وزارة التـــعلـــيـــــم العـــــالـــــي والبـحـــــث العـلـمـــــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département Génie Industriel

Mémoire de fin d'étude

En vue d'obtention le diplôme de Master 2

Spécialité : *Maintenance des automatismes et de l'instrumentation industriels*

Thème :

Application de la pile à combustible dans le véhicule électrique

Présente et soutenu publiquement par :

Nom… **DINE**…… Prénom … **Elhabib**…

Nom… **KHANFOUR**…. Prénom … **Aymen**…

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr.Titah Mawloud	**MCA**	**IMSI**	**Président**
Mme.Chouitek Mama	**MCA**	**IMSI**	**Encadreur**
Mr.Tarfaya Anis	**MCB**	**IMSI**	**Examinateur**

Juin 2025

Remerciements

En préambule à ce projet de fin d'étude nous remerciant ALLAH «الله» qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces langues années d'étude.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribuer à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette exceptionnelles année universitaire.

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle Département Maintenance en Instrumentation, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nous tenant à remercier sincèrement notre encadreur ***Madame CHOUITEK Mama****, qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce projet, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'elle a bien voulu nous consacrer et sans qui ce projet n'aurait jamais vu le jour.*

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail

Dédicace

Ce travail est dédié à toutes ces personnes que j'aime, A mes très chers parents, qui se sont sacrifié pour m'offrir un climat idéal de travail et qui n'ont jamais cessé de me témoigner leurs affections et de m'apporter leurs soutient depuis toujours. Et leurs encouragements, consentis dans le souci de ma réussite.

À La mémoire de ma grand frère Mohammed et ca famille . À mes très chers frères. À ma très chères belle soeur , A tous mes cousins et cousines, À toute mes amis et toute mes amies. À toutes personnes qui nous ont aidés à réaliser ce mémoire.

Elhabib

Dédicace

Tout d'abords, je rends grâce à « الله» pour toutes les bénédictions et la grâce de la réussite.

A ma chère mère, pour ses scarifies depuis qu'elle m'a mise au monde;

A mon cher père, qui m'a toujours soutenu et m'a aider à affronte les difficultés ; A tous ces mes chères sœurs et mes chers frères

A mes tontes et mes oncles et ma grand mère.

A tous ma famille KHANFOUR.

A tous mes amis et mes collègues.

A tous les enseignants du département de génie électrique. Je dédie ce modeste travail.

AYMEN

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre d'utilisation de la pile à combustible pour la traction automobile. Nous avons mentionné l'utilité de la pile à combustible (PEMFC), différents utilisations de la pile à combustible, leur l'utilité de et son emplacement, son mode de fonctionnement, les systèmes qui l'accompagnes (ces auxiliaires) et à quel point son utilisation intéresse les constructeurs de voiture. L'objectif de ce travail est la modélisation d'une véhicule électrique à pile à combustible PEMFC et la simulation par le langage de simulation MATLAB, afin d'obtenir les caractéristiques de cette véhicule.

Mots-clés: pile à combustible, voiture électrique, hydrogène.

ملخص :

العمل المقدم في هذه المذكرة هو في إيطار استخدام خلايا الوقود لجر السيارة .أشرنا إلى أهمية استخدام خلية الوقود موضعها ،طريقة عملها ،ملحقاتها ومدى أهمية استعمالها عند صناع السيارات، لنفهم بعدها مكونات السيارة الكهربائية والطاقة المستعملة وسلاسل الجر الخاصة بهم من المؤكد أننا سنرى في العقود القادمة ظهور قطاع الهيدروجين في حياتنا اليومية كناقل للطاقة.

نهدف في هذا العمل إلى نمذجة مركبة كهربائية بخلايا الوقود ومحاكاتها على برنامج ماتلاب من أجل الحصول على خصائص هذه المركبة .

الكلمات المفتاحية: خلية وقود ،سيارة كهربائية ،طاقة ،هيدروجين .

Abstract:

The work presented in this thesis was realized in the use of fuel cells for car traction. We mentioned the importance of the fuel cells, its place, its functioning, the systems accompany it (auxiliary) and at what point its use interest the constructor of car.

It is certain that in the coming decades we will see the emergence of the hydrogen sector in our daily life as an energy vector.

The choice of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) technology is implicit in view of the interesting performances (low weight, robust, solid electrolyte, fast start, etc.)

It is therefore important to push research / development efforts around this technology even further in order to be able to master it and extend its application.

Keywords: Fuel cell, Electric car, power.

Table des matières

Table des matières :

Introduction Générale: 1
CHAPITRE I : l'état de l'art des piles à combustible : 4
I.1. Introduction 4
I.2. Pile à combustible 4
I.3. Historique des piles à combustible 5
I.4. Évolutions technique: 6
I.5. Principe de fonctionnement: 6
I.6. Constitution : 7
I.7. Fonctionnement: 7
A.Réactions chimiques: 8
B. Rendement: **8**
C. Système pile à combustible: **9**
I.8. Les différents types des piles à combustible : 10
I.9. Les applications des piles à combustible: 11
I.9.1. Transport: **12**
A. Transport Ferroviaire: 12
B. Automobile: 12
C. Aéronautique: 13
D. Spatial : 13
E. Naval : 14
I.9.2. Stationnaires : **15**
I.9.3. Nomades : **16**
I.10. Choix technologique de la pile à combustible : 16
I.11. Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC) : 17
I.11.1. Définition: **17**
I.11.2. Constitution d'une pile à combustible PEMFC : **18**
A. Membranes polymères ioniques : 19
B. Les électrodes: 20
C. Catalyseur : 20

1. Les catalyseurs du coté anode: 20
2. Les catalyseurs du côté cathode: 20
D. Les plaques bipolaires: 21
I.11.3. Caractéristique électrique: **22**
A. Tension de Nernst: 22
B. Polarisation d'activation : 23
C. Polarisation ohmique: 23
D. Polarisation de concentration: 23
I.12. Architecture du système à pile à combustible: 24
I.12. 1. Configuration système: **24**
A. Gestion de l'air: 25
B. Gestion de l'eau: 25
C. Gestion thermique: 25
I.12.2. Interfaces externes: **26**
A. Circuit d'air : 26
B. Circuit d'humidification : 26
C. Circuit de refroidissement: 26
D. Circuit électrique : 27
I.13. Les avantages et les inconvénients des piles à combustibles: 27
I.13.1. Les avantages: **27**
I.13.2. Les inconvénients: **27**
I.14. conclusion: 27
Chapitre II : Les Véhicules Electriques : 29
II.1. Introduction: 29
II.2. Les véhicules électriques comme solution ultime du problème de CO2: 29
II.3. Historique de développement: 30
II.4. Définition d'un véhicule électrique : 34
II.5. Classification des véhicules électriques: 35
II.5.1. Véhicules tout électrique (VTE): **35**
II.5.2. Véhicules électriques à batteries rechargeables par prise de courant: **35**
II.5.3. Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible: **36**
II.5.4.Véhicules hybrids: **37**
A. Véhicules hybrides série: 37

B. Véhicule hybride parallèle: 38
C. Véhicule hybride combine: 38
II.6. Actualités des véhicules électriques: 39
II.7. Fonctionnement d'un véhicule électrique: 39
II.8. Architecture d'un véhicule à pile à combustible: 40
II.9. Description générale de la chaine de traction: 41
II.10. Stockage d'énergie: 42
II.11. La batterie: 42
II.12. Le chargeur: 43
II.13. de puissance dans le véhicule électrique: 43
II.13.1. Les redresseurs (AC/DC): **43**
II.13.2. Les onduleurs (DC-AC): **44**
II.13.3. Les hacheurs (DC-DC): **44**
II.14. Les moteurs électriques utilisés pour les voitures électriques: 45
II.14.1 Le moteur à courant continu (MCC): **45**
II.14.2. Le moteur asynchrone (MAS): **46**
II.14.3. Le moteur synchrone: **46**
A. Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP): 47
B. Le moteur synchrone à reluctance variable (MRV): 47
II.15. Avantages et inconvénient des véhicules électriques: 48
A. Avantages: **48**
B. Inconvénients: **48**
II.16. Conclusion: 49
Chapitre III : Modélisation d'un véhicule électrique à pile combustible 50
III.1. Introduction: 51
III.2. Modèle de la chaîne de traction 51
III.3. Modélisation des convertisseurs 51
III.3.1. Hacheur élévateur de tension (BOOST) **51**
III.3.2. L'onduleur de tension **53**
III.3.3. Modélisation de l'onduleur **54**
III.4. Le moteur synchrone à reluctance variable (MRV) 55
III.4.1 Constitution et principe de fonctionnement **55**
III.4.2. Modélisation mathématique **55**
A. Équations électriques (repère dq) 55

B. Équations magnétiques..... 55
C. Couple électromagnétique 55
D. Équation mécanique..... 56
III.4.3. Représentation bloc fonctionnelle 56
III.4.4. Avantages du MRV 56
III.5. Simulation: 57
III.6. Conclusion 60
Conclusion générale: 62
Bibliographie..... 64

Liste des abréviations et symboles :

PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell.
ANR	Agence Nationale de la Recherche.
PAC	Pile à Combustible.
PEM	Proton Exchange Membrane.
AFC	Alcaline Fuel Cell.
MCFS	Molten Carbonate Fuel Cell.
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell.
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell.
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell.
DC	Direct Current.
AC	Alternate Current.
MAS	Machine Asynchrone.
VEs	Les Véhicules Electriques.
VHEs	Les Véhicules Hybrides Electriques.
MEV	Le moteur synchrone à reluctance variable.
MSAP	Le moteur synchrone à aiment permanent .
MCC	Moteur à Courant Continus.
F.E.M	Force Electro Motrice.

Liste des tableaux :

Tableau I.1: Les différents types des piles à combustible..... 11
Tableau II.1: comparatif des technologies des batteries 43
Tableau II.2: Comparaison des quatre machines de traction électrique 47
Tableau III.1: systèmes bloc fonctionnelle..... 56
Tableau III.2: Avantages du MRV 56

Liste des figures :

Chapitre I

Figure I.1: Représentation schématique d'une pile à combustible produisant de l'électricité à partir d'un combustible……4
Figure. I.2: L'expérience de Sir William Grove /ClubPac/. ……6
Figure I.3: Constitution général d'une pile à combustible……7
Figure I.4: Assemblage de cellules élémentaires dans une pile à combustible (3 piles) ……7
Figure I.5: Une cellule élémentaire d'une pile à combustible……7
Figure I.6: Fonctionnement d'une pile à combustible……8
Figure I.7: Notion du rendement de la pile……9
Figure I.8: Exemple de schéma relatif à un système PAC embarqué……..10
Figure I.9: Train Cordia iLint. ……..12
Figure I.10: Toyota Mirai……..12
Figure I.11: Mercedes-Benz GLC……12
Figure I.12: Le Dimona transformé par Boeing……13
Figure I.13: Décollage Titan2(Gemini)……14
Figure I.14: Décollage Saturn V (Apollo)……14
Figure I.15: Sous-marin allemand - Type 212……14
Figure I.16: Sous-marin allemand - Type 214……15
Figure I.17: Principe de fonctionnement d'une PAC en cogeneration……15
Figure I.18: Stack' d'une pile à combustible de type PEMFC……18
Figure I.19: la structure d'une cellule et d'un empilement……18
Figure I.20: Structure chimique d'une membrane de type Nafion……19
Figure I.21: Plaque bipolaire……21
Figure I.22: Caractéristiques courant - tension d'une pile à combustible……..22
Figure I.23: Schéma fonctionnel d'un groupe électrogène à pile à combustible……24

Chapitre II

Figure II.1: Dodge EV……...29
Figure II.2: Premier véhicule électrique à batterie rechargeable……31
Figure II.3: Premier vrai véhicule électrique en 1891……..31
Figure II.4: La jamais contente……..31
Figure II.5: Wood phaeton 1902……32

Figure II.6: Véhicule d‟Anderson Electric Car Company…….32
Figure II.7: Toyota Prius XW10……33
Figure II.8: Fin de l‟EV1……...33
Figure II.9: Préambule du documentaire "Who Killed the Electric Car ?"…….34
Figure II.10: La Pininfarina Blue Car……34
Figure II.11: Système de propulsion d'un VE……35
Figure II.12: Auto bus à pile à combustible……36
Figure II.13: Véhicule hybride série……..37
Figure II.14: Véhicule hybride parallèle……38
Figure II.15: Véhicule hybride combine……39
Figure II.16: Composantes et fonctionnement d'un véhicule électrique……40
Figure II.17: Schéma général d'un véhicule à pile à combustible - Source Renault – PSA, 1998……...41
Figure II.18: la chaine de traction dans un VE……...41
Figure II.19: La vue interne d'une batterie……..…42
Figure II.20: Schéma détaillé d'un redresseur……...44
Figure II.21: Schéma détaillé d'un Hacheur élévateur bidirectionnel……...45
Figure II.22: photo d'une machine asynchrone avec le Stator et le Rotor qui la constituent….46

Chapitre III

Figure III.1: modèle complet du véhicule électrique……...……...51
Figure III.2: Montage du hacheur parallèle……52
Figure III.3: Allure des tensions et des courants au niveau du hacheur…….52
Figure III.4: Onduleur de tension triphasé à deux niveaux. ……...53
Figure III.4: Modèle du véhicule électrique à pile à combustible sur l'environnement Matlab/Simulink……57
Figure III.5: Position de la pédale (cm)……..57
Figure III.6: Courant de la pile à combustible……58
Figure III.7: Tension de la pile à combustible……58
Figure III.8: Vitesse du moteur (rad/s)……..……59
Figure III.9: Vitesse du véhicule…...……59

Introduction Générale

Introduction Générale:

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 entrainé 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 [1].

Dans les prochaines décennies, la stagnation probable de la production de pétrole entre 2020 et 2030, la concentration de la production du pétrole brut au Proche Orient et les conséquences du changement climatique obligeront les gouvernements à employer l'énergie de façon plus efficace et à recourir à de nouvelles sources d'énergie moins polluantes. L'hydrogène se présente comme une solution portable. Sa capacité de stockage, de l'ordre de 30000 Wh/Kg, a conduit au développement de nouvelles technologies à base de piles à combustible [2].

Selon le rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) le nombre de véhicules électriques à pile à combustible en circulation à travers le monde totaliserait aujourd'hui plus de 72.000 véhicules.

Pour 2030 les prévisions tant californiennes que chinoises prévoient pour leur part chacune un million de ces véhicules à pile à combustible, ce qui à l'échelle mondiale laisse prévoir qu'il pourra en avoir véhicules légers (VUL et taxis), 5 000 poids lourds (bus, autocars et camions), 65 bateaux et navires,et 100 trains

Une pile à combustible (PAC) alimentée par hydrogène est une source d'énergie non polluante qui génère de l'électricité par la réaction chimique de l'hydrogène et l'oxygène. Ceux-ci doivent alimenter de façon continue la PAC afin qu'elle puisse fournir la puissance électricité demandée par une charge. Par définition La pile à combustible est un convertisseur électrochimique qui permet de transformer en partie l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique [3,4].

Les véhicules hybrides dans lesquels une source secondaire d'énergie électrique vient soutenir le moteur à combustion interne sont une alternative prometteuse à court terme favorisant la limitation en consommation de combustible et constituant une étape intermédiaire vers un «tout électrique ». Le véhicule électrique hybride à pile à combustible est un système équipé d'une propulsion intégralement électrique et composé de:

- Source complémentaire assurant le manque d'énergie par rapport à la source principale;
- Source d'appoint remplissant le rôle d'une source auxiliaire qui fournit l'énergie pour les opérations de démarrage;
- Moteur électrique permettant d'assurer la recharge de la source auxiliaire d'énergie en cas de freinage [5].

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 03 chapiters

Le premier chapitre présente l'état de l'art des piles à combustible : son histoire, son principe de fonctionnement, sa construction, ses types, ses applications, ses avantages et ses inconvénients, et la modélisation et dimensionnement du stack à pile à combustible avec la modélisation statique de la pile à combustible (PEMFC), la détermination du nombre des cellules, la détermination de la surface des cellules et en fin la modélisation dynamique de la pile à combustible (PEMFC).

Le deuxième chapitre contient une étude bibliographique sur les véhicules électriques : historique, principe de fonctionnement, constitution, technologie et architecture d'un système de traction de véhicule électrique.

Au troisième chapitre nous allons modéliser notre véhicule électrique à piles à combustible, les différents convertisseurs statiques (les hacheurs, les onduleurs), modélisation de la machine asynchrone et on se termine par la validation du modèle, en utilisant l'environnement Matlab / Simulink.

CHAPITRE I

l’état de l’art des piles à combustible

CHAPITRE I: l'état de l'art des piles à combustible:

I.1. Introduction:

Une pile à combustible est un générateur électrochimique produisant une tension électrique grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple le dihydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air. Elle est distincte de la pile électrique, qui fonctionne également par réaction d'oxydoréduction, mais qui est constituée d'empilements de métaux[6]

I.2. Pile à combustible:

Une pile à combustible est un générateur d'électricité qui convertit l'énergie chimique en énergie électrique (Figure 1.1). Elles partagent le travail continu consommant un type de carburant. Une pile à combustible fonctionne silencieusement et efficacement et lorsque l'Hydrogène est utilisé comme carburant, il génère uniquement de l'énergie et de l'eau, ce qu'on appelle un moteur à émission zéro [7].

