REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Simulation d'une alimentation par pile de combustible « fuel celle » d'un véhicule électrique

Présentés par :

ZERROUKI Yasser

MOUSSAOUI Tarek

Proposés et Dirigés par :

Dr. SKENDER Mohamed

Promotion 2022

Remerciements

Avant tout Nous remercions Dieu Le tout puissant de nous avoir donne le courage.la volonté, la patience et la santé durant tous ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je tiens à remercier Dr. SKANDER Mohamed pour avoir encadrer ce travail de mémoire, je le remercie pour le temps et les conseils qu'il n'a pas comptés, pour l'enthousiasme insatiable dont il fait preuve pour la recherche

Mes remerciements les plus distingués vont également à tous ceux et toutes celles qui m'ont apporté l'aide de près et de loin.

Ma reconnaissance va également à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Que monsieur le président et les membres des jury trouvent ici l'experession de ma gratitude et de mon respect pour nous avoir faite honneur d'examiner ce modeste travail.

Nous tenons aussi a remercier toutes les personnes qui nous ont encouragés pour aller au bout de notre travail, en particulier nos familles avec leur soutien indéfectible.

Dédicaces

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes frères Abdou, Amine, Sidali et ma sœur Asma

pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères Tarek, Mohamed, Youcef et Hamza pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fuit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.

ZERROUKI Yasser

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, qui n'ont jamais cessé de m'encourager et me soutenir.

Mes frères : Raouf et Aymen.

Ma chère sœur : Ihcen.

Mon binôme : Yasser.

Mes amis : Mohamed, Chamsou, Hamzitch, Islam et Malek.

Tous les membres de ma famille.

MOUSSAOUI Tarek

ملخص:

عد لمحة تاريخية موجزة، يتم استدعاء مبدأ خلايا الوقود أولاً من خلال تسليط الضوء على مشاكل التحليل الكهربائي الأساسي التي تنشأ عندما يريد المرء تحسين تشغيلها (كفاءة الطاقة، كثافة التيار وكثافة الطاقة، إلخ). ثم يتم عرض الأنواع المختلفة من خلايا الوقود، مع إبراز مزاياها وعيوبها، وتطبيقها المحتمل، لا سيما في السيارة الكهربائية. يتم تناول مشكلة تخزين وقود الهيدروجين أيضًا. للإنهاء، تناقش هذه المقالة بالتفصيل نوعي البطاريات الأكثر ملاءمة لتجهيز سيارة كهربائية، أي بطارية **H_2** / الهواء بغشاء تبادل البروتون، والاحتراق المباشر الميثانول / خلية الهواء.

الكلمات المفتاحية

خلية وقود ، السيارة الكهربائية ، المحولات الثابتة : العاكس (DC/AC) ، القاطع المتناوب (DC/DC)

Résumé :

Apres un bref aperçu historique, le principe des piles à combustible est tous d'abord rappelé en mettant sur les problèmes des électroanalyses fondamental qui se posent lorsqu'on veut améliorer leur fonctionnement (rendement énergétique, densité de courant et densité de puissance, …). Les différents types de pile à combustible sont ensuite présentes, en soulignant leur avantage et inconvénients, et leur application possible, notamment au véhicule électrique.

Le problème du stockage du combustible hydrogène est également aborde pour termine, cet article discuter en détails les deux types de piles les plus aptes à équiper un véhicule électrique, c'est-à-dire la pile H_2/air à membrane échangeuse de protons, et la pile méthanol/air à combustion directe.

Les mots clés : véhicule électrique, piles à combustible, les convertisseurs statiques : onduleur (DC/AC), hacheur (DC/DC).

Abstract :

After a brief historical overview, the principle of fuel cells is first recalled by highlighting the problems of fundamental electroanalysis that arise when one wants to improve their operation (energy efficiency, current density and power density, etc.) . The different types of fuel cell are then presented, highlighting their advantages and disadvantages, and their possible application, in particular to the electric vehicle.

The problem of hydrogen fuel storage is also addressed. To finish, this article discusses in detail the two types of batteries most suitable for equipping an electric vehicle, that is to say the H_2/air battery with a proton exchange membrane, and the direct combustion methanol/air cell.

Keywords: electric vehicle, fuel cell, static converters: inverter (DC/AC), chopper (DC/DC) .

Table des matières

Introduction générale :……..……..1

Chapitre I : **Généralités sur les piles à Combustible**

I.1 Introduction : 2

I.2. Historique : 2

I.3. Principe de fonctionnement : 5

I.4. Différents types des piles : 6

I.4.1. La pile alcaline (AFC) :..... 7

I.4.2. Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC) : 8

I.4.3. La pile à acide phosphorique (PAFC) : 9

I.4.4. La pile à méthanol direct (DMFC) : 10

I.4.5. La pile à oxyde solide (SOFC) : 10

I.4.6 La pile à carbonates fondus (MCFC) : 11

I.5. Constitution d'une pile à combustible PEMFC : 12

I.5.1. Membranes polymères ioniques : 13

I.5.2. Les électrodes : 14

I.5.3 Catalyseur : 14

I.5.3.1 Les catalyseurs du coté anode :..... 14

I.5.3.2 Les catalyseurs du côté cathode : 15

I.5.4. Les plaques bipolaires : 15

I.6. Caractéristique électrique : 17

I.6.1. Tension de Nernst : 17

I.6.2. Polarisation d'activation : 18

I.6.3. Polarisation ohmique : 18

I.6.4. Polarisation de concentration : 18

I.7. Les applications des piles à combustible : 18

I.7.1. Automobile : 19

I.7.2. Stationnaires : 19

I.7.3. Maritimes : 20

I.7.4. Portables : 20

I.8. Architecture du système à pile à combustible : 20

I.8.1. Configuration système : 21

I.8.1.1. Gestion de l'air : 21

I.8.1.2. Gestion de l'eau : 22

I.8.1.3. Gestion thermique : 22

I.8.2. Interfaces externes : 22

Table des matières

I.8.2.1. Circuit d'air : 22
I.8.2.2. Circuit d'humidification : 23
I.8.2.3. Circuit de refroidissement : 23
I.8.2.4. Circuit électrique : 23
I.9. Les avantages et les inconvénients des piles à combustibles : 23
I.9.1. Les avantages : 23
I.9.2. Les inconvénients : 24
I.10. Conclusion : 24
Chapitre II: Étude bibliographie sur les véhicules électriques
II.1. Introduction : 26
II.2. Historique : 26
II.3. Architecture du véhicule électrique VE : 28
II.3.1. Les moteurs roues : 29
II.4. Source d'énergie d'un véhicule électrique : 31
II.5. L'architecture d'un véhicule à pile à combustible : 32
II.6. Le véhicule hybride : 33
II.6.1. Historique des véhicules hybrides: 33
II.6.2. Définition et classifications des véhicules hybrides : 34
II.6.2.1 Hybride *« micro » :* 36
II.6.2.2 Hybride *« full » :* 36
II.6.3. Architecture des véhicules hybrides : 37
II.6.3.1. Hybride Série : 37
II.6.3.2 Hybride Parallèle : 38
II.6.3.3 Hybride Série/Parallèle : 39
II.6.3.4 Hybride complexe : 40
II.7. Configuration des véhicules électriques hybrides à pile à combustible : 41
II.7.1. Structure directe : 42
II.7.2 Structure à un convertisseur : 43
II.7.3 Structure à deux convertisseurs : 44
II.7. Conclusion : 45
Chapitre III*:*Contrôle des systèmes de production Décentralisée de piles à combustible PEM
III.1. Introduction : 46
III.2. Description du système : 47
III.3. Modéles dynamiques pour PEMFC et dispositifes électroniques d'alimentation : 51

Table des matières

III.3.1. Modèle dynamique pour la centrale PEMFC : 51
III.3.2. Modèle d'espace d'état du convertisseur Boost dc/dc : 52
III.3.3. Modèle d'espace d'état de l'onduleur triphasé : 53
III.4.Conception des contrôleurs pour les dispositifs électroniques d'alimentation : 54
III.4.1. Conception du contrôleur pour le convertisseur Boost dc/dc : 55
III.4.2. Conception du contrôleur pour la VSI triphasée : 55
III.4.3. Interprétation des graphes : 67
III.5. Conclusion : 68
Conclusion générale: ……..…….69

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralités sur les piles à Combustible

Figure I. 1: Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique. 5
Figure I. 2 : Principe de fonctionnement d'une cellule à pile à combustible H_2/O_2. 6
Figure I. 3 : Stack' d'une pile à combustible de type PEMFC 13
Figure I. 4 : empilement des cellules PEMFC [Electro Encyclo] 13
Figure I. 5 : Structure chimique d'une membrane de type Nafion. 14
Figure I. 6 : Plaque bipolaire 16
Figure I. 7 : Caractéristiques courant - tension d'une pile à combustible 17
Figure I. 8 : Véhicule Honda équipe d'une pile à combustible et d'un système reformeur d'essence 19
Figure I. 9 : Un système complet de 250 kW électrique Ballard 19
Figure I. 10 : Un système à pile à combustible utilisé pour un téléphone portable 20
Figure I. 11 : Schéma fonctionnel d'un groupe électrogène à pile à combustible 20

Chapitre II : Étude bibliographie sur les véhicules électriques

Figure II- 1 Exemples des voitures électriques du début du 20ème siècle. 27
Figure II- 2 Caractéristiques force – vitesse du véhicule thermique à 5 rapports et du véhicule électrique à rapport fixe. 28
Figure II- 3 Chaîne de traction électrique. 29
Figure II- 4 Exemples de roue englobant un moteur-roue : a) Roue active de MICHELIN ; b) Roue motrice nouvelle. 30
Figure II- 5 L'autonomie de différents types de voitures avec 100 MJ d'énergie provenant du vent. 31
Figure II- 6 Schéma général d'un véhicule à pile à combustible - Source Renault – PSA, 1998 32
Figure II- 7 L'arrangement des composants sur le véhicule Honda FCX (document Honda, 2005). 33
Figure II- 8 Classification des différents types de chaînes de traction. 35
Figure II- 9 La puissance de la charge décomposée en deux composantes : moyenne et dynamique. 37
Figure II- 10 Chaîne de traction hybride série. 38
Figure II- 11 Chaîne de traction hybride parallèle 39
Figure II- 12 Chaîne de traction hybride série/parallèle. 39
Figure II- 13 Chaîne de traction hybride complexe. 40
Figure II- 14 véhicule hybride complexe. 41
Figure II- 15 Structure PàC / SC directe. 42
Figure II- 16 Structure parallèle PàC /SCs à un convertisseur. 43
Figure II- 17 Structure PàC /SCs à deux convertisseurs. 44

Chapitre III : Contrôle des systèmes de production Décentralisée de piles à combustible PEM

Figure III- 1 Schéma fonctionnel d'un système de production décentralisée de piles à combustible 48
Figure III- 2 Caractéristique PEMFC V –I : Comparaison de la réponse du modèle avec les données ex péri mentales 49
Figure III- 3 PEMFC réponse dynamique dans un court laps de temps : comparaison de la réponse du modèle avec des données expérimentales 52
Figure III- 4 Convertisseur Boost dc/dc. 52
Figure III- 5 Onduleur de source de tension DC/AC triphasé. 53
Figure III- 6 Flux d'alimentation entre une source de tension et un réseau électrique. 55
Figure III- 7 Schéma fonctionnel du système de commande global de l'onduleur. 57
Figure III- 8 Schéma fonctionnel de la boucle de commande de courant de l'onduleur. 58

LISTE DES FIGURES

Figure III- 9 Schéma fonctionnel de la boucle de contrôle de la tension de l'onduleur. 58
Figure III- 10 Architecture électrique du véhicule avec un convertisseur CC/CC pour chaque source d'énergie. 58
Figure III- 11 Graphiques des profils de conduite US6, HWFET, UDDS et NEDC 59
Figure III- 12 schéma de simulation d'un véhicule électrique à pile à combustible. 59
Figure III- 13 graphe représente la vitesse du véhicule en fonction du temps. 60
Figure III- 14 Système d'environnement. 61
Figure III- 15 Système d'environnement longitudinal. 61
Figure III- 16 blocs de boucle ouverte. 62
Figure III- 17 Le sous-système de contrôleur. 63
Figure III- 18 le sous-système de voiture électrique. 64
Figure III- 19 blocs d'un véhicule à traction. 64
Figure III- 20 Trace de vitesse, trajectoire actuelle, (mph). 65
Figure III- 21 vitesse : Eng, Mot, Gen (RPM). 66
Figure III- 22 puissance de traction : Eng,Mot,Gen (Nm). 66
Figure III- 23 courant de la batterie (A). 66
Figure III- 24 SOC de la batterie (A). 67
Figure III- 25 puissance Economique (W). 67

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Généralités sur les piles à Combustible

Tableau I. 1 : Description des six grandes catégories des piles à combustible.....**Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre II: Étude bibliographie sur les véhicules électriques

Tableau II .1 : comparaison entre la configuration série, parallèle et série /parallèle (source Toyota)..... 40

Chapitre III:*Contrôle des systèmes de production Décentralisée de piles à combustible PEM*

Tableau III. 1 : paramètres de configuration du système proposé..... 48

Tableau III. 2 : . paramètres du convertisseur boost dc/dc 54

INTRODUCTION GENERALE

Les enjeux énergétiques et environnementaux font aujourd'hui partie des préoccupations majeures au niveau international. L'accroissement de la population mondiale ainsi que l'activité industrielle des pays développés et des puissances économiques émergentes ont entraîné une explosion des besoins en énergie. L'utilisation des ressources fossiles pour satisfaire cette « boulimie » énergétique est responsable de la majeure partie des rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ; cette pollution est à l'origine du réchauffement de la planète et des bouleversements climatiques qui en découlent. Outre les problèmes liés à l'environnement, les réserves d'énergies fossiles sont limitées et ne pourront satisfaire à moyen terme la demande mondiale.

A cet effet, l'hydrogène est une source énergétique idéal pour remplacer à long terme les énergies fossiles, d'autant qu'il est l'élément le plus abondant de notre univers et qu'il est non toxique car sa combustion ne rejette que de l'eau. La pile à combustible est l'élément électrochimique qui permet de convertir l'énergie de l'hydrogène (H2) en électricité, en utilisant un procédé électrochimique contrôlé (au lieu d'une réaction thermique de combustion, dont le travail mécanique engendré est ensuite converti en électricité).

Les piles à combustible sont présentées comme l'énergie de demain, en parallèle avec l'hydrogène. Pourtant, elles ne sont pas une technologie nouvelle, puisque leur principe de fonctionnement a été découvert en 1839…

Parmi l'ensemble des secteurs incriminés dans les problèmes d'environnement, l'automobile est régulièrement citée notamment que le nombre de véhicules en circulation ne cesse d'augmenter et était de plus de 850 millions d'unité dans le monde en 2005. Les véhicules électriques a pile a combustible présentent une solution prometteuse dans ce domaine avec la propulsion dite « zéro émission » qui est envisageable avec eux. Outre le rendement des véhicules électriques est très élevé par rapport a celle des véhicules thermiques sans oublier de citer le silence aboutit avec eux surtout dans les zones urbaines.

Les objectifs de ce travail sont de modéliser une chaîne de traction de véhicule à pile à combustible pour des applications dans le domaine des transports. A cet effet nous avons décomposé notre travail en quatre chapitres.

Chapitre I

Généralités sur les piles à Combustible

I.1 Introduction :

Une pile à combustible est un générateur qui convertit directement l'énergie interne d'un combustible en énergie électrique, en utilisant un procédé électrochimique contrôlé (au lieu d'une réaction thermique de combustion, dont le travail mécanique engendré est ensuite converti en électricité). Les rendements théoriques attendus sont très élevés, et les sous-produits très peu polluants. Ces arguments, généralement admis par l'ensemble de la communauté scientifique, en font une alternative très probable au moteur thermique (essence, diesel), pour la plupart de ses applications. Elle met en jeu, sans les mélanger un combustible (hydrogène, méthanol, monoxydede carbone ...) et un comburant (généralement de l'oxygène pris dans l'air).

I.2. Historique :

C'est un peu avant 1840 que William GROVE décrit la première pile à combustible. Elle fonctionne à l'hydrogène et à l'oxygène, à basse température, avec des électrodes de platine et de l'acide sulfurique comme électrolyte Cependant, la principale matière première énergétique étant, au siècle dernier, le charbon, celui-ci sera rapidement utilisée comme combustible pour la mise au point des piles. Dès 1855 de nouveaux concepts, à haute température, utilisant des électrolytes fondus, sont mis au point. Les résultats sont modestes et en 1939, le bilan du premier siècle de recherche est plutôt pessimiste, malgré les potentialités indéniables de la filière hydrogène

Après 1945, trois groupes de recherche (aux Etats Unis, en Allemagne et en URSS) reprennent les études sur les principaux types de générateur, en apportant les améliorations technologiques nécessaires à un développement " industriel ". Ces travaux ont débouché sur les concepts actuels, notamment chez Siemens et Pratt and Wittney (aujourd'hui dans le même groupe que International Fuel Cell).

Les premières applications des piles à combustible sont les programmes spatiaux. Ce fut d'abord la NASA qui les utilisa pour ses engins spatiaux dans les années 60 : les piles servaient de générateur pour les véhicules spatiaux habités Gemini en 1963 (piles de type PEMFC de General Electrices) et Apollo en 1968 (piles AFC de Pratt et Whitney). Ayant prouvé leur efficacité, L'un des moments clefs du développement des recherches sur les piles à combustible est le premier choc pétrolier de 1973. Pour la première fois apparaît la nécessité d'être indépendant sur le plan énergétique. Ceci accélère les recherches tant aux Etats-Unis qu'en Europe et au Japon. Les recherches menées pendant cette période seront essentiellement fondamentales et viseront à développer et améliorer les différents composants de la pile. En 1970, il a été met au point la membrane Nation, qui sert d'électrolyte aux piles de type PEMFC.

Les choix des années 80, malgré quelques réussites, les piles restent à cette époque coûteuse, de

faible durée de vie, avec un volume et un poids trop important pour être insérées dans un véhicule. Pour ces raisons, les travaux ralentissent ; en France : seule une veille technologique ainsi que des travaux universitaires sont maintenus. En revanche, les Etats Unis, le Japon et l'Allemagne ont poursuivi leurs recherches. Les PEMFC ont connu un développement accentué après 1987 avec la création de la firme canadienne Ballard.

C'est réellement au début des années 1990 que les piles connaissent un regain d'intérêt. Cela est dû à plusieurs facteurs déterminants. L'aggravation des problèmes environnementaux liés à l'effet de serre, les progrès technologiques et les premiers prototypes (véhicules, installations stationnaires) sont développés. Les PEMFC qui peuvent être utilisées dans des applications stationnaires, portables et mobiles bénéficient ainsi d'une certaine synergie.

En Amérique du Nord, dans le secteur de l'automobile, des associations d'entreprises sont créées (U.S. Fuel Cell Council, California Fuel Cell Partnership). Les piles bénéficient aussi de subventions par les pouvoirs publics, de programmes pour les développements d'énergies propres : le programme PNGV (Partnership for a new Génération Véhicule) regroupant entre autres Daimler Chrysler et Ford vise à mettre au point des véhicules à faible consommation et un véhicule à pile alimenté à l'hydrogène. Du côté des applications stationnaires, des installations de forte puissance (plusieurs MW) sont mises en place pour la production décentralisée mais aussi pour la cogénération.

Au Japon, Soutenu par le MITI (Ministry for International Trade and Industry) et par l'AIST (Agency of Industrial Science and Technology), les programmes ont commencé en 1981 avec le programme Moonlight, suivi dès 1992 du programme New Sunshine. Beaucoup d'installations stationnaires sont implantées au Japon, tant pour la cogénération que pour la production centralisée d'électricité : c'est au Japon que se trouve la plus grosse installation (11 MW). Le secteur automobile est présent, Toyota ayant lancé fin 2002 un programme pour vendre des véhicules aux universités, et aussi aux ministères.

L'an énergétique. Ceci accélère les recherches tant aux Etats-Unis qu'en Europe et au Japon. Les recherches menées pendant cette période seront essentiellement fondamentales et viseront à développer et améliorer les différents composants de la pile. En 1970, il a été mis au point la membrane Nation, qui sert d'électrolyte aux piles de type PEMFC.

Les choix des années 80, malgré quelques réussites, les piles restent à cette époque coûteuse, de faible durée de vie, avec un volume et un poids trop important pour être insérées dans

Un véhicule. Pour ces raisons, les travaux ralentissent ; en France : seule une veille technologique ainsi que des travaux universitaires sont maintenus. En revanche, les Etats Unis, le Japon et l'Allemagne

I.1 Introduction :

Une pile à combustible est un générateur qui convertit directement l'énergie interne d'un combustible en énergie électrique, en utilisant un procédé électrochimique contrôlé (au lieu d'une réaction thermique de combustion, dont le travail mécanique engendré est ensuite converti en électricité). Les rendements théoriques attendus sont très élevés, et les sous-produits très peu polluants. Ces arguments, généralement admis par l'ensemble de la communauté scientifique, en font une alternative très probable au moteur thermique (essence, diesel), pour la plupart de ses applications. Elle met en jeu, sans les mélanger un combustible (hydrogène, méthanol, monoxydede carbone ...) et un comburant (généralement de l'oxygène pris dans l'air).

I.2. Historique :

C'est un peu avant 1840 que William GROVE décrit la première pile à combustible. Elle fonctionne à l'hydrogène et à l'oxygène, à basse température, avec des électrodes de platine et de l'acide sulfurique comme électrolyte Cependant, la principale matière première énergétique étant, au siècle dernier, le charbon, celui-ci sera rapidement utilisée comme combustible pour la mise au point des piles. Dès 1855 de nouveaux concepts, à haute température, utilisant des électrolytes fondus, sont mis au point. Les résultats sont modestes et en 1939, le bilan du premier siècle de recherche est plutôt pessimiste, malgré les potentialités indéniables de la filière hydrogène

Après 1945, trois groupes de recherche (aux Etats Unis, en Allemagne et en URSS) reprennent les études sur les principaux types de générateur, en apportant les améliorations technologiques nécessaires à un développement " industriel ". Ces travaux ont débouché sur les concepts actuels, notamment chez Siemens et Pratt and Wittney (aujourd'hui dans le même groupe que International Fuel Cell).

Les premières applications des piles à combustible sont les programmes spatiaux. Ce fut d'abord la NASA qui les utilisa pour ses engins spatiaux dans les années 60 : les piles servaient de générateur pour les véhicules spatiaux habités Gemini en 1963 (piles de type PEMFC de General Electrices) et Apollo en 1968 (piles AFC de Pratt et Whitney). Ayant prouvé leur efficacité, L'un des moments clefs du développement des recherches sur les piles à combustible est le premier choc pétrolier de 1973. Pour la première fois apparaît la nécessité d'être indépendant sur le plan énergétique. Ceci accélère les recherches tant aux Etats-Unis qu'en Europe et au Japon. Les recherches menées pendant cette période seront essentiellement fondamentales et viseront à développer et améliorer les différents composants de la pile. En 1970, il a été met au point la membrane Nation, qui sert d'électrolyte aux piles de type PEMFC.

Les choix des années 80, malgré quelques réussites, les piles restent à cette époque coûteuse, de

faible durée de vie, avec un volume et un poids trop important pour être insérées dans un véhicule. Pour ces raisons, les travaux ralentissent ; en France : seule une veille technologique ainsi que des travaux universitaires sont maintenus. En revanche, les Etats Unis, le Japon et l'Allemagne ont poursuivi leurs recherches. Les PEMFC ont connu un développement accentué après 1987 avec la création de la firme canadienne Ballard.

C'est réellement au début des années 1990 que les piles connaissent un regain d'intérêt. Cela est dû à plusieurs facteurs déterminants. L'aggravation des problèmes environnementaux liés à l'effet de serre, les progrès technologiques et les premiers prototypes (véhicules, installations stationnaires) sont développés. Les PEMFC qui peuvent être utilisées dans des applications stationnaires, portables et mobiles bénéficient ainsi d'une certaine synergie.

En Amérique du Nord, dans le secteur de l'automobile, des associations d'entreprises sont créées (U.S. Fuel Cell Council, California Fuel Cell Partnership). Les piles bénéficient aussi de subventions par les pouvoirs publics, de programmes pour les développements d'énergies propres : le programme PNGV (Partnership for a new Génération Véhicule) regroupant entre autres Daimler Chrysler et Ford vise à mettre au point des véhicules à faible consommation et un véhicule à pile alimenté à l'hydrogène. Du côté des applications stationnaires, des installations de forte puissance (plusieurs MW) sont mises en place pour la production décentralisée mais aussi pour la cogénération.

Au Japon, Soutenu par le MITI (Ministry for International Trade and Industry) et par l'AIST (Agency of Industrial Science and Technology), les programmes ont commencé en 1981 avec le programme Moonlight, suivi dès 1992 du programme New Sunshine. Beaucoup d'installations stationnaires sont implantées au Japon, tant pour la cogénération que pour la production centralisée d'électricité : c'est au Japon que se trouve la plus grosse installation (11 MW). Le secteur automobile est présent, Toyota ayant lancé fin 2002 un programme pour vendre des véhicules aux universités, et aussi aux ministères.

L'an énergétique. Ceci accélère les recherches tant aux Etats-Unis qu'en Europe et au Japon. Les recherches menées pendant cette période seront essentiellement fondamentales et viseront à développer et améliorer les différents composants de la pile. En 1970, il a été mis au point la membrane Nation, qui sert d'électrolyte aux piles de type PEMFC.

Les choix des années 80, malgré quelques réussites, les piles restent à cette époque coûteuse, de faible durée de vie, avec un volume et un poids trop important pour être insérées dans

Un véhicule. Pour ces raisons, les travaux ralentissent ; en France : seule une veille technologique ainsi que des travaux universitaires sont maintenus. En revanche, les Etats Unis, le Japon et l'Allemagne

ont poursuivi leurs recherches. Les PEMFC ont connu un développement accentué après 1987 avec la création de la firme canadienne Ballard.

C'est réellement au début des années 1990 que les piles connaissent un regain d'intérêt. Cela est dû à plusieurs facteurs déterminants. L'aggravation des problèmes environnementaux liés à l'effet de serre, les progrès technologiques et les premiers prototypes (véhicules, installations stationnaires) sont développés. Les PEMFC qui peuvent être utilisées dans des applications stationnaires, portables et mobiles bénéficient ainsi d'une certaine synergie.

En Amérique du Nord, dans le secteur de l'automobile, des associations d'entreprises sont créées (U.S. Fuel Cell Council, California Fuel Cell Partnership). Les piles bénéficient aussi de subventions par les pouvoirs publics, de programmes pour les développements d'énergies propres : le programme PNGV (Partnership for a new Génération Véhicule) regroupant entre autres Daimler Chrysler et Ford vise à mettre au point des véhicules à faible consommation et un véhicule à pile alimenté à l'hydrogène. Du côté des applications stationnaires, des installations de forte puissance (plusieurs MW) sont mises en place pour la production décentralisée mais aussi pour la cogénération.

Au Japon, Soutenu par le MITI (Ministry for International Trade and Industry) et par l'AIST (Agency of Industrial Science and Technology), les programmes ont commencé en 1981 avec le programme Moonlight, suivi dès 1992 du programme New Sunshine. Beaucoup d'installations stationnaires sont implantées au Japon, tant pour la cogénération que pour la production centralisée d'électricité : c'est au Japon que se trouve la plus grosse installation (11 MW). Le secteur automobile est présent, Toyota ayant lancé fin 2002 un programme pour vendre des véhicules aux universités, et aussi aux ministères.

