

N° d'ordre : /2013/DM

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DE HADJ LAKHDAR BATNA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE MÉCANIQUE

Mémoire présenté Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTÈRE

En

Mécanique

Option: **CONSTRUCTION MECANIQUE**

Par

ZITOUNI Hadda

Etude du système pile à combustible des véhicules

Soutenu le: 02 / 10 / 2013 Devant le jury composé de

Pr MIHI ABDELKADER	Professeur, Université de Batna	Président
Pr BRIOUA MOURAD	Professeur, Université de Batna	Rapporteur
Pr ZIDANI KAMEL	Professeur, Université de Batna	Examineur
Pr ZEDIRA HAMMA	Professeur, Université de Kenchela	Examineur

Année universitaire 2012 / 2013

Sommaire

Remerciement	
Liste des figures et des tableaux	
Introduction Générale	1

Chapitre I.

Types de motorisation des véhicules

Introduction	3
I.1. Généralités	4
I.1.1. Types de véhicules routiers	4
I.1.2. Description d'une voiture	4
I.2. Types de motorisation des voitures	5
I.2.1. Motorisation des voitures actuelles	5
I.2.1.1. Circuit d'alimentation d'une voiture actuelle	5
I.2.1.2. Moteur	7
a) Moteurs à essence	7
b) Moteurs Diesel	8
I.2.1.3. Chaîne cinématique	8
I.2.1.4. Cycle de fonctionnement	8
I.2.1.5. Chaîne de traction d'une voiture à moteur thermique	9
I.2.2. Nouvelles motorisations de voiture	10
I.2.2.1. Moteurs électriques	10
I.2.2.1.1. Description	10
I.2.2.1.2. Fonctionnement du moteur électrique	10
I.2.2.1.3. Types de moteur	11
a) Moteurs AC	11
b) Moteurs DC	11
I.2.2.1.4. Utilisation pour la propulsion	12
I.2.2.1.5. Energie utilisée et son stockage	12
a) Utilisation des batteries	12
b) Utilisation de la pile à combustion	13
I.2.2.2. Moteurs hybrides	15
I.2.2.2.1. Composants utilisés dans les véhicules hybrides	15
I.2.2.2.2. Concept d'une chaîne de traction hybride	16
I.2.2.2.3. Principales architectures de véhicules hybrides	18
I.2.2.2.4. Différents fonctionnements suivant le régime.....	20
I.2.2.2.5. Véhicules hybrides à pile à combustible	21
Conclusion	24

Chapitre II

Application du système PAC dans les voitures

Introduction	26
II.1. Bref historique des piles à combustible et application dans le transport	26
II.2. Chaîne de traction d'une voiture équipée d'une PAC	26
II.3. Types de piles à combustible	27
II.4. Piles PEMFC	29
II.4.1. Caractéristiques	29

II.4.1.1. Densité de puissance	29
II.4.1.2. Température de fonctionnement	30
II.4.1.3. Structure solide	30
II.4.1.4. Description	30
II.4.1.5. Montage d'une pile	31
II.4.1.6. Principe de fonctionnement	31
II.4.1.7. Performances	32
II.4.2 Auxiliaires du système PAC	34
II.4.3 Stockage de l'hydrogène	37
II.4.4. Prototypes de voitures	39
Conclusion	42

Chapitre III

Développement de la PEMFC et les projets des voitures qui l'incluent.