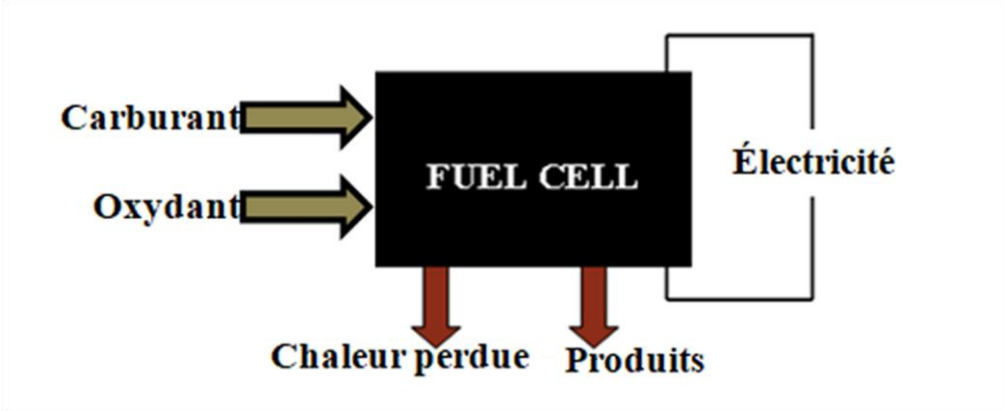


Figure I.1: Représentation schématique d'une pile à combustible produisant de l'électricité à partir d'un combustible

Une pile à combustible peut convertir plus de 90% de l'énergie chimique d'un combustible en électricité.

Les réactifs typiques pour les piles à combustible sont l'Hydrogène et l'Oxygène, mais aucun d'entre eux ne doit être sous sa forme pure. L'Hydrogène peut être présent soit en mélange avec d'autres gaz, tels que le dioxyde de carbone, l'Azote et le monoxyde de carbone, soit dans des hydrocarbures tels que le gaz naturel et le Méthane, ou même dans des hydrocarbures liquides tels que le Méthanol. L'air ambiant contient suffisamment d'Oxygène pour être utilisé comme oxydant dans les piles à combustible.

I.3. Historique des piles à combustible:

La découverte du principe de la pile à combustible remonte à 1839. Toutefois elle ne resta pendant de nombreuses années qu'une simple curiosité scientifique, son utilisation n'étant alors pas une nécessité.

Cette découverte s'est effectuée en plusieurs étapes. En effet, à la période des précurseurs succéda un relatif abandon de près d'un siècle avant une « redécouverte » vers la fin du 20ième siècle de cette technique, relancée par les préoccupations environnementales liées à l'aggravation de l'effet de serre.

Le premier pas vers la pile à combustible a été réalisé en 1806 par le chimiste et physicien anglais Sir Humphry Davy qui en réalisant l'électrolyse de l'eau pure obtient distinctement de l'hydrogène et de l'oxygène dont il constate qu'ils sont les seuls produits.

L'électrolyse de l'eau consistant, à l'aide d'un courant électrique (décomposer l'eau en hydrogène et oxygène gazeux), certains scientifiques se sont alors intéressés à effectuer le processus inverse afin de générer un courant électrique à partir de l'hydrogène et de l'oxygène.

Néanmoins, la découverte du principe de la pile à combustible n'intervient qu'en 1839 quand le scientifique suisse Christian Friedrich Schöenbein observe en réalisant une électrolyse que lorsqu'il coupe l'alimentation, les produits donnent lieu pendant quelques secondes à un courant électrique de sens inverse à celui appliqué pour réaliser l'expérience.

En 1839, lors d'une réunion scientifique à Birmingham, Schöenbein rencontra l'avocat et chimiste anglais Sir William Robert Grove, qui travaillait sur les batteries à l'époque, et les deux restèrent en contact et rassemblèrent leurs découvertes.

Les acteurs du domaine énergétique français ne restent pas à l'écart des travaux de l'époque mais pour des raisons de faisabilité technique ou pour des raisons stratégiques (choix d'autres filières de production d'électricité) les programmes sont progressivement arrêtés. Ce n'est que dans les années 1990 que les recherches reprennent, notamment dans le domaine automobile. . En 1999, les recherches vont être encouragées (et financées) grâce à la création d'un réseau national de recherche technologique " pile à combustible" [3].

Elles sont poursuivies à l'heure actuelle par l'intermédiaire de projets financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) ou d'autres organismes publics comme.

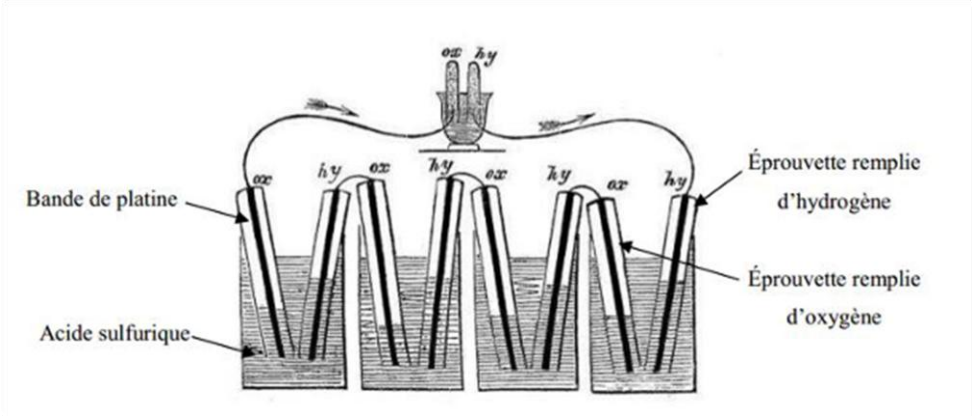


Figure. I.2: L'expérience de Sir William Grove /ClubPac/

I.4. Évolutions technique:

Depuis 1977, certaines piles à combustible (utilisées sur les satellites) contiennent des membranes en polymères (électrolyte solide acide ou alcalin) rendus conducteurs, prenant la forme d'une fine membrane séparant les deux électrodes [8]. Ces électrodes contiennent du platine, qui agit comme catalyseur de la réaction. S'agissant d'un métal rare, polluant et coûteux, on lui cherche donc des alternatives; on teste, par exemple en Chine, un polymère (polysulfone ou polysulfone à ammonium quaternaire) avec une cathode (côté oxygène) en argent et une anode (côté hydrogène) en nickel plaquée de chrome [9].

En 2010, des chercheurs américains et des chercheurs allemands ont proposé d'intégrer un catalyseur supplémentaire, moins coûteux et qui pourrait diviser par deux la quantité de platine des piles à combustible [10]; il s'agit de nanosphères construites avec des atomes de platine et de cuivre, dont les particules de cuivre sont par la suite en partie extraites, laissant une sorte de nanocoquille de platine de quelques atomes d'épaisseur. La méthode de production de ces nanosphères est telle qu'elle diminue leur capacité de fixation de l'oxygène, ce qui favorise la formation d'eau en rendant la pile plus productive. Selon cette équipe cela pourrait réduire de 80 % le prix des piles à combustible. Ce procédé pourrait être appliqué à d'autres métaux pour produire d'autres types de catalyseurs pouvant par exemple permettre une production d'hydrogène et d'oxygène à partir d'eau comme stockage chimique de l'énergie électrique produite par des éoliennes ou des panneaux solaires, avant de la restituer sous forme d'électricité.

I.5. Principe de fonctionnement:

La pile à combustible PEM met en jeu la réaction d'oxydoréduction entre l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'eau, de l'électricité et de la chaleur. Elle transforme une énergie chimique en énergie électrique. Donc la pile à combustible est un appareil qui permet de

convertir l'énergie chimique d'un combustible et d'un oxydant en énergie électrique. Elle fonctionne sur le mode inverse de l'électrolyse de l'eau. Son architecture est similaire à celle d'une batterie.

Pour le bon fonctionnement de la pile, des accessoires lui sont associés. Ils ont pour objectif d'alimenter cette dernière en hydrogène et en air, d'évacuer l'eau formée à partir de la réaction de l'hydrogène avec l'oxygène, et d'assurer le refroidissement. À cela s'ajoute un système de supervision permettant de coordonner l'ensemble des accessoires. [11]

I.6. Constitution:

Une cellule élémentaire est constituée de 3 éléments (Figure 1):

- deux électrodes,
- un électrolyte

Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. A l'anode, on amène le combustible (le plus souvent de l'hydrogène, parfois du méthanol). Le combustible est injecté à l'anode où il est oxydé et libère des électrons dans le circuit. La cathode est alimentée en oxygène (ou plus simplement en air, enrichi ou non en oxygène). L'oxydant est injecté à la cathode où il est réduit grâce aux électrons issus du circuit extérieur. L'augmentation de la puissance nécessite l'association de plusieurs éléments en série ou en parallèle (stack), voir figure 2. [11]

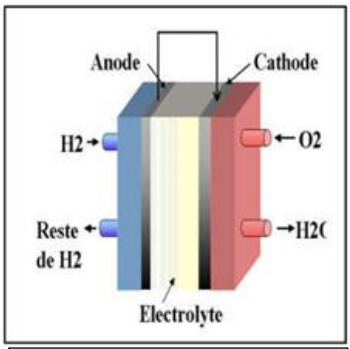


Fig.I.3. Constitution general d'une pile à combustible

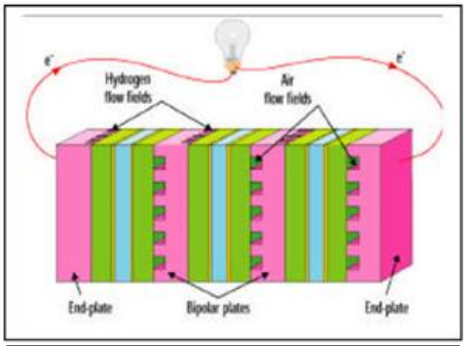


Fig. I. 4. Assemblage de cellulesélémentaires dans une PAC (3 piles)

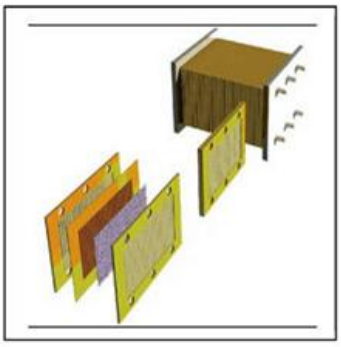


Fig.I.5. Une cellule élémentaire d'une PAC

I.7. Fonctionnement: [11]

L'hydrogène H2 alimente le côté anode (électrode négative) : ses atomes sont dissociés en électrons et en protons. Les protons traversent la membrane, tandis que les électrons circulent de l'anode vers la cathode (électrode positive) par les électrodes et le circuit électrique extérieur dans lequel une partie de leur énergie potentielle est convertie en travail utile. L'oxygène O2 (pur ou de l'air) alimente le côté cathode et se combine aux protons qui ont traversé la membrane et aux électrons venant du circuit électrique pour donner de l'eau (Figure **I.4**). Cette eau issue de la réaction électrochimique doit être évacuée, souvent par un débit d'air en excès.

La pile à combustible constitue donc un dispositif de transformation de matière et de conversion d'énergie fortement hétérogène.

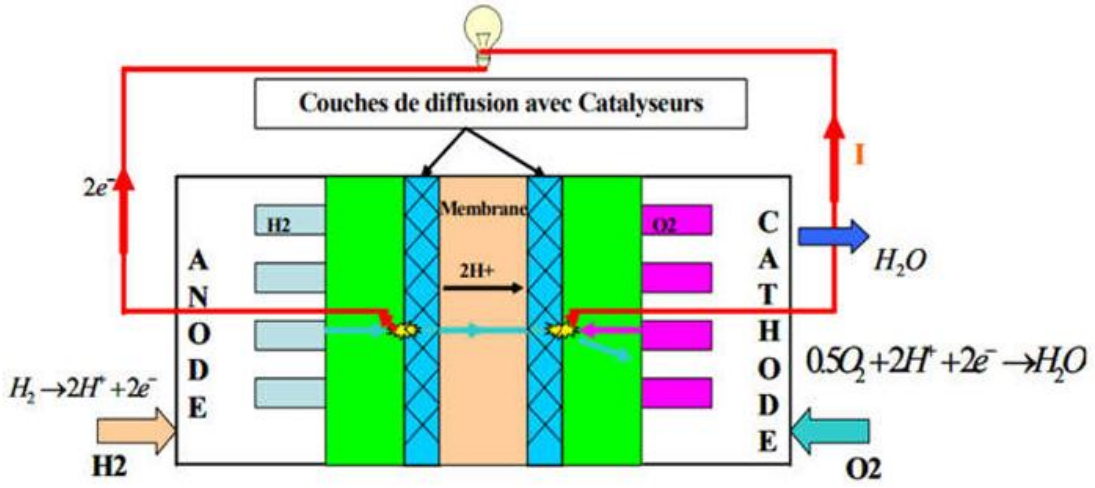


Figure I.6. Fonctionnement d'une pile à combustible

A. Réactions chimiques: [11]

Le résultat net des réactions simultanées au sein de ce dispositif de conversion électrochimique est une production d'eau accompagnée de production d'électricité à courant continu et de chaleur suivant les réactions :

A la cathode (électrode positive), réduction de l'oxygène

$$½\ O_2 + 2H^+ + 2e^- = H_2O \quad (I.1)$$

A l'anode (électrode négative), oxydation de l'hydrogène

$$H_2 = 2H^+ + 2e^- \quad (I.2)$$

La réaction d'oxydoréduction totale s'écrit :

$$½\ O_2 + H_2 = H_2O + \text{energie electrique} + \text{chaleur} \quad (I.3)$$

Les électrodes génèrent du courant tant qu'elles sont approvisionnées en combustible.

B. Rendement:

Le rendement d'un processus de transformation d'énergie est défini comme

$$\tau = \frac{energie\ recueree}{energie\ fournie} \quad (I.4)$$

Le rendement de la pile à combustible est donc égal au rapport entre l'énergie électrique délivrée et l'énergie potentielle de l'hydrogène consommé pour produire cette électricité, voir Figure I.7.

L'énergie potentielle de l'hydrogène dépend des réactifs et des conditions de la réaction. Le rendement global peut se mettre sous la forme suivante:

$$\tau = \tau_{thq} * \tau_f * \tau_{volteq} * \tau_{mat} \quad (I.5)$$

τ_{thq} : est le rendement thermodynamique ()

C'est le rapport entre le travail électrique récupérable et l'enthalpie de la réaction à l'équilibre thermodynamique

τ_f : est le rendement faradique

C'est un rapport qui tient compte du nombre d'électrons effectivement obtenus par mole de carburant présent.

τ_{volteq} : est le rendement voltaïque

C'est le rapport entre la tension de sortie de la pile et la tension E0 (tension à vide) à la température concernée.

τ_{mat} : est le rendement matière- Quantités de combustibles [11]

Ce rendement concerne l'utilisation des réactifs au niveau des électrodes

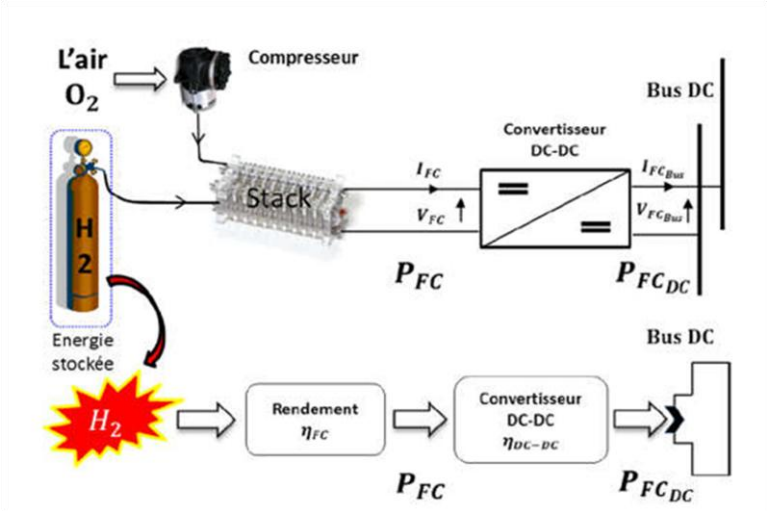


Figure I.7. Notion du rendement de la pile

C. Système pile à combustible:

Le système ou générateur PAC se compose donc de la pile et de composants auxiliaires Destinés à la faire fonctionner. La figure I.6 ci ci-dessous fait apparaître un exemple de schéma relatif à un système PAC embarqué. [12]

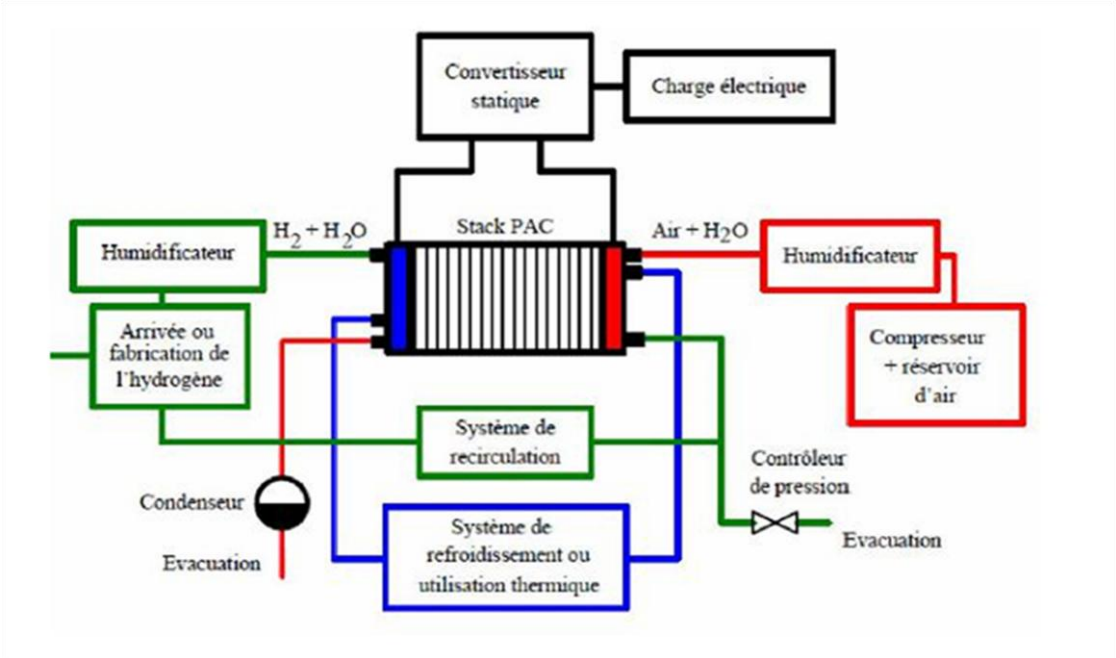


Figure I.8. exemple de schéma relatif à un système PAC embarqué

Les auxiliaires assurent notamment l'approvisionnement des réactifs, leur conditionnement, l'évacuation des produits et de la chaleur, la conversion et l'exploitation de l'énergie électrique.