En Europe, le programme Eureka est lancé en 1991 : il vise à construire un bus basé sur une pile AFC et fonctionnant à l'hydrogène. En 1994, les premières installations stationnaires de cogénération sont mises en place en Allemagne. Parallèlement, Daimler construit son premier véhicule avec pile embarquée la NECAR. L'Europe se lance alors plus concrètement dans la technologie des piles avec les programmes JOULE, THERMIE et BRITE-EURAM dans le cadre du 4ème plan cadre (1994-1998). Ce sont surtout les piles PEMFC qui profitent de ces subventions, suivies par les SOFC, MCFC et DMFC. Le 5ème plan cadre (1998-2002) poursuit sur cette lancée : 10 nouveaux projets, sont lancés bénéficiant de subventions.

La France participe de plus en plus activement avec la création d'un réseau pile à combustible (Réseau PACO) et l'implication d'entreprises telles qu'EDF, GDF, ALSTOM, PSA, Renault, Air Liquide, Hélion... La première pile française d'Hélion a vu le jour en 2002, suivi par les piles d'Axène (EVOPAC...) et PSA a présenté un nouveau prototype. Plusieurs prototypes de PEMFC sont étudiés

pour des applications stationnaires de petite puissance. [1,2]

I.3. Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est décrit par une relation chimique. Cette réaction chimique est une oxydoréduction électrochimique. Elle fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur, selon la réaction chimique globale suivante :

$$H_2 + \frac{1}{2}\, O_2 \rightarrow H_2O + \text{chaleur} + \text{électricité} \qquad \text{(I.1)}$$

Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) qui seront les conducteurs électroniques, séparées par un électrolyte solide qui sera le conducteur protonique. Plus précisément, les réactions suivantes interviennent aux deux électrodes :

A l'anode : couple H+/H2 (électrolyte acide) :

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \qquad \text{(I.2)}$$

A la cathode : couple O2/H2O

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \qquad \text{(I.3)}$$

Ces réactions d'oxydation de l'hydrogène (à l'anode) et de réduction de l'oxygène (à la cathode) s'effectuent à l'interface électrolyte/électrode en présence d'un catalyseur (platine), en des points appelés « points triples » [3]

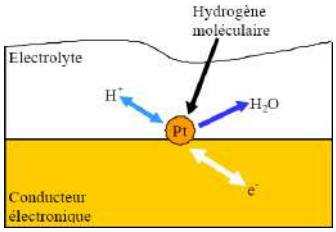


Figure I. 1: Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique.

En ces points, nous trouvons, autour de la particule de catalyseur :

- Une continuité physique avec l'électrolyte pour assurer la conduction des protons H+.
- Une continuité physique avec le conducteur électronique qu'est l'électrode, pour assurer la conduction des électrons e^-.
- Une structure poreuse capable d'assurer la diffusion de l'hydrogène ou de l'oxygène

moléculaire.

- Une structure hydrophobe pour assurer l'élimination de l'eau formée, dans le cas de la cathode.
- Une structure thermiquement conductrice pour assurer l'évacuation de la chaleur de réaction.

Nous pouvons ainsi apprécier la difficulté de réalisation de cette interface qui représente un point clé de la réalisation de l'ensemble Electrode-Membrane-Electrode, appelé souvent EME… [3] Le principe de fonctionnement de la pile à combustible peut être résumé par le schéma suivant :

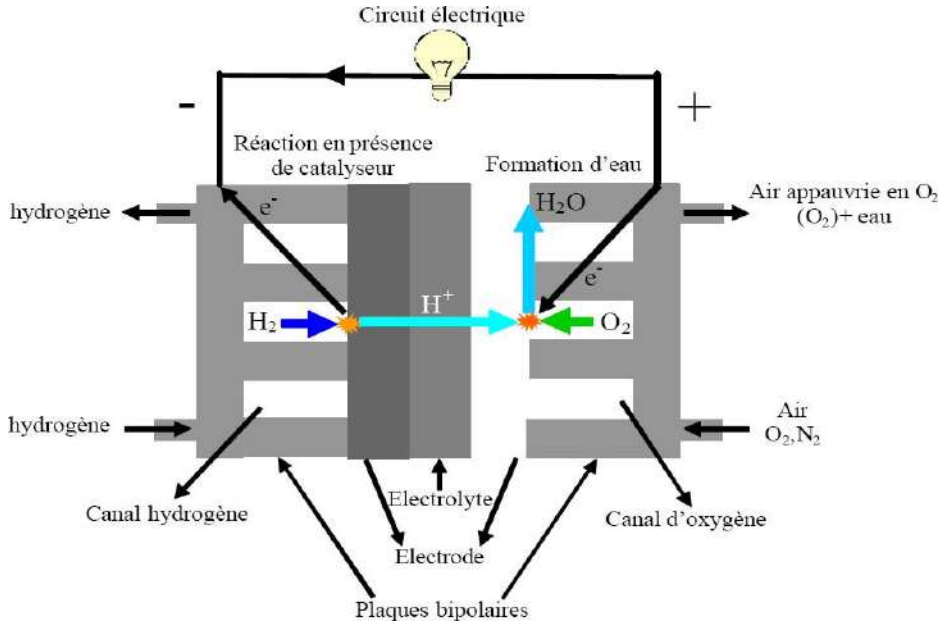


Figure I. 2 : Principe de fonctionnement d'une cellule à pile à combustible H_2/O_2.

I.4. Différents types des piles :

Notre étude portant sur l'application de la pile à combustible dans un véhicule électrique. Le niveau de température ainsi que la gamme de puissance ont justifié le choix de type de pile PEMFC dans cette application.

Les piles à combustible sont généralement six types classifiés selon la nature d'électrolyte utilisé, et leur température de fonctionnement, on distingue alors les piles à basse température (<200°C) et les piles à haute température (650-1000C°). Ces types sont :

- Les piles alcalines (AFC Akaline Fuel Cell).
- Les piles à membranes polymères échangeuses de protons (PEMFC Proton Exchang Membranes Fuel Cell).
- Les piles au Méthanol direct (DMFC Direct Méthanol Fuel Cell).
- Les piles à acide phosphorique (PAFC Phosphorique Acid Fuel Cell).
- Les piles à carbonates fondus (MCFC Molten Carbonate Fuel Cell).
- Les piles à oxydes solides (SOFC Solid Oxide Fuel Cell).

Le Tableau (1.1) décrit les six grandes catégories, leurs caractéristiques techniques et leurs applications. [1,2, 4].

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nom	Alkalin Fuel Cell	Polymer Exchang Membran Fuel Cell	Direct Methanol Fuel cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxyd Fuel Cell
Electrolyte	Solution KOH	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique	Li_2CO_3 et KCO_3 fondu dans une matrice $LiAlO_2$	ZrO_2 et Y_2O_3
Ions dans l'électrolyte	OH^-	H^+	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Niveau de température	60-80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Combustible	H_2	H_2 (pur ou rformé)	Méthanol	H_2 (pur ou reformé)	H_2 (pur ou reformé)	H_2 (pur ou reformé)
Oxydants	O_2 (pur)	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'application	Spatial	Automobiles, Portable, Cogénération, Maritime	Portable	Cogénération	Cogénération Production centralisée d'électricité, Maritime	Cogénération Production centralisée d'électricité Automobile (APU),Maritime
Niveau de développement	Utilisée	Utilisé	Prototypes	Technologie mûre	Prototypes	Prototypes

Tableau I.1 : Description des six grandes catégories des piles à combustible

I.4.1. La pile alcaline (AFC) :

Les piles AFC ont l'avantage d'avoir le meilleur rendement de toutes les piles à combustible, mais elles travaillent correctement seulement en utilisant des gaz très purs ce qui est considéré comme un inconvénient majeur pour de nombreuses applications.

Utilisée depuis le début des années 1940, cette pile se retrouve également à bord des vaisseaux spatiaux habités de la NASA depuis les trentes dernières années. Fonctionnant à des températures variant de 120 à 150°C, les réactions mises en jeu sont les suivantes

A l'anode, avec un catalyseur au nickel ou au platine-palladium, on a la réaction:

$$2H_2 + 4\,HO^- \rightarrow 4\,H_2O + 4\,e^- \quad \text{(I.4)}$$

Et à la cathode, avec un catalyseur à l'oxyde de nickel, à argent ou au platine-or, on a la réaction :

$$O_2 + 4e^- + 2H_2O \rightarrow 4HO^- \quad \text{(I.5)}$$

Dans ce cas, l'électrolyte utilisé est une solution de KOH (généralement en concentration de 30 à 40%), qui est un électrolyte conducteur d'hydroxyde (OH-). Comparé aux piles à électrolyte acide, cet électrolyte a l'avantage, d'accélérer la réduction de l'oxygène, ce qui en fait un système intéressant pour certaines applications spécifiques. L'électrolyte peut réagir avec le dioxyde de carbone pour former un composé de carbonate, ce qui réduit énormément le rendement de la pile à combustible. En effet, le CO2 contenu dans l'air réagit avec l'électrolyte dans la réaction suivante

$$CO_2 + 2OH^- \rightarrow (CO_3)^{2-} \quad \text{(I.6)}$$

Les catalyseurs sont habituellement une combinaison de nickel et d'un métal inactif, comme l'aluminium, permettant ainsi de réduire le coût global du système. Le magnésium métallique ou des composés de graphite sont utilisés pour les plaques bipolaires qui sont les connecteurs permettant de construire un assemblage (ou stack) en reliant plusieurs piles en série. [1,2]

I.4.2. Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC) :

Ce type de pile a été mis au point pour les missions spatiales Gemini de la NASA dans les années 1960, mais fût ensuite vite remplacé par des AFC, faute de rendement suffisant. Cette technologie a connu des progrès énormes dans les années 1980, notamment avec l'arrivée de nouvelles membranes de types Nation (fabriquées par la société Dupont de Nemours), permettant d'envisager le recours à la technologie des piles à combustible pour la généralisation des applications. La PEMFC fonctionne à une température d'environ 80°C, de façon à maintenir l'eau A l'état liquide dans la membrane. Les réactions suivantes se produisent :

A l'anode, on a :

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ 4e^- \quad \text{(I.7)}$$

Et à la cathode, on a :

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \quad \text{(I.8)}$$

L'électrolyte est une membrane polymérique mince qui permet le passage des protons (H+). Un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes. Le monoxyde de carbone peut être absorbé sur ce catalyseur s'il n'est pas éliminé pendant le procédé de purification, d'où une diminution de l'efficacité de la pile à combustible. De nombreux centres de recherche sont à la recherche des catalyseurs plus

robustes et moins chers, et des électrolytes polymériques échangeur d'ions plus efficaces et également moins coûteux.

Les plaques bipolaires peuvent être faites à partir des feuilles de graphite, de composites ou de métaux à base de carbone. [1,2]

I.4.3. La pile à acide phosphorique (PAFC) :

La pile à combustible à acide phosphorique est le système le plus avancé dans le développement et la commercialisation. Elle est principalement utilisée pour des applications stationnaires, en tant que générateur électrique. Des centrales électriques de type PAFC ont été installées dans différents endroits dans le monde pour fournir de l'électricité, du chauffage et de l'eau chaude à certains villages, usines ou hôpitaux.

Les avantages des PAFC sont sa facilité de fabrication, sa stabilité thermique et chimique et la faible volatilité de l'électrolyte aux températures de fonctionnement (entre 150 et 220°C). Ces facteurs ont facilité le développement commercial de ce type de système. Les réactions qui se produisent dans une PAFC sont les mêmes que dans le cas de la PEMFC, avec des températures de fonctionnement variant de 180 à 220°C, on a donc :

A l'anode :

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \quad \text{(I.9)}$$

Et à la cathode :

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \quad \text{(I.10)}$$

Les composants de ces deux dernières piles à combustible (PAFC et PEMFC) sont très semblables, sauf pour ce qui est de l'électrolyte. Dans le cas de la PAFC, l'électrolyte est de l'acide phosphorique (aussi un électrolyte conducteur de protons), un liquide, alors qu'il s'agit d'un polymère solide dans le cas de la PEMFC. Au début du développement des PAFC, on a utilisé l'acide phosphorique en solution afin de limiter la corrosion de certains constituants de la pile. Mais avec les progrès faits dans les matériaux utilisés pour la construction des piles.

La concentration en acide est maintenant de 100%. L'acide est généralement stabilisé dans une matrice à base de SiC. La forte concentration en acide augmente la conductivité de l'électrolyte et réduit la corrosion du support des électrodes en carbone.

Comme dans le cas des PEMFC, cette pile utilise des électrodes de carbone, avec un catalyseur à base de platine, qui permettent la diffusion des gaz. Les plaques bipolaires sont deux plaques poreuses séparées par une mince feuille de graphite pour former un substrat côtelé dans lequel l'électrolyte peut

être stocké. On procède actuellement à l'essai d'autres catalyseurs pour ce type de piles à combustible : fer-cobalt, titane, chrome, zirconium. [1,2]

I.4.4. La pile à méthanol direct (DMFC) :

Il ne faut pas confondre cette pile avec les piles qui utilisent du méthanol (ou éthanol) comme source d'hydrogène par le reformage externe (la pile à méthanol indirect). La DMFC est une PEMFC utilisant du méthanol comme carburant, le méthanol est alors directement en contact avec l'anode, à laquelle les réactions suivantes se produisent (à des températures de fonctionnement ne dépassant jamais 100°C) :

A l'anode on a :

$$CH_3OH + H_2O \rightarrow 6H^+ + 6e^- + CO_2 \qquad (I.11)$$

Et à la cathode on a :

$$O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 6H_2 \qquad (I.12)$$

Il est important de noter que dans une DMFC, ce sont les protons qui se déplacent de l'anode à la cathode et non les molécules de méthanol. Tout comme c'est le cas chez la PEMFC, cette pile à combustible utilise un électrolyte polymérique échangeur d'ions, cependant ces membranes ne sont pas avantageuses pour bloquer le passage du méthanol. Le mouvement des protons dans la membrane est associé à la teneur en eau de la membrane. Le méthanol et l'eau ayant des propriétés comparables (moment dipolaire), les molécules de méthanol sont aussi bien transportés vers la cathode que les molécules d'eau par un processus de drag osmotique. A la cathode, le méthanol cause un mélange de potentiels dus à l'interférence entre les réactions d'oxydation du méthanol et de réduction de l'oxygène. Cela a pour effet une baisse des performances de la pile. La traversée du méthanol à travers la membrane dépend de plusieurs facteurs, les plus importants étant la perméabilité (et donc proportionnel à l'épaisseur) de la membrane, la concentration en méthanol, la température de fonctionnement, et les performances de l'anode elle-même. La membrane est un facteur très important dans le problème de la traversée du méthanol ; une membrane fine permet d'avoir une résistance de la pile moins importante, mais elle tend à avoir une plus grande perméabilité au méthanol. Une membrane épaisse est donc avantageuse dans le cas des piles au méthanol.

Comme pour les PEMFC, les plaques bipolaires sont faites de graphite, de métal ou de matériaux composites. Le catalyseur à l'anode est composé d'un mélange de ruthénium et de platine qui empêche l'empoisonnement par le monoxyde de carbone, qui est l'intermédiaire dans la réaction. [1,2].

I.4.5. La pile à oxyde solide (SOFC) :

Le principe de fonctionnement des SOFC est basé sur le mécanisme suivant : l'oxygène est dissocié

à la cathode en O2-, puis l'anion migre à travers l'électrolyte conducteur ionique à haute température et va se combiner à l'anode avec l'hydrogène, ou le monoxyde de carbone, pour former de l'eau et libérer des électrons. Les réactions mises en jeu sont les suivantes :

A l'anode, avec un catalyseur au cermet de zirconium et nickel on a la réaction :

$$2H_2 + 2O^{2-} \rightarrow 2H_2O + 4e^- \qquad (I.13)\ .$$

Où :

$$2CO + 2O^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 4e^- \qquad (I.14\ ).$$

Et à la cathode, dans les deux cas, à l'aide d'un catalyseur au manganite de luthane dopé au strontium, on a la réaction :

$$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-} \qquad (I.15)$$

La caractéristique principale des SOFC réside donc dans leur haute température de fonctionnement (700 à 1 000 °C) nécessaire à l'obtention d'une conductivité ionique suffisante de l'électrolyte céramique. Cette température présente un double avantage. Elle permet d'abord l'utilisation directe d'hydrocarbures, qui pourront être facilement reformés en se passant de catalyseur à base des métaux nobles. Elle produit d'autre part une chaleur élevée facilement exploitable en cogénération, le rendement pouvant atteindre ainsi 80%. Mais elle présente également un inconvénient, la mise en température est longue et complique toute utilisation à cycles courts et répétitifs (comme dans le cas des transports).

Pour ces raisons, la technologie SOFC se prête particulièrement bien à la production d'électricité décentralisée et à la cogénération (domaines couvrant des puissances allant de 1 kW à quelques dizaines de MW). Grâce à son fort rendement et sa capacité potentielle à fonctionner directement avec des hydrocarbures liquides, elle trouvera également un débouché dans la propulsion navale, voire terrestre (trains, camion…). La mise au point de ce type de pile implique, de part cette haute température de fonctionnement, la résolution des problèmes thermomécaniques de tenue des matériaux assez complexes, ainsi que d'assemblage et d'étanchéité.

Une des particularités de la SOFC est son électrolyte solide, habituellement du Zirconium (Zr2) dopé d'une mole de 8 à 10% d'ytterbium (Y3+), lequel joue le rôle de conducteur pour l'anion oxygène (O2-). Les SOFC peuvent être de conceptions plane, monolithique et tubulaire, et utiliser de l'acier inoxydable, de l'acier austénitique, des matériaux céramiques selon les températures de fonctionnement et l'électrolyte désiré. [1,2]

I.4.6 La pile à carbonates fondus (MCFC) :

Le développement des piles à combustible à carbonates fondus a débuté dans le milieu du vingtième

siècle. Les avantages et les inconvénients de ce type de pile sont sensiblement les mêmes que dans le cas des SOFC. La température élevée améliore énormément la cinétique de la réaction de réduction de l'oxygène et rend ainsi inutile l'utilisation des métaux nobles comme catalyseurs. Les systèmes à base des piles MCFC peuvent atteindre des rendements supérieurs à 50%, voir supérieurs à 70% lorsqu'ils sont combinés à d'autres générateurs. De plus, les MCFC peuvent utiliser une large gamme de carburant (grâce au reformage interne), et ne sont pas sensibles à la contamination par CO ou CO_2 comme c'est le cas pour les piles à basses températures. Les réactions ayant lieu dans ce type des piles sont les suivantes :

A l'anode, avec un catalyseur fait d'un alliage nickel-chrome / nickel-aluminium, on a la réaction :

$$2H_2 + 2CO_3^{2-} \rightarrow 2H_2O + 2CO_2 + 4e^- \quad \text{(I.16)}$$

Et à la cathode, avec un catalyseur d'oxyde de nickel, on a :

$$O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow 2CO_3^{2-} \quad \text{(I.17)}$$

Ici, du dioxyde de carbone et de l'oxygène sont consommés à la cathode et l'ion de carbonate (CO_3^{2-}) voyage de la cathode à l'anode.

L'électrolyte est fait d'un mélange de carbonates de métaux alcalins (carbonates de lithium, de potassium et de sodium) retenus par une matrice céramique d'oxyde d'aluminium et de lithium (LiAlO2). Les plaques bipolaires sont faites d'acier inoxydable recouvert de nickel du côté de l'anode. Le choix des matériaux est extrêmement important, en raison de la nature hautement corrosive de l'électrolyte et de la température de fonctionnement très élevée. [1,2]

I.5. Constitution d'une pile à combustible PEMFC :

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forment un 'stack'. Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode-membrane-électrode (EME) figure (I.3).

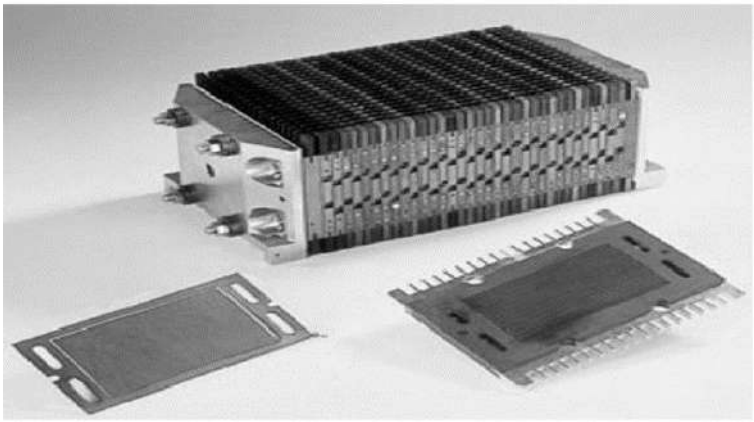


Figure I. 3 : Stack' d'une pile à combustible de type PEMFC

La figure suivante représente la structure d'une cellule et d'un empilement.

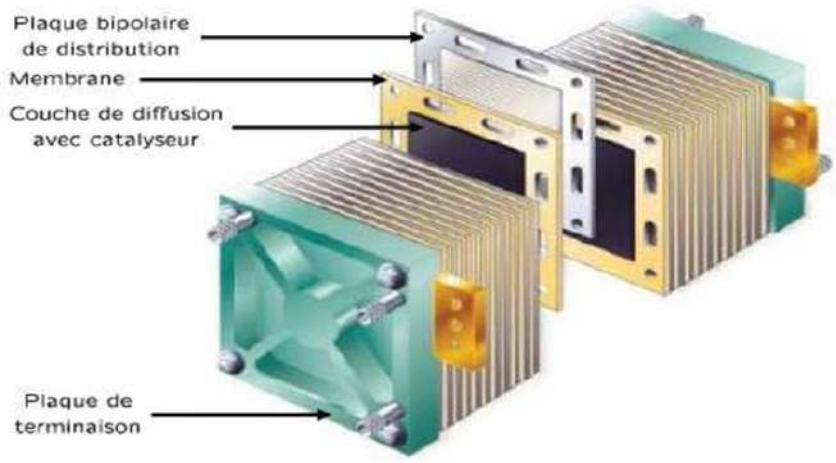


Figure I. 4 : empilement des cellules PEMFC [Electro Encyclo]

Cette figure met en évidence trois éléments constitutifs d'une cellule : L'électrolyte (la membrane dans le cas de la PEMFC), les électrodes (Anode, Cathode) et les plaques.

I.5.1. Membranes polymères ioniques :

Les membranes conductrices protoniques constituent le coeur des piles à combustible de type PEMFC. Leur importance est évidente, puisque ce sont leurs propriétés de conduction qui vont conditionner la recombinaison électrochimique de l'hydrogène avec l'oxygène, et donc ses performances. Les chutes ohmiques limitent le fonctionnement à hautes densités de courant et sont principalement associées aux membranes (la résistance de la membrane étant liée au rapport épaisseur sur conductivité protonique). De plus, ces dernières doivent présenter de bonnes propriétés de résistance mécanique et chimique dans les conditions de fonctionnement, ne pas être perméables aux gaz et maintenir une teneur en eau élevée à haute température car cela conditionne les propriétés de conduction.

Les membranes possèdent dans leurs structures polymérisées des groupements acides échangeurs de

protons (d'où leur nom de Proton Exchange Membrane : PEM), généralement de terminaison -SO3H ou COOH, permettant le transfert des protons de l'anode vers la cathode. [3]

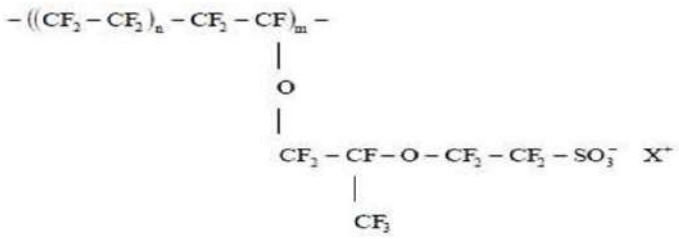


Figure I. 5 : Structure chimique d'une membrane de type Nafion.

L'épaisseur de la membrane polymère échangeuse d'ions, généralement comprise entre 50 et 150 mm, résulte d'un compromis entre ces divers paramètres : les caractéristiques mécaniques, la conductivité ionique, la perméabilité des gaz, les caractéristiques d'hydratation et le coût de fabrication.

Les premières membranes à base de copolymère de di- vinyl-benzène permettant la réalisation de pile, ont été définitivement remplacées par des membranes ioniques à structure perfluorée (type Teflon : membranes commercialisées par différentes sociétés telles que Dow Chemical, Asahi Chemical ou Asahi Glass, Dupont de Nemours et plus récemment, Gore).

Cette membrane est ensuite associée à deux électrodes une sur chaque face pour permettre l'alimentation en gaz et favoriser la réaction chimique. [3]

I.5.2. Les électrodes :

Ils sont le siège des réactions d'oxydoréduction, en plus ils ont une triple fonction :

- Supporter le catalyseur finement divisé et permettre son contact avec les gaz.
- Permettre aux espèces protoniques de se déplacer depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène est réduit grâce à la présence de polymère ionique.
- Evacuer les électrons des sites catalytiques anodiques et redistribuer ces électrons sur les sites catalytiques cathodiques [1, 2].

I.5.3 Catalyseur :

Le catalyseur est un métal utilisé pour catalyser (accélérer) la réaction électrochimique au niveau des électrodes, de plus, pour résister durablement la corrosion (dissolution) dans cet environnement chimique très acide. C'est pour cela, le métal le plus utilisé est du platine (métal noble) pur ou allié à un élément de transition (Cr, Mn, Ni, Co, Fe). [1, 2, 4]

I.5.3.1 Les catalyseurs du coté anode :

Pour les piles de basse et moyenne température, on utilise des métaux précieux : platine Pt, rhodium Rh, ruthénium Ru ou palladium Pd ; ou du Nickel de Raney. Les métaux précieux sont répartis sur les électrodes en charbon actif à très grande surface spécifique (noir d'acétylène). Actuellement on utilise surtout du platine : celui-ci est réparti sous forme des particules de faible taille (2 nm). La réaction de dissociation de l'hydrogène est assez complexe.

Ces électrodes sont très sensibles au CO (elles ne supportent pas plus de 100 ppm) et au soufre, ce qui constitue un vrai problème si on utilise de l'hydrogène issu du reformage : on assiste alors à une diminution de la densité de courant surfacique et donc de la puissance.

De nombreux travaux portent actuellement sur le remplacement du platine jugé trop cher ou la diminution de la quantité nécessaire : alliages de platine (Pt/Ru, Pt/Mb, Pt/Sn), terres rares... Pour les piles de haute température, on peut utiliser des métaux moins chers (Fer, Nickel, Cobalt) et on n'a pas de problème d'empoisonnement au CO. [4]

I.5.3.2 Les catalyseurs du côté cathode :

Pour les piles de basse et moyenne température, on utilisera aussi des métaux précieux et certains métaux de transition usuels (Chrome, Nickel), ou bien du charbon actif avec de l'or ou de l'argent. Pour les piles de haute température, on peut utiliser soit du Nickel fritté ou des oxydes mixtes. La réaction de l'oxygène est aussi assez complexe.