Introduction	43
III.1. Acteurs industriels de la pile à combustible de type PEMFC	43
III.2. Projets des voitures à pile à combustible	45
III.2.1. Programme de FORD	45
III.2.2. Programme de TOYOTA	47
III.2.3. Programme de MAZDA	49
III.2.4. Programme de GENERAL MOTORS (GM)	49
III.2.5. Programme de NISSAN	52
III.2.6. Programme de HONDA	53
III.2.7. Programme de DAIMLER	55
III.2.8. Programme de VOLKSWAGEN	57
Conclusions	59

Chapitre IV

Caractérisation électrique de la pile PEMFC

Introduction	60
IV.1. Modélisation des piles à combustible	61
IV.2 Puissance de la pile	65
IV.2.1. Dimensionnement d'une pile selon la puissance désirée	65
a) Détermination du nombre de cellules.	65
b) Détermination de la surface des cellules	66
c) Influence des paramètres de fonctionnement	66
IV.3. Organigramme de calcul	68
IV.4. Interprétation des résultats et conclusion	71
Conclusion générale	72

Remerciements

Au terme de ce travail, avant tout, je remercie « » le tout puissant qui m'a toujours soutenu.

*Je remercie vivement **Mr Briou Mourad**, professeur à l'université de Batna, pour la proposition de ce sujet et l'encadrement avec beaucoup de confiance.*

*Je remercie également le professeur **Mr. Ben Moussa Hocine**, professeur à l'université de Batna, pour l'accueil dans son groupe de recherche scientifique sur les piles à combustibles.*

Nous remercions:

***Mr. Mifi Abdelkader**, professeur à l'université de Batna, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider le jury de ce travail.*

***Mr. Zidani KameL** professeur à l'université de Batna et **Mr. Zedira Hamma**, professeur à l'université de Khenchela, pour l'examinations et l'évaluation de ce mémoire de magistère.*

Je remercie:

*Mes deux amies **Abdenebi Hafsia** (thèse de doctorat en cours sur les piles à combustibles) et **Mezache Fatiha** (thèse de doctorat en cours) de m'avoir donnée le courage d'y revenir à nouveau pour poursuivre mes études. Elles étaient près de moi à tout moment.*

***Mr Bait O.** (mémoire de magistère en cours) et à **Mr. Haddad Dj.** maître de conférences à l'université de Batna, pour l'aide lors de la réalisation du programme de calcul.*

Tous mes respects à mes enseignants, aux auteurs des thèses et des articles que j'ai consultés et à toutes les personnes, en particulier mes collègues en mécanique (mémoires de magistère ou thèse de doctorat en cours) pour l'aide et l'encouragée le long de ce travail.

1. Liste des figures

- Figure I.1.:** Circuit d'alimentation d'une voiture actuelle.
- Figure I.2.:** Architecture de base commune à (quasi) tous les constructeurs.
- Figure I.3.:** Chaîne de traction d'une voiture électrique.
- Figure I.4.:** Schéma illustrant le concept d'un véhicule hybride.
- Figure I.5.:** L'architecture hybride série.
- Figure I.6.:** L'architecture hybride parallèle simple arbre.
- Figure I.7.:** L'architecture double arbre.
- Figure I.8.:** Différents fonctionnements suivant le régime.
- Figure I.9:** Structure d'un véhicule hybride à pile à combustible.
- Figure I-10:** Plan de Ragone.
- Figure I.11.:** PAC principale et batterie secondaire.
- Figure I.12.:** Batterie principale et PAC secondaire.
- Figure I.13.:** PAC pour l'alimentation des auxiliaires.
- Figure II.1.:** Schéma d'ensemble d'une chaîne de traction PAC.
- Figure II.2. :** Technologies des piles à combustible et domaines d'application.
- Figure II.3.:** vue éclatée d'une cellule élémentaire de pile à combustible.
- Figure II.4.:** Vue éclatée de la pile GENEPAC.
- Figure II.5.:** Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC.
- Figure II.6.:** Caractéristiques électriques d'une cellule PEMFC.
- Figure II.7.:** nomenclatures des principaux composants d'un système PAC.
- Figure II.8.:** Schéma illustrant les différents éléments d'un système PAC.
- Figure II.9:** Schéma la pile GENEPAC avec un réservoir à hydrogène pur.
- Figure II.10:** organes de contrôle de la pile PEMFC.
- Figure II.11:** nomenclature du système pile à combustible de PAC-Car.
- Figure II.12:** Structure du système de propulsion du véhicule Daimler F-CELL.
- Figure II.13:** Une FCX 2005 de Honda.
- Figure II.14:** La Lada Antel 2.
- Figure II.15:** Le prototype FINE-N.
- Figure III.1:** PEMFC dédiée à la traction électrique Ballard (Mk 902) 85 KW.
- Figure III.2:** PEMFC HT système de 2.5kw 5.0kw composé de deux modules.
- Figure III.3:** PEMFC de 2kW de l'institut Paul Scherrer.
- Figure III.4:** Pile ZSW 20 cellules.
- Figure III.5:** Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « FORD ».
- Figure III.6:** Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « TOYOTA ».
- Figure III.7:** Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « MAZDA ».
- Figure III.8:** De la *génération 4* (à gauche) à la *génération 5* (à droite).
- Figure III.9:** Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « GENERAL MOTORS ».
- Figure III.10:** Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « NISSAN ».
- Figure III.11:** Vue éclatée de la Honda FCX 2006.
- Figure III.12:** Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « HONDA ».
- Figure III.13:** Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « DAIMLER ».
- Figure III.14:** Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « VOLKSWAGEN ».
- Figure IV.1:** Courbe de polarisation
- Figure IV.2:** Organigramme de calcul
- Figure IV.3:** Influence de la température sur la tension de la cellule
- Figure IV.4:** Influence de la pression sur la tension de la cellule
- Figure IV.5:** Influence de l'épaisseur de la membrane sur la tension de la cellule
- Figure IV.6:** Influence de la température sur la puissance de la cellule
- Figure IV.7:** Influence de la pression sur la puissance de la cellule
- Figure IV.8:** Influence de l'épaisseur de la membrane sur la puissance de la cellule