I.8. Les différents types des piles à combustible:

Les piles à combustible sont classées en basant sur des critères différents telle que: la température de fonctionnement (haute de 600° à 1000° et basse de 60° à 250°), la nature de la membrane utilisée (liquide ou solide) et le type de combustible (hydrogène, méthanol, gaz naturel). De ceci ils ont fini par avoir six types différents des piles à combustible qui sont:

- ✓ **Les piles à basse température de fonctionnement [5]**

- Les piles à combustible à membranes polymères échangeuse de protons (PEMFC Proton Exchange Membranes Fuel Cell).
- Les piles à combustible à méthanol directe (DMFC Direct Methanol Fuel Cell).
- Les piles à combustible à acide phosphorique (PAFC Phosphorique Acid Fuel Cell).
- Les piles à combustible alcaline (AFC Alkaline Fuel Cell).

- ✓ **Les piles à haute température de fonctionnement**

- Les piles à combustible a oxydes solides (SOFC Solid Oxyde Fuel Cell).
- Les piles à combustible a carbonates fondus (MCFC Molten Carbonate Fuel Cell).

Le Tableau (I.1) représente les différents types des piles à combustible:

	Basse température				Haute température	
	AFC	**PAFC**	**PEMFC**	**DMFC**	**MCFC**	**SOFC**
Température (°C)	80 à 250	150 à 220	70 à 100	60 à 90	600 à 800	600 à 1100
Electrolyte	Potasse (KOH) liquide	Acide phosphorique (PO_4H_3) liquide	Membrane en polymère solid	Membrane en polymère solide	Mélane de Li_3CO_3 et K_2CO_3 Liquide	Céramique Solide
Combustible possible	H_2	H_2 (pur ou reformé)	H_2	Méthanol (CH_3OH)	Hydrogène, gaz naturel, méthanol…	Hydrogène, gaz naturel, méthanol…
Catalyseur	Platine	Platine	Platine	Platine	Nickel et l'oxyde de nicke	Nickelzirconе (Cermet)
Oxydant	O_2 (pure)	Air/O_2	Air/O_2	Air/O_2	Air/O_2	Air/O_2
Ion mobile	OH^-	H^+	H^+	H^+	CO_3^{-2}	O^{-2}
Rendement	55-60%	35-50% +75% avec cogénération	35-45%	20-30%	50-60%	50-55% +70% en cogénération
Gamme de Puissance (kW)	1-100	50-1000	10^{-3}-1000	10^{-3}-1000	100-10^5	5-10^5
Applications	Spatial Militaire Equipement portable	Transport, Equipements portable	Cogénération, Téléphone portable, Sous-marin, Automobile, Spatiale	Applications portables	Cogénération, production centralisée d'électricité	Cogénération, production centralisée d'électricité, automobile, maritime

Tableau II.1: Les différents types des piles à combustible

I.9. Les applications des piles à combustible:

Les PACs sont utilisés dans plusieurs domaines on mentionne:

I.9.1. Transport:

A. Transport Ferroviaire:

Les piles à combustible sont aujourd'hui utilisées dans un train du nom de Coradia iLint qui a été créé par le groupe Alstom et est entré en service en Allemagne en 2018. Il a été conçu à Salzgitter en Allemagne et à Tarbes en France.



Figure I.9: Train Coradia iLint

B. Automobile:

Les prototypes les plus connus sont de la marque Mercedes, Audi, Peugeot, Ford, GM, Nissan, BMW et d'autres marques. De plus, les voitures hybrides électriques à hydrogène commercialisées depuis 2016 sont Toyota, Hyundai et Honda



Figure I.10: Toyota Mirai



Figure I.11: Mercedes-Benz GLC FCELL

C. Aéronautique:

Dans le domaine aéronautique, le premier exemple d'application est le Dimona qui a été transformé par Boeing. Il s'agit d'un modèle réduit alimenté par une pile à hydrogène de type PEMFC de la firme britannique Intelligent Energy. L'avion a volé environ 20 minutes en palier à 100 km/h et a grimpé jusqu'à une altitude de 1 000 mètres.



Figure I.12: Le Dimona transformé par Boeing

Par la suite, un avion à hydrogène entièrement électrique dont l'énergie est produite par une pile à combustible du nom de HY4 de DLR Institute of Engineering Thermodynamiques qui a décollé le 29 septembre 2016 de l'aéroport de Stuttgart. Cet engin à un moteur électrique de 80 kW. Au décollage, une batterie de lithium-ion fournit de l'électricité à l'avion mais en vol, il s'agit de la pile à combustible qui en fournit à l'aide de l'oxygène de l'air.

D. Spatial:

D'après une présentation sur la pile à combustible pour les 50 ans de la mission Apollo 11, présentée par David BOUQUIN, le jeudi 9 mai 2019 La NASA a utilisé 2 types de piles à combustible pour deux programmes avec l'aide d'ingénieurs de General Electric. Pour les missions Gemini, ils ont créé une pile AFC en hybridation avec des batteries, il y avait 6 stacks pour 707 h d'autonomie reliés à plusieurs batteries (Figure I.12). Cependant, ils ont trouvé une pile plus adaptée pour les missions Apollo, afin d'avoir moins de soucis quant aux niveaux d'eau dans les piles et aussi avec une durée de vie plus longue que l'AFC. Ils ont donc utilisé des piles PEMFC durant ces missions Apollo



Figure I.13: Décollage Titan2(Gemini)



Figure I.14: Décollage Saturn V (Apollo)

E. Naval:

Dans le domaine naval, nous avons deux types d'applications, les bateaux et les sous-marins. Nous avons par exemple les sous marins allemands Type 212, et Type 214 développés par Howaldtswerke-Deutsche Werft AG (HDW), utilisant comme la pile à combustible de type PEMFC[13].



Figure I.15: Sous-marin allemand - Type 212



Figure I.16: Sous-marin allemand - Type 214

I.9.2. Stationnaires:

Dans le domaine stationnaire, on peut parler de domaine de cogénération, où nous utilisons des piles à combustible comme source d'énergies délocalisées.

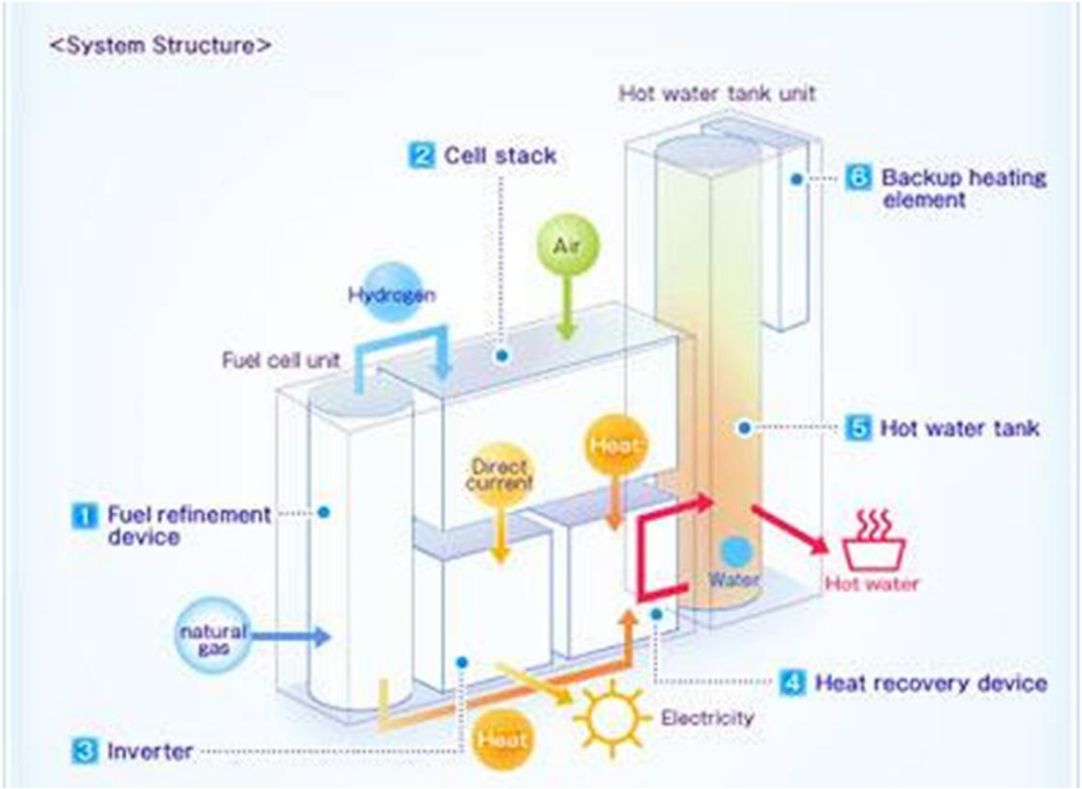


Figure I.17: Principe de fonctionnement d'une PAC en cogénération

Les deux principaux domaines d'application sont la production collective, d'une puissance de 200 kW à quelques MW, et la production individuelle, d'une puissance de 2 à 7kW. Son rendement varie en fonction de sa taille. En plus de pouvoir fournir de l'électricité, la pile à combustible peut nous fournir de l'eau chaude, ce qui peut être utilisée pour le chauffage domestique par exemple. De plus, le rendement total de la pile utilisée à des fins de cogénération peut s'élever à 80%.[14]

I.9.3. Nomades:

Les piles à combustibles sont de plus en plus utilisées comme alternative aux générateurs et recharge des batteries servant comme alimentation de secours, assurant une grande autonomie et restant fiable aux démarrages. Les PEMFC sont le plus souvent utilisés comme alimentation. De même pour les téléphones mobiles et ordinateurs portables, qui connaissent tous deux, une très forte croissance mais sont limitées par l'autonomie de leur batterie. [15]

I.10. Choix technologique de la pile à combustible:

La PEM dans la traction de véhicule electrique

Parmi tous les types de piles à combustible connus, la pile à membrane échangeuse de protons reste la plus utilisée dans le domaine d'automobile, mais elle n'a pas été choisie aléatoirement, plusieurs raisons expliquent ce choix.

- **Densité de puissance**

La propulsion d'un véhicule requiert une puissance de quelques kilowatts à une centaine de kilowatts. En outre, le groupe motopropulseur doit avoir une masse et un encombrement acceptable. La PAC de type PEM répond le mieux à ces contraintes avec une densité de puissance comprise entre 1 kg/kW et 3 kg/kW.

- **Température de fonctionnement**

La pile de type PEM a une température de fonctionnement comprise entre 50 °C et 80 °C, ce qui est adapté à un usage automobile.

- **Structure solide**

La pile à combustible PEM est composée d'éléments solides (spécialement la membrane en polymère). Cette structure solide garantit une certaine résistance mécanique vis à vis des contraintes liées à l'environnement automobile et elle est, ensuite, insensible à la présence du CO_2 dans l'air, contrairement à la filière alcaline [5].

I.11. Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC):

I.11.1. Définition:

Les piles PEMFC ont des multiples applications autant dans le domaine automobile que dans le domaine stationnaire et portable. Elles présentent plusieurs avantages : non sensibles au CO2 (comme l'est l'AFC), faible température de fonctionnement permettant un démarrage rapide, grande souplesse de fonctionnement et une meilleure gestion thermique, multi usage et couvrent un large spectre de puissance. Cependant, elles présentent encore des problèmes qui doivent être réglés : très sensibles au CO, faible valorisation de la chaleur et coût élevé de catalyseur (Platine).

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:

$$2H^2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \quad \text{(I.6)}$$

Et à la cathode, on a:

$$O2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \quad \text{(I.7)}$$

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 plusrobustes 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. [13] [14]

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 plusrobustes 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. [16] [17]

I.11.2. 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.16).

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.18).

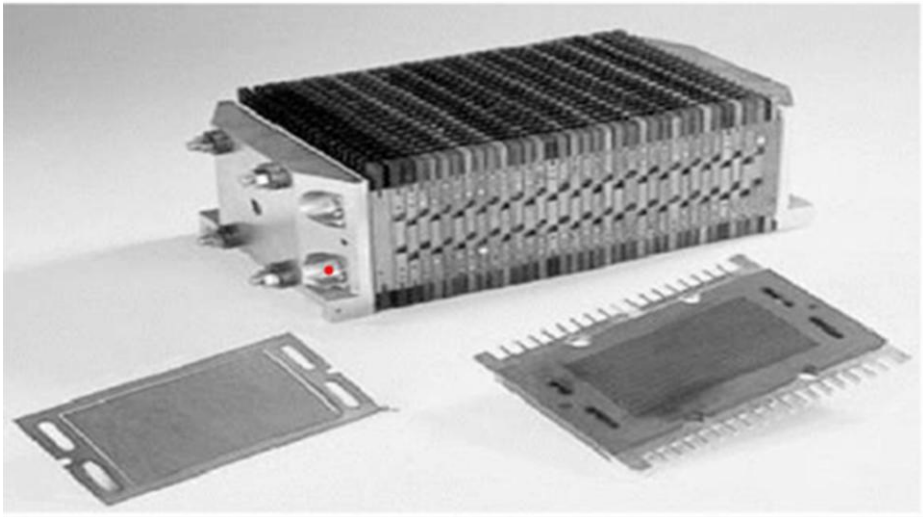


Figure I.18: Stack' d'une pile à combustible de type PEMFC

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

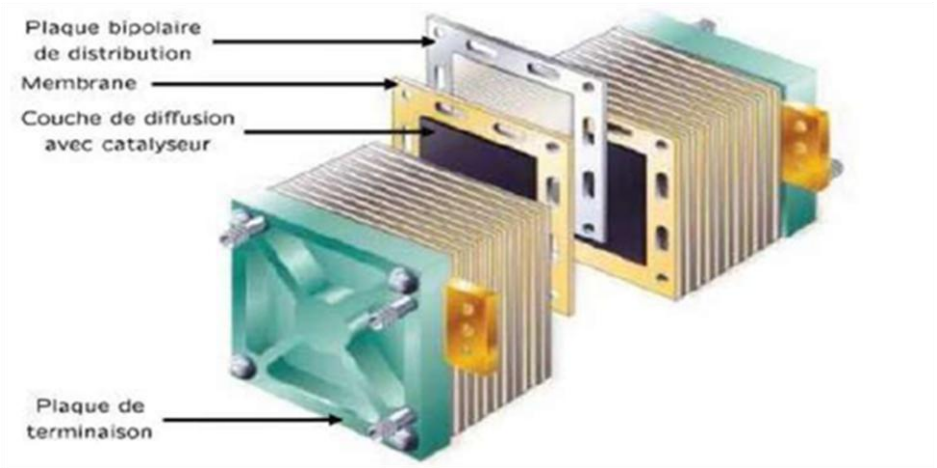


Figure I.19: la structure d'une cellule et d'un empilement

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.

A. 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. [5]

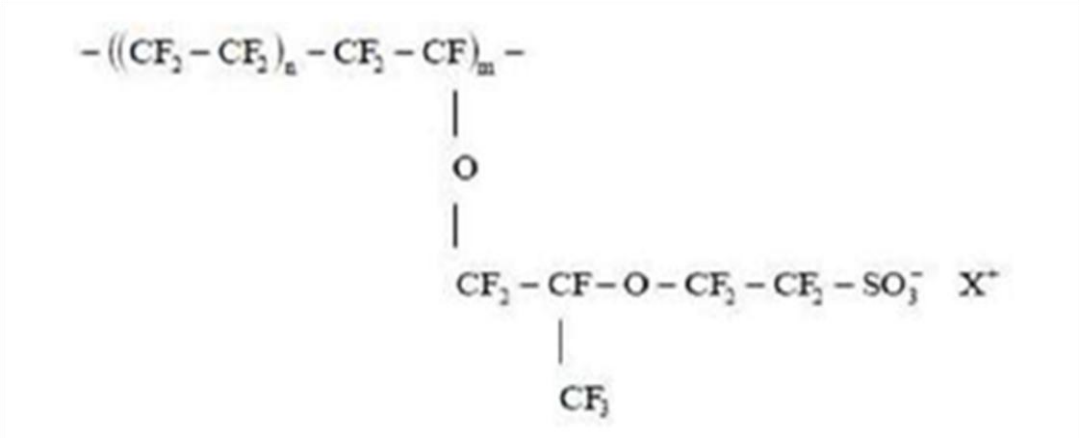


Figure I.20: Structure chimique d'une membrane

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. [5]

B. 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 [16,17].

C. 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). [16, 17]

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. [18]

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. [18]

D. 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

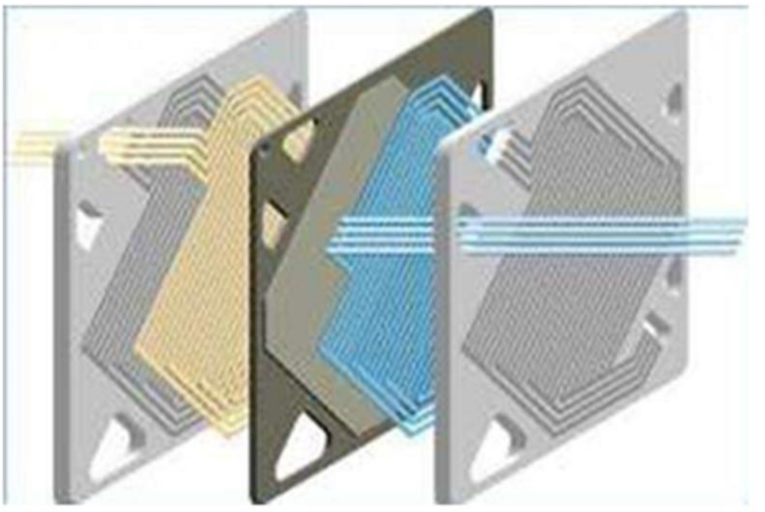


Figure I.21: Plaque bipolaire

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. [5]

I.11.3. 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).