Ces électrodes sont assemblées puis collées de part et d'autre de la membrane par pressage à chaud. L'ensemble électrode membrane électrode (EME) a une épaisseur inférieure au millimètre. Cet ensemble EME est intégré entre deux plaques bipolaires. [4]

I.5.4. Les plaques bipolaires :

Ces plaques sont accolées aux supports d'anode et de cathode. Elles ont plusieurs rôles :

- Canaliser les gaz venant de l'extérieur,
- Collecter les électrons (le courant),
- Gérer les flux d'eau.

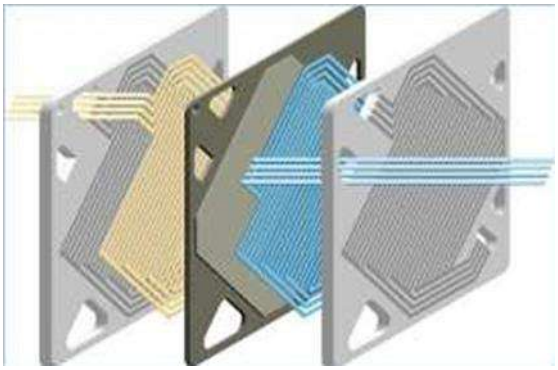


Figure I. 6 : Plaque bipolaire

Les matériaux des plaques bipolaires doivent donc posséder un niveau de conductivité électrique suffisant (supérieur à 10 siemens/cm), une imperméabilité au gaz supérieure à celle de la membrane échangeuse de protons et une bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides présents dans le coeur de pile (eau, acide, oxygène...).

Les plaques les plus courantes sont réalisées en graphite et les canaux de distribution des gaz sont obtenus par usinage. Ces plaques, sont disponibles commercialement mais à des prix très élevés, essentiellement dus à la phase d'usinage, ne permettent pas d'envisager une utilisation industrielle. Pour réduire ce coût, deux autres types de plaques bipolaires ont été mis au point. Ce sont :

Les plaques bipolaires à base de composites organiques. Ces plaques reposent sur l'utilisation de charges (carbone, graphite...) dispersées dans un matériau thermoplastique ou thermodurcissable. Ces charges vont donner aux plaques bipolaires la conductivité électrique nécessaire à la collecte du courant et le liant polymère leur bonne tenue mécanique nécessaire à l'assemblage des différents éléments. L'intérêt majeur réside d'une part dans le faible coût des matières de base et d'autre part dans le fait que les canaux de distribution peuvent être obtenus directement par moulage du polymère chargé sur une empreinte sans phase ultérieure d'usinage.

Les plaques bipolaires à base de métaux et alliages, et particulièrement les aciers inoxydables. Celles-ci présentent un ensemble de propriétés (tenue mécanique, étanchéité, conductivité électrique, aptitude à la mise en forme et l'assemblage par des procédés de production de masse) qui en font des candidates de choix pour la conception et la réalisation de plaques bipolaires compactes, légères et bon marché. Leur densité supérieure à celle du graphite impose de les utiliser sous forme de feuilles minces, facilement mises en forme par emboutissage. Dans ces conditions, l'évacuation des calories et le contrôle de la température du module en fonctionnement peuvent être assurés avec précision par circulation d'un fluide de refroidissement interne. [3]

I.6. Caractéristique électrique :

La caractéristique électrique d'une pile à combustible est déterminée par le nombre de cellules en série, définissant la tension totale et par la taille de la surface active, déterminant le courant délivré. Les caractéristiques électriques d'une cellule de pile à combustible basse température sont décrites à la Figure (1.6). La tension à vide dite (tension de Nernst) est d'environ 1,23 V. Lorsque la densité de courant augmente, les pertes sont plus importantes (pertes d'activation et ohmique) : la tension diminue. Pour de fortes densités de courant, la tension chute rapidement (pertes de concentration).

I.6.1. Tension de Nernst :

C'est le potentiel d'équilibre thermodynamique définit en utilisant l'équation de Nernst

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta G}{2.F} + \frac{\Delta S}{2.F}\,(T - T_{ref}) + \frac{R.T}{2.F}[ln(P_{H2}) + 1/2(P_{H2})] \qquad (I.18)$$

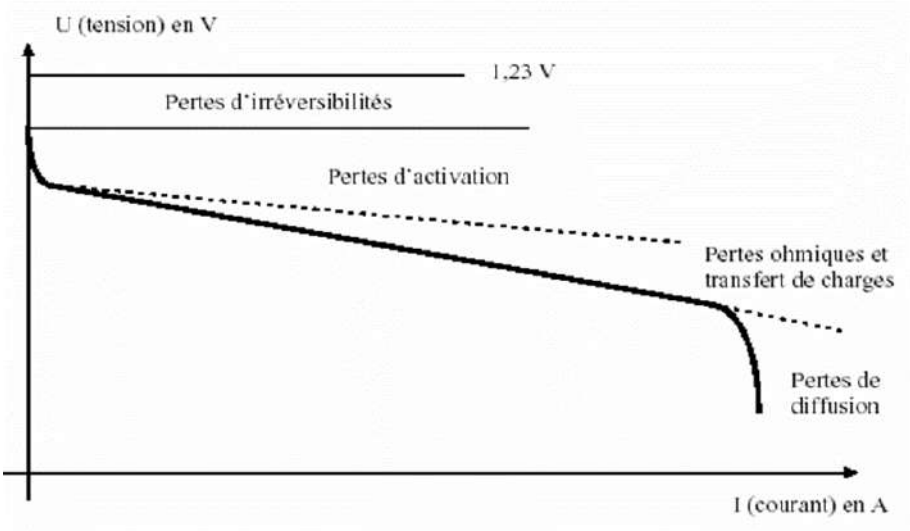


Figure I. 7 : Caractéristiques courant - tension d'une pile à combustible

En accord avec l'équation de Nernst pour la réaction de l'hydrogène, le potentiel idéal d'une pile à une température donnée peut être augmenté en augmentant la pression des réactifs. Et on observe en effet des améliorations dans les performances des piles à haute pression.

Les pertes, appelées souvent polarisation, proviennent principalement de trois sources: la polarisation d'activation, la polarisation ohmique, et la polarisation de concentration. Ces pertes entraînent, pour une pile de potentiel idéal ENernst, une chute de la tension : V = Enernst – pertes.

I.6.2. Polarisation d'activation :

La polarisation d'activation est présentée quand le taux d'une réaction électrochimique à la surface de l'électrode est contrôlé par le ralentissement de la cinétique pour cette électrode. En d'autres termes, la polarisation d'activation est directement reliée au taux de la réaction électrochimique. Dans les deux cas, pour qu'une réaction chimique ou électrochimique puisse démarrer, les réactifs doivent dépasser une barrière d'activation. Dans le cas d'une réaction électrochimique les pertes d'activation (act) sont supérieures à 50-100 mV. [1, 2]

I.6.3. Polarisation ohmique :

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance que rencontre le flux d'ions en traversant l'électrolyte et à la résistance que rencontrent les électrons dans les électrodes et le circuit électrique. Les pertes ohmiques sont principalement dues à l'électrolyte et peuvent être réduites en diminuant l'épaisseur de l'électrolyte et en améliorant sa conductivité ionique. L'électrolyte et les électrodes obéissant à la loi d'Ohm. [1, 2]

I.6.4. Polarisation de concentration :

Lorsque, à une électrode, il y a une perte de potentiel dû à l'incapacité du système à maintenir la concentration initiale des réactants, on a alors la formation d'un gradient de concentration. De nombreux facteurs peuvent contribuer à la polarisation de concentration : la faible diffusion du gaz à travers les électrodes poreuses, la dissolution des réactants ou des produits dans l'électrolyte, la diffusion des réactifs ou des produits du site de la réaction vers l'électrolyte ou l'inverse. A des densités de courants élevées, la faible vitesse de transport des réactifs ou des produits vers le site de la réaction est la contribution majeure à la polarisation de concentration. [1,2]

I.7. Les applications des piles à combustible :

La pile à combustible peut être considérée comme un générateur d'électricité portable et autonome, si elle dispose de sa propre réserve de combustible. Elle est donc très sérieusement envisagée comme une candidate alternative aux moteurs thermiques dans la plupart des modes de transports, terrestres ou maritimes. Produisant électricité et chaleur à parts sensiblement égales, suivant le type de pile (niveau de température), une grande quantité d'applications en cogénération sont considérées comme I I r E F 27 réalistes, pour des cibles diverses, de l'habitat individuel à tout type de bâtiment collectif ou tertiaire, sans oublier les sites industriels. Au vu des très bons rendements électriques que l'on peut obtenir, il

peut même être envisagé, pour des applications statiques, de ne récupérer que le courant produit, notamment dans les zones où, pour des raisons de bruit et de pollution, l'installation de tout autre générateur est exclue. Enfin, comme la pile garde de très bons rendements même au niveau d'une seule petite cellule, il n'est pas exclu de rêver à des micros générateurs portables pour diverses applications exotiques (en substitution des batteries plus ou moins limitées en capacités volumique et massique). [1,2] Nous présentons ici quatre principaux domaines d'application :

I.7.1. Automobile :

Les véhicules hybrides et les véhicules électriques ; les véhicules particuliers et de golf, les bus (PEMFC, SOFC, AFC

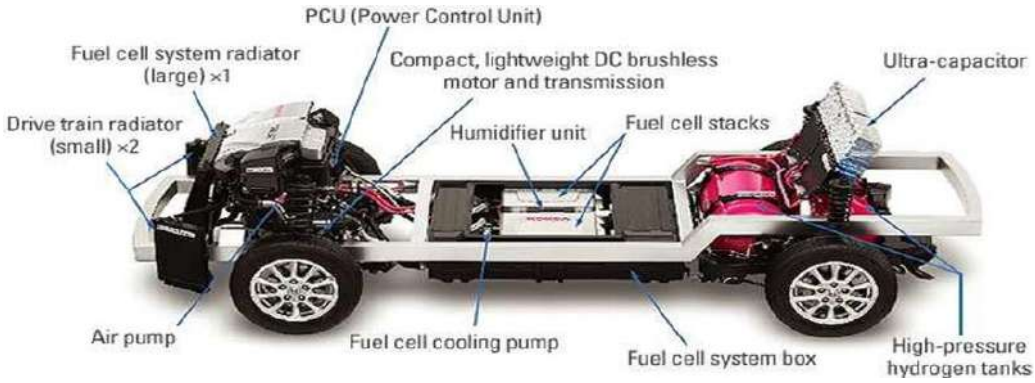


Figure I. 8 : Véhicule Honda équipe d'une pile à combustible et d'un système reformeur d'essence

I.7.2. Stationnaires :

Génération de chaleur et d'électricité (résidentiel, bâtiments publics type piscine, hôpital, école, résidences, générateur de secours). Le type de pile le plus testé est PAFC, et aussi la PEMFC.



Figure I. 9 : Un système complet de 250 kW électrique Ballard

I.7.3. Maritimes :

Elles peuvent être utilisées dans des petits bateaux à moteur et même dans des sous-marins. C'est une application relativement peu connue - et peu médiatisée - des piles, mais qui pourrait connaître un développement certain. Les piles les plus utilisées sont PEMFC, MCFC. [2]

I.7.4. Portables :

Téléphone, ordinateur portable, caméra, matériel de camping ou militaire. Les piles utilisées sont seulement PEMFC et DMFC à cause de leur faible température de fonctionnement.



Figure I. 10 : Un système à pile à combustible utilisé pour un téléphone portable

I.8. Architecture du système à pile à combustible :

Comme pour un moteur thermique, divers périphériques sont nécessaires à la mise en oeuvre d'un générateur d'énergie à pile à combustible PEM

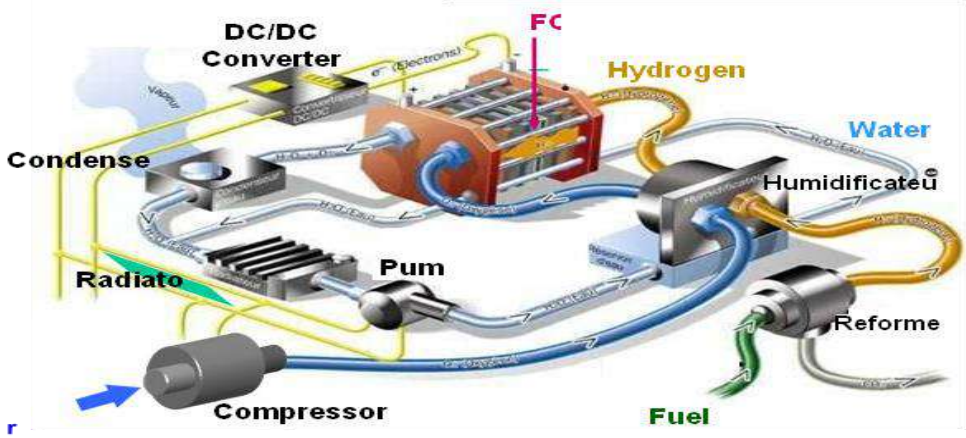


Figure I. 11 : Schéma fonctionnel d'un groupe électrogène à pile à combustible .

Un système pile à combustible exige du carburant, de l'oxydant et du liquide réfrigérant afin de fonctionner. Les pressions et les débits du carburant et de l'oxydant doivent être réglés.

En outre, les gaz doivent être humidifiés et la température du système doit être contrôlée. Pour atteindre ceci, un stack de pile à combustible doit être entouré d'un système de fourniture du carburant, un système d'alimentation en air, un système de refroidissement du stack et un système d'humidification

En fonctionnement, l'énergie produite doit être adaptée pour être utilisée par une charge. Des alarmes doivent arrêter le processus en cas de condition de fonctionnement dangereuse. Un système de mesure de la tension des cellules doit surveiller le fonctionnement du stack. Ces fonctions sont assurées par un système de contrôle. [1]

I.8.1. Configuration système :

Les différents constituants d'un système pile à combustible sont représentés dans la figure (1.10). Comme cette figure l'indique, un système pile à combustible se compose des sous-systèmes fondamentaux : le stack présenté précédemment, la production du carburant, la gestion de l'air, la gestion de l'eau, la gestion thermique et le système de conditionnement de l'énergie électrique produite. La conception de chaque sous-système est une partie de la conception du système complet est un élément fondamental de la réalisation de systèmes pile à combustible performants. [3]

I.8.1.1. Gestion de l'air :

En plus du carburant, la pile à combustible exige un oxydant, qui est typiquement de l'air. L'air est fourni à la cathode de la pile à combustible à basse pression par un ventilateur ou à haute pression par un compresseur d'air. Le choix entre basse pression et haute pression n'est pas évident. D'une part, l'augmentation de la pression de l'air améliore la cinétique des réactions électrochimiques et mène à une plus grande densité de puissance et à une meilleure utilisation du stack. D'autre part, la puissance exigée pour comprimer l'air réduit la puissance disponible. Une partie de cette énergie peut être récupérée en plaçant une turbine sur la sortie d'air du côté de la cathode. Néanmoins, le compresseur d'air emploie typiquement plus de puissance que n'importe quel autre dispositif auxiliaire dans le système. Actuellement, la plupart des stacks de pile à combustible fonctionnent à une pression comprise entre 1 et 8 atmosphères. Afin d'obtenir des densités de puissance importantes et pour améliorer la gestion de l'eau, la plupart des systèmes développés pour l'automobile à partir de pile PEM fonctionnent à des pressions de 2 à 3 atmosphères. [3]

I.8.1.2. Gestion de l'eau :

L'eau est nécessaire à plusieurs endroits dans un procédé de reformage. Dans les systèmes de pile PEM, les gaz réactifs doivent être humidifiés afin d'éviter de dessécher la membrane. Si de l'eau est fournie au niveau de la réaction, celle-ci n'est pas toujours suffisante et l'air (et parfois l'hydrogène) doit être humidifié. Dans des systèmes autonomes, elle peut être récupérée dans les gaz d'échappement. [3]

I.8.1.3. Gestion thermique :

Un stack de pile à combustible de type PEM produit pratiquement autant d'énergie thermique que d'énergie électrique. Cette énergie thermique peut être employée de différentes manières. Elle peut être utilisée pour préchauffer les gaz dans un système de reformage, transférée extérieurement pour satisfaire les besoins thermiques d'une application particulière ou être rejetée dans l'environnement. Pour les systèmes de petite puissance (< 200 W), l'air en excès circulant à la cathode est suffisant pour refroidir le système. Pour des systèmes plus importants la circulation d'air, d'eau ou d'un liquide de refroidissement dans des canaux spécifiques est nécessaire. Avec un liquide de refroidissement, le stack est plus compact. En outre, avec un liquide, il est plus facile de transférer l'énergie thermique vers d'autres applications telles que le chauffage d'espace ou le chauffage d'eau dans des applications de cogénération. [3]

I.8.2. Interfaces externes :

Les interfaces externes du système sont :

- L'atmosphère pour l'arrivée d'air et le refroidissement.
- La sortie du détendeur pour l'arrivée d'hydrogène.
- La demande de puissance électrique au groupe électrogène.
- L'évacuation d'eau, trop-plein réservoir et purge anodique

I.8.2.1. Circuit d'air :

Le circuit d'air comporte séquentiellement, de l'entrée vers la sortie :

- un filtre
- un compresseur (vitesse commandée)

- un évaporé-condenseur à parois (flux d'entrée) un séparateur air/eau liquide
- la pile à combustible
- un deuxième séparateur (pour récupérer l'eau condensée)
- un évapo-condenseur à parois (flux de sortie)
- un troisième séparateur (pour récupérer l'eau condensée)
- une régulation de pression (vanne commandée)

I.8.2.2. Circuit d'humidification :

Ce circuit sert à la récupération de l'eau produite par la pile afin d'humidifier les gaz en entrée. Il comporte :

- trois séparateurs pour récupérer l'eau liquide
- un réservoir
- une pompe ou un autre dispositif assurant
- la circulation un évapore-condenseur à parois

I.8.2.3. Circuit de refroidissement :

Ce circuit est fermé et hydrauliquement indépendant des autres circuits. Il comporte :

- une pompe avec un dispositif de régulation de débit
- un radiateur
- la pile à combustible (les plaques)
- Un by-pass en parallèle de la pile (vanne commandée)
- Un by-pass en parallèle du radiateur (vanne commandée) [3]

I.8.2.4. Circuit électrique :

Dans les limites du groupe électrogène, ce circuit comporte le branchement des auxiliaires (pompes, ventilateurs, compresseur, hacheur élévateur) sur la pile.

I.9. Les avantages et les inconvénients des piles à combustibles :

I.9.1. Les avantages :

Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique, de l'automobile. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages [9] :

- de hauts rendements énergétiques.

- de faibles émissions sonores.
- peu d'émissions (elles dépendent cependant du combustible utilisé).
- elles sont de construction modulaire.
- diverses températures de fonctionnement.
- pas de parties rotatives.

I.9.2. Les inconvénients :

Si les piles sont si intéressantes, pourquoi ne les trouve-t-on pas sur le marché ? En fait, il reste de nombreux points faibles qui sont à régler [4] :

- le coût.
- le poids et le volume.
- la durée de vie.
- la gestion thermique du module.

I.10. Conclusion :

Les piles à combustible, plus généralement, la " filière hydrogène ", est un moyen intéressant de valoriser l'énergie chimique contenue dans divers combustibles, avec un très bon rendement, sous la forme " noble " d'énergie électrique. Les réactions électrochimiques en jeu ne produisent pas d'émissions polluantes, et elles n'émettent ni bruit ni odeur. Déjà, de nombreuses installations fonctionnent, et des programmes de recherche ambitieux tentent de développer de nouvelles applications, notamment dans le domaine des transports et des applications statiques (production d'énergie électrique, cogénération).

Enfin le développement de sources autonomes d'énergie, notamment pour un véhicule propre et économe, est I 'un des enjeux technologiques majeurs du débit de ce siècle. L'utilisation d'un moteur électrique, de rendement énergétique élevé, et de fonctionnement silencieux et non polluant, apparaît être une solution idéale, à condition que soient mis au point des générateurs électrochimiques fiables et de faible coût. Si, dans un premier temps, les accumulateurs électriques peuvent jouer ce rôle, leur utilisation est cependant limitée par leur rendement de charge et décharge, le nombre relativement faible de cycles, et surtout le temps et l'installation électrique nécessaires pour leur recharge. Au contraire, les piles à combustible, dont les éléments production d'énergie (coeur de pile) et stockage d'énergie (réservoir de combustible) sont séparés, permettent une utilisation plus souple, similaire à celle des moteurs thermiques actuels, et pourraient donc bénéficier d'un réseau équivalent pour la distribution du combustible. Déjà, de nombreuses installations fonctionnent, et des programmes de recherche ambitieux tentent de développer de nouvelles applications, notamment dans le domaine des transports et des applications statiques (production d'énergie électrique, cogénération).

Enfin le développement de sources autonomes d'énergie, notamment pour un véhicule propre et économe, est I ‘un des enjeux technologiques majeurs du débit de ce siècle. L'utilisation d'un moteur électrique, de rendement énergétique élevé, et de fonctionnement silencieux et non polluant, apparaît être une solution idéale, a condition que soient mis au point des générateurs électrochimiques fiables et de faible coût. Si, dans un premier temps, les accumulateurs électriques peuvent jouer ce rôle, leur utilisation est cependant limitée par leur rendement de charge et décharge, le nombre relativement faible de cycles, et surtout le temps et l'installation électrique nécessaires pour leur recharge. Au contraire, les piles à combustible, dont les éléments production d'énergie (cœur de pile) et stockage d'énergie (réservoir de combustible) sont séparés, permettent une utilisation plus souple, similaire a celle des moteurs thermiques actuels, et pourraient donc bénéficier d'un réseau équivalent pour la distribution du combustible.

Chapitre II

Étude bibliographie sur les véhicules électriques

II.1. Introduction :

Avec une présence importante au début de l'histoire de l'automobile, le véhicule toutélectrique est réapparu ces derniers temps comme une solution potentielle au remplacement du véhicule conventionnel. Même s'il n'est pas encore en mesure de s'imposer sur le marché des véhicules particuliers, il reste sans conteste une bonne solution mais à la condition de disposer d'une source d'énergie embarquée performante.

Les véhicules autonomes tout électriques utilisent la seule énergie électrique des batteries. Cette énergie est utilisée pour alimenter un ou plusieurs moteurs électriques de traction.

II.2. Historique :

L'histoire du véhicule électrique commence en Europe au début du 19 ème siècle. Après l'invention de la batterie primaire par Volta en 1800 et la démonstration du principe du moteur électrique en 1821 par Faraday, la première voiture électrique a été construite en 1834 à Brandon

en Grande Bretagne, par un mécanicien nommé Thomas Davenport. Le petit véhicule fonctionnait sur une batterie non rechargeable et réussissait à parcourir un court trajet sur rail.

Puis, en 1859, le français G. Planté inventait la batterie secondaire plomb/acide rechargeable et en 1869 Gramme construit le premier moteur électrique à courant continu ayant une puissance de plus d'un cheval.

Douze ans plus tard, en 1881, Gustave Trouvé, réalisait le premier véhicule électrique alimenté par une batterie secondaire. Le véhicule était propulsé par un moteur électrique à courant continu de 0,1 cheval et pesait 160 kg avec son conducteur. Il a été précédé par Sir David Salomons qui construisit un VE avec une batterie rechargeable en 1874. Plus tard, en 1885, les allemands Daimler et Benz inventaient la première voiture à essence.

Les premières réalisations n'ont pas attiré l'attention du public due à leur technologie encore immature qui ne pouvait pas rivaliser avec les voitures à chevaux. Mais, les choses ont vite changeait et dans les années qui ont suivi la course était lancée : les véhicules électriques rivalisaient avec les véhicules thermiques mais aussi avec les véhicules à vapeurs. A titre d'exemple, parmi les automobiles construites en 1900 aux Etats-Unis, 1575 étaient électriques, 1684 à vapeur et seulement 936 à essence [5]

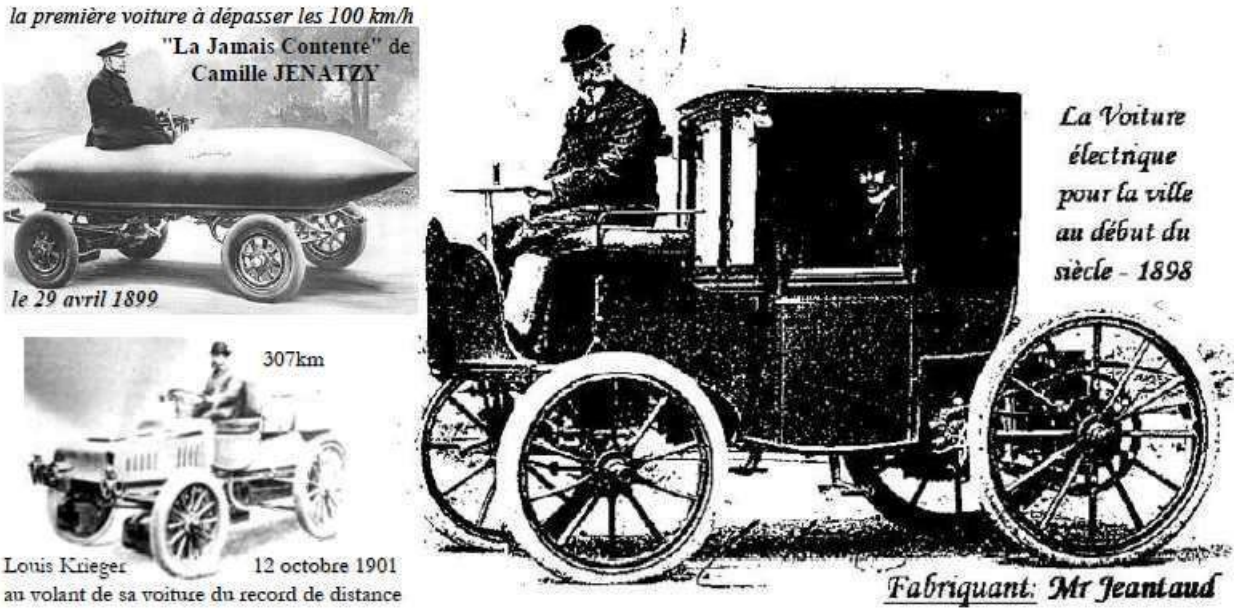


Figure II- 1 Exemples des voitures électriques du début du 20ème siècle.

Sans doute, le début du 20ème siècle a constitué l'âge d'or du VE. En effet, c'est un VE qui pour la première fois a franchi la limite de 100 km/h, le 29 avril 1899, avec le Belge Camille Jenatzy à bord de sa voiture baptisée « La Jamais Contente » en forme d'obus. Ce VE avait deux moteurs entraînant directement les roues arrière, d'une puissance maximale totale de 50 kW (soit 67 chevaux), alimentés par les 80 éléments de la batterie Fulmen pesant près de la moitié du poids total du véhicule de 1,5 tonne.