2. Liste des tableaux

Tableau I.1. Comparaison entre l'essence et diesel.

Tableau I.2.: Différents types de batterie

Tableau II.1.: Les principaux types de piles à combustible.

Tableau III.1: Plan de démonstration et de commercialisation de voitures pile à combustible

Tableau IV.1: Les expressions du potentiel

Tableau IV.2: Mécanismes de pertes en tension et leurs expressions.

Tableau IV.3: Coefficients paramétriques appropriés à quelques types de pile à combustible PEMFC (extraites des publications).

Tableau IV.4: Tableaux des données

Introduction Générale

Ce mémoire englobe une des sources d'énergie renouvelable pour les véhicules tels que la pile à combustible (PAC).

Les préoccupations environnementales comme la pollution et le réchauffement climatique ainsi que l'épuisement des ressources fossiles et le besoin croissant en énergie sont devenues des préoccupations de premier plan. Les énergies renouvelables, dans leur diversité, sont au centre des préoccupations des scientifiques qui cherchent à les développer et à les maîtriser.

Les vecteurs d'énergies susceptibles de remplacer le pétrole dans les véhicules sont évidemment l'électricité.

Pourtant, la propulsion dite « zéro émission » est envisageable avec des véhicules électriques. Ces derniers n'ont pas connu de véritable départ du fait de leur faible autonomie et de leur important temps de recharge. Une solution à ce problème est possible : la production d'énergie « propre » en quantité suffisante pour alimenter une motorisation électrique peut être réalisée par une pile à combustible. Si son carburant, l'hydrogène, n'est pas disponible à l'état naturel, il s'agit d'un vecteur énergétique qui peut être produit à partir de différentes sources d'énergies (dont les énergies renouvelables) ce qui offre des perspectives d'avenir très intéressantes [1].

Plusieurs recherches sont effectuées allant de la compréhension du cœur de la pile à combustible jusqu'à son intégration dans les véhicules. C'est pour cela l'utilisation de la pile à combustible dans le domaine de la traction automobile fait l'objet de ce mémoire.

Dans le premier chapitre, nous présenterons les types des motorisations des voitures, leurs sources d'énergie et leurs modes de fonctionnement. Dont on a décrit les voitures hybrides ou purement électriques à pile à combustible ainsi leurs architectures.