A. Tension de Nernst:

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

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta G}{2{:}F} + \frac{\Delta S}{2{:}\mathrm{F}}\left(T - T_{ref}\right) + \frac{R.T}{2.F}\left[\ln(P_{H2}) + 1/2\,(P_{H2})\right] \quad \text{(I.8)}$$

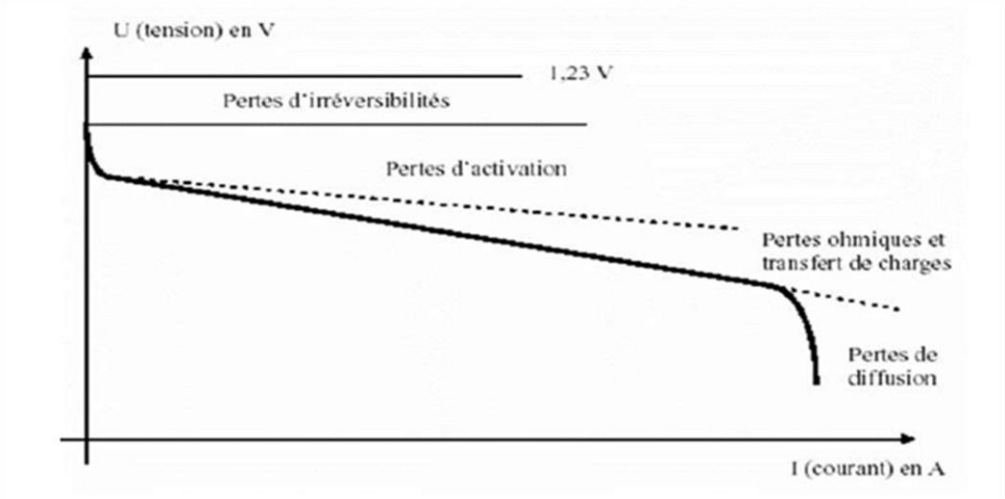


Figure I.22: Caractéristiques courant - tension d'une pile à combustible

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.

B. 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. [13, 14]

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. [16, 17]

C. 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. [13, 14]

D. 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. [13,14]

I.12. 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

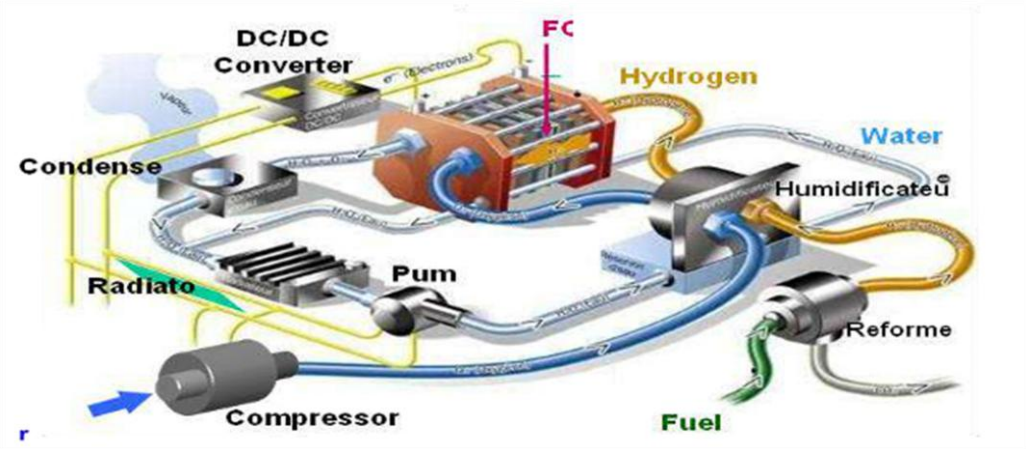


Figure I.23: Schéma fonctionnel d'un groupe électrogène à pile à combustible

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 sys tème de contrôle. [16]

I.12.1. 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. [5]

A. 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. [5]

B. 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. [5]

C. 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. [5]

I.12.2. 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

A. 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)

B. 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

C. 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) [5]

D. Circuit électrique:

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

I.13. Les avantages et les inconvénients des piles à combustibles:

I.13.1. 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 [19]:

- 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.13.2. 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 [19]:

- le coût.
- le poids et le volume.
- la durée de vie.
- la gestion thermique du module.
- le carburant et la mise en place des normes de sécurité liées à son emploi.

I.14. conclusion:

Le contenu de ce premier chapitre a porté sur les piles à hydrogène, avec un intérêt particulier à l'analyse plus poussée des piles à membrane échangeuse de protons (PEM). L'analyse a commencé par l'historique succinct du développement de la technologie, suivi de la formulation aussi succincte que possible de son principe de fonctionnement. Ce travail s'est uniquement concentré sur les piles PEM. Cette orientation suit surtout le fait que ce système est le meilleur candidat pour des applications de mobilité. Les détails concernant le fonctionnement d'une cellule de type PEM ont été abordés ainsi que ceux concernant l'ensemble de son organisation. Le rendement global de ce type de pile a été aussi défini et discuté.

Chapitre II

Les Véhicules Electriques

Chapitre II: Les Véhicules Electriques:

II.1. Introduction:

Dans un temps ou l'activité humaine et le potentiel économique ne cessent d'évoluer, le XXème siècle a connu un réchauffement climatique jamais enregistré auparavant. Les causes ne sont pas tant à rechercher dans la nature que dans la concentration des gaz polluants entre autres le CO2 dans l'atmosphère dues à l'activité humaine. Le secteur des transports est désormais le secteur le plus accusé des gaz à effet de serre, c'est la raison pour laquelle l'industrie de l'automobile s'intéresse précieusement au phénomène de la pollution afin d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre et contribuer à une vie plus seine, et propose le véhicule électrique pour améliorer la qualité de l'air. Les véhicules électriques (VE) et hybrides constituent actuellement une alternative potentielle face aux véhicules conventionnels a carburant d'origine fossile, permettant aux constructeurs de véhicules de se focaliser sur l'objectif de pouvoir répondre aux quantités et quantités exigées par les utilisateurs (performances et consommation) s'aligner aux lois de protection de l'atmosphère (réduction des émissions de polluants) [20].

Dans ce chapitre nous allons présenter un état de l'art de la voiture électrique tout en mettant en évidence les principaux composants de la chaine de traction en citant les différentes configurations. Nous soulignerons aussi leurs avantages et inconvénients.

II.2. Les véhicules électriques comme solution ultime du problème de CO2:

Le développement des véhicules à moteur à combustion interne est qualifié parmi les meilleures réalisations de la technologie moderne. L‟industrie automobile et les autres industries associées constituent l‟épine dorsale de l‟activité économique mondiale. Cependant, la forte utilisation de ces automobiles est d‟un impact non négligeable sur l‟environnement et la vie humaine en général. La pollution, le réchauffement de la planète et l‟épuisement des ressources fossiles deviennent des préoccupations mondiales pour les années à venir. Dans les dernières décennies, les activités de recherche et de développement dans le secteur du transport se sont intensifiées dans le but de propres . Les véhicules électriques, hybrides électriques et hybrides à pile à combustible sont au cœur de cette recherche [21].



Figure II.1: Dodge EV.[18]

D"autre part, les véhicules tout électriques possèdent de grands avantages par rapport aux véhicules traditionnels représentant la solution idéale aux problèmes annoncés.

En effet, les véhicules tout électriques sont:

- Sans émission des gaz à effet de serre (en supposant que la production d"électricité est « propre »).
- Sans pollution environnementale locale.
- Sans dépendance des ressources fossiles.
- Ont un bon rendement global de la chaîne de traction.
- Permettent un freinage électrique avec récupération d"énergie.
- Ont une conduite plus souple.
- Sont d"une conception simplifiée (suppression des boîtes de vitesse... etc.).
- Sont silencieux.

Cependant, les inconvénients des véhicules tout électriques coïncident avec les avantages des véhicules traditionnels : leur source d"énergie embarquée (les batteries) est caractérisée par une faible densité d"énergie engendrant ainsi un véhicule aux faibles performances avec une autonomie réduite.

II.3. Historique de développement:

Le premier véhicule électrique a fait son apparition aux alentours de 1830. Son inventeur était Robert Anderson (un homme d"affaires écossais).

Il s"agissait plutôt d"une carriole électrique. Vers 1835, l"américain Thomas Davenport construisit une petite locomotive électrique. Vers 1838, l"écossais Robert Davidson arriva avec un modèle similaire qui peut rouler jusqu"à une vitesse de 6 km/h. Ces deux inventeurs n"utilisaient pas de batterie rechargeable.

En 1859, le français Gaston Planté inventa la batterie rechargeable au plomb-acide qui a connu une amélioration par Camille Faure en 1881. La figure 2.2 montre Thomas Parker assis dans un véhicule électrique qui pourrait être le premier au monde (en 1884). Le petit véhicule fonctionnait avec une batterie non rechargeable et réussissait à parcourir un court trajet sur rail. En 1891, l"américain William Morrison construisit le premier vrai véhicule électrique.



Figure II.2: Premier véhicule électrique à batterie rechargeable



Figure II.3: Premier vrai véhicule électrique en 1891

Depuis leur apparition en 1873 au Royaume-Uni, soit plus de dix ans avant l‟apparition en 1885 du premier véhicule à essence par les Allemands Daimler et Benz, l'histoire des VE n'a cessé de se présenter comme une suite de hauts et de bas. Jusqu'à il y a quelques années de cela, ils n'ont suscité un intérêt sporadique qu'à la faveur de l'importance prise par des problèmes liés à l'énergie ou à l'environnement comme par exemple les crises pétrolières des années 1974 et 1979. Chaque fois, les VE n'ont su se faire accepter par le marché en raison des réserves inspirées par leur coût et par leurs performances. Pourtant, pour mémoire, le premier véhicule automobile a franchi la barre des 100 km/h était un VE : la "Jamais contente" (baptisée ainsi en l'honneur de sa femme) du Belge Camille Jenatzy atteint ainsi 105 km/h en 1899. Depuis, les VE n'ont pratiquement connu que des utilisations spéciales dans des conditions bien circonscrites [22].



Figure II.4: La jamais contente

Dès 1900, le véhicule électrique connaît ses beaux jours. Plus du tiers des véhicules en circulation étaient électriques, le reste étant des autos à essence et à vapeur. En 1902, "La Phaeton de Wood" pouvait rouler 29 kilomètres à une vitesse de 22.5 km/h et coûtait 2000

dollars. En 1912, la production des véhicules électriques était à son apogée mais l‟introduction de "La Ford Model T à essence" en 1908 commençait à se faire sentir. "L‟Anderson Electric Car Company" présenta son modèle en 1918 à Détroit.



Figure II.5: Wood phaeton 1902 [23]



Figure II.6: Véhicule d‟Anderson Electric Car Company [23]

En 1920, quelque facteurs menèrent à réduire la production du véhicule électrique. On peut citer leur vitesse trop basse, leur faible autonomie, la recharge d‟énergie électrique, la disponibilité du pétrole, leur manque de puissance [24] et leur prix deux fois plus élevé que les Ford à essence.

En 1966, le congrès américain recommanda la construction de véhicules électriques pour réduire la pollution de l‟air [25]. L‟opinion publique américaine était largement favorable et avec l‟augmentation du prix de l‟essence en 1973 (premier choc pétrolier : embargo de l‟Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole envers les Etats-Unis) le moment était bien là. Pourtant rien ne décolla vraiment.

En 1972, Victor Wouk le parrain du véhicule hybride, construisit le premier véhicule hybride, "La Buick Skylark" de General Motors (GM). En 1974, "La Vanguard-Sebring CitiCar", qui ressembla beaucoup à un véhicule électrique de Golf, fit son apparition à "l‟Electric Véhicule Symposium de Washington D.C". Elle pouvait rouler sur 64 kilomètres à une vitesse de 48 km/h.

En 1990, l‟État de la Californie vote le "Zero Émission Vehicle (ZEV)", un plan qui prévoyait que 2% des véhicules ne devraient avoir aucune émission polluante.

Entre 1996 et 1998, GM produira 1117 EV1, dont 800 d‟entre elles en location avec un contrat de 3 ans. En 1997, Toyota lança "La Prius", premier véhicule hybride commercialisé en série. 18000 exemplaires étaient vendus au Japon la première année de sa sortie d‟usine.



Figure II.7: Toyota Prius XW10

De 1997 à 2000, de nombreux constructeurs lancèrent des modèles électriques hybrides : la Honda EV Plus, la G.M. EV1, le Ford Ranger pickup EV, Nissan Altra EV, Chevy S-10 EV et le Toyota RAV4 EV.

En 2002, GM et Daimler Chrysler poursuivaient le "California Air Ressourcées Board (CARB)" pour faire annuler la loi "Zero Emission Vehicle (ZEV)" de 1990 [25]. Le président américain George Bush était d‟accord avec cette annulation.

En 2003, en France, Renault fit une tentative avec la sortie de son véhicule hybride "Kangoo Elect‟road", mais, abandonna la production après environ 500 véhicules. Entre 2003-2004, c‟était la fin de l‟EV1. GM va récupérer "un par un tous les véhicules" pour les détruire et ce malgré plusieurs mouvements de protestation.



Figure II.8: Fin de l‟EV1

En 2006, Chris Paine sortit un documentaire intitulé "Who Killed the Electric Car ?" qui analysa la montée en puissance et le déclin du véhicule électrique à la fin des années 90.

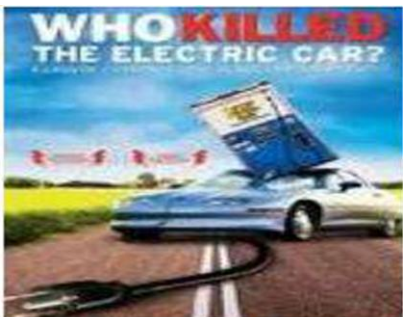


Figure II.9: Préambule du documentaire "Who Killed the Electric Car?"

En mars 2009, Vincent Bolloré annonça la sortie pour 2010 de " La Pininfarina Blue Car". Sa location mensuelle était à 330 euros.



Figure II.10: La Pininfarina Blue Car

II.4. Définition d'un véhicule électrique :

Le véhicule électrique VE est une automobile dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Contrairement aux véhicules à carburant, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue [26].

Compte tenu des progrès scientifiques et technologiques accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, les systèmes de gestion de l'énergie,… etc. beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions sont explorées pour développer ce mode de propulsion. Le système de propulsion électrique a une architecture très simple. Il est constitué d'un actionneur électrique, un dispositif de transmission, et des roues [27].

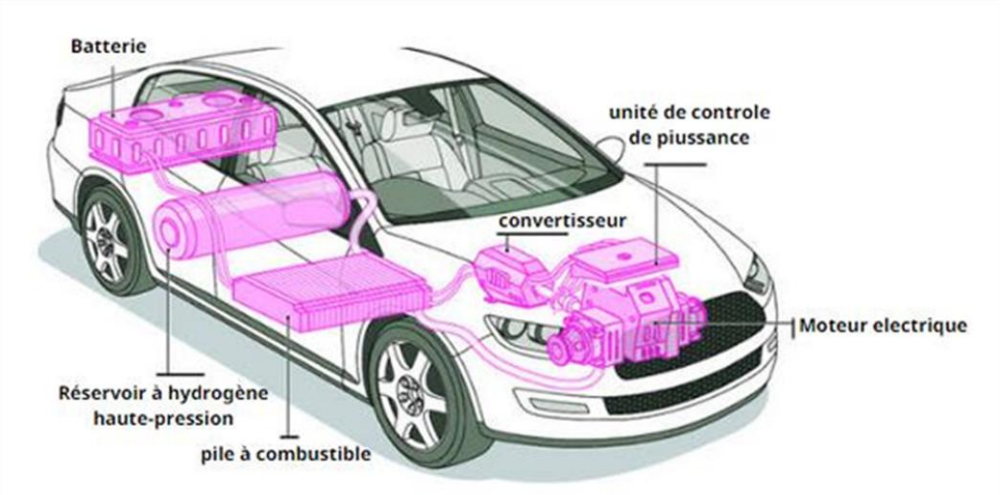


Figure II.11: Système de propulsion d'un VE

II.5. Classification des véhicules électriques:

Compte tenu des progrès scientifiques et technologiques accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, Beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions des VE sont explorées pour développer ce mode de propulsion. Toutes ces explorations sont liées à une problématique commune: la production, le stockage et l'utilisation de l'électricité [28].

Les VH font partie de la famille des véhicules électrifiés qui désigne l'ensemble des véhicules hybrides, hybrides rechargeables et électriques. A l'intérieur de ces familles, plusieurs sous catégories peuvent exister.

II.5.1. Véhicules tout électrique (VTE):

Il s'agit d'un véhicule qui possède uniquement un accumulateur comme source d'énergie, ainsi, le VTE semble bien adapté pour les petits véhicules urbains. En effet, ceux-ci ne sont pas trop pénalisés par la limitation de la puissance et de l'autonomie car ils sont l'une des résolutions du problème de pollution gazeuse et sonore au niveau des conglomérations urbaines [29][30]. Le développement du VE est fortement lié au développement de son alimentation en énergie. Les batteries dont l'énergie massique est relativement faible sont de plus très lourdes et très coûteuses. Selon la source d'énergie utilisée pour alimenter ces véhicules, on distingue essentiellement deux types de véhicules électriques : voitures électriques à batteries rechargeables par prise de courant et voitures électriques à alimentation par pile à combustible.

II.5.2. Véhicules électriques à batteries rechargeables par prise de courant:

Les véhicules électriques fonctionnant avec des batteries, constituent aujourd'hui l'essentiel du parc mondial des véhicules électriques. Une batterie est un système embarqué pouvant stocker de l'énergie électrique pour la restituer par la suite. C'est à ce jour le système

le mieux adapté pour l'alimentation des véhicules électriques. Son invention remonte au 19ème siècle, il est de ce fait, le système de stockage le mieux maîtrisé techniquement. [31]

II.5.3. Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible:

Les VE à pile à combustible sont semblables aux autres véhicules électriques sauf qu'ils produisent leur propre électricité à bord. La source de cette électricité est la pile à combustible. C'est un dispositif électrochimique semblable à une batterie à plusieurs égards. Plutôt que de stocker et relâcher l'énergie électrique comme une batterie, une pile à combustible produit toutefois de l'électricité par réaction chimique aussi longtemps qu'elle reste alimentée en carburant.