Deux ans plus tard, le 12 octobre 1901, l'ingénieur français Louis Krieger effectuait, sans recharge, le voyage Paris-Châtellerault soit 307km à la vitesse moyenne de 17,5km/h. Cette performance lui a valu un statut parmi les plus importants constructeurs de véhicules électriques du début du siècle

Le véhicule électrique était donc bien présent dans le monde de l'automobile. Notamment, à l'occasion de l'Exposition Universelle de Paris, en 1900, la ville est traversée par « des taxis à batteries amovibles, d'élégants et silencieux coupés, des fourgons postaux, des voitures de livraison et des véhicules de pompiers, fonctionnant tous à l'électricité »

Cependant, l'amélioration continue des performances des véhicules à moteur à combustion interne, l'apparition de l'essence bon marché, et la persistance des limites qui affectent la capacité des batteries, font disparaître progressivement les VE du marché. Ainsi, au début des années 30, la production de véhicules électriques est presque complètement interrompue, la période 1921-60 étant dominée par les véhicules à moteur thermique. Dès lors, les VE n'ont connu que des utilisations spécifiques. La dernière production significative de VE, d'un point de vue commercial, a été réalisée autour des années 1905.

De nouvelles possibilités vont apparaître en traction électrique après les années 1945, lorsque les laboratoires Bell inventent le transistor et plus tard, à l'apparition des thyristors capables de commuter des courants et des tensions élevées. Ces découvertes conduisent au développement de l'électronique de puissance qui permet le remplacement des rhéostats et la commande des moteurs à courant alternatif à fréquence variable.

En même temps, dans les années 60-90, à cause de la pollution atmosphérique et surtout des chocs pétroliers des années 70 et 80, de nombreux pays commencent à s'intéresser aux VE. Les recherches sont reprises et le VE commence à réapparaître en petit nombre. L'ère moderne du VE culmine entre les années 80-90 avec quelques véhicules réalisés comme l'EV1 et la Peugeot 106

Electrique. Malgré les progrès, dans les années 90, il devient évident que les véhicules électriques ne peuvent pas rivaliser avec les véhicules conventionnels à cause de leur autonomie et performances insuffisantes. Comme au début du 20éme siècle, le frein à leur développement est, et reste, la source de stockage d'énergie. [5]

II.3. Architecture du véhicule électrique VE :

La solution la plus simple pour réaliser un véhicule électrique est de le construire sur la base d'un véhicule thermique existant, en remplaçant le moteur thermique par un moteur électrique. Cependant, la transmission mécanique peut être simplifiée. La capacité des moteurs électriques à démarrer à couple élevé et de fonctionner sur une large plage de vitesse, comme présentée sur la Figure (II.2), rend possible l'élimination de l'embrayage, voir même de la boîte de vitesses. [6]

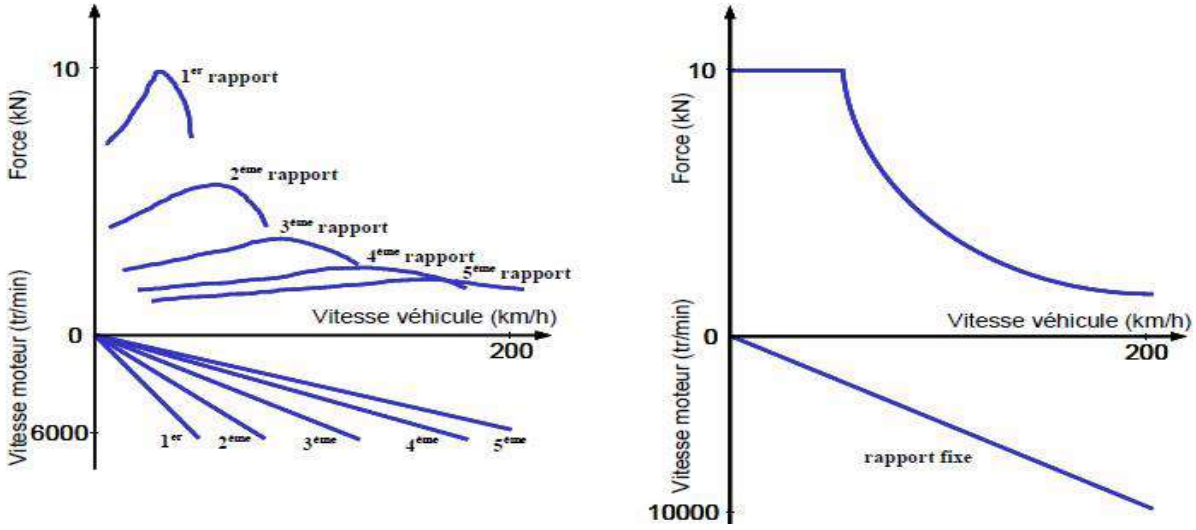


Figure II- 2 Caractéristiques force – vitesse du véhicule thermique à 5 rapports et du véhicule électrique à rapport fixe.

Par contre, comme le couple est une grandeur dimensionnée, l'absence de boîte de vitesse implique un moteur plus lourd, plus encombrant et donc plus coûteux. Aussi, pour réduire la masse embarquée, les VE peuvent être conçus avec un réducteur qui permet au moteur électrique de travailler à grande vitesse. Ce réducteur permet de réduire la taille du moteur grâce à la réduction du couple demandé. Cette chaîne de traction centrée autour d'un seul moteur de traction couplé à un réducteur à rapport fixe représente la solution dite classique pour l'architecture des VE. La chaîne de traction classique d'un VE comprend donc, la source d'énergie, le convertisseur, le moteur électrique, la transmission mécanique englobant le différentiel et les roues. Cette configuration est présentée sur la Figure (II.3). [7]

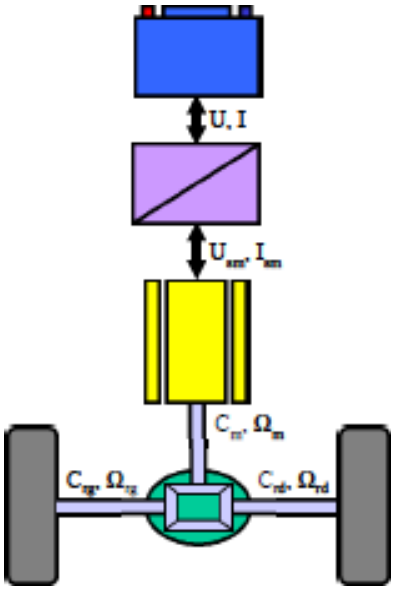


Figure II- 3 Chaîne de traction électrique.

II.3.1. Les moteurs roues :

La chaîne de traction tout électrique présentée ci-dessus, peut être encore simplifiée en utilisant un moteur pour chaque roue motrice. Ainsi, le différentiel classique est remplacé par un différentiel électrique réalisé par un contrôle indépendant de chaque moteur.

Dans ce cas, deux configurations sont possibles : soit les moteurs sont fixés au châssis donc suspendu, soit les moteurs sont fixés sur les roues formant ainsi ce qui est connu sous le nom de moteur-roue.

Dans le premier cas la puissance est transmise sur les roues par des cardans. L'avantage de cette configuration est que la suspension isole les roues de la masse du moteur et la conduite du véhicule est plus facile. Dans le deuxième cas où les moteurs et les roues sont confondus la transmission est

simplifiée. Mais, pour réduire au minimum les masses non suspendues, les moteurs-roue doivent avoir une forte puissance massique. A cause de ces contraintes, ces derniers sont relativement coûteux limitant leur utilisation.

Concernant les moteurs-roue au moins deux configurations peuvent être envisagés : avec réducteur ou à entraînement direct.

La figure (II.4) représente un moteur-roue avec réducteur. Le constructeur intègre dans une roue un moteur électrique de traction, un frein à disque et une suspension électronique active située dans l'axe verticale de la roue. Très compacte, cette architecture nouvelle influe énormément sur celle du véhicule, qui n'a plus besoin de moteur, de boîte de vitesses, d'embrayage, de cardans, d'arbres de transmission mais aussi d'amortisseurs et de barres antiroulis. En plus, elle agit telle une suspension active modifiant à tout instant l'assiette du véhicule pour assurer la tenue de route la mieux adaptée. [7]

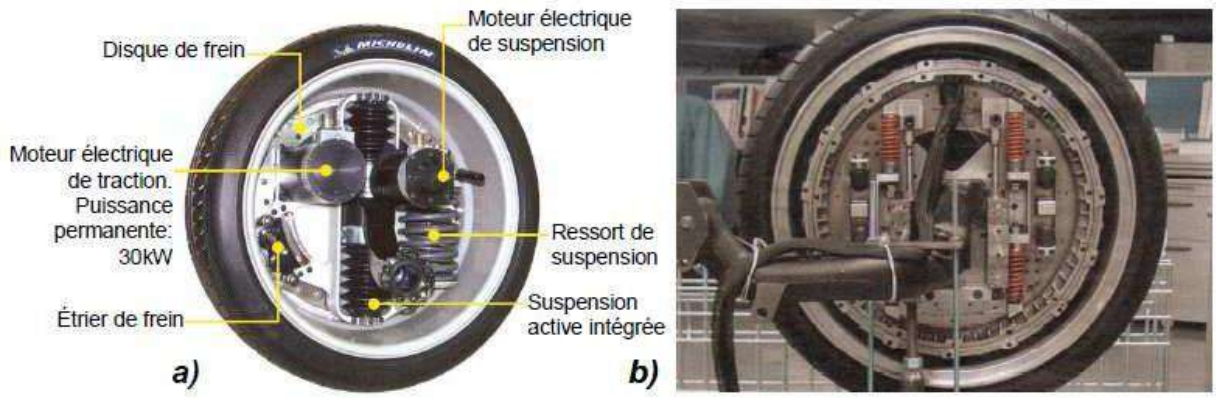


Figure II- 4 Exemples de roue englobant un moteur-roue : a) Roue active de MICHELIN ; b) Roue motrice nouvelle.

La présence d'un réducteur à rapport fixe a permis d'utiliser un moteur ayant un poids extrêmement faible de environ 5 kg. Cependant, le moteur a besoin d'un système de refroidissement (eau ou air). L'ensemble, avec pneu basse résistance au roulement 195/45 R 17 ou R 18, ne pèse pas plus de 32 kilos

En ce qui concerne le moteur-roue sans réducteur, les constructeurs présentent un nouveau concept d'entraînement : un moteur électrique intégré dans la roue et doté d'un système de suspension et d'amortissement. Ils sont parvenus à améliorer la sécurité et le confort en « suspendant » le moteur par quatre ressorts et deux amortisseurs et ainsi résoudre les problèmes de poids des parties tournantes nuisibles à la tenue de route.[7]

II.4. Source d'énergie d'un véhicule électrique :

La question du stockage de l'électricité a mobilisé les scientifiques depuis déjà deux siècles et reste encore l'une des clés de l'évolution du système énergétique en général et du VE en particulier Ainsi, si la traction électrique autonome est maintenant disponible, cette technologie bute sur les performances médiocres du stockage de l'énergie par batterie. L'autonomie des VE reste généralement faible, couvrant essentiellement des petits trajets de type urbains. En outre, la recharge des batteries est lente et doit être généralement effectuée la nuit. Ces contraintes d'utilisation ont bloqué le marché du véhicule électrique à moins de 1000 véhicules vendus par an. Des batteries plus performantes et plus légères arrivent maintenant sur le marché, mais elles sont coûteuses et les progrès sont modestes.

En fait, la pile à combustible remplace la batterie comme élément de stockage avec l'avantage de permettre au FCV une plus grande énergie stockée et donc une plus grande autonomie. Toutefois, si on se reporte à l'énergie initiale produite, le VE à batterie a une autonomie plus que double par rapport au FCV. La Figure (II.5) présente différentes autonomies pour une même énergie initiale, le rendement énergétique de chaque solution crée la différence. [8]

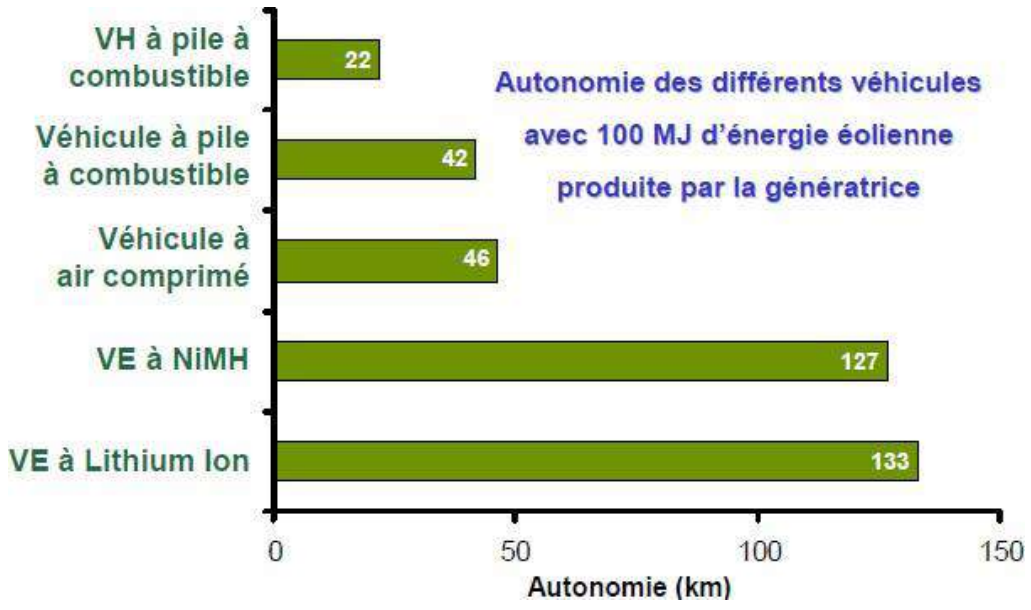


Figure II- 5 L'autonomie de différents types de voitures avec 100 MJ d'énergie provenant du vent.

II.5. L'architecture d'un véhicule à pile à combustible :

- Un véhicule à pile à combustible est essentiellement conçu autour des composants suivants figure (II.6)
- Un stockage d'hydrogène ou un système de production d'hydrogène (reformeur par exemple),
- Une pile à combustible,
- Un système de stockage d'électricité fonctionnant en parallèle avec la pile (batterie ou super capacités),
- Un moteur électrique entraînant les roues,
- Un compresseur d'air (les piles fonctionnent avec de l'air à une pression comprise entre 1,2 et 5 bars absolus),
- Des échangeurs de chaleurs et un radiateur pour évacuer la chaleur produite par la pile,
- Divers composants spécifiques : pompes, capteurs, séparateurs, convertisseur de courant, contrôle commande…

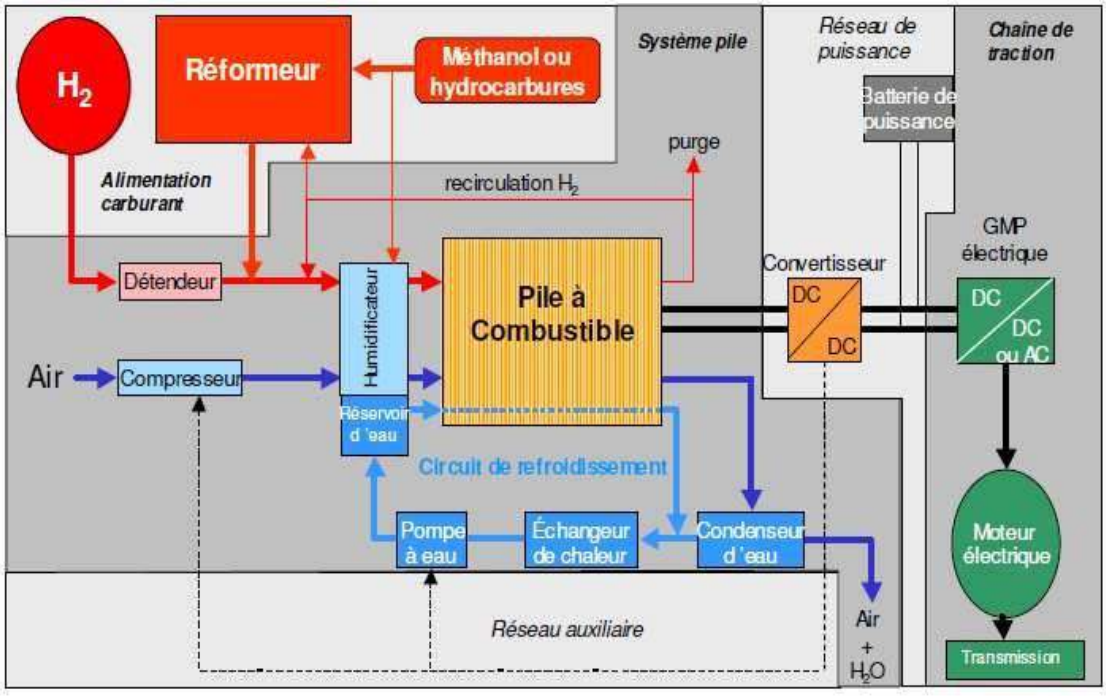


Figure II- 6 Schéma général d'un véhicule à pile à combustible - Source Renault – PSA, 1998.

La qualité, la fiabilité, les coûts de ces composants seront évidemment des facteurs clés d'une introduction plus ou moins rapide de ce type de véhicule.

L'arrangement de ces composants dans un véhicule est montré dans la figure ci-dessous figure (II.7). On voit, de la droite vers la gauche : les deux réservoirs d'hydrogène (en rouge), les batteries, la pile à combustible au centre, le moteur électrique et divers composants, à l'avant du véhicule, et enfin le radiateur. [7]



Figure II- 7 L'arrangement des composants sur le véhicule Honda FCX (document Honda, 2005).

II.6. Le véhicule hybride :

Pour palier au problème d'autonomie, d'autres solutions ont été investiguées. Ainsi, les constructeurs se sont orientés vers les véhicules électriques hybrides (VH). Ils représentent un compromis entre le véhicule conventionnel à moteur thermique et le VE. Leur but principal est de diminuer la pollution des véhicules conventionnels ou inversement d'augmenter l'autonomie du VE. Ils peuvent être vus comme une solution intermédiaire, en attendant que les problèmes d'autonomie et d'infrastructure des VE soient résolus.

II.6.1. Historique des véhicules hybrides:

Même si le VH apparaît maintenant comme une solution aux faibles performances des VE actuels le concept de VH n'est pas nouveau. En effet, il est aussi vieux que l'automobile lui-même. A l'origine, son but n'était pas de minimiser la consommation de carburant, mais surtout d'assister les faibles performances des moteurs à combustion de l'époque.

Les premières VH de type série ou parallèle ont été présentées à Paris au Salon de 1899. Le VH

parallèle avait un petit moteur thermique refroidi par air, assisté par un moteur électrique et alimenté par des batteries au plomb. Le moteur électrique était utilisé dans le cas où la puissance de traction dépassait la puissance du moteur thermique. Lors d'un stationnement ou d'un roulage au- dessous de la capacité du moteur thermique, la batterie était chargée par le moteur thermique.

Le premier VH série a été conçu pour augmenter l'autonomie d'un VE. Deux moteurs électriques entraînaient séparément les deux roues arrière, la batterie étant rechargée par un moteur thermique de ¾ chevaux couplés à un générateur de 1,1 kW.

Ces deux types de VH ont été commercialisés jusqu'en 1914 avant de disparaître complètement, à cause des améliorations des moteurs à combustion interne.

Même si quelques études et prototypes de VH ont vu le jour après les années 70, l'intérêt des constructeurs est réapparu dans les années 90, Le plus gros effort de développement et de commercialisation a été fait par les constructeurs japonais et Américains. Ces efforts se sont concrétisés par des VH commercialisés apportant de réels gains en consommation. Aujourd'hui plusieurs types de voitures hybrides apparaissent. [5]

II.6.2. Définition et classifications des véhicules hybrides :

Les VH constituent une famille recouvrant une grande variété de solution. Ainsi, une définition exhaustive des VH est assez difficile et la majorité des définitions sont incomplètes. Une définition courante est celle proposée par le Comité Technique 67 (Electric Road Vehicles) de la Commission Internationale d'Electrotechnique : le VH est un véhicule dans lequel l'énergie de propulsion est fournie par deux ou plusieurs types de dispositifs de stockage, sources convertisseurs d'énergie, où au moins un parmi eux fournit de l'énergie électrique. Une autre définition proposée par l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) dans un rapport technique : un VH a un groupe motopropulseur dans lequel l'énergie peut être transmise par au moins deux dispositifs de conversion d'énergie différents tirant l'énergie d'au moins deux dispositifs de stockage d'énergie différents. Néanmoins, ces définitions ne sont pas reconnues par tous les constructeurs car elles n'intègrent pas l'hybride « micro » présenté ci-dessous.

Une chaîne de traction hybride peut être réalisée à partir de deux configurations principales, série ou parallèle, en pratiques les solutions retenues sont souvent des combinaisons entre les deux schémas.

Toutefois, une classification souvent utilisée aujourd'hui propose une décomposition en quatre catégories principales en fonction notamment du niveau d'hybridation :

- Micro hybrid.
- Mild hybrid.

- Full hybrid
- Plug-in hybrid.

Ainsi, le VH, dans le sens classique du terme, devient dans cette classification un « full hybrid » laissant place à des configurations moins complexes comme les hybrides « micro » et « mild ». D'autre part, l'hybride « plug-in » s'intercale entre le « full hybrid » et le VE.

La Figure (II.8), donne une image d'ensemble des solutions existantes pour créer une chaîne de traction et les situe sur un axe véhicule thermique – véhicule électrique. [5]

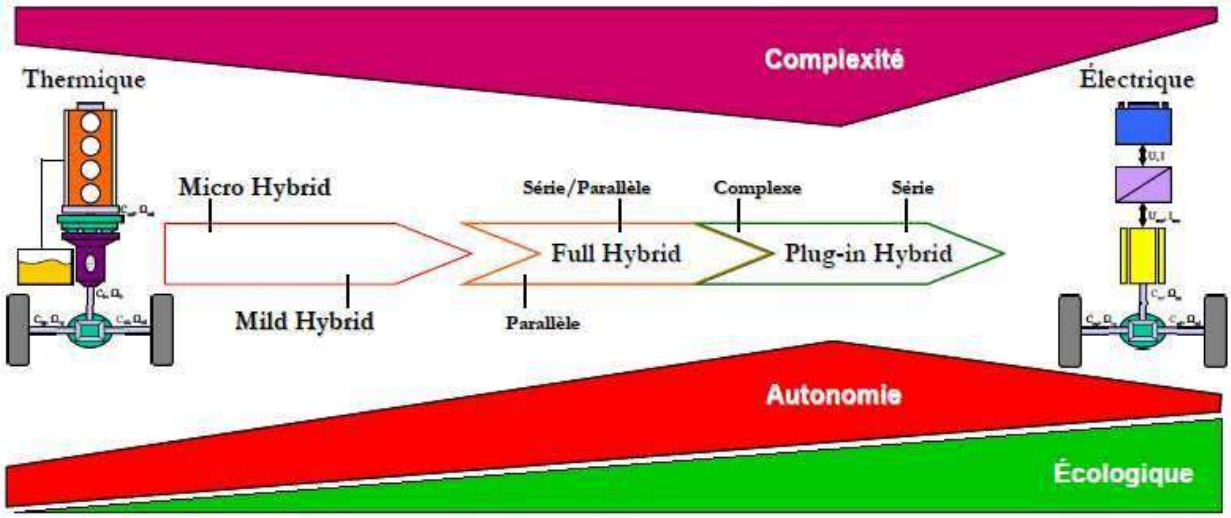


Figure II- 8 Classification des différents types de chaînes de traction.

Cette figure permet de visualiser les quatre niveaux d'hybridation, ainsi que les différents hybrides « full » ou « plug-in » en fonction de l'architecture (série, parallèle, série/parallèle, complexe). Les hybrides « full » et « plug-in » sont liés afin de souligner qu'ils peuvent avoir la même architecture. Leur différence vient du fait que le VH « plug-in » peut être rechargé à partir d'une source électrique extérieure. Ces véhicules ont souvent une batterie plus grande, donc une autonomie plus importante en régime « zéro émission », étant ainsi plus proche d'un VE. Plus la partie électrique prend importance, plus l'impact environnemental baisse. Par contre, la complexité augmente avec l'introduction successive de la traction électrique et commence à diminuer lorsque le moteur thermique cesse de participer à la traction, notamment dans la configuration série.

Les différents types d'hybrides et d'architecture exposés dans la Figure (II.8) sont présentés ci-dessous.

Toutefois, il est possible d'imaginer d'autres classifications. Il serait également intéressant de qualifier les VH, soit en fonction du nombre de kilomètres qu'ils peuvent parcourir en mode tout électrique (zéro émission), soit en fonction du pourcentage de la puissance électrique par rapport à la

puissance totale disponible. Cela permet d'introduire un nouveau vocabulaire :

VH20, pour 20 km d'autonomie,VH30%, pour 30% de puissance électrique par rapport à la puissance totale.

Ces classifications s'intègrent facilement dans le schéma de la Figure (II.6), trouvant leur place entre les deux technologies situées aux extrémités. [5]

II.6.2.1 Hybride *« micro » :*

Connu aussi sous le nom de « light hybrid » où « soft hybrid », ce niveau d'hybridation s'apparente aux véhicules ayant la fonctionnalité « Stop GO » appelé aussi « Stop&Start ».

La caractéristique principale du « micro hybrid » est que l'ancien alternateur et démarreur du véhicule forment maintenant un seul moteur électrique appelé alterno-démarreur, capable de remplir les deux fonctions, celles de démarrer le moteur thermique et de charger la batterie. Cette configuration permet également de remplir la fonction « stop GO » représentant le premier niveau d'hybridation. Ainsi, les véhicules qui en sont équipés se mettent en « veille » dès que la vitesse tombe au-dessous de 6 km/h, i.e. à l'approche d'un feu rouge ou dans un embouteillage. Au démarrage, le moteur repart automatiquement dès que le conducteur relâche la pédale de frein. Autre avantage, même si la traction est réalisée complètement par le moteur thermique la configuration « micro » permet de courtes périodes d'accélération où le moteur électrique intervient pour aider le moteur thermique.

II.6.2.2 Hybride *« full » :*

Le « full hybrid » est équipé d'un moteur thermique et d'un moteur électrique d'une puissance relativement équivalente. Ainsi, par rapport à la configuration « mild » le moteur électrique augmente en importance, le moteur thermique pouvant être diminué de taille, fait connu sous le nom de « downsizing ». La batterie devient aussi plus grande et permet grâce au moteur électrique d'entraîner le véhicule en fonctionnement tout électrique (zéro émission). Ce mode de fonctionnement peut être sous le contrôle de la gestion électronique du véhicule ou sous le contrôle direct du conducteur. Dans le premier cas, le fonctionnement tout électrique couvre des distances courtes aux vitesses faibles, laissant la priorité à l'essence sur route ou quand la circulation est fluide. Dans le deuxième cas, le conducteur peut choisir un mode tout électrique pour des distances plus longues (20 km ou plus), en général compatibles avec l'usage urbain. Le contrôle de tel système est complexe, mais l'amélioration du rendement global entraîne une diminution de consommation de 40% à 45%.

La variété des modes de fonctionnement d'un véhicule « full hybrid », procure une importante flexibilité dans la gestion énergétique. La Figure (II.9) présente une gestion d'énergie sur un VH où la

puissance instantanée est décomposée en puissance moyenne et dynamique. Cette décomposition s'accorde avec la théorie des « 3E » (ΣE = EP + Et + Ei) qui divise la fourniture d'énergie en trois catégories : l'énergie permanente (Ep), transitoire (Et) et impulsionnelle (Ei).