Dans le deuxième chapitre, nous décrirons les types de piles à combustible. Dans le domaine automobile, la pile à combustible la plus utilisée est la PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) qui est une pile fonctionnant à basse température et dont le produit de combustion est de l'eau. L'hydrogène (carburant) peut être pur ou obtenu par reformage d'autres combustibles embarqués, tels que le gaz naturel, le méthanol ou l'essence. L'oxygène (comburant) utilisé est en général celui de l'air. Donc on a ensuite, étudié particulièrement la PAC (type PEMFC), commençant par ces caractéristiques, ces auxiliaires, le mode de stockage de l'hydrogène. Pour finir ce chapitre on a présenté l'intégration de la PAC dans les structures des systèmes de propulsion de quelques voitures en vus éclatée.

Le troisième chapitre concerne une analyse des programmes des voitures à pile à combustible selon les maisons. Et on a abstrait les domaines des recherches actuelles.

Quant au quatrième chapitre on a présenté quelques paramètres physiques et électriques qui influent sur la puissance d'une pile.

Mots Clés: « Système pile à combustibles », Véhicules, modélisation, puissance.

« Le développement du véhicule est un projet multidisciplinaire »

Chapitre I

Types de motorisation des véhicules

Introduction

Le but d'un moteur est de faire tourner un axe, et c'est ce mouvement de rotation qui est transmis aux roues. C'est ce qui permet à la voiture de rouler. Mais ce mouvement ne peut pas se créer tout seul C'est pour cela que tous les véhicules ont besoin d'une source d'énergie, à transformer en mouvement.

Les premiers ancêtres des voitures marchaient à la vapeur d'eau. Il y avait un réservoir d'eau chauffée par un feu de charbon. C'est le charbon qui apportait l'énergie en brûlant, et la vapeur d'eau était utilisée pour faire tourner les roues. C'est le même principe qui était utilisé par les premiers trains (locomotives à vapeur) Mais ce n'était pas pratique du tout: cela demandait beaucoup de place.

Aujourd'hui, on utilise des carburants liquides comme l'essence, le diesel ou le GPL: ils sont bien plus faciles à stocker que le charbon, prennent peu de place, et sont très efficaces (avec un plein, on peut rouler plus de 500 km avec un modèle de voiture classique) c'est ce qu'on appelle véhicules à moteur thermique. Pour les véhicules à moteur électrique, ils nécessitent d'être rechargés plus souvent (on recharge les batteries comme pour un téléphone portable).ils existe aussi d'autres carburants comme l'hydrogène qui nécessite l'utilisation de la pile à combustible.

Un des problèmes des voitures d'aujourd'hui est la pollution. Quand le carburant est brûlé dans le moteur, il crée des gaz et des petites particules qui sont en fait des poussières plus ou moins fines. Ceux-ci sont évacués par le « pot d'échappement » vers l'extérieur. Parmi les gaz nocifs, on recense en particulier les oxydes d'azote (qu'on appelle souvent les "NOx". Les petites particules de poussières sont mauvaises pour la santé car elles peuvent facilement entrer dans les poumons et causer des problèmes respiratoires tels que l'asthme.

Certains carburants sont considérés comme plus polluants que d'autres. C'est notamment le cas du diesel, qui émet de nombreuses particules.

Les fabricants de voiture travaillent donc de plus en plus à fabriquer des voitures plus propres, qui émettent moins de polluants et consomment moins de carburant, ce qui permet aussi de diminuer les émissions de gaz à effet de serre.

Ils cherchent aussi à améliorer les voitures électriques ou créer des voitures hybrides, qui ont deux moteurs (un moteur électrique et un moteur à essence). Les voitures électriques sont encore limitées par leur faible autonomie, et par le poids des batteries qui sont leur source d'énergie.