Il y a divers types de piles à combustible qui fonctionnent avec différents carburants mais la pile à membrane échangeuse de protons, considérée comme la plus prometteuse pour les véhicules automobiles, utilise de l'hydrogène H2 et l'oxygène de l'air ambiant comme carburant.

Ballard Power Systems a annoncé d'être la première entreprise de pile à combustible à avoir permis à des bus (Figure II.12) en service de circuler sur plus de 10 millions km cumulés [28]



Figure II.12: Auto bus à pile à combustible

La société a réussi cet exploit en sept générations de son moteur à pile à combustible FcveloCity, déployé au sein des autobus de 15 pays sur 5 continents au cours des 10 dernières années. Durant cette période, Ballard a travaillé avec 13 fabricants d'autobus pour developer une variété de configurations de bus à pile à combustible, et ceci en étudiant un large éventail de conditions climatiques et de financement [32]

II.5.4. Véhicules hybrids:

Les véhicules hybrides utilisent au moins deux types de production et de stockage d'énergie habituellement un moteur thermique classique (essence ou diesel), en plus d'au moins un moteur électrique et le stockage d'électricité par batteries. Ces systèmes peuvent fonctionner simultanément ou indépendamment les uns des autres. Les VH, sont quant à eux munis d'un moteur classique et d'un moteur électrique qui fonctionnent en combinaison selon la vitesse et l'accélération du véhicule. Le moteur électrique permet d'améliorer les performances du moteur thermique ainsi que l'autonomie du véhicule. On distingue deux principaux types de système d'entrainement hybrides : parallèle et série, ces systèmes défèrent dans leur façon d'intégrer le fonctionnement des deux unités de production d'énergie. [31]

A. Véhicules hybrides série:

Dans ce cas, le principe repose sur le fait que l'énergie électrique utilisée par le moteur électrique peut être produite par un alternateur entraîné par un moteur thermique fonctionnant à vitesse de rotation constante. Les deux moteurs sont donc en série, d'où l'appellation. On peut alors choisir la vitesse de rotation du moteur thermique de manière à obtenir un rendement maximum et par conséquent augmenter la quantité de carburant brûlée dans un cycle moteur, ce qui implique une diminution des rejets gazeux. Par ailleurs, la signature acoustique du moteur thermique peut être améliorée pour la vitesse de rotation fixe choisie [29]. Le schéma de principe d'un tel véhicule est donné sur la figure (II.13):

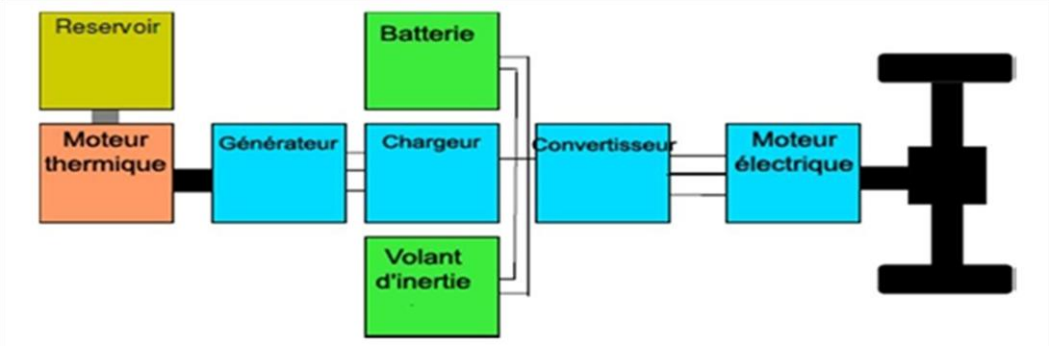


Figure II.13: Véhicule hybride série

La plus grande partie de l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du moteur électrique est fournie par la génératrice. La batterie est là uniquement en tampon pour fournir des pointes d'énergie ou pour fonctionner en mode tout électrique [33]. Un des inconvénients majeur de ce type d'architecture est le faible rendement global de l'ensemble car la puissance mécanique délivrée par le moteur thermique est tout d'abord convertie en puissance électrique par l'alternateur, éventuellement stockée dans les batteries, puis reconvertie en puissance mécanique par le moteur électrique. Cependant, du point de vue de la commande, cette

architecture offre deux degrés de liberté: le régime et le couple du moteur thermique peuvent être choisis quasiment indépendamment des conditions de conduite [34].

B. Véhicule hybride parallèle:

La première idée est de faire deux véhicules en un, en bénéficiant des avantages de chacun. Le VHP possède ainsi deux moteurs fonctionnant en parallèle, un électrique et un thermique. Les deux moteurs sont utilisés séparément et on résout alors le problème écologique du moteur thermique en ville, en fonctionnant en mode électrique et celui de l'autonomie du véhicule électrique pour les grands déplacements hors des agglomérations en fonctionnant en mode thermique [30].

Le schéma de principe d'un tel véhicule est donné sur la figure (II.14):

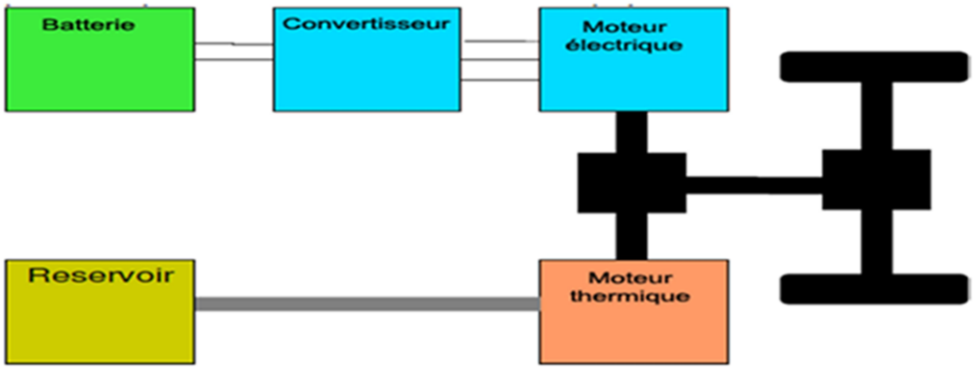


Figure II.14: Véhicule hybride parallèle

Le moteur électrique joue habituellement aussi le rôle d'un générateur entraîné par le moteur thermique pour recharger les batteries lorsque la puissance électrique n'est pas requise pour propulser le véhicule.

C. Véhicule hybride combine:

La catégorie des architectures combinées correspond aux hybrides série/parallèle, appelée aussi hybride parallèle à dérivation de puissance, cette architecture intègre un moteur électrique, une génératrice, et un moteur thermique. Grâce à une gestion efficace des puissances demandées d'un coté, et fournies de l'autre, il est possible de contrôler en régime le moteur thermique, et de partager son couple entre les demandes du véhicule, et la recharge de la batterie. Schématise le fonctionnement d'un hybride combiné [28].

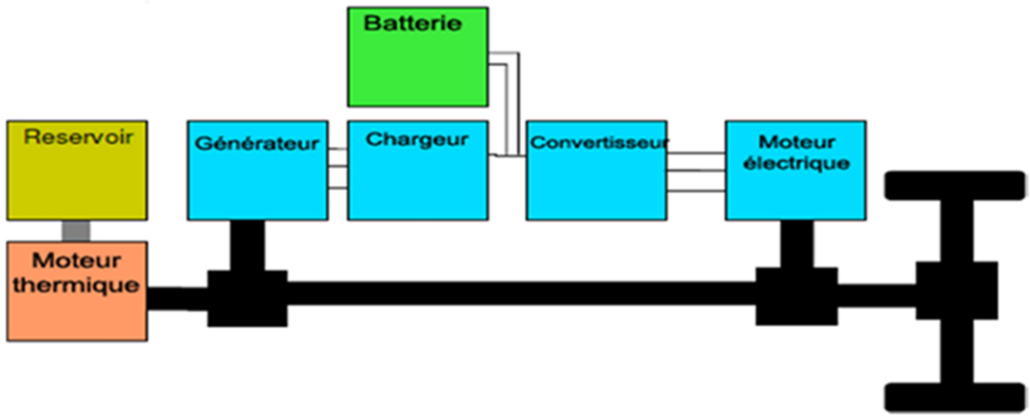


Figure II.15: Véhicule hybride combine

II.6. Actualités des véhicules électriques:

A l'heure actuelle, l'autonomie de l'ensemble des VE proposés par les constructeurs comprennent des batteries qui peuvent développer une vitesse de (70 km à 200km). L'utilisation de la pile à combustible a permis d'augmenter considérablement l'autonomie(400 à 450 km pour le moment) pour arriver à des valeurs proches de celles des véhicules thermiques classiques, donc l'apparition de nouvelles perspectives.

La gamme de puissance s'étale d'environ 15 kW jusqu'à environ 100 kW. C'est l'utilisation des véhicules qui guident le choix de puissance, dont 20 à 30 kW sont suffisantes pour un véhicule urbain alors que 40 à 50 kW sont préférables pour une voiture routière. Pour ce qui est du prix de ces véhicules, il est encore difficile à établir car les quantités produites sont très faibles, souvent ce ne sont que quelques exemplaires qui sont fabriqués. On peut cependant estimer que si les technologies d'alimentation employées (batteries, pile à combustible) sont fabriquées à grande échelle, alors les prix seraient comparables à ceux des véhicules thermiques. En effet, le prix de l'alimentation constitue la part la plus importante du coût d'un véhicule électrique [33].

II.7. Fonctionnement d'un véhicule électrique:

Les véhicules électriques sont dotés d'une batterie qui stocke l'énergie et se recharge grâce à l'électricité du réseau, d'un ou plusieurs moteurs électriques avec un système de contrôle et d'un chargeur de batterie.

La batterie est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. Le régulateur sert à régler l'intensité du courant qui alimente le moteur. Son fonctionnement est assez simple: lorsque le conducteur du véhicule appuie sur la pédale de

l'accélérateur, la batterie libère du courant. Le convertisseur transforme alors le courant continu (DC) de la batterie en courant alternatif (AC) pour alimenter le moteur.

Le convertisseur est une partie intégrante du moteur.Le point fort du véhicule électrique est la chaîne de transmission électromécanique. En effet, un véhicule a besoin d'un couple élevé à basses vitesses afin de pouvoir accélérer et d'un couple moins important à des vitesses de croisière. Ces spécificités sont celles d'un moteur électrique [33].

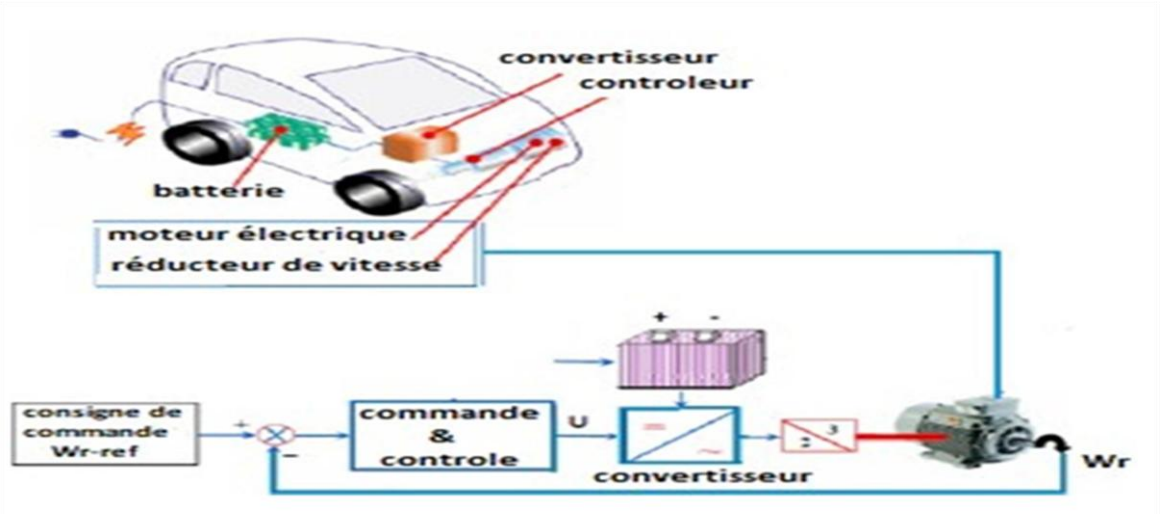


Figure II.16: Composantes et fonctionnement d'un véhicule électrique

II.8. Architecture d'un véhicule à pile à combustible:

Un véhicule à pile à combustible est essentiellement conçu autour des composants suivants:

- 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…

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 [1].

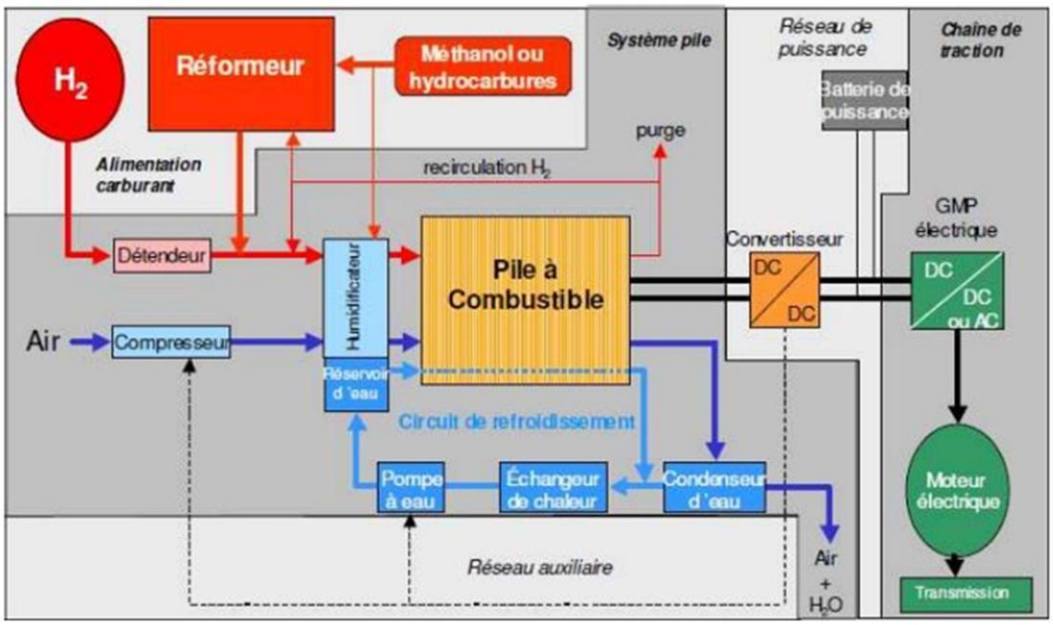


Figure II.17: Schéma général d'un véhicule à pile à combustible - Source Renault – PSA, 1998

II.9. Description générale de la chaine de traction:

La chaine de traction d'un VE est plus simple que celle d'un véhicule thermique. Le choix et l'arrangement des composants qui constituent la chaine de traction sont décrits dans la figure

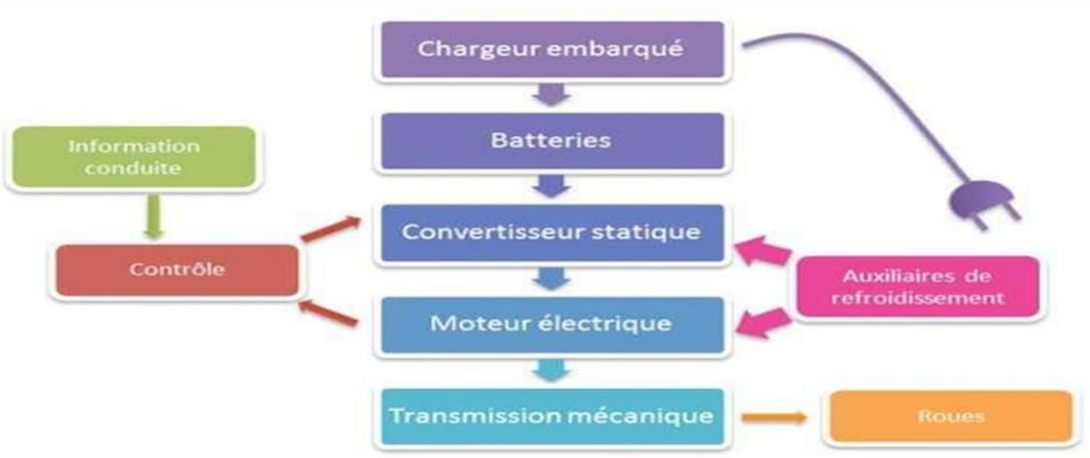


Figure II.18: la chaine de traction dans un VE

Il s'agit, si l'on part du réseau d'alimentation alternatif, du chargeur de batteries, de la batterie électrochimique de la source embarquée d'énergie électrique, de l'ensemble convertisseur statique du moteur électrique et le contrôle et, enfin, de la transmission mécanique dont la fonction est d'adapter la caractéristique mécanique de la charge à celle du moteur. Pour l'analyse de la consommation totale, il faut aussi prendre en compte les auxiliaires comme le

système de refroidissement (air ou eau) du moteur et de son convertisseur électronique, ainsi que la gestion des flux d'énergie entre eux restent au stade de la recherche. Dans cette partie, on essayera de présenter les organes de la traction électrique en justifiant le choix de chaque organe [34].

II.10. Stockage d'énergie:

la batterie est un réservoir d'énergie, et elle est connectée à un convertisseur DC/DC, qui doit être à double sens. Stock l' énergie est l'un des plus grands défis de la généralisation de l'Eva. La densité est inférieure à celui des produits pétroliers, ce qui entraîne un poids plus élevé et une autonomie réduite. Quant à la batterie, il faut de loin plus de temps et de coût pour la recharger qu'il n'en faut pour remplir une cuve pleine à une station-service, ce qui est l'un des plus grands défis.

II.11. La batterie:

La batterie est un système de stockage d'électricité sous forme chimique, pouvant fonctionner de manière réversible (en courant pas en tension), caractérisée par sa capacité et son énergie massique, afin d'alimenter le véhicule d'une façon permanente. L'énergie chimique stockée dans chaque pile est convertie directement en énergie électrique lorsque les bornes de la batterie sont connectées à un consommateur électrique.