Il énergétique du système entier. Dans ce sens, la puissance totale de la charge est fournie par deux types de sources différentes. Ainsi, l'énergie thermique provenant est donc avantageux d'optimiser la liaison source et consommation afin d'améliorer l'efficacité d'un moteur thermique est bien adaptée pour fournir l'énergie permanente, tandis que l'énergie électrique est bien adaptée pour fournir la puissance dynamique à travers le moteur électrique alimenté par une batterie ou un super condensateur.[5]

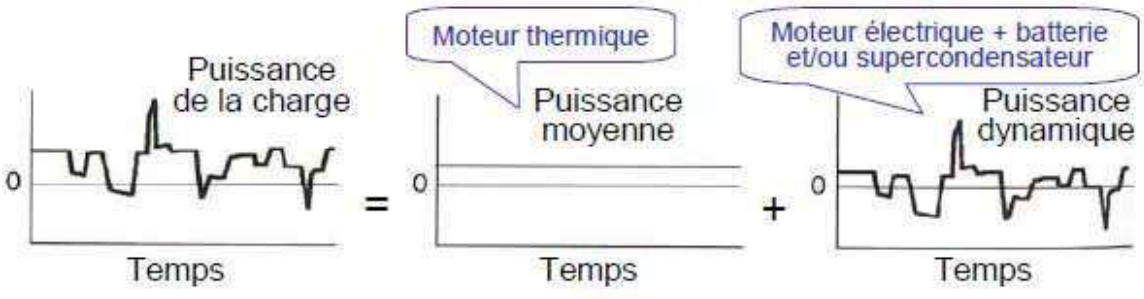


Figure II- 9 La puissance de la charge décomposée en deux composantes : moyenne et dynamique.

II.6.3. Architecture des véhicules hybrides :

Les principales architectures pouvant constituer le « full hybrid» sont détaillées ci-après en commençant avec les architectures classiques, hybride série et parallèle, et en terminant avec l'hybride série/parallèle et l'hybride complexe, combinaison des deux précédentes.

II.6.3.1. Hybride Série :

La configuration série, présentée sur la Figure (II.10), peut être vue comme étant un VE assisté par un moteur thermique. Elle a l'avantage d'être la configuration hybride la plus simple mais aussi l'inconvénient d'avoir trois machines alors qu'il n'y a qu'un seul moteur fournissant la puissance de propulsion

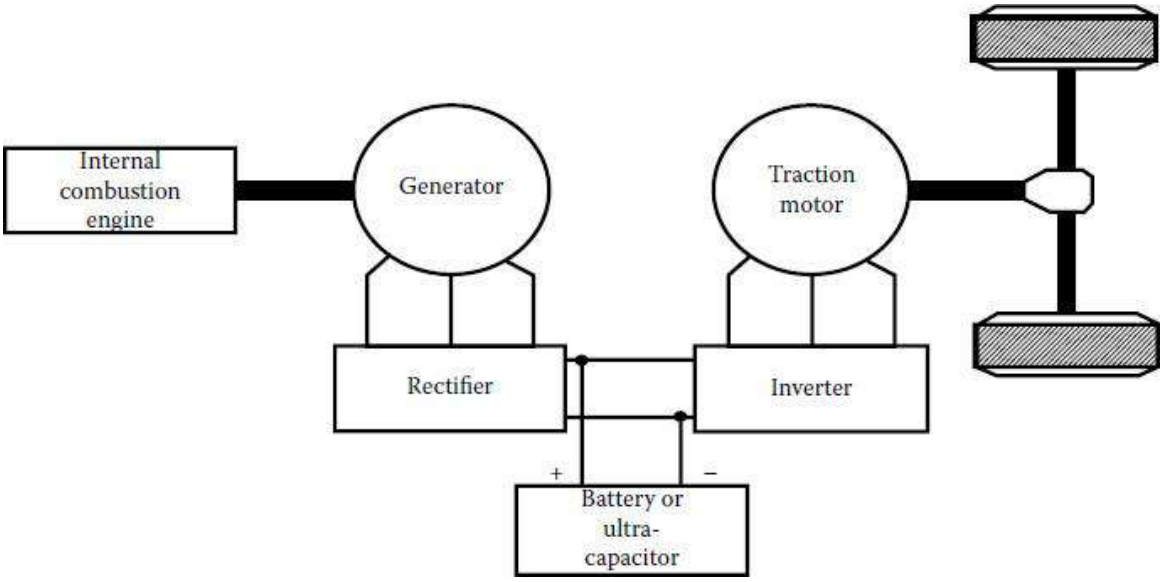


Figure II- 10 Chaîne de traction hybride série.

Le moteur thermique entraîne une génératrice pour produire de l'énergie afin d'assurer l'autonomie du véhicule. L'énergie générée par la génératrice peut charger la batterie ou alimenter directement le moteur électrique afin de propulser la voiture. Le désavantage principal de cette solution est la présence de 3 moteurs devant être surdimensionnés sur parcours sévères. En général, la solution est adaptée pour les véhicules lourds comme les bus. [9]

II.6.3.2 Hybride Parallèle :

L'hybride parallèle (ou dual) est caractérisé par deux motorisations assurant la propulsion. Comme présenté sur la Figure (II.11), le moteur thermique et le moteur électrique sont placés en parallèle et sont liés mécaniquement afin que chacun puisse propulser la voiture indépendamment ou simultanément. L'hybride parallèle est plutôt un véhicule thermique assisté par un moteur électrique afin de réduire les émissions du moteur thermique et d'optimiser la consommation de carburant. Le moteur électrique peut être utilisé comme génératrice pour charger la batterie à partir du moteur thermique ou lorsque le véhicule est en régime de freinage. Le désavantage provient de la complexité du contrôle mais aussi du dispositif mécanique liant les deux moteurs. L'avantage, par rapport à la configuration série, est que cette solution nécessite seulement deux moteurs de plus petite taille car tous deux participent à la traction. L'ensemble est donc plus compact que l'hybride série.

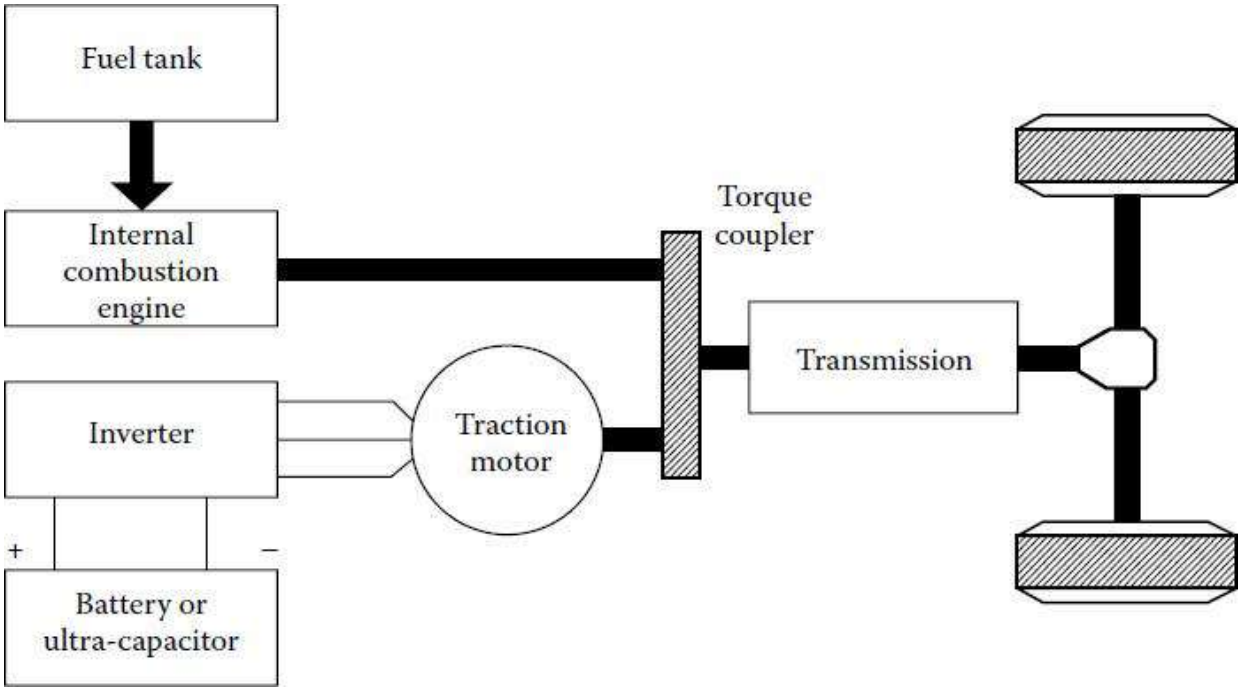


Figure II- 11 Chaîne de traction hybride parallèle .

II.6.3.3 Hybride Série/Parallèle :

A partir de ces deux configurations de base, d'autres configurations ont été réalisées. La combinaison la plus simple est l'hybride série/parallèle, présenté sur la Figure (II.12), rassemblant les deux configurations classiques dans une solution qui incorpore les avantages des VH série et des VH parallèle.

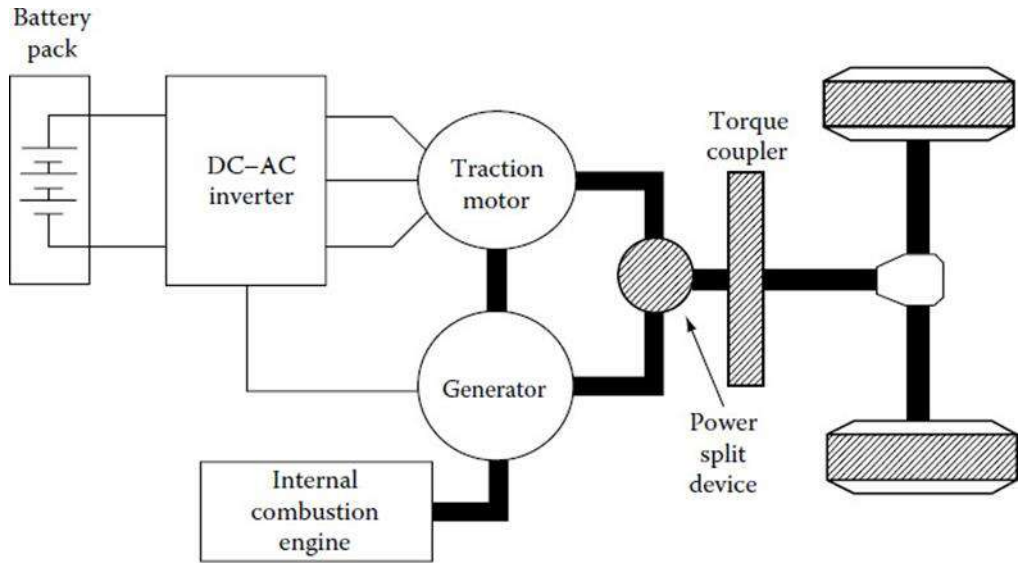


Figure II- 12 Chaîne de traction hybride série/parallèle.

Une comparaison faite par Toyota entre les trois configurations d'hybride décrites ci-dessus est présentée dans le Tableau (II.13) Ce dernier met en évidence l'élimination des désavantages des configurations série et parallèle dans la configuration série/parallèle.

	Economie de carburant				Performances	
	Arrêt	Récupération d'énergie	Gestion de l'énergie	Rendement total	Accélération	Régime permanent
Série	●	◎	●	●	○	○
Parallèle	●	●	○	●	●	○
Série/Parallèle	◎	◎	◎	◎	●	●

◎ Excellent ● Supérieur ○ Défavorable

Tableau II.1 : comparaison entre la configuration série, parallèle et série /parallèle (source Toyota)

II.6.3.4 Hybride complexe :

La possibilité d'agencer les éléments dans une chaîne de traction hybride reste ouverte, d'autres possibilités de configurations peuvent encore apparaître. Un autre exemple de chaîne de traction hybride qui n'est pas inclus dans les configurations mentionnées est l'hybride complexe. La différence est située au niveau de la génératrice, qui dans le cas de l'hybride complexe peut également fonctionner en moteur avec la possibilité de participer à la traction. Cette configuration peut être appliquée pour entraîner les deux essieux, comme présenté sur la Figure (II.13).

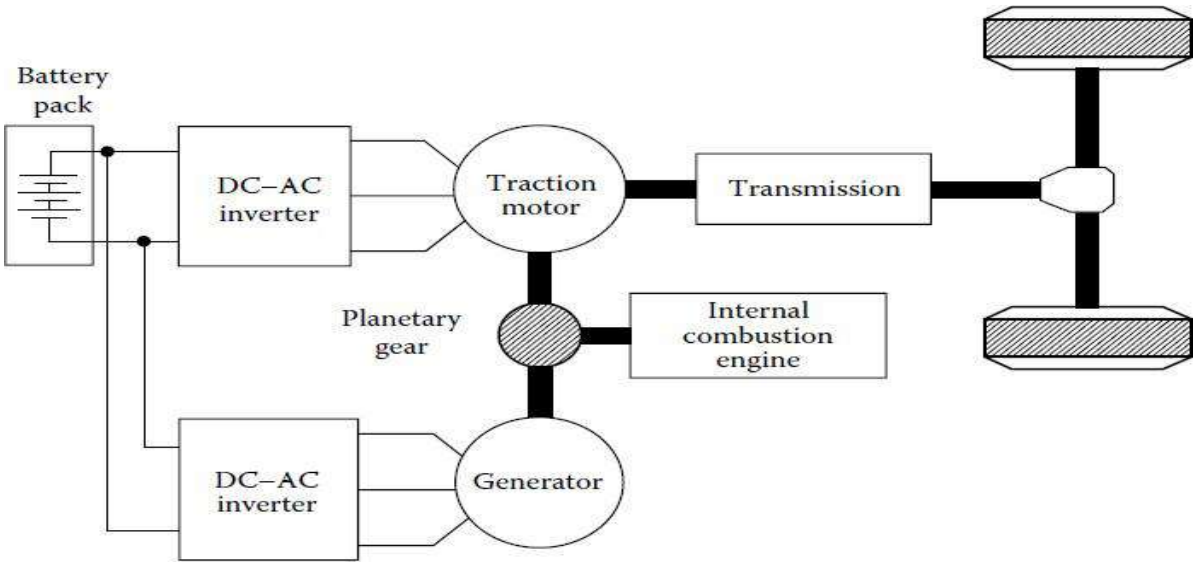


Figure II- 13 Chaîne de traction hybride complexe.

Cette configuration présentée sur la Figure (II.14), représentant le premier système hybride à quatre roue motrices, lancé en 2001 sur le marché japonais. Il consomme 5,6 litres d'essence aux

100 km (sur cycle japonais à 100 km/h), soit deux fois moins que la limite imposée par le gouvernement japonais pour un véhicule de cette catégorie pour 2010. Le véhicule bénéficie d'une autonomie d'environ 1000 km et d'un niveau d'émissions de plus de 75 % inférieur au seuil spécifié par les dernières réglementations.

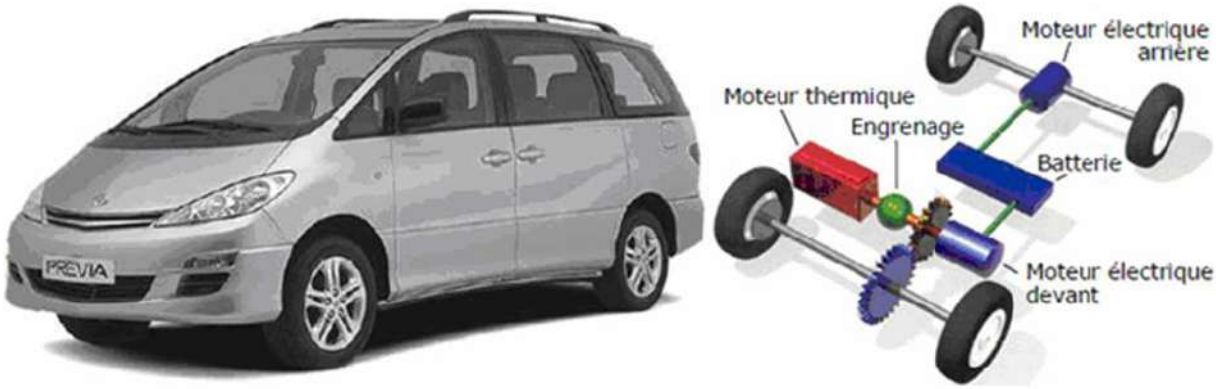


Figure II- 14 véhicule hybride complexe.

II.7. Configuration des véhicules électriques hybrides à pile à combustible :

Dans ce cas, la seule source d'énergie à bord est composée d'une pile à combustible alimentée par un réservoir d'hydrogène installé à l'intérieur du véhicule.

La contrainte principale qui limite l'utilisation d'une pile à combustible seule en tant que source principale dans un système d'alimentation de véhicule électrique réside dans le fait qu'un système de PàC ne peut pas supporter des dynamiques élevées telles qu'exigées par la dynamique du véhicule [2, 4, 29-30]. Cette contrainte s'avère cruciale sur le choix de l'architecture globale du système d'alimentation et sur la gestion d'énergie et de puissance qui lui est associée. La plus ou moins bonne prise. En compte de cette contrainte a des répercussions sur d'autres facteurs fondamentaux comme : la durée de vie, la continuité de service, la fiabilité, l'efficacité énergétique. ..etc. En effet, la valeur de ces indicateurs de performance dépend essentiellement de la dynamique à laquelle on sollicite la P à C et le niveau de la demande.

Afin de protéger la pile à combustible, il convient donc de lui adjoindre une deuxième source "auxiliaire", pour obtenir ainsi une source électrique hybride, d'où l'appellation d'un véhicule électrique hybride à pile à combustible. Le but de cette source auxiliaire est de soulager la PàC en lui évitant de répondre aux transitoires rapides. Les gains espérés sont donc en premier lieu une économie de combustible et une durée de vie importante pour le système de PàC. Aussi, cette source d'assistance doit satisfaire à quelques critères, à savoir : une densité de puissance élevée, un bon rendement Sur un cycle pour ne pas compromettre les performances du système, un coût moindre, un poids et un volume réduits afin de ne pas augmenter la taille et le prix du système complet et également nécessiter une légère maintenance pour des questions de coût, de continuité de service et de fiabilité [10, 11, 12-13].

La source auxiliaire (SA) peut être n'importe quel élément de stockage d'énergie électrique (batterie, super condensateur 'I SC", volant d'inertie ...etc.). Par conséquent, il existe plusieurs configurations des véhicules électriques hybrides à piles à combustible, cette thèse se limite aux structures utilisant une pile à combustible (PàC) comme source d'énergie principale, assistée d'une source d'énergie impulsionnelle réversible à base de super condensateurs (SCs).

La gestion d'énergie de la source hybride a pour objectifs majeurs : le respect de la dynamique

de la pile à combustible (qui est limitée principalement par le temps de réponse du compresseur d'air), de contrôler l'état de charge dy dispositif de stockage et d'apporter ou d'absorber la puissance exigée par la charge.Dans la littérature, on rencontre principalement trois types différents de structures hybrides (PàC / SCs) : la structure directe, la structure à un convertisseur et la structure à deux convertisseurs [10, 11, 12-13]. Ces structures vont être décrites dans les paragraphes suivants.

II.7.1. Structure directe :

La structure directe consiste à interconnecter chaque source directement à la charge via le Bus continu (FigureII.15).

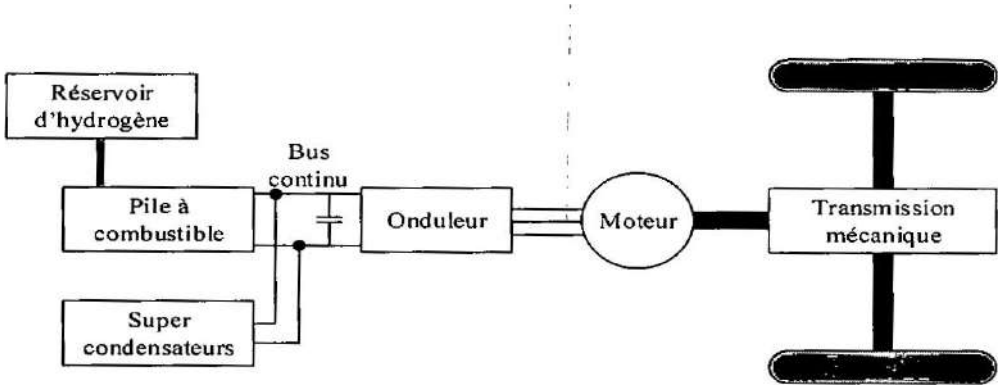


Figure II- 15 Structure PàC / SC directe.

En régime permanent, la pile fournit la puissance nécessaire à la charge, en même temps le banc de super condensateurs se charge à la valeur de tension résultant de ce point de fonctionnement. En régime transitoire, le principe consister à profiter de la différence entre la valeur de la tension de la pile et celle du super condensateur ainsi que de leurs constantes de temps; le but est que les courants transitoires de la charge circulent préférentiellement dans les super condensateurs plutôt que dans la pile à combustible. Pour rendre la solution intéressante, il faut donc que, dans la gamme des fréquences visées (des centaines de mHz jusqu'aux hautes fréquences), l'impédance du banc de super condensateur soit nettement inférieure à celle de la pile

Parmi les avantages du la structure directe nous citons :

- Les SCS permettent une circulation réversible de la puissance.
- Sa structure simple permet l'association de deux sources hybrides (PàC — SC) sans aucune gestion d'énergie.

Parmi les inconvénients du la structure directe nous citons :

- Le dimensionnement des SCS est fortement couplé à celui de la PàC (en plus du cahier des charges fixé par la source).
- Les transitoires de la charge peuvent être transmis partiellement à la PàC.
- Les SCS sont surdimensionnés, ce qui provoque un excès dans le volume, le poids et le coût du véhicule.
- La charge doit supporter les variations de tension de la PàC.

II.7.2 Structure à un convertisseur :

Cette structure consiste à connecter directement la PàC à la charge en utilisant un seul convertisseur bidirectionnel « d'interface » pour régler les puissances. Ce convertisseur n'est utilisé que de manière intermittente, puisqu'il assure l'adaptation des grandeurs électriques (tension / courant) entre les SCS et la charge Figure (II.16) [10, 11, 12-].

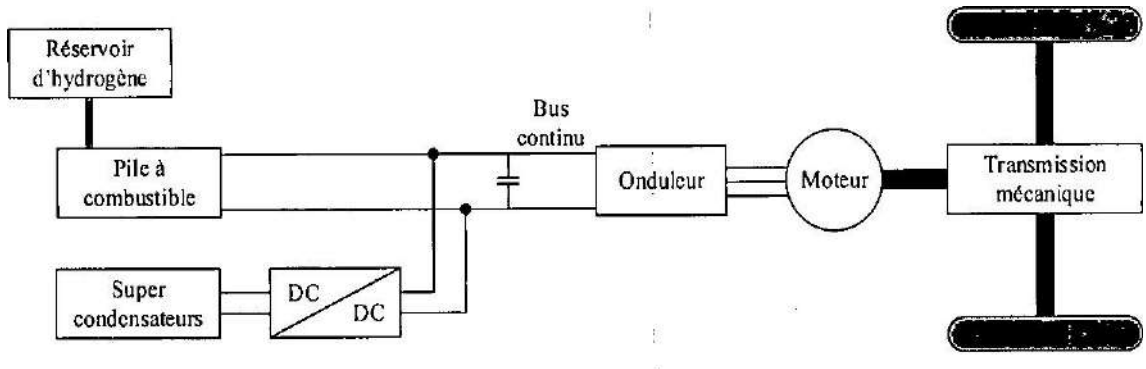


Figure II- 16 Structure parallèle PàC /SCs à un convertisseur.

Ses avantages principaux sont la simplicité ainsi que la réduction des pertes et des coûts liés aux interfaces de gestion de puissance (convertisseurs statiques).

Techniquement, nous pouvons énumérer les avantages suivants :

- Les SCS permettent une circulation réversible de la puissance.
- Structure relativement simple.
- Découplage fort des caractéristiques des SCS eticelles de la PàC.
- Maîtrise potentiellement parfaite de la répartition de puissance.

Parmi les inconvénients du la structure directe nous citons :

- La charge doit supporter les variations de tension de la PàC.
- Contrôle et gestion d'énergie complexe

II.7.3 Structure à deux convertisseurs :

Cette structure consiste à associer à chaque source un convertisseur statique (FigureII.18)

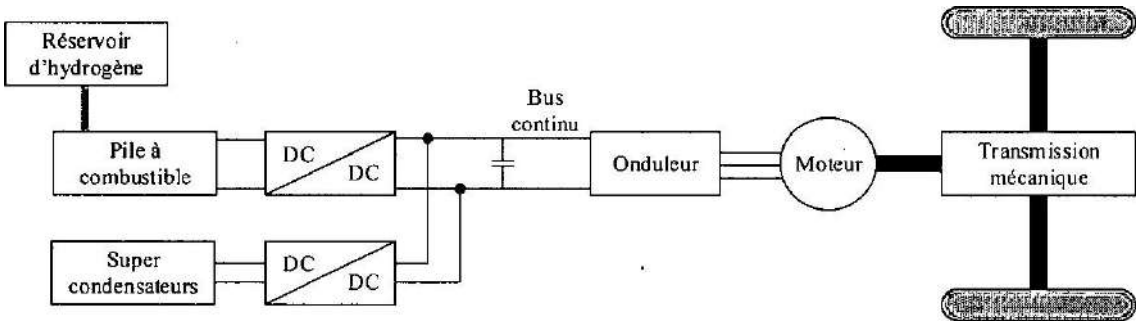


Figure II- 17 Structure PàC /SCs à deux convertisseurs.

Le convertisseur dédié à la PàC est unidirectionnel en puissance et fonctionne en mode élévateur de tension. Le convertisseur connecté aux SCS fonctionne en survolteur lorsque ceux-ci fournissent transitoirement une partie de la puissance motrice, et opère en dévolteur lorsque les SCS récupèrent l'énergie de freinage ou lorsqu'ils sont chargés par la PàC. Cette structure permet de maîtriser parfaitement la puissance de chaque source.

Malgré le fait que dans cette configuration, oh est obligé d'utiliser deux convertisseurs statiques, il y a deux avantages principaux : on peut maintenir constante la tension du Bus continu pour obtenir un bon réglage de vitesse du moteur d'entraînement en plus d'une bonne maîtrise de la gestion d'énergie entre la PàC et les SCs.

Nous rappelons les exigences d'un bon fonctionnement du système hybride comme suite :

- Soulagement du stress de la PàC lors des régimes transitoires.
- Satisfaction de la demande en énergie en régime permanent et en régime transitoire avec une bonne gestion des deux sources.

- Récupération de l'énergie de freinage.

Par conséquent, les architectures données en figures (II.17) et 1.9 ne peuvent pas répondre convenablement à ces exigences vu leurs limites, contrairement à la configuration donnée en figure 1.10 qui peut parfaitement répondre à ces exigences. En effet, elle permet d'ajuster et de régler la tension aux bornes de la capacité du Büs continu à une valeur désirée constante pour atteindre la tension nominale du moteur électrique en plus de la récupération de l'énergie de freinage avec une gestion flexible de l'énergie entre les deux sources. Pour ces raisons, nous adoptons cette configuration dans la suite des travaux de cette thèse.