Dans cette étude on commence d'abord par une compréhension des types de motorisation des voitures tel que motorisation actuelle qui comprend la plupart des types à savoir les moteurs à essence les moteurs diesel. Ainsi, les nouvelles motorisations ;

tel que, moteurs électriques et moteurs hybrides pour mieux comprendre par la suite le principe d'une voiture écologique utilisant la pile à combustible.

Notre synthèse bibliographique sera limitée sur les véhicules touristique nommés voitures ou bien automobiles.

I.1. Généralités

I.1.1. Types de véhicules routiers

Il y'a 3 principaux types de véhicules routiers [2]:

1- les véhicules de tourisme: voitures destinées au transport de passagers, qui seules ont conservé le nom d'automobile

2- les véhicules utilitaires: - transports en commun (autobus, autocars)

- transport de marchandises (camionnettes, camions porteurs, tracteurs et semi-remorques)

- véhicules spéciaux: engins de chantier, voitures de pompiers...

3- les véhicules légers à deux, trois ou quatre roues: bicyclettes, motocycles, triporteurs, quads, etc.

I.1.2. Description d'une voiture

Formée par un châssis posé sur quatre roues et une carrosserie qui constituent un habitacle fermé muni de sièges elle permet le transport de personnes en position assises, l'automobile est généralement propulsée par un moteur à combustion interne. Un ou plusieurs moteurs électriques peuvent également fonctionner de concert avec le moteur thermique, voire le remplacer. La puissance mécanique fournie par le ou les moteurs est transmise aux roues, éléments supportant le véhicule et permettant sa mobilité. La transmission du couple moteur est assurée par une boîte de vitesses et d'autres organes de transmission. Les suspensions réalisent quant à elles une liaison élastique entre le châssis et les roues [3].

Les instruments de contrôle et les commandes tels que le volant, les pédales ou le tachymètre, permettent la conduite de l'automobile. Le réservoir permet le stockage du carburant nécessaire au fonctionnement du moteur, tandis qu'une ou des batteries alimentent en courant les organes électriques. Enfin, les éléments de confort (climatisation, autoradio, ...) et de sécurité (éclairage, ABS, ...) sont des accessoires en nombre toujours croissant.

I.2. Types de motorisation des voitures

Le moteur est l'un des éléments fondamentaux nécessaires au fonctionnement de la voiture. Transformant une énergie non-mécanique généralement chimique ou électrique dans le cas de la voiture électrique en une énergie mécanique, il produit un travail capable de mettre en mouvement la voiture. Ses performances sont généralement mesurées en termes de puissance (cheval-vapeur ou kilowatt) et de couple (Newton-mètre).

Nous allons donc étudier dans cette partie les types de moteurs contribuant la technologie de la voiture.

I.2.1. Motorisation des voitures actuelles

La plupart des automobiles, à l'aube du XXI^e siècle, sont propulsées par un moteur thermique son fonctionnement reste un domaine complexe et réservé à un monde professionnel et spécialisé.

Tout moteur thermique a besoin, pour fonctionner, d'un carburant et d'un comburant. La combustion de ces deux produits fournit l'énergie qui est transformée en mouvement mécanique, et dégage de la chaleur qui représente les pertes de rendement. C'est le cas des moteurs à essence et Diesel qui sont tous deux des moteurs à combustion interne.

L'essence, le GPL ou le gaz naturel ou encore le gazole sont le carburant, et le comburant est l'oxygène de l'air.

I.2.1.1. Circuit d'alimentation d'une voiture actuelle

Le moteur doit donc être alimenté en air et en carburant. C'est le rôle des circuits d'alimentation. Le carburant et le comburant sont mélangés et dosés par le carburateur ou par les systèmes d'injection qui alimentent eux-mêmes le moteur; ils assurent la carburation.

Le circuit d'alimentation se divise en deux parties principales : le circuit d'alimentation en air et le circuit d'alimentation en carburant (**Figure I-1**).