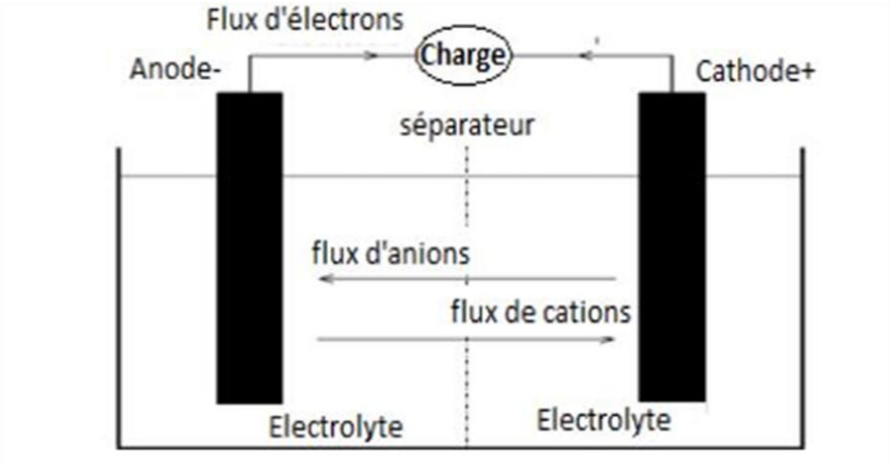


Figure II.19: La vue interne d'une batterie

Le principe de fonctionnement de celle-ci est que la reaction chimique entre les electrodes et l'électrolyte provoque une oxydoréduction. Dans ce cas, l'électrode négative subit une oxydation, c'est-à-dire que la réaction chimique libère des électrons, tandis que l'électrode positive subit une réduction, autrement dit elle absorbe des électrons. Ce déséquilibre des charges électriques génère la F.E.M (Force électro Motrice) de l'accumulateur [35].

Il existe différents types de batteries:

- La batterie Plomb Acide .
- Les batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd).
- Les batteries Nickel-hydrure Métallique (Nickel-Métal hybride Ni-Mh).
- Les batteries Lithium-ion (Li-ion).
- Les batteries Lithium-ion Polymère (Li-po).
- Les batteries Lithium-ion Polymère (Li-po).

Le tableau donne une comparaison de différentes technologies des batteries:

Batterie	Plomb acide	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-ion
Densité énergétique (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	160-200
Nombre de cycles (charge/décharge)	500 à 800	1000 à 2000	600 à 1500	400 à 1200
Temps de charge	6 à 12h	1 à 2h	2 à 4h	2 à 4h
Température de fonctionnement	-20 à 60C	-40 à 60C	-20 à 60C	-20 à 60C

Tableau III.1: comparatif des technologies des batteries

II.12. Le chargeur:

Les chargeurs de batteries sont spécifiques au type d'alimentation électrique à leur emplacement (embarqués ou non au sein du véhicule) et au mode de transmission de l'énergie. Pendant la charge, la batterie se comporte comme un récepteur de courant [36].

Deux grands types des chargeurs ont été définis pour cette fonction :

- **les chargeurs de type "lents":** Le chargeur de type lent est un dispositif d'une moyenne, généralement de 3kW. Il nécessite pour une charge complète du pack de batteries une durée de 5 à 8 heures. Cette opération peut donc s'effectuer en heures creuses.
- **les chargeurs de type "rapides":** Les structures, dont la puissance transitée est supérieure à 10 kW, ont été classées dans les chargeurs dits rapides. La puissance maximale atteint aujourd'hui 150 kW. L'objectif de ce type de montage est de permettre, en peu de temps (inférieur à 30 min.) Une recharge partielle (80%) des batteries [35].

II.13. de puissance dans le véhicule électrique:

II.13.1. Les redresseurs (AC/DC):

Dans un véhicule électrique, les redresseurs sont utilisées pour transformer l'énergieélectrique à courant alternatif fournie, soit par le réseaux de distribution générale, soit par un alternateur placé à bord du véhicule et accouplé à un moteur thermique, en énergie

électrique à courant continu qui peut être stockée dans une batterie d'accumulateurs électrochimiques ou dans une batterie de grande capacité[31] .

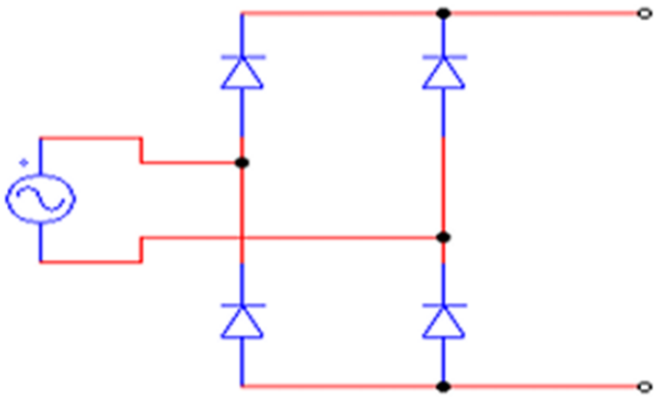


Figure II.20: Schéma détaillé d'un redresseur

II.13.2. Les onduleurs (DC-AC):

Pour les véhicules électrique avec le moteur à courant alternatif, il est exigé d'intercaler entre la source et les moteurs de traction un organe de conversion dénommé onduleur, qui convertit l'énergie électrique continu en l'énergie électrique-alterne et avec lequel on peut réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage du régime cyclique du véhicule à la fois en service et en freinage.[37] [31].

II.13.3. Les hacheurs (DC-DC):

Un hacheur est un convertisseur de courant qui permet d'obtenir à partir d'une source de tension à courant continu de valeur sensiblement constante, des tensions et des courants contrôlés, réglables et adaptés aux besoins nécessaires à l'alimentation des divers récepteurs (capteurs, régulateurs, etc.). Dans un véhicule électrique, les hacheurs ont deux usages essentiels :

- Ils sont indispensables dans l'alimentation des moteurs de propulsion quand ceux-ci sont des moteurs à courant continu.
- Ils sont nécessaires pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires électroniques utilisés (capteurs, régulateurs, etc...) [31].

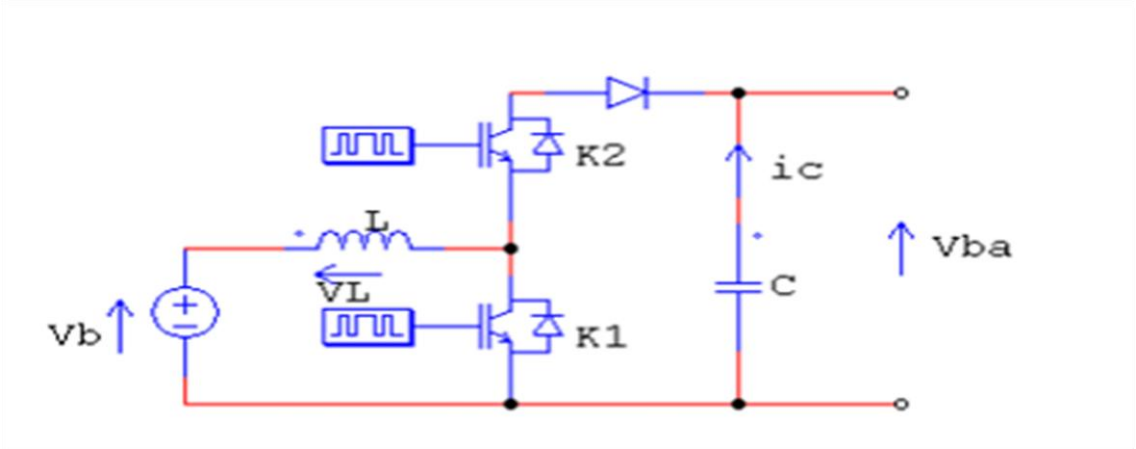


Figure II.21: Schéma détaillé d'un Hacheur élévateur bidirectionnel

II.14. Les moteurs électriques utilisés pour les voitures électriques:

Ce moteur constitué par l'élément fondamental du système de propulsion ayant pour fonction d'acheminer la puissance à un niveau mécanique dans un véhicule électrique est d'une simplicité technique en apparence mais exige néanmoins la reconnaissance de sa particularité et de son rôle en raison des phénomènes électromécaniques qu'il incorpore. En effet, le moteur assure le transfert bidirectionnel de l'énergie électrique vers une énergie mécanique : en mode traction, le moteur convertit l'énergie électrique, reçue un peu plus tôt de la batterie, en énergie mécanique pour entraîner un véhicule, tandis que lors du freinage, le fonctionnement est inversé. L'énergie mécanique, provenant du déplacement du véhicule, redevient énergie électrique, minimisant alors les inconvénients associés à l'énergie électrique (régénération).

Dans ce procédé, la chaîne d'entraînement agit momentanément comme une source d'énergie et la batterie, normalement source, très temporairement comme un récepteur. [38]

II.14.1 Le moteur à courant continu (MCC):

Étant donné que l'énergie fournie par la batterie d'un véhicule électrique est en courant continu, le moteur à courant continu apparaît comme une solution naturellement compatible. Historiquement, ce type de moteur a largement été utilisé dans les premières générations de véhicules électriques en raison de la simplicité de contrôle de la vitesse qu'il permet. Il présente également des caractéristiques dynamiques intéressantes pour l'application automobile, notamment une courbe de couple avantageuse à basse vitesse.

Cependant, cette technologie présente plusieurs limitations. La présence de balais et de collecteurs nécessite un entretien régulier, ce qui impacte la fiabilité à long terme. Par ailleurs, la fabrication de ces moteurs reste coûteuse. Leur densité de puissance est relativement faible, se situant généralement entre 0,3 et 0,5 kW/kg, ce qui contraste avec les performances des

moteurs thermiques dont la densité atteint couramment entre 0,75 et 1,1 kW/kg. Ces contraintes limitent leur pertinence dans le contexte actuel de l'électromobilité [39].

II.14.2. Le moteur asynchrone (MAS):

Le moteur asynchrone, constitué d'un stator fixe et d'un rotor tournant, repose sur une conception robuste et éprouvée.

Le stator intègre trois enroulements pouvant être configurés en étoile (Y) ou en triangle (Δ), en fonction de l'alimentation. Quant au rotor, il peut être équipé soit de bobinages accessibles via bagues et balais, soit d'une cage d'écureuil formée de barres conductrices, souvent en aluminium. Dans les deux cas, le circuit rotorique est mis en court-circuit, parfois via un rhéostat [40].

Ce type de machine se distingue par sa simplicité de conception et de maintenance, ce qui en fait l'un des moteurs les plus utilisés dans les applications industrielles. Il présente un bon compromis entre coût et robustesse. Néanmoins, par rapport aux machines à aimants permanents, les moteurs asynchrones affichent généralement un couple massique, un rendement énergétique et un facteur de puissance moindres

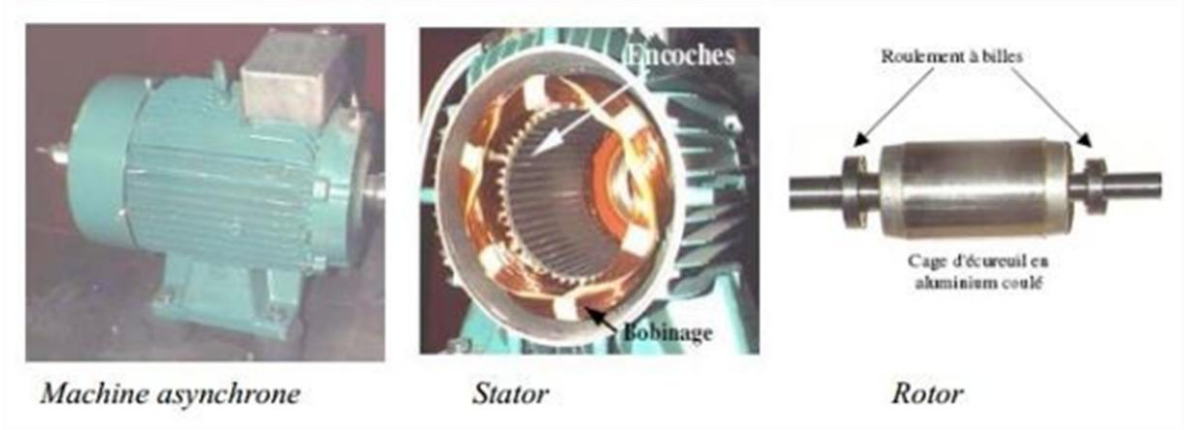


Figure II.22: photo d'une machine asynchrone avec le Stator et le Rotor qui la constituent

II.14.3. Le moteur synchrone:

Bien que sa commande soit plus complexe, que son coût soit plus élevé et que sa robustesse puisse être inférieure à celle d'autres technologies, le moteur synchrone est aujourd'hui privilégié dans les véhicules électriques et hybrides. Il offre d'excellentes performances en modes moteur comme générateur, notamment en matière de rendement énergétique. À l'instar du moteur asynchrone, il est composé d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer, mais la configuration du rotor constitue la principale différence technologique [40].

A. Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP):

Le moteur synchrone à aimants permanents représente actuellement l'une des solutions les plus répandues pour la propulsion des véhicules électriques. Il se distingue par ses performances supérieures en termes de rendement, de couple et de puissance massique. Sa conception nécessite peu d'entretien et sa commande est relativement aisée, ce qui en fait un choix privilégié pour de nombreuses applications automobiles. Toutefois, son coût de production demeure élevé, principalement en raison de la dépendance à la qualité et au prix des aimants utilisés. [31]

B. Le moteur synchrone à reluctance variable (MRV):

Le rotor de ce type de moteur ne contient ni aimants, ni bobinage d'excitation. Le couple est créé seulement grâce à l'effet reluctance. Le stator est semblable à celui de la majorité des machines à courant alternatif Le rotor est construit de manière à ce que le rapport entre l'inductance dans l'axe direct et l'axe en quadrature (Ld/Lq) soit le plus important possible. La plage de fonctionnement en vitesse à puissance constante est directement liée à ce rapport. Il en est de même pour le facteur de puissance (plus ce rapport est élevé plus le facteur de puissance est grand). L'obtention d'un rapport (Ld/Lq) élevé induit des contraintes au niveau de la fabrication, qui se répercutent négativement sur le cout . Chacun de ces moteurs a des avantages et des inconvénients, mais ce sont essentiellement les notions de coût et de difficulté de la commande qui s'affrontent. Une comparaison quantitative des quatre machines en fonction des critères spécifiques à la traction électrique, est résumée dans le tableau. Chaque machine est évaluée sur la base de 7 critères sur une échelle de 0 à 5, la note 5 correspondant a la meilleure réponse au critère [24, 25].

	Machine			
	MCC	**MAS**	**MSAP**	**MRV**
Plage de vitesse	2,5	4,5	4,5	5
Performance energetique	2	4	5	4
poid	2	3	4	5
cout	5	4	3	5
fiabilite	2	4	3	5
Densite de puissance	1	4	5	3
Partie alimentation	4	5	3	2
total	18,5	28,5	27,5	29

Tableau IV.2: Comparaison des quatre machines de traction électrique [41,42]

Dans cette étude, nous optons pour le moteur MRV car c'est le plus favorisée en termes de critères technologiques (tel que le meilleur rendement en mode générateur et moteur), en plus il a un couple massique plus élevé. Le véhicule électrique choisi dans tous ce qui suit est propulsé par deux roues motrices avant.

Les deux roues seront entrainées par moteur MRV 8/6 pôles à travers une transmission différentielle fixe.

II.15. Avantages et inconvénient des véhicules électriques:

A. Avantages:

La voiture électrique possède plusieurs avantages qui la prédominent sur les véhicules a combustion interne et qu'on peut les énumérer comme suit: [31]

- Les véhicules électriques sont dépourvus de pollution sonore puisqu'ils sont totalement silencieux.
- Les véhicules électriques sont agréables à conduire, avec un roulement qualifié de «doux» en raison d'une accélération continuelle et progressive car le moteur ne cale jamais (absence d'embrayage).
- L'architecture technique des véhicules électriques est simple il est composés de 6000 pièces de moins qu'une auto traditionnelle.
- Ces véhicules sont plus faciles d'entretien et leurs dépenses sont réduites de 30 à 40% (par exemple le moteur électrique ne requiert pas de vidange). De plus, les occasions de pannes sont 3 fois moins nombreuses.
- Les véhicules électriques ne consomment pas d'énergie dans les embouteillages et les freinages (la voiture se recharge seule). Ils sont donc très adaptés au milieu urbain qui sera le principale mode d'habitat du futur (mégapole).
- Le moteur électrique a un rendement énergétique 3 fois plus élevé que celui d'un moteur thermique.
- Le démarrage est très rapide, il suffit d'appuyer sur un bouton pour quelle se mette en marche (fini les problèmes de démarrages pendant les temps froids d'hiver).
- L'indépendance vis-à-vis du pétrole.

B. Inconvénients:

Comme la voiture électrique possède plusieurs avantages, elle a aussi des cotés négatifs:[31]

- Question autonomie.
- Sans oublier que la voiture se doit d'être la plus légère possible : plus la masse du véhicule augmente, plus il demande d'énergie, et donc moins il circule longtemps.

- D’autant que comme les produits innovants ont un coût souvent élevé, le prix deces voitures devrait être élevé.
- Ainsi la durée de recharge des batteries électriques est encore importante. De plus, lors de l’utilisation, le moteur électrique ne produit pas de chaleur L’habitacle de la voiture n’est pas chauffé. Pour un meilleur confort (climatisation, radio, etc.), la décharge des batteries est accélérée.

II.16. Conclusion:

Ce chapitre a facilité l'analyse des véhicules électriques sous leur aspect global, au regard des grandes technologies utilisées et des éléments de base de leur chaîne de traction. Elle a fourni la base pour guider les décisions techniques concernant l'architecture du système, le type de moteur, les convertisseurs d'énergie, ainsi que les solutions de stockage nécessaires au fonctionnement de l'application en étude.