II.7. Conclusion :

Les véhicules électriques semblent être la bonne solution en termes de transport au problème d'émissions des gaz à effet de serre et de l'épuisement des ressources fossiles. En effet, le véhicule électrique ne dépend pas nécessairement du pétrole et ne libère pas de gaz à effet de serre. De plus, il possède de nombreux avantages : il est silencieux, sans pollution environnementale locale, sans consommation à l'arrêt et avec un bon rendement énergétique global. Le VE à moteur-roue représente une solution très avantageuse avec une simplification considérable de la chaîne de traction laissant plus d'espace aux batteries. Cependant, le VE souffre de performances faibles dues au problème de stockage de l'énergie électrique dans des batteries et d'un temps de recharge élevé. Ainsi, le concept de VE a été mis en veille par la plupart des constructeurs qui investissent plutôt dans des solutions à piles à combustibles (FCV) et véhicules hybrides (VH).

Le véhicule hybride (VH) commence déjà à apparaître sur le marché. Il représente un compromis entre les véhicules actuels et le VE, et bénéficie donc en partie de l'avantage de la traction électrique sans avoir les limitations des VE.

Chapitre III

Contrôle des systèmes de production

Décentralisée de

piles à combustible PEM

Chapitre III : Contrôle des systèmes de production Décentralisée de piles à combustible PEM

III.1. Introduction :

La consommation d'énergie est toujours croissante et la sensibilisation croissante du public à la protection de l'environnement ont suscité un intérêt accru pour les systèmes de production d'électricité écologiques (c.-à-d. renouvelables et à base de piles à combustible). De plus, en raison des progrès constants de la déréglementation de l'électricité et de la restructuration des services publics et des contraintes strictes imposées à la construction de nouvelles lignes de transport d'électricité pour le transport d'électricité à longue distance, l'intérêt pour la production décentralisée (DG) les systèmes installés à proximité des centres de chargement augmentent.

Les piles à combustible sont des dispositifs de conversion d'énergie statique qui convertissent l'énergie chimique du combustible directement en énergie électrique. Ils sont très prometteurs pour être une source importante de DG de l'avenir en raison de leurs nombreux avantages, tels que la haute efficacité, zéro ou faible émission (de gaz polluants), et la structure modulaire flexible. Les systèmes de MD à pile à combustible peuvent être placés stratégiquement à n'importe quel emplacement d'un système d'alimentation (normalement au niveau de la distribution) pour renforcer le réseau, ce qui retarde ou élimine la nécessité de mettre à niveau le système et d'améliorer l'intégrité, la fiabilité et l'efficacité du système. Lorsqu'ils sont raccordés à un réseau de services publics, des exigences importantes en matière de fonctionnement et de rendement sont imposées aux systèmes de DG des piles à combustible. Par exemple, ils devraient être en mesure de fournir une quantité prédéfinie de puissance réelle et réactive au réseau ou de suivre un profil de charge variable dans le temps [14], [15], [16]. Par conséquent, les régulateurs appropriés doivent être conçus pour un système de DG à pile à combustible afin d'obtenir les caractéristiques de rendement souhaitées. Plusieurs types de piles à combustible, de piles à combustible à membrane de changement de protonexe (PEMFC), de piles à combustible à oxyde solide (SOFC) et de piles à combustible à carbonate fondu (MCFC) sont susceptibles d'être utilisés dans les applications de DG. Pour étudier les caractéristiques de rendement des systèmes de DG à pile à combustible, il faut des modèles précis de piles à combustible [17] – [18]. En outre, des modèles de circuits électroniques de puissance d'interface dans un système de DG à pile à combustible sont également nécessaires pour concevoir des contrôleurs pour l'ensemble du système afin d'améliorer ses performances et de répondre à certaines exigences opérationnelles.

Ces aperçus présentent la configuration et le contrôle du système PEMFCDG avec une capacité de contrôle de puissance réelle et réactive. La centrale à pile à combustible est connectée au réseau électrique par l'intermédiaire de convertisseurs DC/DC et d'un onduleur à modulation pulsée (PWM) triphasé. Un modèle dynamique PEMFC validé, présenté dans [], est utilisé dans le présent document. Les modèles pour le convertisseur Boost dc/dc et l'onduleur triphasé avec un filtre LC et des lignes de

transmission sont également abordés. Les méthodologies de conception des contrôleurs pour les convertisseurs cc/cc et l'onduleur triphasé sont également présentées pour le système de DG de pile à combustible proposé. Basé sur les modèles de composants individuels développés et les contrôleurs conçus, un modèle de simulation du système PEMFC DG a été construit dans MATLAB/Simulink en utilisant SimPowerSystems block-set. Les résultats de la simulation montrent que la puissance réelle et réactive du système de DG de la pile à combustible au réseau électrique peut être contrôlée au besoin. Les résultats montrent également que le système de DG la pile à combustible est capable de suivre la charge et de demeurer stable en cas de graves pannes électriques.

III.2. Description du système :

Pour répondre aux exigences opérationnelles du système, un système de DG à pile à combustible doit être relié par un ensemble de dispositifs électroniques d'alimentation. L'interface est très importante pour le fonctionnement du système de piles à combustible et du réseau électrique. Divers circuits électroniques d'alimentation ont été proposés dans le cadre de travaux récents pour relier différentes sources d'énergie au réseau de services publics [19]-[20]. Les onduleurs de source de tension à modulation de largeur d'impulsion (VSI) sont largement utilisés pour interconnecter un système d'énergie de pile à combustible à un réseau de services publics à des fins de contrôle de puissance réelle et réactive [19], [21], [22], [20]. En outre, les systèmes à pile à combustible ont normalement besoin de convertisseurs dc/dc pour adapter la tension de sortie de la pile à combustible à la tension d'entrée souhaitée de l'onduleur et lisser le courant de sortie de la pile à combustible [23], [24].

La figure 1 montre le schéma du système de DG à pile à combustible proposé dans le présent document. Les valeurs nominales et les paramètres de configuration du système sont présentés dans le tableau I. La centrale PEMFC se compose de dix réseaux de piles à combustible raccordés en parallèle.

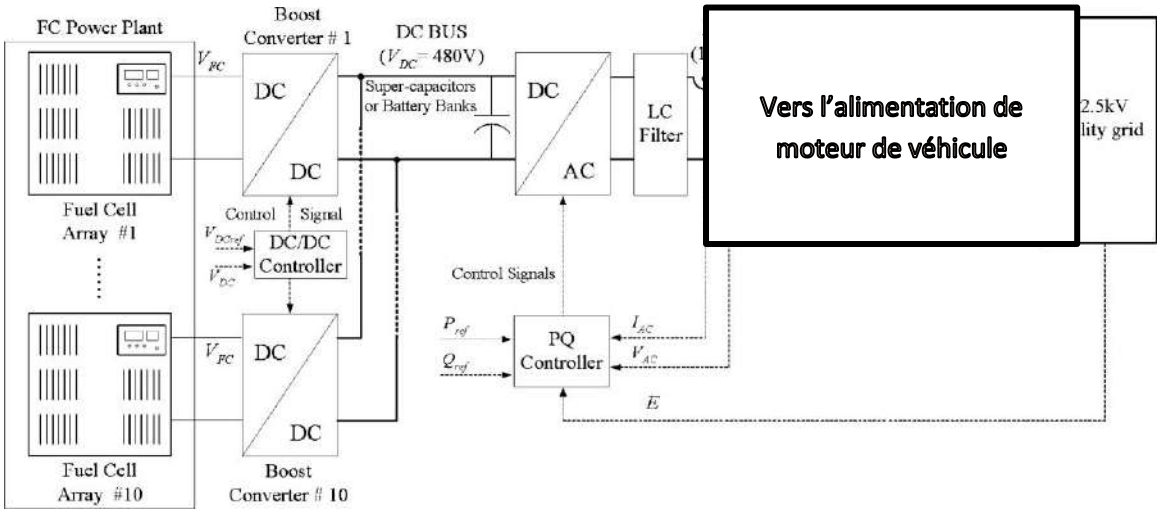


Figure III- 1 Schéma fonctionnel d'un système de production décentralisée de piles à combustible .

PEMFC centrale électrique	**216v/480kw Dix 48-kw FC réseaux sont connectés en parallèle**
PEMFC réseau	216v/480kw, composé de 8 (séries)x12(parallèle) 500-w empilements de piles à combustible
Convertisseur dc/dc élévateur	200V/480V, chacun 50 kw . 10 unités connectées en parallèle.
3-phase dc/ac onduleur	480V dc/208V ac, 500kw
LC Filtre	Lf = 0.15mH, Cf = 306.5µF
Transformateur élévateur	V_a = 208V /12.5kv, S_n = 500kw R_1 - R_2 - 0. $005_{p.u}$, X_1 - X_2 - $0.025_{p.u}$
Inducteur de couplage	Xc = 50 Ω
Ligne de transmission	0.5 km ACSR 6/0 R = 2.149 Ω/km , X = 0.5085 Ω/km
DC tension de bus	480V
AC tension de bus	120V/208V

Tableau III.1 Paramètres de configuration du système proposé

Chaque tableau Est nominale à 48 kW, pour un total de 480 kW. Un convertisseur d'appoint est utilisé pour adapter la tension de sortie de chaque réseau de piles à combustible au courant continu tension du bus. Dans cet article, la tension du bus DC (convertisseur DC/DC sortie) est choisi comme VDC = 480 V, qui est principalement déterminé par la tension de sortie AC de l'onduleur et la chute de tension sur le filtre LC. L'équation suivante devrait être satisfaite entre les tensions côté DC et côté AC de l'onduleur [22] :

$$\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} m_\alpha V_{DC} \geq \sqrt{(V_{AC.LL})^2 + 3\left(\omega L_f I_{max}\right)^2} \qquad \text{(III.1)}$$

où VDC est la tension du bus DC, VAC,LL est la ligne de ligne AC rms tension, Lf est l'inductance du filtre, Imax est la moyenne de la racine valeur carrée (rms) du courant alternatif maximal (IAC), et ma est l'indice de modulation de l'onduleur. PWM linéaire est utilisé pour l'onduleur, c'est-à-dire ma ≤ 1.0, dans ce document. Pour un convertisseur de suralimentation, plus le rapport de la différence de tension entre l'entrée et la sortie), la plus faible est l'efficacité [20]. Dans ce document un rapport de droit autour 55 % est utilisé pour le convertisseur DC/DC au fonctionnement nominal de la pile à combustible.

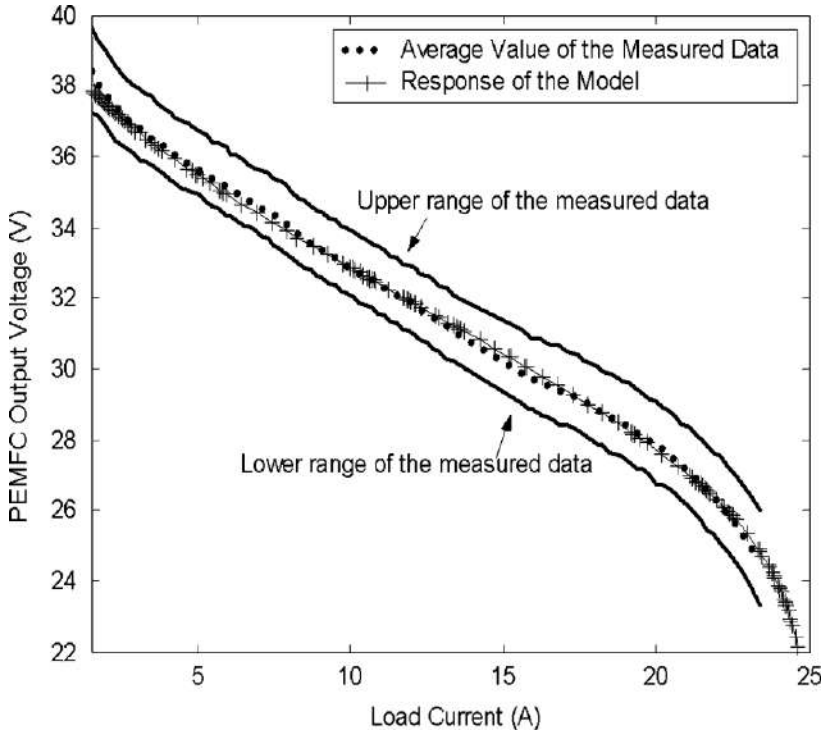


Figure III- 2 Caractéristique PEMFC V –I : Comparaison de la réponse du modèle avec les données ex péri mentales .

La tension d'entrée approximative souhaitée pour le convertisseur DC/DC est de [(1 0,55) VDC = 216 V]. Selon les caractéristiques de la tension de sortie par rapport au courant de charge (V –I) du PEMFC, données à la figure 2, lorsque son courant de charge est supérieur à 23 A, la pile à combustible est dans la zone de concentration, ce qui devrait être évité [25], [26]. Pour laisser une marge de sécurité, le carburant cellule est actionnée autour du point où son courant est de 20 A (nominale point de fonctionnement) et sa tension de sortie (VFC, cellule) est d'environ 27 V. Par conséquent, le nombre de piles à combustible que nous devons raccorder une série pour obtenir une tension de 216 V est :

$$\text{Ns} = \frac{V_{FC}}{V_{FC.CELL}} = \frac{216}{27} = 8 \qquad \text{(III.2)}$$

Le nombre de piles de série de piles à combustible nécessaires pour composer un réseau de piles à combustible de 48 kW est :

$$N_p = \frac{P_{réseau}}{N_s \times P_{pile}} = \frac{48KW}{8 \times 0.5\ \text{kW}} = 12 \quad \text{(III.3)}$$

Par conséquent, chaque réseau de piles à combustible est composé de 8×12 piles d'une puissance nominale de 48 kW.

Les supercondensateurs ou les batteries sont connectés au bus DC. pour fournir une capacité de stockage et une réponse dynamique rapide à la charge transitoires. Un onduleur triphasé à six switch avec un système d'alimentation 120 V/208 V ac. Un filtre LC est connecté à la sortie de l'onduleur pour réduire les harmoniques introduites par l'onduleur. Un transformateur élévateur 208 V/12,5 kV connecte le système d'alimentation électrique de la pile à combustible au réseau de services publics par un couplage inducteur et une ligne de transmission courte. L'inducteur de couplage est nécessaire pour contrôler le flux de puissance réel et réactif entre le système de DG des piles à combustible et le réseau de services publics et pour limiter les perturbations et les courants de défaut.

Les régulateurs des convertisseurs boost dc/dc sont conçus pour maintenir la tension du bus dc dans une fourchette acceptable (5 % dans ce papier). Par conséquent, l'entrée de l'onduleur triphasé peut être considéré comme une source de tension constante assez bonne. L'onduleur contrôle les flux de puissance réels et réactifs vers l'utilitaire réseau. Les flux de puissance P, Q suivent leurs valeurs de référence respectives, qui peut être défini soit comme valeurs fixes, soit pour suivre une certaine demande de charge.

III.3. Modéles dynamiques pour PEMFC et dispositifes électroniques d'alimentation :

Cette section décrit les modèles dynamiques des principaux composants du système illustrés à la Figure.1, à savoir pour la centrale PEMFC, les convertisseurs dc/dc et l'onduleur triphasé.

III.3.1. Modèle dynamique pour la centrale PEMFC :

Les PEMFC, l'une des piles à combustible les plus développées, sont très prometteuses tant dans les applications de transport que dans les applications de production d'énergie stationnaire. Pour étudier les caractéristiques dynamiques d'une centrale électrique PEMFC soumise à des transitoires de charge, il est nécessaire d'utiliser un modèle PEMFC dynamique. Le modèle de centrale PEMFC utilisé dans cette étude est basé sur le modèle de cheminée PEMFC dynamique développé et validé dans [27]. Ce modèle physique utilise des circuits électriques équivalents pour représenter les phénomènes électrochimiques et thermodynamiques à l'intérieur du PEMFC. Le modèle a été validé par des données expérimentales mesurées à partir d'une pile SR-12 500-W PEMFC d'Avista Labs. Il s'agit d'un modèle autonome fonctionnant sous pression de canal constante sans contrôle du débit de carburant entrant dans le réservoir. Le réservoir de carburant ajuste le débit de carburant d'entrée en fonction de son courant de charge pour maintenir la pression du canal constante. La figure 2 montre la courbe caractéristique (V –I) du 500-W modèle PEMFC comparé aux données expérimentales [27]. Courbe caractéristique peut être divisée en trois régions. La volt- baisse de l'âge à travers la pile à combustible associée aux faibles courants est due à la perte d'activation à l'intérieur de la pile à combustible, la chute de tension i le milieu de la courbe (qui est approximativement linéaire) est dû à la perte ohmique dans la cheminée de la pile à combustible, et en conséquence de la perte de concentration, la tension de sortie à la fin de la courbe baissera fortement à mesure que le courant de charge augmente [25], [26]. La propriété dynamique de PEMFC dépend principalement des trois aspects : effets de charge double couche.

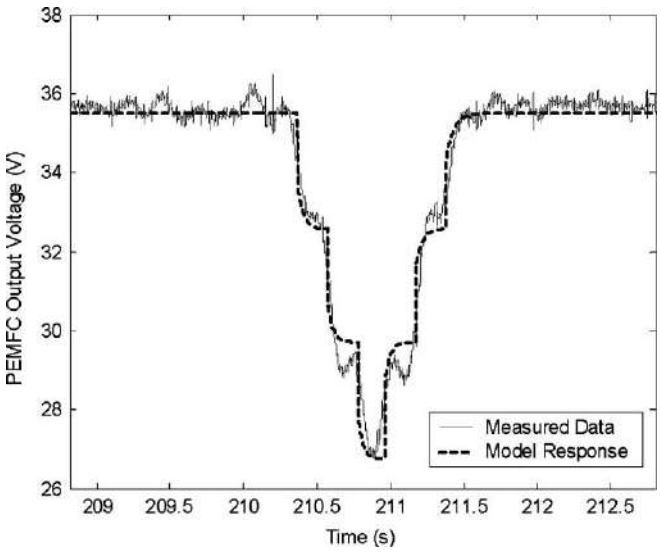


Figure III- 3 PEMFC réponse dynamique dans un court laps de temps : comparaison de la réponse du modèle avec des données expérimentales .

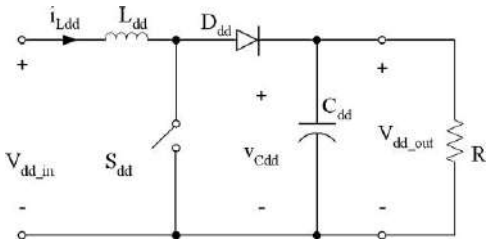


Figure III- 4 Convertisseur Boost dc/dc.

Les délais d'écoulement des oxydants et les caractéristiques thermodynamiques à l'intérieur de la pile à combustible. La réponse dynamique du PEMFC est dominée par les effets de charge à double couche dans la courte période (moins de 1 s) et par les retards d'écoulement du combustible et des oxydants et les caractéristiques thermodynamiques à l'intérieur de la pile à combustible dans la longue période (plusieurs minutes) [27], [26]. La réponse dynamique du modèle (tension de sortie de la pile à combustible par rapport au temps) aux variations de charge par paliers dans la courte période est illustrée à la figure 3. Il est noté à partir de cette figure que la réponse du modèle concorde bien avec les données mesurées. Pour plus de détails sur l'élaboration du modèle, le lecteur est invité à consulter [27].

III.3.2. Modèle d'espace d'état du convertisseur Boost dc/dc :

Un convertisseur DC/DC de suralimentation, illustré à la Fig. 4 [22], peut être utilisé pour convertir la tension de sortie de la pile à combustible à la tension de bus DC souhaitée. Une technique de calcul de la moyenne de l'espace d'État, proposée par Middle brook et Cuk [22], est largement utilisée pour développer des modèles d'espace d'État pour les convertisseurs. Le modèle d'espace

d'état du petit signal pour le convertisseur DC/DC de suralimentation peut alors être obtenu comme suit :

$$\tilde{x}' = A_d\tilde{x} + B_d d \qquad \text{(III.4)}$$

$$\tilde{v}_{dd\,\text{out}} = C_T\tilde{x} \qquad \text{(III.5)}$$

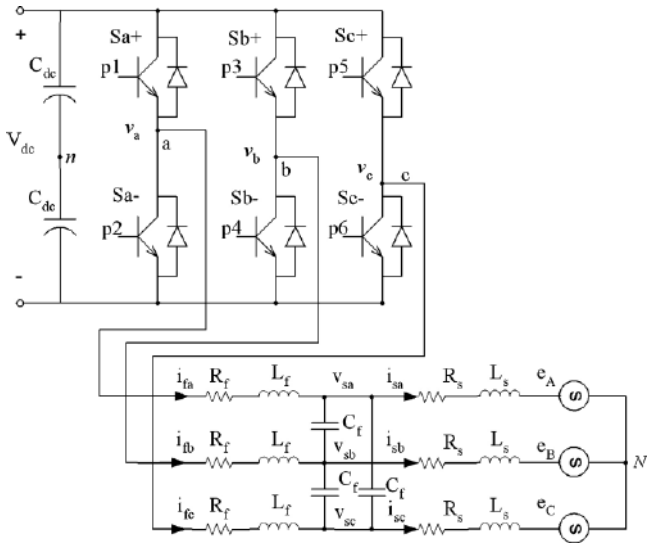


Figure III- 5 Onduleur de source de tension DC/AC triphasé.

Où :

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_{Ldd} \\ \tilde{v}_{cdd} \end{bmatrix}, A_d = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-(1-D)}{L_{dd}} \\ \frac{1-D}{C_{dd}} & \frac{-1}{RC_{dd}} \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} \frac{X_2}{L_{dd}} \\ \frac{-X_1}{C_{dd}} \end{bmatrix} \qquad \text{(III.6)}$$

Où CT = [0,1], X1, et X2 sont les valeurs d'état stable de x1 et x2 respectivement, et D est le rapport de service par impulsion au point de fonctionnement nominal. Le symbole " ~ " est utilisé pour désigner les petits signaux de perturbation.

III.3.3. Modèle d'espace d'état de l'onduleur triphasé :

Un PWM VSI triphasé à six commutateurs est utilisé pour convertir l'alimentation disponible au niveau du bus DC en alimentation AC La figure 5 montre le circuit principal de l'onduleur de la source de tension triphasée raccordé au réseau électrique par le filtre LC (Lf et Cf) et l'inducteur de filtre et de l'inducteur de couplage, respectivement. L'utilisation de la théorie de la circulation électrique de classe et de l'espace-états en utilisant la technique, ainsi qu'une description détaillée de l'espace-état du transformateur peut être obtenue [28], [29]. Cependant, le modèle détaillé de l'onduleur est trop compliqué pour être appliqué directement dans la conception du contrôleur. Une version simplifiée du

modèle d'onduleur, qui est utilisée dans le présent document pour concevoir les contrôleurs, est fournie en annexe.

III.4.Conception des contrôleurs pour les dispositifs électroniques d'alimentation :

Les figures 2 et 3 montrent que la tension de sortie d'une pile à combustible est fonction de la charge. Le convertisseur DC/DC de suralimentation adapte la tension de sortie de la pile à combustible à la tension du bus DC, et le contrôleur de tension aide à réguler la tension de sortie dans une plage de tolérance de 5 % en fonctionnement normal. Dans cette section, le contrôleur PI conventionnel est utilisé pour les convertisseurs boost DC/DC. En pratique, un contrôleur de partage de charge (non abordé dans le présent document) peut être appliqué sur les convertisseurs, connectés en parallèle, afin d'obtenir une répartition uniforme de la charge entre eux [30]. En outre, un schéma de contrôle du courant à deux boucles transformées en dq est présenté

L_{dd}	**1.2 mH**
C_{dd}	2500 µF
D_N	0.5833
R (charge équivalente)	4.608 Ω
X_1	250 A
X_2	480 V
K_{di}	20
K_{dp}	0.02

Tableau III.2. Paramètres du convertisseur boost dc/dc

pour que l'onduleur contrôle la puissance réelle et réactive livrée du système d'alimentation de la pile à combustible au réseau.

III.4.1. Conception du contrôleur pour le convertisseur Boost dc/dc :

Les principaux composants du convertisseur DC/DC peuvent être déterminés par les spécifications techniques prescrites, telles que la tension et le courant de crête, l'ondulation du courant d'entrée, l'ondulation de la tension de sortie, etc., en utilisant la procédure de conception classique du convertisseur DC/DC d'appoint [22], [20]. Les valeurs des composants du convertisseur DC/DC de 48 kW utilisés dans le présent document sont indiquées dans le tableau III.2 Basé sur le modèle de convertisseur de (5), un contrôleur de courant PI ($K_{dp} + K_{di}/s$) peut être conçu en utilisant la méthode classique Bode-plot et root-locus [31]. Les paramètres du contrôleur de tension PI sont également répertoriés dans le tableau III.2.

III.4.2. Conception du contrôleur pour la VSI triphasée :

Pour satisfaire aux exigences d'interconnexion d'un système de pile à combustible à un réseau de services publics et contrôler le flux de puissance réel et réactif entre eux, il est nécessaire de façonner et de contrôler la tension de sortie de l'onduleur en amplitude, angle et fréquence [32]. Dans cette section, un contrôleur PWM est conçu pour que l'onduleur satisfasse à la régulation de tension ainsi qu'au contrôle de puissance réel et réactif. La transformation dq transfère un système stationnaire (abc) à un système rotatif (dq0). la transformation diminue le nombre de variables de contrôle de 3 à 2 (la composante 0 sera zéro) si le système est équilibré. De plus, les signaux dq peuvent être utilisés pour atteindre le contrôle zéro erreur de suivi [29]. En raison de ces mérites, la transformation dq a été largement utilisée dans la commande de convertisseur/onduleur PWM et est également appliquée pour la commande de convertisseur dans ce document. Pour un système de DG à pile à combustible, il n'y a pas de flexibilité pour la fréquence de modulation du générateur PWM sinusoïdal (SPWM) pour l'onduleur – il doit suivre la fréquence du réseau auquel il est connecté. L'amplitude de la tension de sortie de l'onduleur peut avoir une tolérance de 5 % avec une valeur nominale de 1,0 p.u. [32], [33]. Par conséquent, l'angle de la tension de sortie sera contrôlé, ainsi qu'un réglage de magnitude de 5 %, pour obtenir un contrôle de puissance réel et réactif. Considérons une source de tension connectée à un réseau électrique par une impédance de couplage R + jX, comme le montre la Fig. 6. Les puissances réelles et réactives fournies à l'utilitaire.