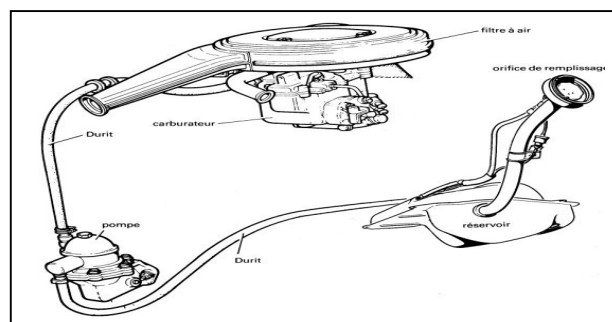


Figure I.1. : Circuit d'alimentation d'une voiture actuelle [4]

- **Circuit d'air**

Il est relativement simple puisqu'il comporte essentiellement une tuyauterie qui prélève l'air frais à l'avant de la voiture ou dans le compartiment moteur, et l'air chaud sur le collecteur d'échappement pour l'amener au carburateur ou à l'injection. L'air ainsi réchauffé en hiver favorise la vaporisation de l'essence lors de la carburation. L'air froid et l'air réchauffé sont dirigés vers la vanne de sélection ou vers le robinet thermostatique qui permet le réglage. L'air froid est utilisé en été, et l'air réchauffé en hiver. L'air est ensuite dirigé vers le filtre à air qui a pour fonction de stopper les impuretés et autres particules abrasives qui causeraient une usure prématurée du moteur et qui doit être changé régulièrement. Le filtre à air sert également aussi de silencieux d'admission car l'air qui traverse à vitesse élevée produit un bruit assez important d'aspiration.

- **Circuit de carburant**

Plus complexe, il comprend un réservoir, des canalisations, une pompe et un filtre. Le réservoir a pour rôle de stocker l'essence et d'assurer une certaine autonomie au véhicule. Sa capacité oscille entre 30 et 100 litres.

- **Réservoir**

Jusque dans les années 30, le réservoir d'essence était placé sur la cloison pare-feu au-dessus du moteur, à proximité immédiate de celui-ci. L'essence descendait par gravité jusqu'au carburateur. Un robinet situé à la base du réservoir devait être fermé après chaque arrêt, sinon le réservoir se serait lentement vidé dans le carburateur, puis par le trop-plein de celui-ci au cas où le pointeau n'aurait pas été étanche.

Aujourd'hui, le réservoir est placé à l'arrière de la voiture pour éliminer au maximum les risques d'incendie et les odeurs d'essence dans la voiture. Cependant, tout à l'arrière, le réservoir est exposé aux chocs ; c'est pourquoi il est maintenant le plus souvent situé entre les roues arrière, sous la banquette ou derrière le dossier du siège arrière. Une pompe est donc nécessaire pour remonter l'essence vers le carburateur.

- **Durit d'alimentation**

Le réservoir est relié au moteur grâce à une canalisation qui parcourt la longueur de la voiture sous le plancher. Il s'agit d'une tuyauterie en cuivre ou en plastique d'environ 6 à 8 mm de diamètre. La pompe à essence peut être du type mécanique (voitures anciennes) ou électrique. La pompe mécanique est fixée sur le bloc moteur et entraînée par une came de l'arbre à cames.

Ce type de pompe est extrêmement fiable et ne nécessite aucun entretien. Il assure un débit suffisant pour les voitures de petite et moyenne cylindrée. Sur les voitures de grosse cylindrée, une pompe électrique est nécessaire pour assurer un débit et une pression plus élevés.

Sur certaines voitures de grosse cylindrée et sur les voitures à moteur Diesel, un filtre à décantation qui élimine les impuretés et les gouttelettes en suspension, est placé après la pompe. En effet le réservoir peut contenir de l'eau par condensation et celle-ci ne doit pas arriver au moteur. Elle est retenue par le filtre et reste au fond de celui-ci par gravité. Sur les voitures de petite cylindrée, un filtre en ligne, à éléments en papier, est incorporé à la tuyauterie reliant la pompe au carburateur. Sur toutes les voitures, il y a également des filtres à crépine métallique, soit dans le réservoir d'essence, soit à l'entrée du carburateur, ou encore à l'entrée de la pompe à essence.