Chapitre III

Modélisation d'un véhicule électrique à pile combustible

Chapitre III: Modélisation d'un véhicule électrique à pile combustible

III.1. Introduction:

Dans ce chapitre qui va suivre présente un système de traction électrique à pile à combustible PEMFC. Ce modèle est en effet composé, en plus de la pile à combustible, d'un hacheur, d'un onduleur et d'un moteur synchrone à reluctance variable (MRV).

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, le générateur à pile à combustible est un système complexe, constitué de différents actionneurs et sous systèmes. L'utilisation de cette source d'énergie ne peut se faire sans un environnement de commandes adapté.

III.2. Modèle de la chaîne de traction:

La figure (III.1) représente le modèle complet de la chaîne de traction du véhicule électrique qui comporte en plus d'une bouteille d'hydrogène, la pile à combustible, un hacheur, un onduleur et la machine asynchrone [1].

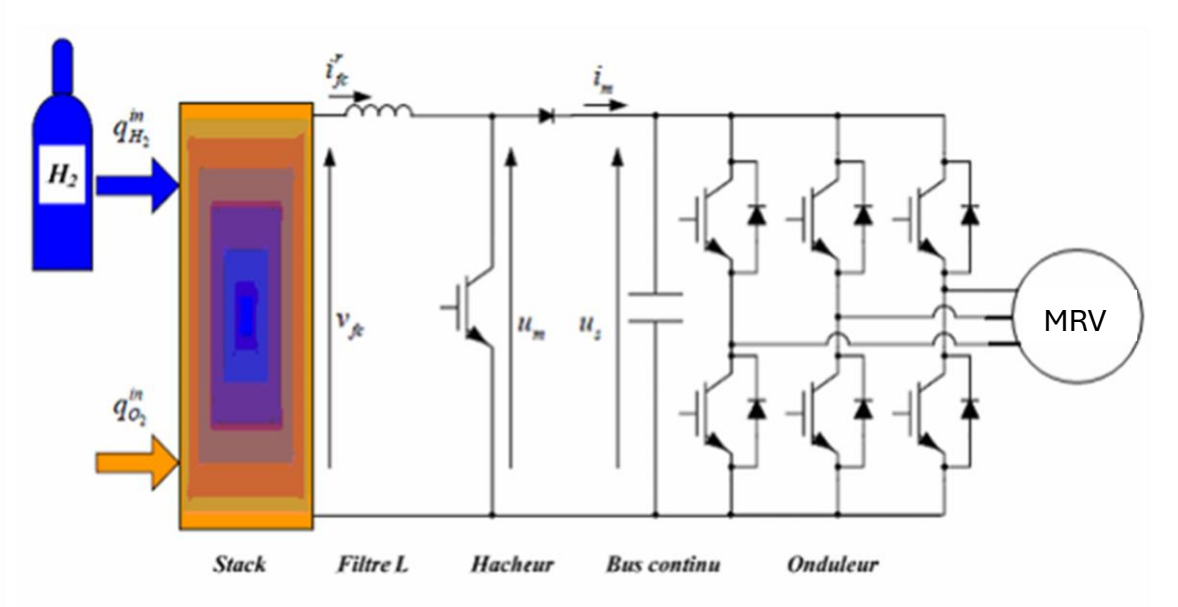


Figure (III.1): modèle complet du véhicule électrique

III.3. Modélisation des convertisseurs:

III.3.1. Hacheur élévateur de tension (BOOST):

Le placement d'une inductance de valeur suffisante permet que le courant ne s'annule pas et une capacité de forte valeur pour avoir la tension de sortie Vs constante.

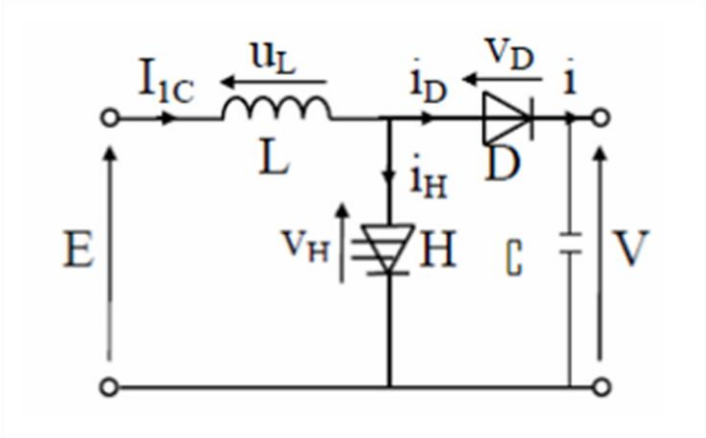


Figure (III.2): Montage du hacheur parallèle

a) H passant

Dans ce cas, $V_H = 0$ et $V_D = -V_C$, ce qui maintient D bloquée par inversion de tension. Par ailleurs, on a $U_L = E$ et $i_H = I_{1C}$

b) H bloqué

D conduit par effet de roue libre Il s'ensuit que $i_D = i = I_{1C}$, $V_H = V_C$ et $U_L = E - V_C$

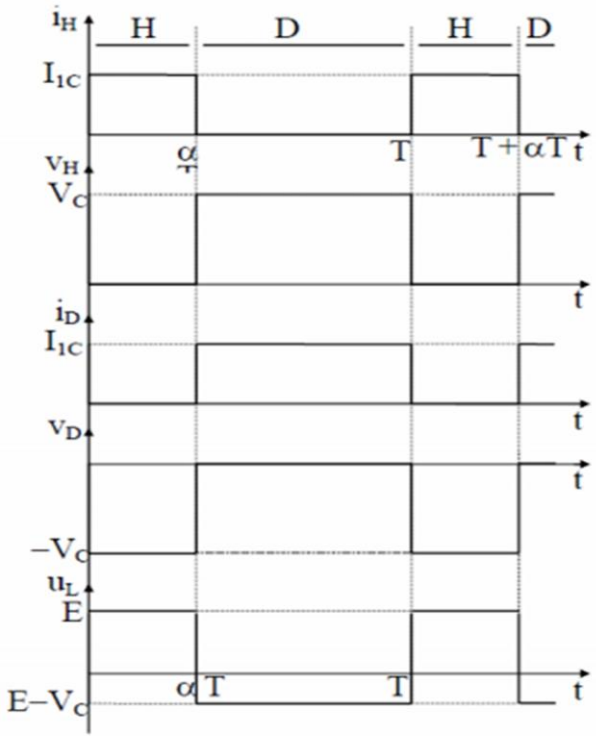


Figure (III.3): Allure des tensions et des courants au niveau du hacheur

La valeur moyenne de la tension de sortie est constante, sa valeur moyenne est aussi égale à sa valeur instantanée VC. Il suffit donc de déterminer la relation liant VC à E. Pour l'obtenir, on peut utiliser le fait que la valeur moyenne de UL est nulle. Ceci entraîne que

$$\frac{1}{T}\int_0^{\alpha T} Edt + \frac{1}{T}\int_{\alpha T}^{T}(E - V_C)dt = 0 \quad \text{(III.1)}$$

On en déduit

$$\frac{1}{T}E\alpha T + \frac{1}{T}(E - V_c)(T - \alpha T) = 0 \quad \text{(III.2)}$$

Soit

$$E\alpha + E(1-\alpha) - V_C(T-\alpha) = 0 \quad \text{(III.3)}$$

D'où finalement

$$V_C = \frac{1}{1-\alpha} \quad \text{(III.4)}$$

III.3.2. L'onduleur de tension:

L'onduleur est un convertisseur statique qui a le rôle de convertir une tension continue en tension alternative. Chaque bras est composé de deux transistors mis en opposition, shuntés en antiparallèle par des diodes de récupération. Ce sont elles qui ont pour principale tâche de renvoyer le courant de retour négatif au condensateur de filtrage mis à l'entrée de l'onduleur, garantissant en cela la continuité du flux énergétique et protection du circuit

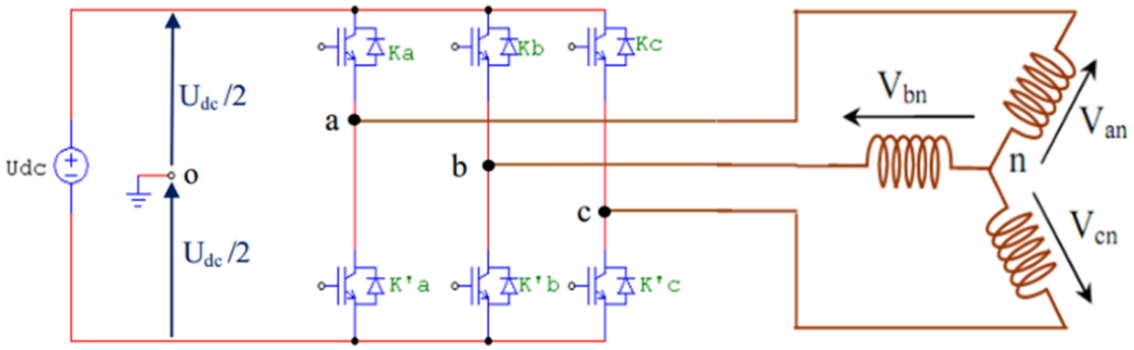


Figure (III.4):onduleur de tension triphasé à deux niveaux

On attribue à chaque interrupteur de l'onduleur une fonction logique de connexion F i. Cette fonction décrit l'état de l'interrupteur, sa valeur vaut 0 s'il est ouvert et 1 s'il est fermé. Ainsi les tensions de ligne aiguillées par l'onduleur sont données par:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_{dc}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & 0 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad \text{(III.5)}$$

Le courant à l'entrée de l'onduleur est donné par l'équation suivante :

ie = $[F][I] = F1ia + F2ib + F2ic$ (III.6)

III.3.3. Modélisation de l'onduleur:

de tension Les' hypothèses simplificatrices:

- ✓ La commutation des interrupteurs est instantanée,
- ✓ La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable, supposés idéalisés,
- ✓ La charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

On a, donc:

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad \text{(III.7)}$$

Les tensions composées V_{ab} ,V_{bc} ,V_{ca} et sont obtenues à partir de ces relations:

Tel que V_{ao}, V_{bo} et V_{co} sont les tensions d'entrée de l'onduleur ou tensions continues. Elles sont référencées par rapport à un point milieu «o» d'un diviseur fictif d'entrée. On peut écrire les relations de Charles, comme suit:

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad \text{(III.8)}$$

V_{an},V_{bn} et V_{cn}: sont les tensions des phases de la charge (valeur alternative)

V_{no}: Tension de neutre de la charge par rapport au point fictif «o».

Le système V_{an},V_{bn} et V_{cn} étant équilibre, il en découle:

$V_{an}+V_{bn}+V_{cn}=0$ (III.9)

Après la substitution aboutit à:

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{ob} + V_{co}) \quad \text{(III.10)}$$

on obtient:

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{3}{2}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{2}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{2}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad \text{(III.11)}$$

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu-alternatif

$[V_{AC}]=[T][V_{DC}]$ (III.12)

Telle que:

$[V_{AC}]=[V_{an}V_{bn}V_{cn}]^T$ (III.13)

$[V_{DC}]=[V_{ao}V_{bo}V_{co}]^T$ (III.14)

Donc, pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme des grandeurs booléennes.

III.4. Le moteur synchrone à reluctance variable (MRV):

III.4.1 Constitution et principe de fonctionnement:

Le synchrone à réluctance variable (MRV) est alimenté sans enroulement rotorique ni aimant permanent. Le couple résulte de la variation d'inductance entre les axes quadrature (q) et direct (d) du rotor: principe de variation de réluctance

III.4.2. Modélisation mathématique:

Hypothèses simplificatrices:

- ✓ Le fer est linéaire (magnétiquement non saturable)
- ✓ Il n'y a pas de perte dans le fer
- ✓ Le modèle est défini dans le référentiel rotatif dq synchronisé avec le rotor

A. Équations électriques (repère dq):

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \\ v_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega_e \psi_d \end{cases} \quad \text{(III.15)}$$

Avec:

- v_d , v_q : tensions statoriques
- i_d , i_q : courants statoriques
- R_s : résistance statorique
- ω_e: vitesse électrique du rotor

B. Équations magnétiques:

Pas de flux d'aimant permanent. Le flux est purement inductif :

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad \text{(III.16)}$$

$L_d \neq L_q$ est la base de génération du couple dans le MRV.

C. Couple électromagnétique:

$$T_e = \frac{3}{2} p (L_d - L_q) i_d i_q \quad \text{(III.17)}$$

- ✓ T_e: couple développé
- ✓ p: nombre de paires de pôles
- ✓ L_d, L_q: inductances selon les axes d et q

D. Équation mécanique:

$$J\frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - f\omega_m \quad \text{(III.18)}$$

- ✓ J : moment d'inertie
- ✓ ω_m: vitesse mécanique
- ✓ T_L : couple de charge
- ✓ f: coefficient de frottement

III.4.3. Représentation bloc fonctionnelle:

Le modèle complet peut être divisé en 3 sous-systèmes:

Bloc	Entrées	Sorties	Fonction
Bloc électrique	v_d , v_q, ω_e	i_d , i_q	Résout équations de tension
Bloc magnétique	i_d , i_q	ψ_d, ψ_q	Calcule les flux
Bloc mécanique	T_e, T_L	ω_m	Résout la dynamique de rotation

Tableau III.1: systèmes bloc fonctionnelle

III.4.4. Avantages du MRV:

Avantages	Détails
Faible coût	Pas d'aimants, pas d'enroulement rotorique
Construction robuste	Rotor simple, sans excitation
Rendement élevé	Faibles pertes et bon comportement à haut régime
Moins d'entretien	Pas de balais, pas de circuits rotorique

Tableau III.2: Avantages du MRV

III.5. Simulation:

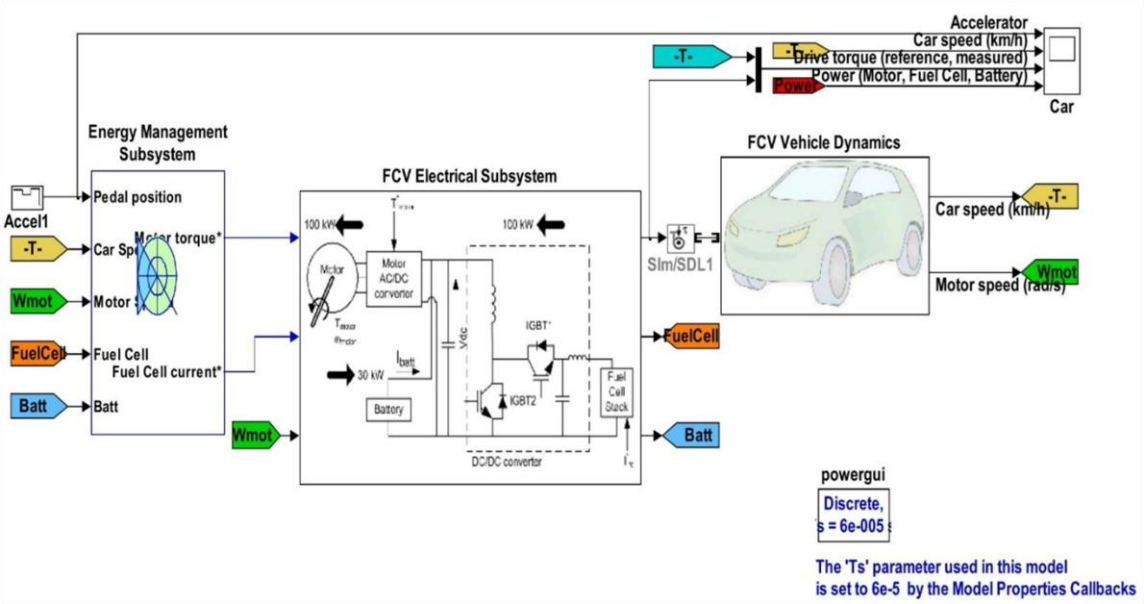


Figure (III.4):Modèle du véhicule électrique à pile à combustible sur l'environnement Matlab/Simulink

À la suite de la modélisation abordée précédemment dans cette section, un point est dédié à la validation du modèle mathématique élaboré grâce à l'environnement MATLAB. La figure (III.4) montre l'architecture complète de la chaîne de traction d'un véhicule électrique intégrant notamment une bouteille d'hydrogène, une pile à combustible, un onduleur et une machine asynchrone.