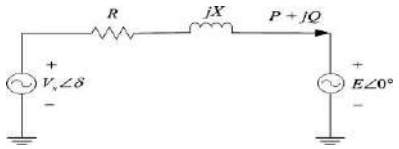


Figure III- 6 Flux d'alimentation entre une source de tension et un réseau électrique.

$$P = \frac{EV_S}{z}\cos(\theta_z - \delta) - \frac{E^2}{Z}\cos(\theta_z) \qquad \text{(III.6)}$$

$$Q = \frac{EV_S}{z}\sin(\theta_z - \delta) - \frac{E^2}{Z}\sin(\theta_z) \qquad \text{(III.7)}$$

Où $Z = \sqrt{R^{2+} X^2}$ et $\theta_z = \tan^{-1}(X/R)$ (III.8)

À partir de (5) et (6), il est clair que les puissances réelles et réactives fournies au réseau de distribution sont entièrement déterminées par l'amplitude et l'angle de la source de tension d'émission, c'est-à-dire la tension de sortie de l'onduleur. Toutefois, si les valeurs souhaitées de puissance réelle et réactive sont indiquées, les valeurs de Vs et δ peuvent être déterminées à partir de (5) et (6) :

$$V_s = \left[\frac{Z^2}{E^2}\left(P^2 + Q^2\right) + E^2 + 2PZ\cos(\theta_z) + 2QZ\sin(\theta_z)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \text{(III.9)}$$

$$\delta = \theta_z - \cos^{-1}\left(\frac{ZP}{EV_s} + \frac{E}{V_s}\cos(\theta_z)\right) \qquad \text{(III.10)}$$

Les valeurs de composant d_{q_0}correspondantes de V_s in (7) peuvent être obtenues par transformation abc/dq comme suit : où $T_{abc/dq}$est la matrice de transformation abc/dq. La méthodologie pour développer la transformation abc/dq est expliquée dans [34].Un schéma de commande consistant en un régulateur de tension externe avec une boucle de commande de courant interne, présenté dans [28], [29], a été adopté pour le contrôle de la source de tension triphasée. Le schéma fonctionnel global du système de commande de l'onduleur est donné à la Fig. 7. La boucle de commande de courant interne est conçue pour répondre plus rapidement que la boucle de commande de tension externe afin que les deux boucles de commande puissent être conçues indépendamment. En conséquence, lorsque nous traitons avec la boucle intérieure, nous prenons la boucle extérieure comme une entrée constante (c.-à-d.,$I_{d.q\,(ref)}$ est constante dans Fig. 7). La boucle de contrôle de courant interne (contenant le bloc de contrôleur de courant dans Fig. 7) peut être approchée comme bloc de décalage simple quand nous procédons avec la boucle extérieure. Les régulateurs de courant et de tension sont choisis comme compensateurs PI. Les procédures de conception classiques des régulateurs Bode-plot et root-locus PI [31] sont utilisées pour obtenir les paramètres des régulateurs de courant et de tension. Ces paramètres sont également énumérés en annexe.

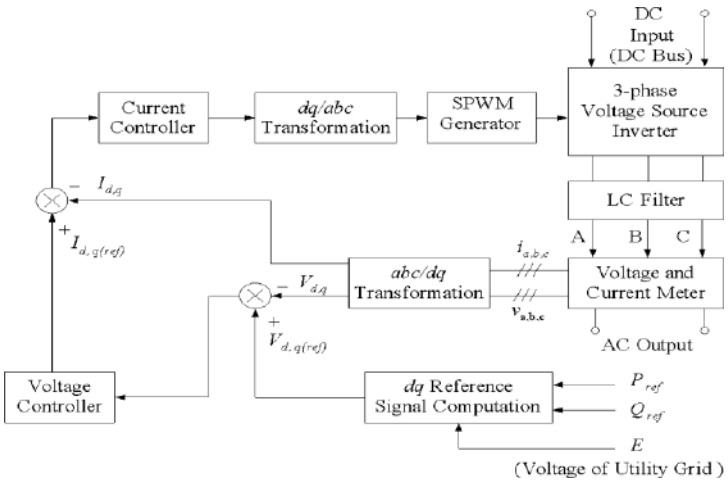


Figure III- 7 Schéma fonctionnel du système de commande global de l'onduleur.

Figure (III.7), le bloc de calcul du signal de référence d_q, qui est basé sur les équations (7) et (8), calcule la magnitude et angle des tensions de sortie filtrées de l'onduleur, puis les convertit en signaux de référence de tension $d_q$conformément à (10). Le bloc de transformation abc/d_q prend le courant et la tension les valeurs (en coordonnées abc) des tensiomètres et les convertit en valeurs d_q. Le contrôleur de tension externe prend les signaux d'erreur entre la tension de sortie réelle en dq image ($V_{d.q}$) et la tension de référence ($V_{d.q\ (ref)}$) et génère les signaux de référence actuels ($I_{d.q\ (ref)}$) pour la commande de courant boucle. Le contrôleur de courant interne produit les signaux de commande d_q, qui sont convertis en signaux de commande en coordonnées abc par le bloc de transformation d_q/abc . Ces signaux de commande sont utilisés pour moduler le générateur d'impulsions SPWM afin de produire les impulsions appropriées pour les commutateurs de l'onduleur Figure (III.5) , contrôler la tension de sortie de l'onduleur.

Les contrôleurs donnés dans cette section pour les convertisseurs électroniques de puissance sont conçus sur la base de modèles linéarisés à petits signaux. Conceptuellement, il n'y a aucune garantie que les contrôleurs conçus fonctionneront bien sur une large plage de fonctionnement en raison de la non-linéarité des appareils électroniques de puissance. Néanmoins, La majorité des régulateurs pour les dispositifs électroniques de puissance sont linéaires invariants dans le temps (LTI) qui sont conçus sur la base de modèles linéarisés. L'efficacité des contrôleurs LTI peut être vérifiée par des simulations sur des modèles plus détaillés (non linéaires) que les modèles linéarisés utilisés pour la conception initiale des contrôleurs [35].

Nous Ont vérifié la validité des schémas de contrôle proposés sur une large plage de fonctionnement au moyen de simulations sur des modèles convertisseur/onduleur non linéaires. Les résultats de la simulation seront discutés dans la section suivante.

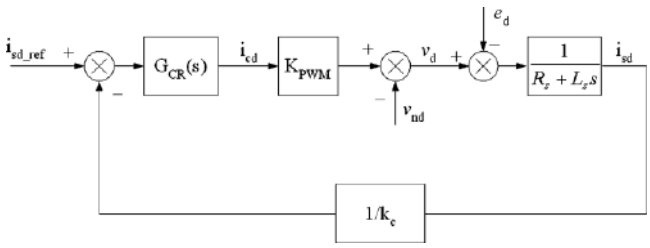


Figure III- 8 Schéma fonctionnel de la boucle de commande de courant de l'onduleur.

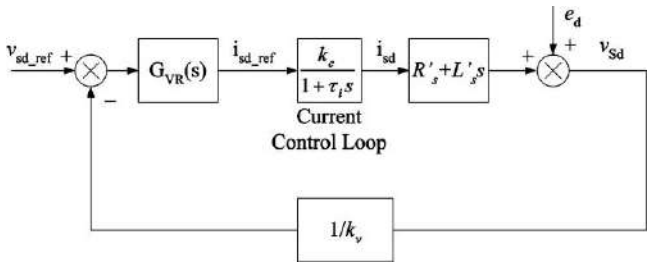


Figure III- 9 Schéma fonctionnel de la boucle de contrôle de la tension de l'onduleur.

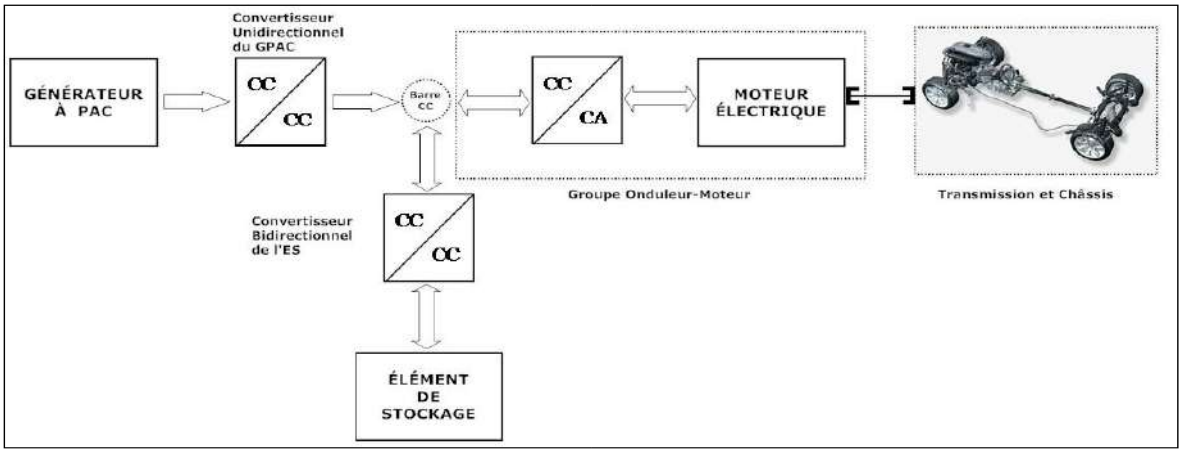


Figure III- 10 Architecture électrique du véhicule avec un convertisseur CC/CC pour chaque source d'énergie.

Le convertisseur de CC/CA transforme la puissance dans les bus CC en puissance CA vers le moteur électrique et permet de contrôler le couple de traction de celui-ci. De plus, il doit être réversible pour permettre de récupérer de l'énergie lors de freinages.

Les convertisseurs CC/CC contrôlent la distribution de la puissance entre la PAC et l'ES. Ils permettent d'adapter les tensions de la PAC et de l'ES au bus CC et de limiter leurs courants.

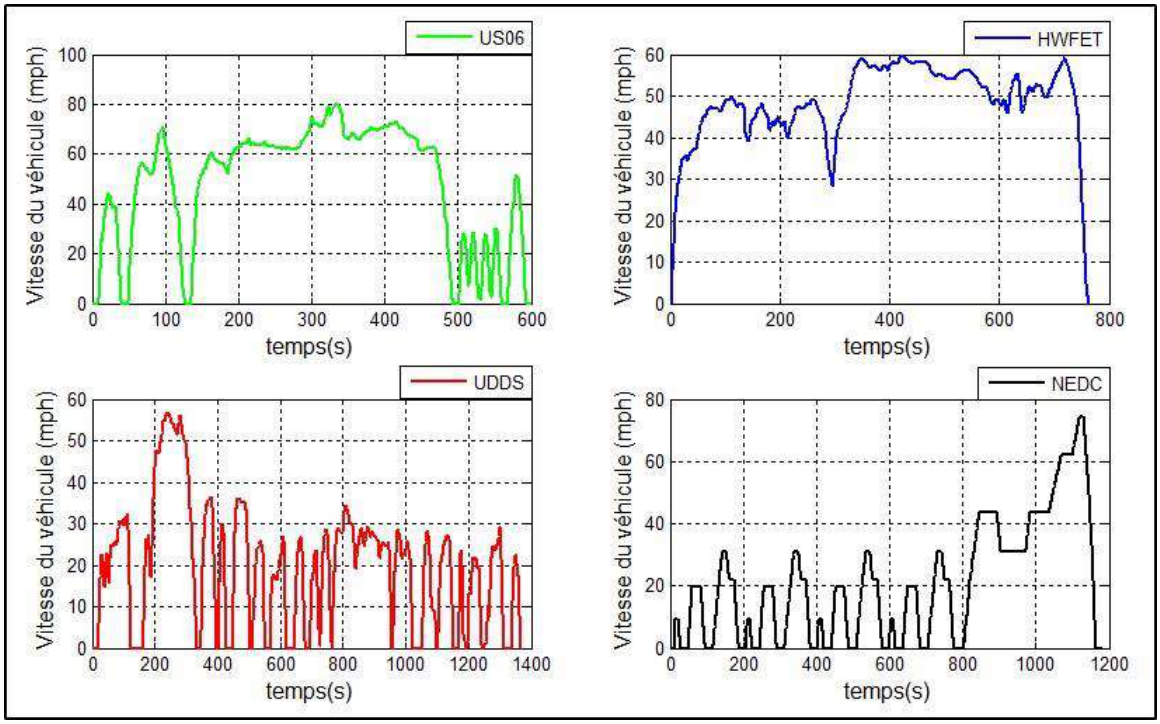


Figure III- 11 Graphiques des profils de conduite US6, HWFET, UDDS et NEDC .

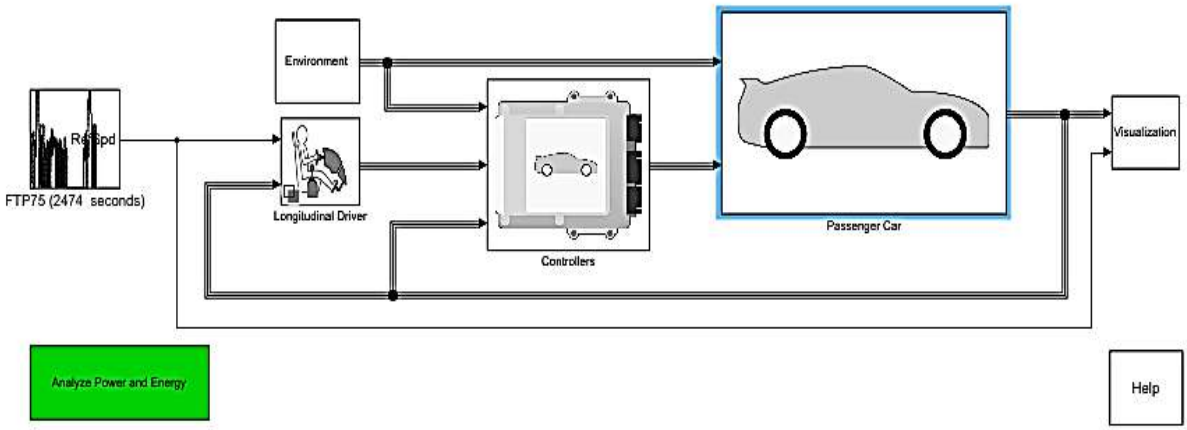
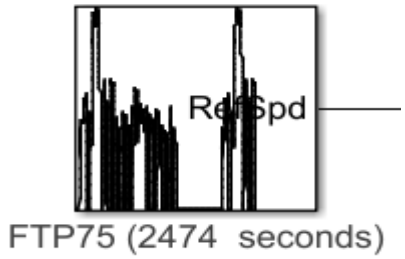


Figure III- 12 schéma de simulation d'un véhicule électrique à pile à combustible.

Ce modèle représente un modèle complet modèle de véhicule électrique complet avec un moteur générateur et une directive de drainage direct de la batterie.

la transmission et le groupe motopropulseur associé peut contrôler les algorithmes aussi vous pouvez utiliser ce modèle pour l'analyse de l'adéquation du groupe motopropulseur et la sélection des composants le contrôle la conception d'algorithmes de contrôle et de diagnostic et le matériel dans la boucle c'est le test hil une vidéo séparée est postée sur mon canal qui concerne le matériel et ce que l'on entend par hardware in the loop testingen particulier pour ce véhicule électrique ok avec ce modèle on pouvons analyser la puissance de l'électricité électrique et l'énergie pour générer une réponse énergétique.



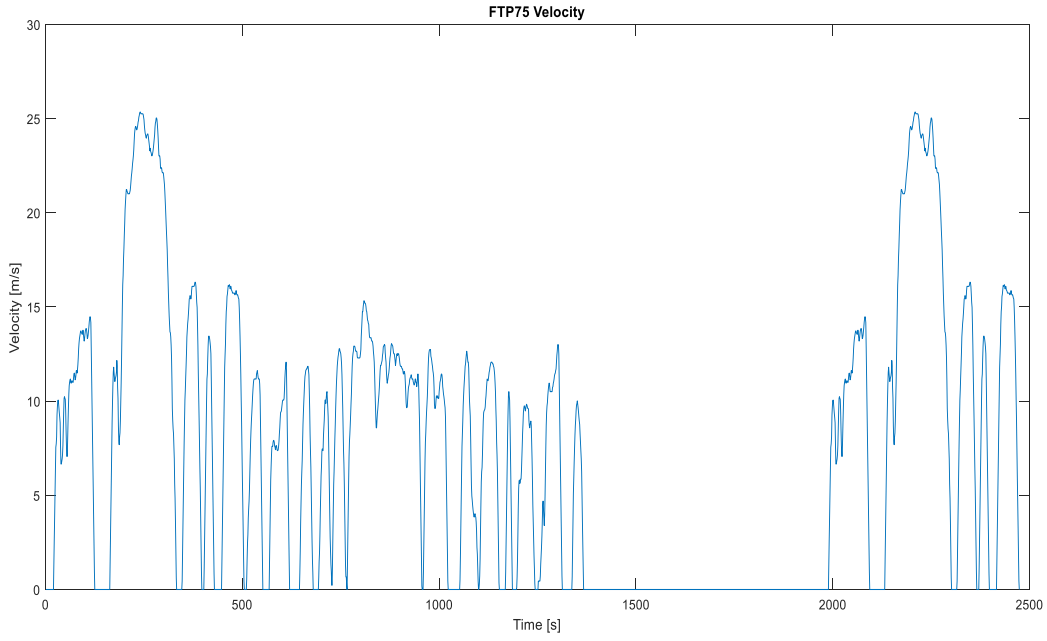


Figure III- 13 graphe représente la vitesse du véhicule en fonction du temps.

C’est une source de cycle d'entraînement est une collection de euh cycles d'entraînement standard um il trace la source de cycle de conduite vitesse du véhicule en fonction du temps ici véhicule temps spécifique ceci particulièrement pour cette source de cycle de conduite qui est ftp 75 vitesse En se basant sur ça, vous pouvez vérifier us06 une fois que vous avez sélectionné et sélectionné le cycle de conduite source qui sont automatiquement.

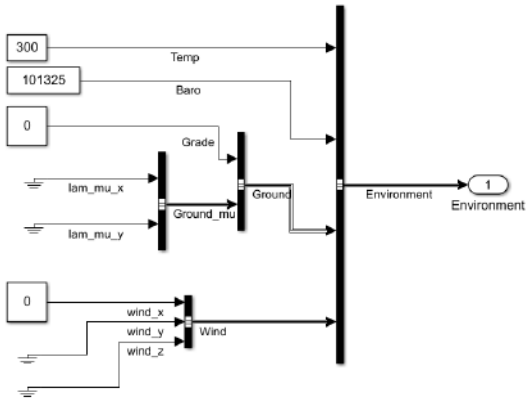


Figure III- 14 Système d’environnement.

Ce sous-système crée des variables environnementales variable environnementale comprenant la pente de la route, la vitesse du vent, la température et la pression la température et la pression atmosphériques.

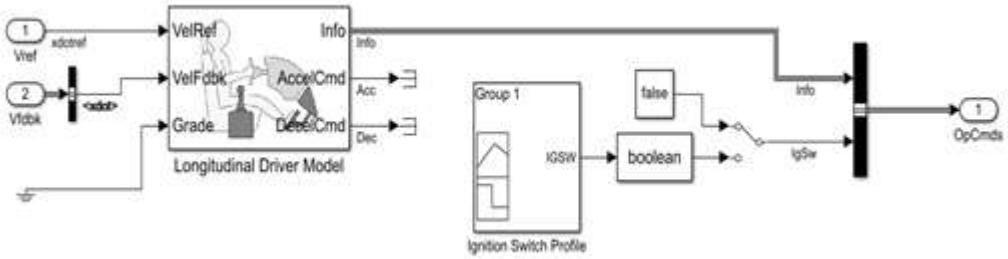


Figure III- 15 Système d’environnement longitudinal.

La vitesse du vent au niveau de la route et la température et la pression atmosphériques. température et pression atmosphériques ici puis c'est un sous-système d'entraînement longitudinal Ici, ce sous-système est utilisé pour générer la déclaration normalisée et la rupture pour mettre en œuvre ce modèle

d'entraînement modèle d'entraînement c'est-à-dire que vous utilisez pour mesurer utilisé pour mesurer si vous avez utilisé pour véhicule cible ce utilise la cible du véhicule et les vitesses de référence cette variante en boucle ouverte vous permet de configurer l'accélération et de désapprouver le vitesse d'accélération et l'embrayage commandes avec des entrées constantes ou basées sur des signaux ici.

la gestion de la batterie, ce sont des algorithmes de gestion de l'énergie algorithmes de gestion de l'énergie implémentés ici dans ces algorithmes de gestion d'énergie euh quel genre de applications usb sont là pour estimer puissance électrique basée sur la puissance mécanique la puissance mécanique en utilisant la carte d'efficacité vérifier si la puissance électrique est dans les limites de puissance de la batterie si la puissance est dans les limites, utiliser le moteur commande d'attaque et toutes ces possibilités sont là dans cet algorithme, des algorithmes prédéfinis c'est-à-dire l'algorithme de gestion de l'énergie et le contrôle du freinage régénératif et le freinage pédale à la demande de pression de freinage totale.

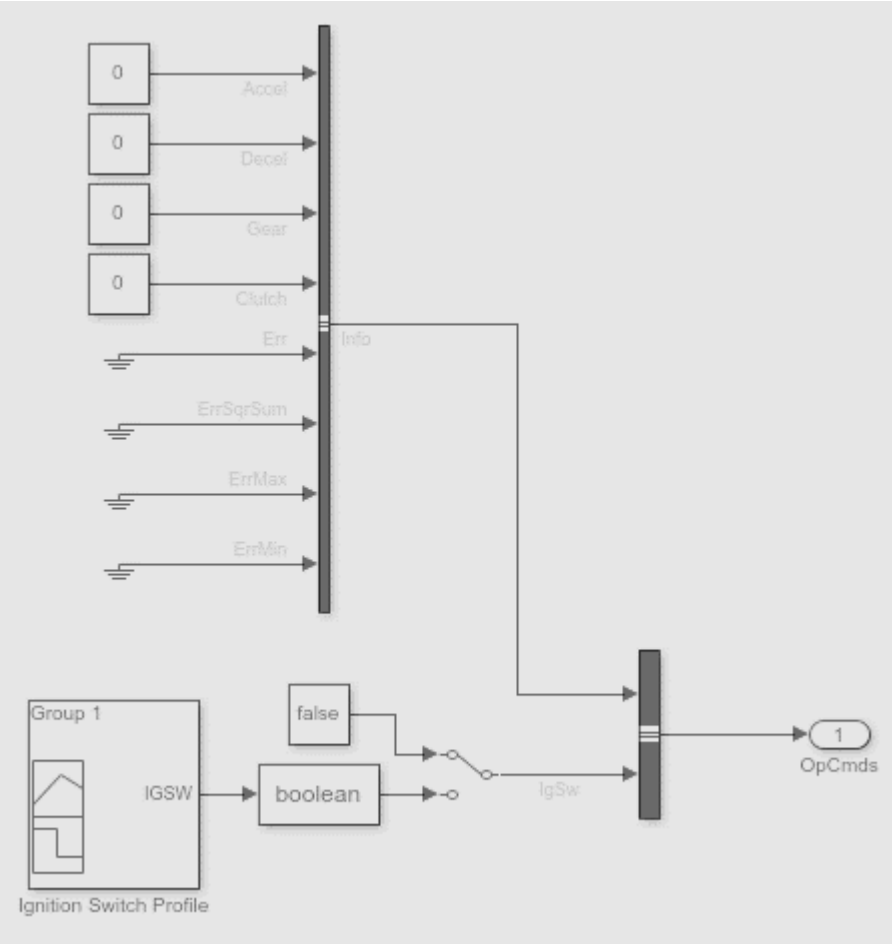


Figure III- 16 blocs de boucle ouverte.

les blocs en boucle ouverte peuvent aussi être utilisés le sous-système est prévu pour désactiver et le sous-système d'abonnement au lecteur exposera l'interface du pilote en utilisant cette interface vous pouvez connecter blocs d'interface utilisateur de tableau de bord ou du matériel tiers et fournir l'application spécifiée préprogrammés ou même basés sur le temps signaux sont un peu pilotés par l'opérateur enregistré signaux pour le réglage et le dépannage et le modèle les vérifications de modèles ici

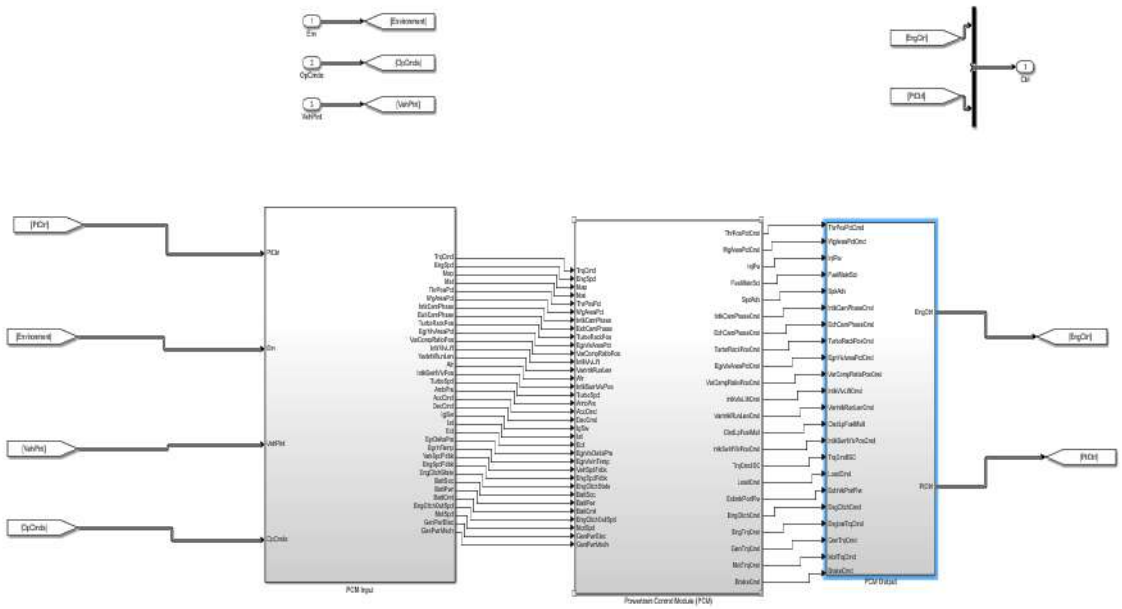


Figure III- 17 Le sous-système de contrôleur.

le sous-système de contrôle est important et dans ce compteur sous-systèmes, il y a la puissance l'entrée de puissance et de contrôle et la sortie de puissance et de la sortie de contrôle est là dans ce modèle de modèle de contrôle du groupe motopropulseur, il y a un modèle pcm met en œuvre une commande de chaîne cinématique avec le freinage par récupération contrôle du freinage arbitrage du couple moteur et la gestion de la puissance ici la commande de freinage par récupération et la gestion de la batterie et l'arbitrage du couple moteur et les blocs de gestion de l'énergie sont là ici en utilisant ce bloc régénératif euh c'est un sérieux de freinage régénératif et de régénération parallèle de régénération parallèle est là et ensuite il y a un bloc d'arbitrage du couple moteur d'arbitrage du couple moteur et de gestion de l'énergie dans ce bloc nous parlons de la gestion de la batterie, ce sont des algorithmes de gestion algorithmes de gestion d'énergie implémentés ici dans ces algorithmes de gestion d'énergie euh quel genre d'applications applications usb sont là pour estimer puissance électrique basée sur la puissance mécanique la puissance mécanique en utilisant la carte d'efficacité vérifier si la puissance électrique est dans les limites de puissance de la batterie si la puissance est dans les limites

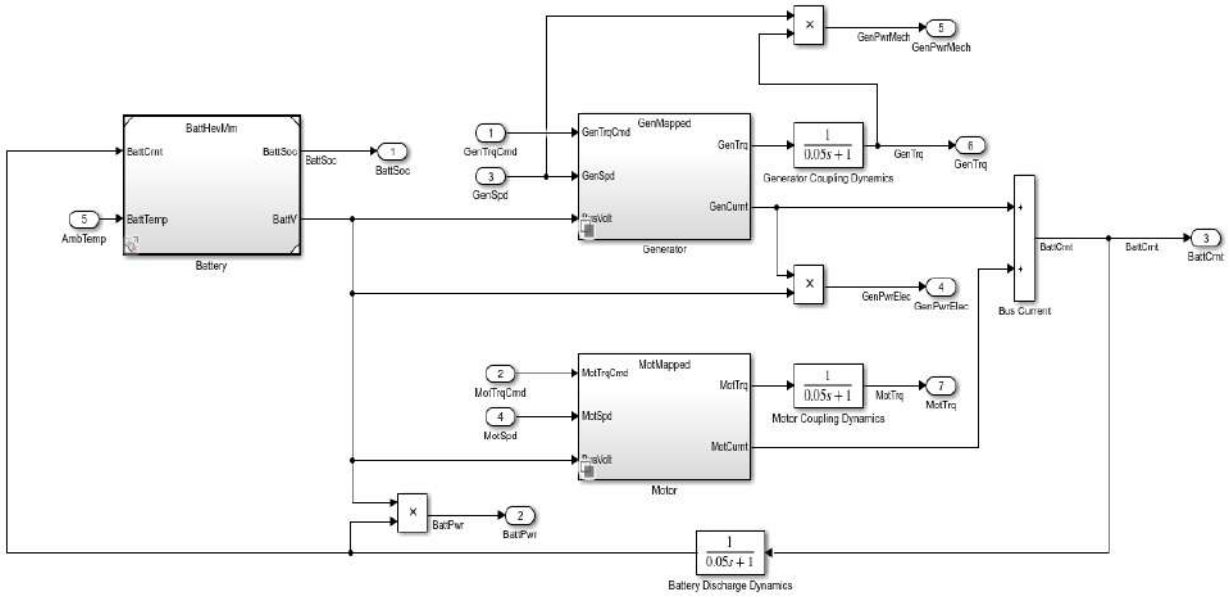


Figure III- 18 le sous-système de voiture électrique.