I.2.1.2. Moteur

L'accélérateur permet de doser la puissance du moteur en variant la quantité d'air et de carburant. Et un système de ralenti permet au moteur de tourner sans caler, sans avoir besoin d'appuyer sur l'accélérateur.)

Le système bielle-manivelle fonctionne sur le principe suivant : un piston sur lequel s'exerce la pression des gaz issus de l'inflammation du carburant entraîne une bielle qui, reliée à un vilebrequin, engendre un mouvement de rotation de ce dernier. Un couple est ainsi généré. Le moteur thermique est généralement constitué de plusieurs ensembles bielle-piston reliés à un même vilebrequin. Comme pour tout moteur à pistons, il existe de nombreuses configurations possibles des cylindres.

Deux grands types de moteurs à combustion interne sont distingués : les moteurs à allumage commandé (à essence) et les moteurs Diesel. Ces deux catégories de moteurs se distinguent principalement par le type d'hydrocarbures utilisés pour le carburant, la méthode d'inflammation des gaz (carburant) et leurs performances.

a) Moteurs à essence : dans lesquels la combustion de l'essence est amorcée par l'étincelle d'une bougie ; ils possèdent un système d'allumage commandé ; le mélange d'air et d'essence pouvant se faire

Soit par injection.

Soit par carburateur (depuis le 01/01/93, tous les véhicules neufs vendus en Europe sont équipés d'un système d'injection) [5].

b) Moteurs Diesel : dont la combustion est déclenchée par l'injection de gazole sous pression dans de l'air fortement comprimé (T° élevée) ; il se produit alors une auto-inflammation, ce qui signifie que le mélange s'enflamme spontanément.

Alors la combustion du mélange air/essence est déclenchée par l'étincelle que produit la bougie, tandis que la combustion du mélange air/Diesel est provoquée par la compression de celui-ci, les bougies n'étant utilisées que lors du démarrage du moteur (préchauffage). Le moteur Diesel est le fruit du travail de l'ingénieur allemand Rudolf Diesel, ce qui justifie que le terme "Diesel" conserve sa majuscule.

I.2.1.3. Chaîne cinématique

Le moteur transforme en énergie mécanique l'énergie chimique contenue dans le carburant (ou l'énergie électrique pour un véhicule électrique). Le mouvement ainsi créé est transmis par l'embrayage, puis par la boîte de vitesses vers les roues motrices.

Les roues motrices sont :

- à l'avant sur une traction
- à l'arrière sur une propulsion
- à l'avant et à l'arrière sur quatre roues motrices (4X4)

Les moteurs à combustion sont également appelés "moteurs thermiques". Ils transforment une explosion dégageant de la chaleur en énergie mécanique. L'énergie dégagée par l'explosion d'un mélange de carburant et d'air dans la chambre met en mouvement les pistons du moteur, qui transmettent cette énergie à la bielle. Celle-ci actionne le vilebrequin. Les résidus de l'explosion du mélange sont ensuite évacués par les tuyaux d'échappement.

I.2.1.4. Cycle de fonctionnement

L'ingénieur français Beau de Rochas a défini, en 1862, le principe du cycle de fonctionnement des moteurs à combustion interne **Tableau 1-1**.

Première phase : admission : aspiration d'air ou de mélange d'air et d'essence.

Deuxième phase : compression : de l'air ou du mélange.

Troisième phase : inflammation et détente: inflammation rapide provoquant la détente du gaz (temps moteur).

Quatrième phase : échappement : évacuation des gaz brûlés.