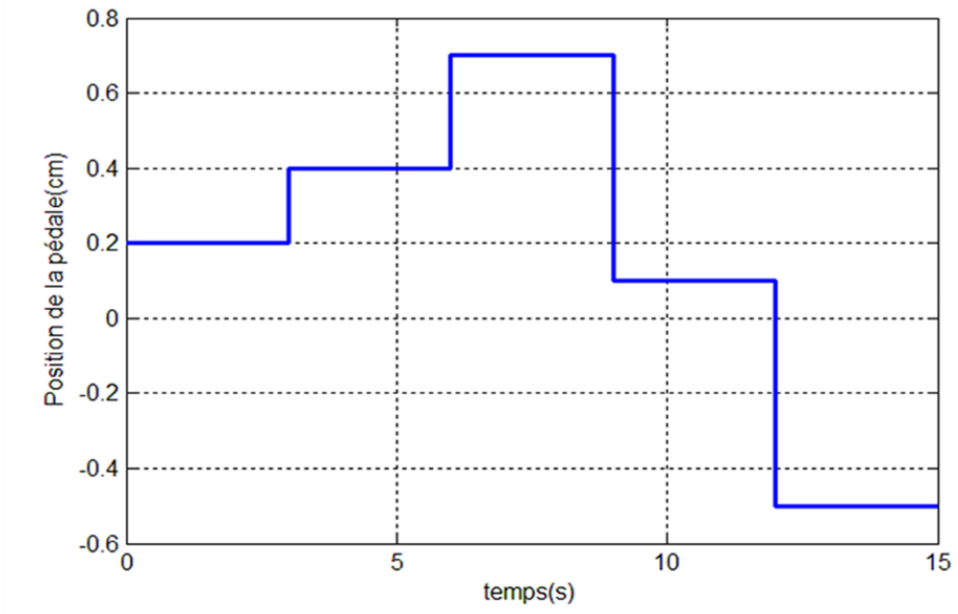


Figure (III.5) : Position de la pédale (cm)

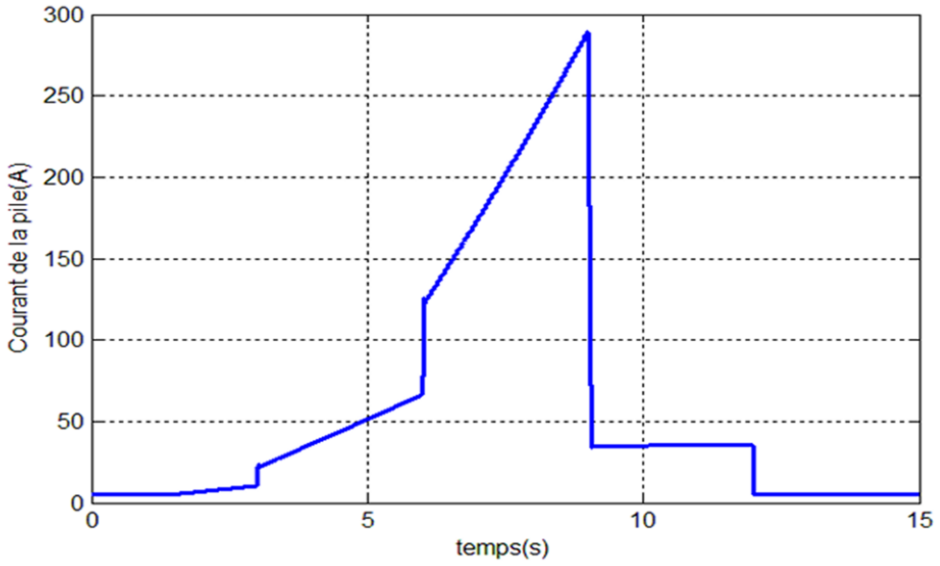


Figure (III.6): Courant de la pile à combustible

La figure III.5 permet de visualiser le profil de la position de la pédale d'accélérateur du véhicule, cette position étant modifiée toutes les trois secondes pour observer la réponse dynamique obtenue. Les figures III.6 à III.9 représentent respectivement l'évolution du courant délivré par la pile à hydrogène, la variation de tension de celle-ci, la vitesse du moteur, la vitesse du véhicule.

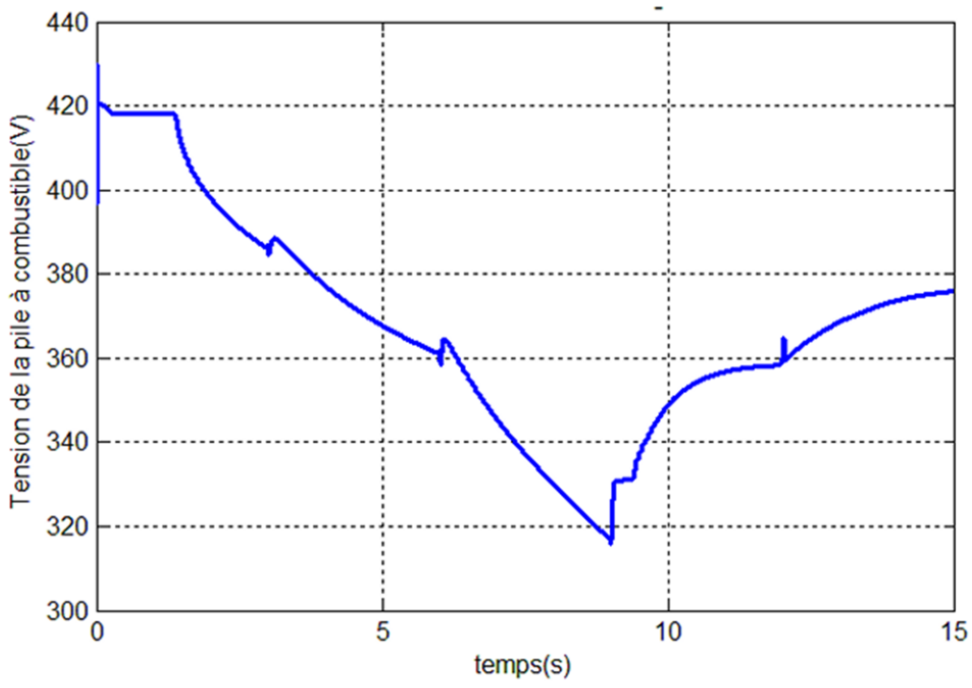


Figure (III.7): Tension de la pile à combustible

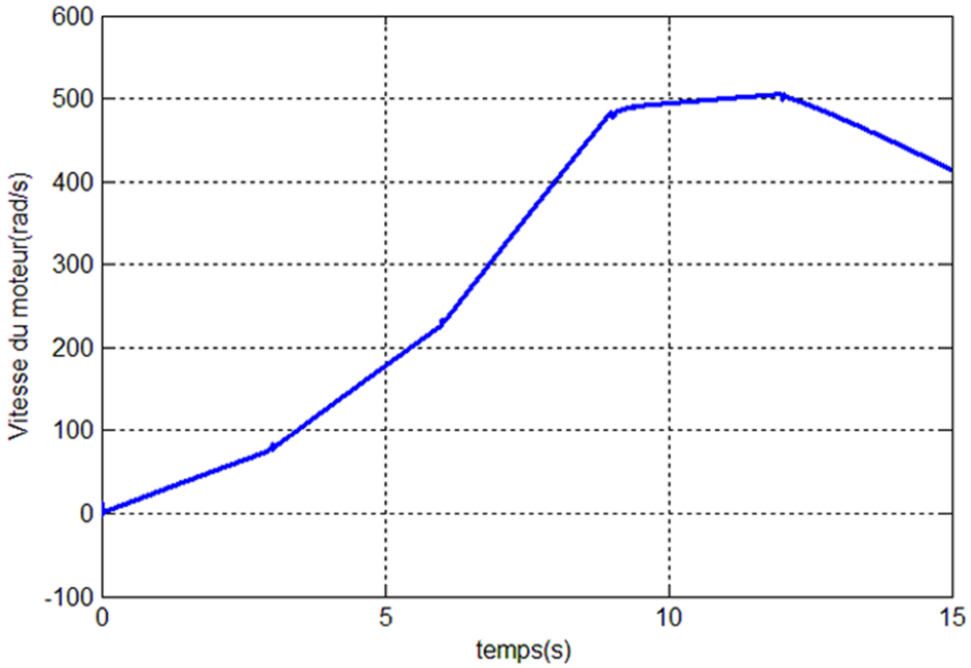


Figure (III.8): Vitesse du moteur (rad/s)

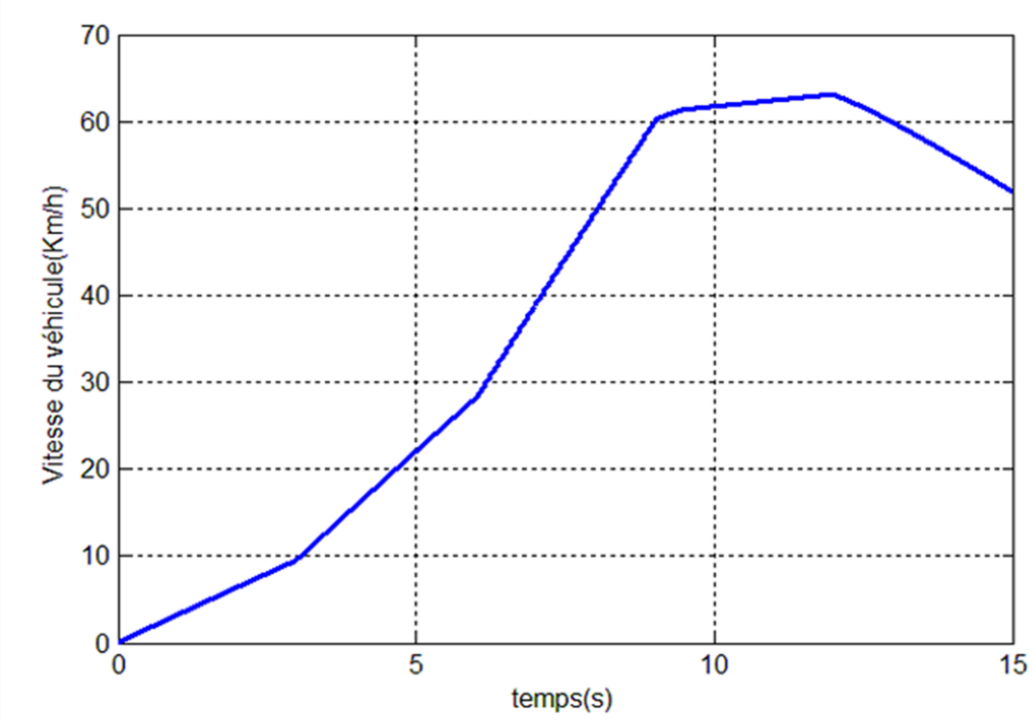


Figure (III.9): Vitesse du véhicule

Les courbes exposées dans la figure III.6 mettent en avant l'impact de l'oscillation de la position de la pédale d'accélérateur sur le courant restitué par la pile à hydrogène. En effet, une position plus enfoncée de la pédale (comme illustré dans la figure III.5) augmente le courant délivré, qui entraîne une vitesse de moteur supérieure (figure III.8) et donc une plus forte accélération du véhicule (figure III.9). A l'inverse, lorsque la pédale est laissée libre, le courant diminue donc de façon progressive sa vitesse se réduisant ainsi avant celle du véhicule.

III.6. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté un modèle dynamique de la chaîne de traction avec un modèle dynamique de la pile à combustible de type PEMFC, un hacheur élévateur (boost), un onduleur et la machine asynchrone puis des résultats de simulation de véhicule électrique à pile combustible.

La pile à combustible PEMFC a pu délivrer une puissance selon la demande de la MEV (Le moteur synchrone à reluctance variable) et la MEV a bien suivit les consignes (vitesse et couple). Le problème majeur est lors du démarrage ou la pile ne peut pas fournit ces valeurs, alors nous somme obligé de placer une batterie ou un super condensateur.

Conclusion Générale

Conclusion générale:

Depuis une vingtaine d'années, et du fait de leurs performances énergétiques et environnementales, les piles à combustible connaissent un développement spectaculaire. Plus de 130 000 piles à combustible ont été fabriquées de 1995 jusqu'à la fin 2010. Plus de 90% de la technologie utilisée est de type PEMFC/DMFC.

Les efforts de recherche sont pour augmenter les performances et diminuer le coût, aussi bien de la pile elle-même que de ses périphériques. Plusieurs constructeurs automobiles ont maintenant lancé des prototypes et des petites séries d'une centaine de véhicules hybrides à pile à combustible; elles sont mises sur le marché de la location depuis le début 2003.

Les caractéristiques techniques obtenues aujourd'hui sont très proches de celles prévues des points de vue des performances massiques (1.5 kWe/kg) et volumiques (plus de 2 kWe/litre) et de la fiabilité (les technologies PEMFC et PAFC ont été validées sur plusieurs dizaines de milliers d'heures) et c'est essentiellement le coût qui reste un obstacle majeur à une diffusion plus large, en particulier dans le domaine du transport et, dans une moindre mesure, dans celui du portable et du stationnaire.

Dans ce mémoire on a commencé en bref, par la présentation de la chaine de traction d'une voiture actuelle et celle de la voiture à PAC, leur principe de fonctionnement, leurs avantages et leurs problèmes, qui restent à résoudre.Dans ce travail nous avons essayé d'alimenter la chaîne de traction de ce véhicule électrique avec une pile à combustible PEMFC.

Le véhicule électrique reste un but de recherche intéressant pour parer aux problèmes d'environnement qui menacent notre planète avec les émissions des gaz à 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).

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 à deux testes: un changement de couple et une variation de vitesse.

En dernier lieu, les performances du véhicule simulé sous Simulink/Matlab se sont révélées stabilisées dans le profil de conduite imposé, en raison du choix de composants et des progrès de la technologie dans les domaines de l'électronique, de l'électronique de puissance et de l'automatique, qui ont permis d'intégrer facilement des énergies renouvelables dans les véhicules traditionnels.

Bibliographie

Bibliographie:

[1] S.Meddah, « Modélisation et commande d'un véhicule électrique à pile combustible », Mémoire de Magister de l'université des Sciences et la Technologie d'oran, Algeria, 2013.

[2] H.MAKER, «Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride: Association Pile à Combustible et super condensateurs», thèse de doctorat, Université de Technologie Belfort Montbéliard, 2008.

[3] W. VIELSTICH, Handbook of fuel cells. Fundamentals, Technology and Applications.

[4] Idris SADLI, « Modélisation par impédance d'une pile à combustible PEM utilisation en électronique de puissance », thèse de doctorat INPL, décembre 2006.

[5] Jérôme LACHAIZE, « 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 INPT, septembre 2004.

[6] Pierre Mayé, Générateurs électrochimiques Piles, accumulateurs et piles à combustible, Dunod, [20] (ISBN 978-2-10-055564-2 et 2-10-055564-2, OCLC 800778001).

[7]: Observ'ER, « La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde», Collection chiffres et statistiques, Onzième inventaire, Edition 2009.

[8] Exemple: Nafion de Dupont de Nemours, pour la PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, « pile à combustible à membrane échangeuse de protons »), piles utilisées dans l'espace.

[9] (en) Shanfu Lu, Jing Pan, Aibin Huang, Lin Zhuang, et Juntao Lu, « Alkaline polymer electrolyte fuel cells completely free from noble metal catalysts » [archive], PNAS, 2008.

[10] Lattice-strain control of the activity in dealloyed core-shell fuel cell catalysts [archive], Nature

[11] Notes de cours, B. Azoui, Master Energies renouvelables/stockage UB2MB, 2020/2021

[12] R. Benchrifa, D. Zejli, A. Bennouna; "Piles à combustible, mode efficace et propre de production d'électricité", International Congres on the Renewable Energies and the Environment, Sousse, Tunisia, March 2005.

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

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

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

[19] F Ouagueni, M Boumehraz, S Belhamdi « A Fuzzy Model Feed Forward PredictiveControl of the Nonlinear Tubular Solid-Oxide Fuel Cell System ». Advances in Modelling and Analysis C, V. 74, N°. 2-4, PP. 71-79, 2019.

[20] A. Boucha, Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué, Mémoire De magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran 2015.

[21] Walid Hankache, „„Gestion optimisée de l‟énergie électrique d‟un groupe électrogène hybride à pile à combustible‟‟‟, Thèse de Doctorat, de l‟Institut National Polytechnique de Toulouse, 16 Décembre 2008.

[22] Fabrice Delfosse, „„Détermination de l‟état de charge des batteries d‟un véhicule électrique‟‟‟, Mémoire de fin d‟études de l‟Université de Liège, 1998.

[23] Mahdi Benaouadj, „„Contrôle d‟une source hybride batteries/supercondensateurs, rechargée par l'énergie photovoltaïque, pour traction électrique « véhicule hybride »‟‟‟, Mémoire de Magister, Université d‟El-Oued, 15 Octobre 2012.

[24] B.Multon, L.Hirsinger, „„Problème de la motorisation d‟un véhicule électrique‟‟‟, Journées électrotechniques du club EEA, 24-25 Mars 1994.

[25] Benjamin Baudouin, „„Histoire de la voiture électrique‟‟‟, 10 Juillet 2009, Site web : http://www.benjaminbaudouin.com/histoire-de-la-voiture-electrique/ .

[26] F. Khoucha, A. Khoudiri, M. Benbouzid, A. Kheloui, Commande DTC d‘une propulsion moteur asynchrone / onduleur multi niveaux asymétrique pour un véhicule électrique, Européen Journal of Electrical Engineering 14, 2-3 (2011).

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

[28] R. Castermans, G. Saelens, T. Bréchet Quelles sont les perspectives d’évolution desMicrogrid en Belgique? Étude des apports de l’économie collaboratvie au secteur de l’énergien 2018.

[29] C. Espanet. Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à structure inversée Application au moteur-roue, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Janvier 1999.

[30] https://www.transbus.org.

[31] Chenouf Abdallah et Gafsi Houssem Eddine memoire de Commande par la Logique Floue de la Machine à Réluctance Variable à Commutation Electronique (MRVCE) pour la Traction des Véhicules Electriques Légers 2021.

[32] L. Angot, La mobilité électrique dans les systèmes de transport et de mobilité urbains : Constats et perspectives. Comment développer une nouvelle offre de mobilité durable par le Biais de l’électromobilité dans la métropole toulousaine ? Géographie. 2014.

[33] G. Malloy, M. Lachapelle, Essence, hybride ou électrique :ce q’il faut savoire, Association Canadienne des Automobilistes 2019.

[34] M. Florence, L. Benoit, Mobilité urbaine et technologies de l’information et de la communication (TIC): enjeux et perspectives pour le climat, Studies, 5 :56, 2012.

[35] S. Meziani, A.Bourenane, Contrôle par logique floue d’une chaine de traction d’un véhicule électrique basé sur une machine asynchrone à double alimentation, Mémoire de master,Université Abderahmane Mira Bejaia, 2013.

[36] Mr. KHALI L MAALEJ, Méthodes De Gestion D'énergie Pour Un Véhicule Électrique Hybride Et Un Véhicule Électrique À Batteries Utilisant L'estimation en Ligne De La Masse, Université Du Québec.

[37] A. Nouh, Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers,Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard et par l'université de Franche-Comté, Mars 2008.

[38] A. Daanoune, Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Décembre 2012.

[39] M. Ikkiss, R. El Ferrare, Voitures solaires électriques, Mémoire de Master, Faculté multydisciplinairede Ouarzazate, Mai 2013.

[40] G. Henni, Modélisation et Commande d'un véhicule électrique hybride, Mémoire de Magister, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.

[41] CC Chan. The state of the art of electric and hybrid vehicles. Proceedings of the IEEE, 90(2): 247–275, 2002.

[42] P Andrada, M Torrent, B Blanqué, and JI Perat. Switched reluctance drives for electric vehicle applications. In International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2012.