Sous-systèmes de voitures électriques c'est ici qu'il inclut l'entrée de la centrale électrique l'entrée et l'unité électrique la sortie et l'unité de l'installation électrique et aussi l'unité de transmission et ceci ce système met en œuvre une voiture de tourisme qui contient une ces deux usines électriques et le sous-système électriques du train voici le sous-système électrique blocs ayant la dynamique de couplage batterie-moteur et dynamique de décharge de la batterie

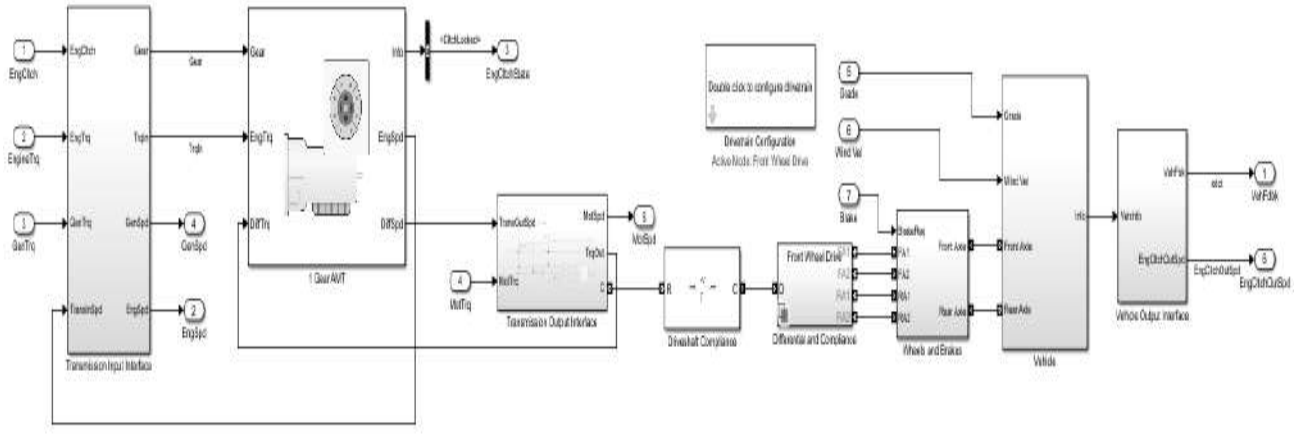


Figure III- 19 blocs d'un véhicule à traction.

Le modèle pour configurer le groupe motopropulseur modèles roues avant, roues arrière motrices ou toutes roues motrices vous pouvez choisir ici pour ce modèle je sélectionne ce mode actif comme un mode retour comme roue avant champ avant mode ici ce sont les blocs que l'on utilise pour obtenir cette interface de sortie du véhicule ici voici l'interface de sortie du véhicule ici vélocité des 3 degrés de liberté longitudinal modèle que nous utilisons ici ce bloc qui est votre corps du véhicule à 3 degrés de liberté blocs longitudinaux outils 2 semaines excel un corps de véhicule uh modèle pour calculer un mouvement longitudinal, vertical et mouvements de tangage ce bloc tient également compte de la masse du corps la traînée aérodynamique et la réclamation de la route et la répartition entre l'accès dû à l'accélération et le profil de la route et également ces blocs couple un véhicule ou deux pneus sans tableau pousser les paramètres de rigidité et paramètres d'amortissement ici aussi vous pouvez utiliser ce type d'interaction déplacement axial vitesse ou un grade angle ou extension suspension externe et vous pouvez également utiliser ces paramètres médicaux. Un nombre de véhicules sur l'essieu avant et nombre de roues à chiffres sur un essieux arrière, en fonction de cela vous pouvez spécifier le site paramètres qui est une longue interne les paramètres sont des paramètres verticaux et les paramètres de tangage et la suspension paramètres et les paramètres environnementaux.

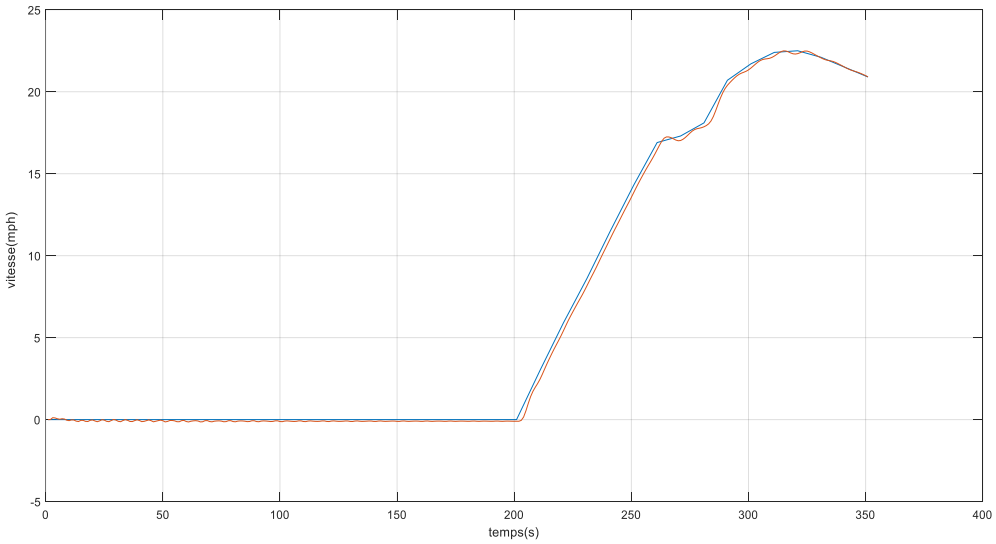


Figure III- 20 Trace de vitesse, trajectoire actuelle, (mph).

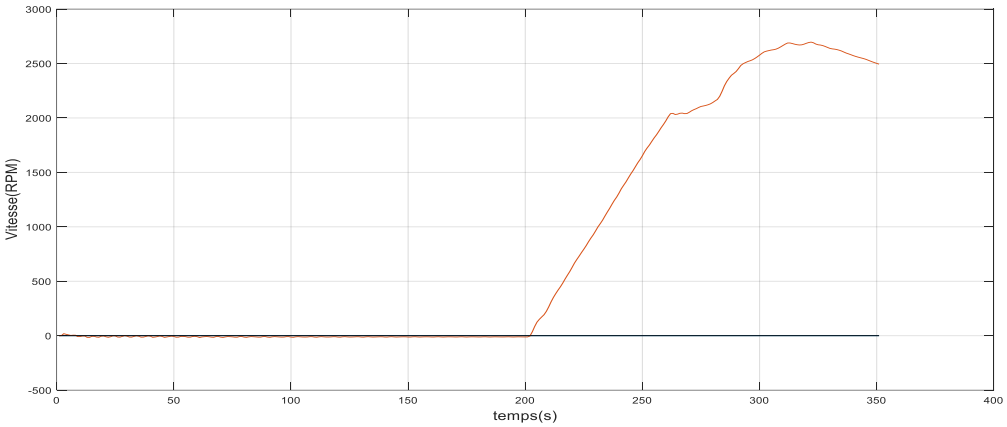


Figure III- 21 vitesse : Eng, Mot, Gen (RPM).

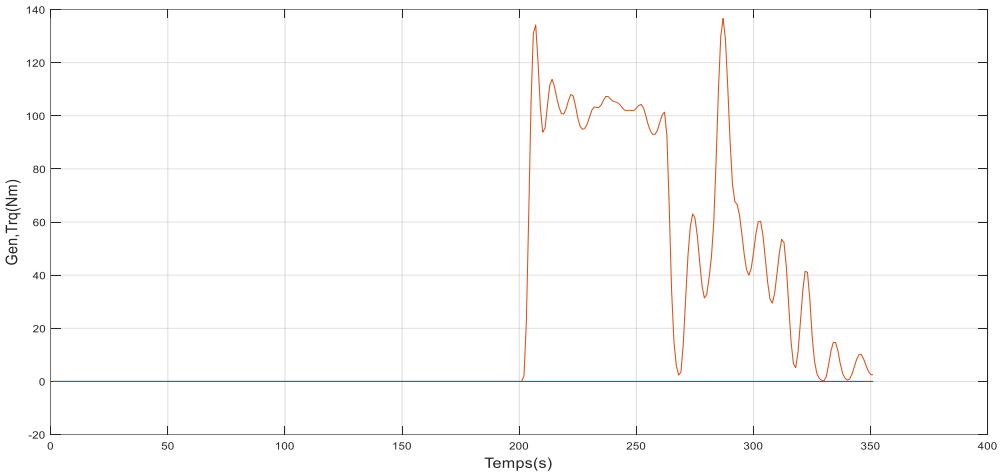


Figure III- 22 puissance de traction : Eng,Mot,Gen (Nm).

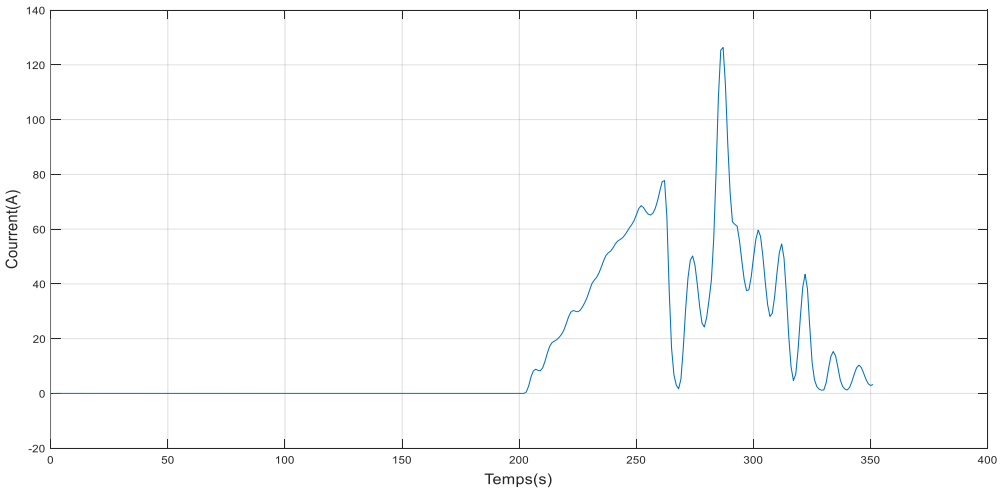


Figure III- 23 courant de la batterie (A).

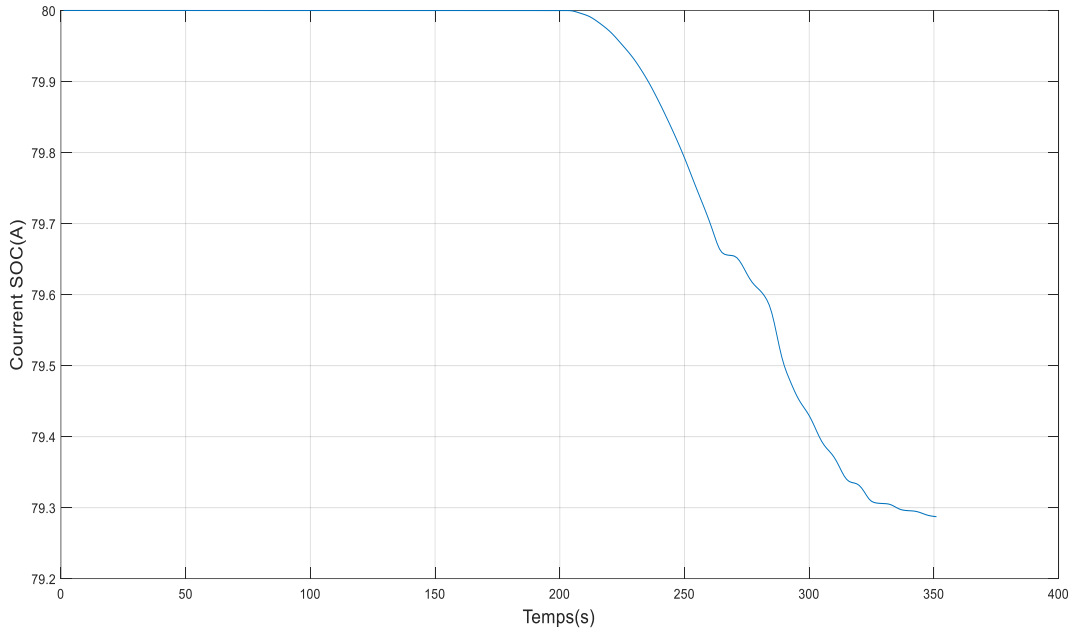


Figure III- 24 SOC de la batterie (A).

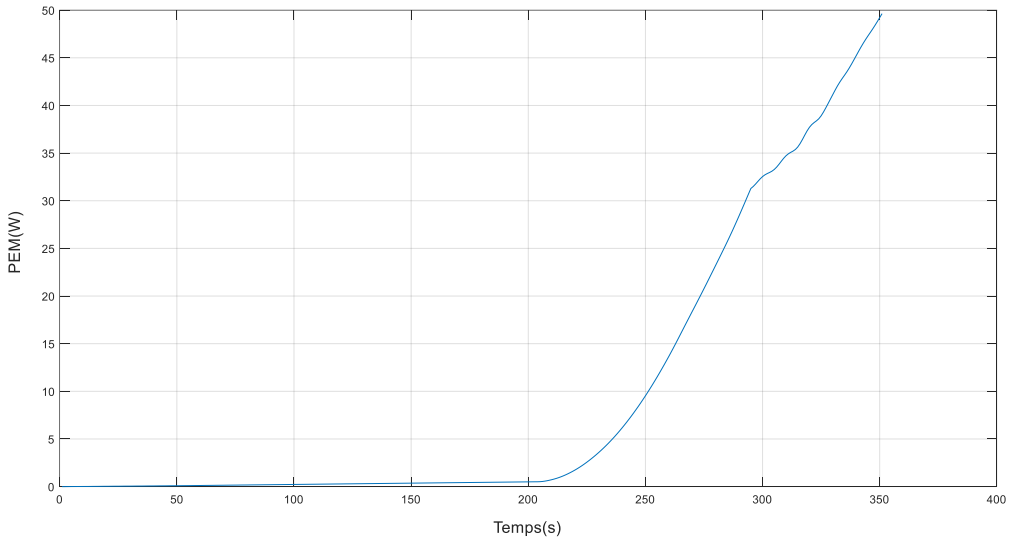


Figure III- 25 puissance Economique (W).

III.4.3. Interprétation des graphes :

pour obtenir ce résultat vous pouvez également vérifier cette performance en fonction des cycles d'entraînement vous pouvez voir le côté droit en premier et le deuxième champ d'application ici même aussi vous pouvez mesurer celle-ci mesurer celle-ci la vitesse du moteur la vitesse du moteur et le courant cible Et une autre chose est que vous pouvez aussi utiliser ce modèle de légende qui montre les

légendes adresse ce qu'une ligne jaune indique ce qu'est la ligne bleue indique la vitesse du tracé et sp moteur vitesse cible courant de la batterie en en ampères usb économie de carburant basée sur ce que vous pouvez mesurer et aussi vous pouvez utiliser cette mesure et ce signal statistiques, vous pouvez également utiliser en fonction de ce meilleur de la trace que vous obtiendrez la valeur maximale et minimale et la valeur minimale, de pic à pic et la valeur moyenne médiane valeur rms sur cette base, vous pouvez mesurer et ce bloc de mesures disponibles bloc également présent sur cette base, vous pouvez définir cette transition niveau de tolérance de l'état de transition et niveau de référence de référence toute la différenciation est possible sous cette performance et le site d'économie de carburant ici et ce bloc permet également d'obtenir ce graphique sda comment ce résumé de l'usine électrique se déroule vous devez attendre un certain temps pour obtenir ce rapport rendement moyen rapport d'efficacité pour le résumé de la centrale électrique et le résumé de l'usine d'entraînement et de reconversion um basé sur cela vous pouvez obtenir uh en utilisant cette portée est un curseur de mesure et de signal.

Les statistiques et les mesures à deux niveaux et aussi une autre application en utilisant ce scope sûr de performance pour obtenir cette aide um la référence eva applications uh signifie matlab fichiers d'exemple il y a un en particulier il est disponible dans le groupe motopropulseur euh bloc cet si vous n'êtes pas encore un utilisateur de matlab, devrez-vous obtenir ceci uh pour installer le paquet add-on pour obtenir cette source de cycle d'entraînement alors seulement votre précédent pour normalement le default life cycle sources ftp 75 default ressource est disponible

III.5. Conclusion :

On conclut que la modélisation, le contrôle et la simulation d'un système PEMFC DG sont étudiés dans cet article. Un modèle dynamique PEMFC de 500 W validé, présenté dans [1], est utilisé pour modéliser la centrale à pile à combustible. Les modèles d'espace d'état pour le convertisseur Boost dc/dc et l'onduleur triphasé sont également discutés. Les conceptions des contrôleurs pour le convertisseur cc/cc et l'onduleur triphasé sont données en utilisant des modèles linéarisés de convertisseur/onduleur de petits signaux. Des régulateurs conventionnels de rétroaction de tension PI sont utilisés pour les convertisseurs cc/cc afin de réguler la tension du bus cc, et un schéma de commande de courant à deux boucles transformées en dq est utilisé sur l'onduleur pour contrôler la puissance réelle et réactive délivrée du système de pile à combustible au réseau électrique.

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons défini les piles à combustibles, leur principe de fonctionnement, leurs avantages et leurs problèmes, qui restent à résoudre. Notamment le problème de coût qui a constitué des freins et des grands challenges au développement des piles à combustible : Un kilowattheure produit par une pile à combustible coûte actuellement cinq à six fois plus cher que son équivalent fourni par une technologie conventionnelle (turbine à gaz, centrale à charbon..). Néanmoins, les prix baisseront naturellement avec l'augmentation du volume du marché, lié à l'adaptation progressive du grand public à ce procédé.

Le véhicule électrique reste un but de recherche intéressant pour parer aux problèmes d'environnement qui menacent notre planète avec les émissions des gaz a effet de serre. Dans ce travail nous avons essayé d'alimenter la chaîne de traction de ce véhicule électrique avec une pile à combustible PEMFC.

La modélisation statique d'une pile à combustible de type PEMFC, nous a permis de décrire: la courbe caractéristique tension/densité de courant d'une cellule ainsi que la courbe Caractéristique densité de Puissance /Densité de courant (par cellule). Ce qui nous admis à faire dimensionner la pile pour notre application par la détermination du nombre des cellules et de leurs surfaces. Nous avons développé un modèle dynamique de la pile à combustible, cette dernière a réussi à l'aide d'un régulateur PI de réagir devant les différentes demandes de puissance imposée par la charge.

En fin, le système de traction alimenté par une pile à combustible PEMFC qui contient en plus les convertisseurs statique DC/DC et DC/AC et un moteur asynchrone est soumis a deux testes : un changement de couple et une variation de vitesse. Les résultats obtenus sont acceptable en régime permanent (il y'a des perturbations) mais le problème majeur reste au régime transitoire lors du démarrage ou il est –selon les résultats de simulation- indispensable de placer une batterie ou un super condensateur qui sera mise pour le démarrage du système et même pour la récupération d'énergie lors du freinage ou la marche en arrière. Elle peut diminuer encore la consommation d'hydrogène : c'est la technique de l'hybridation qui sera le sujet de ma future recherch

Bibliographie

[1] **K. Kordesch et G. Simader**, « *Fuels Cells and Their Applications* », ed VCH (1996)

[2] **Fuel Cell Handbook** (5ème édition), EG&G Services, Parson, Inc. Sciences Applications International Corporation (CD ROM).

[3] **Jérôme LACHAISE**, <<Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à pile à combustible (PAC) destinés à la traction>>, thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse, 2004.

[4] **Anne-Sophie Corbeau** (Ecole Centrale Paris, Promo 2000), « les piles à combustible hydrogène», www.annso.freesurf.fr, 2005.

[5] **Victor Mester**, « Conception Optimale Systémique des Composants des Chaînes de Traction Electrique », thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, mai 2007.

[6] **Nicolas Romani, «** Modélisation et Commande du Système d'Alimentation en Air pour le Module de Puissance d'un Véhicule à Pile à Combustible avec Reformeur Embarqué », thèse de doctorat, Université de Paris Sud, 24 Septembre 2007

[7] **Jérôme BERNARD, «** Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande**»,** thèse de doctorat, l'université de valenciennes et du hainaut-cambresis, 03 décembre 2007.

[8] **Julien Scorida**, « Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré- Nancy 1, 10 novembre 2004.

[9] **Muhammad H. Rashid**, « FUEL CELLS Modeling, Control, and Applications», Series Editor University of West Florida.

[10] **Toufik Azib,** "Contribution à l'étude d'électro-générateurs à pile à combustible: conceptions d'architectures et de leurs commandes", Thèse de Doctorat à l'Université de Paris-Sud XI, France, 2010.

[11] **Toufik Azib;** Olivier Bethoux; Ghislain Remy; Claude Marchand; Éric Berthelot, "Comparaison d'architectures d'hybridation d'une pile à combustible avec des supercondensateurs", Conférence Électrotechnique du futur (EF 2009), Compiègne, France, 24-25 Septembre 2009.

[12] Toufik Azib; Olivier Bethoux; Ghislain Remy; Claude Marchand; Eric Berthelot, "SysOme hybride å pile å combustible et s)percondensateur: structures, contröle, commande et gestion d'énergie", European Journal of Electrical Engineering. Vol. 14, NO. 2-3, 201 1.

[13] T. Azib; O. Bethoux; G. Remy; C. Marchand, "Structure and control strategy for a parallel hybrid fuel cell/supercapacitors power source", IEEE, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2009), Dearborn, Ml, USA, 7-10 sept. 2009.

Bibliographie

[14] C. J. Hatziadoniu, A. A. Lobo, F. Pourboghrat, and M. Daneshdoost, "A simplified dynamic model of grid-connected fuel-cell generators," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 17, no. 2, pp. 467–473, Apr. 2002.

[15] K. Sedghisigarchi and A. Feliachi, "Dynamic and transient analysis of power distribution systems with fuel cells—Part II: Control and stability enhancement," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 19, no. 2, pp. 429– 434, Jun. 2004.

[16] Y. Zhu and K. Tomsovic, "Development of models for analyzing the loadfollowing performance of microturbines and fuel cells," *J. Elect. Power Syst. Res.*, vol. 62, no. 1, pp. 1–11, May 2002.

[17] C. Wang, M. H. Nehrir, and S. R. Shaw, "Dynamic models and model validationforPEMfuelcellsusingelectricalcircuits,"*IEEETrans.Energy Conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 442–451, Jun. 2005.

[18] Z. Miao, M. A. Choudhry, R. L. Klein, and L. Fan, "Study of a fuel cell power plant in power distribution system—Part II: Stability control," in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Denver, CO, Jun. 2004.

[19] D.Candusso,L.Valero,andA.Walter,"Modelling,controlandsimulation of a fuel cell based power supply system with energy management," *Proc. IECON*, vol. 2, pp. 1294–1299, 2002.

[20] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*. New York: Wiley, 2001.

[21] W. Shireen and M. S. Arefeen, "An utility interactive power electronics interface for alternate/renewable energy systems," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 11, no. 3, pp. 643–649, Sep. 1996.

[22] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. New York: Wiley, 2003.

[23] M. H. Todorovic, L. Palma, and P. Enjeti, "Design of a wide input range DC-DC converter with a robust power control scheme suitable for fuel cell power conversion," in *Proc. 19th Ann. IEEE Appl. Power Electron. Conf.*, Anaheim, CA, 2004.

[24] S. M. N. Hasan, S. Kim, and I. Husain, "Power electronic interface and motor control for a fuel cell electric vehicle," in *Proc. 19th Ann. IEEE Appl. Power Electron. Conf.*, Anaheim, CA, 2004.

[25] *Fuel Cell Handbook*, EG&G Services, Parsons Inc., Washington, DC, Oct., 2000. DOE of Fossil Energy, National Energy Technology Lab.

[26] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*. New York: Wiley, 2001.

[27] C. Wang, M. H. Nehrir, and S. R. Shaw, "Dynamic models and model validationforPEMfuelcellsusingelectricalcircuits,"*IEEETrans.Energy Conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 442–451, Jun. 2005.

Bibliographie

[28] M. Tsai and W. I. Tsai, "Analysis and design of three-phase AC-to-DC converters with high power factor and near-optimum feedforward," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, no. 3, pp. 535–543, Jun. 1999.

[29] H. Mao, "Study on three-phase high-input-power-factor PWM-voltagetype reversible rectifiers and their control strategies," Ph.D. dissertation, Zhejiang Univ., Hangzhou, Zhejiang, China, 2000. (in chinese).

[30] R. Wu, T. Kohama, Y. Kodera, T. Ninomiya, and F. Ihara, "Load-currentsharing control for parallel operation of DC-to-DC converters," in *Proc. IEEE PESC'*, Seattle, WA, Jun. 1993, pp. 101–107.

[31] J. Van de Vegte, *Feedback Control Systems*, 3rd ed., Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1994.

[32] *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, IEEE Standard 1547, 2003.

[33] J. D. Glover and M. S. Sarma, *Power System Analysis and Design*, 3rd ed., Pacific Grove, CA: Brooks/Cole, 2002.

[34] P. C. Krause, O. Wasynczuk, and S. D. Sudhoff *Analysis of Electric Machinery*, Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995.

[35] J. G. Kassakian, M. F. Schlecht, and G. C. Verghese, *Principles of Power Electronics*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1991.