Tableau I.1. : Comparaison entre l'essence et diesel [6]

TEMPS MOTEUR	ADMISSION	COMPRESSION	COMBUSTION DETENTE	ECHAPPEMENT
MOTEUR ESSENCE	Aspiration d'un mélange préparé et dosé air-essence dont le volume est variable	compression de 10à 15 bars $T^{\circ}=300$ à 400°c	Combustible déclenchée par étincelle (rapide)	Evacuation des gaz brulés
MOTEUR DIESEL	Aspiration d'air pur à un volume sensiblement constant	compression de 30à 40bars $T^{\circ}=600$ à 700°c	Combustion par auto-inflammation (lente)	Idem (oxyde d'azote)

Les applications de ce cycle peuvent amener à des types de moteurs différents selon la manière dont ces quatre phases sont réalisées.

Il existe trois types de moteurs :

- **Les moteurs à quatre temps :** qui réalisent le cycle en quatre courses de piston et deux tours de vilebrequin,

- **Les moteurs à deux temps :** qui réalisent ce cycle en deux courses de piston et un seul tour de vilebrequin,

- **Les moteurs rotatifs :** dont le mouvement rectiligne alternatif du piston classique est remplacé par la rotation d'un organe jouant le rôle d'un piston. Il réalise le cycle en un tour de piston.

Il existe différents types de moteurs à explosion. Les principales changements sont le nombre de pièces, leurs proportions et leur disposition (par exemple : les pistons, les soupapes, les chambres). Ces caractéristiques font varier la force et la puissance des moteurs.

I.2.1.5. Chaîne de traction d'une voiture à moteur thermique

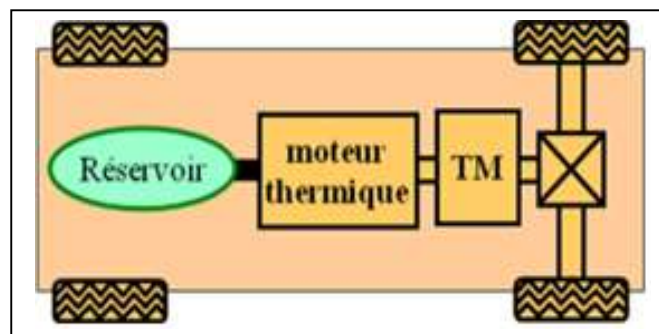


Figure I.2. : Architecture de base commune à (quasi) tous les constructeurs [7]

I.2.2 Nouvelles motorisations de voiture

I.2.2.1. Moteurs électriques

La voiture électrique existe depuis l'avènement de l'automobile à la fin du 19^{ème} siècle

Après une période d'hésitation qui dure jusque dans les années 1930, le moteur à combustion interne a gagné la course de la meilleure motorisation des véhicules routiers.

Le moteur électrique possède des caractéristiques intrinsèques bien supérieures sur certains aspects au moteur thermique impact environnemental est, en principe, plus faible qu'une automobile « thermique » et son fonctionnement plus silencieux. Puissance constante. Pas de vitesse de ralenti Maintenance facile.

Un ou plusieurs moteurs électriques peuvent assurer partiellement ou totalement la production d'énergie mécanique de l'automobile.

I.2.2.1.1. Description

La voiture électrique comporte une batterie, telle que nickel-hydrure métallique ou bien encore lithium, qui est le point de stockage de l'électricité. Un régulateur et un convertisseur permettent la connexion de la batterie au moteur électrique. L'intensité du courant alimentant le moteur est assurée par le biais du régulateur, et le convertisseur permet de convertir le courant continu en courant alternatif par simple action du conducteur appuyant sur la pédale d'accélération.

I.2.2.1.2. Fonctionnement du moteur électrique

Le moteur électrique est essentiellement constitué d'une bobine de cuivre mobile et d'un stator fixe. La partie fixe est composée d'un ou plusieurs aimants. Un champ magnétique est généré lorsque le courant passe dans la bobine. Ce champ est opposé à celui créé par les aimants. Cette opposition crée une force tangentielle à l'axe de rotation, autrement dit un couple. Ce couple étant proportionnel au courant, plus il y a de courant, plus la vitesse sera grande.

Le moteur électrique puise son énergie dans une batterie, et qui doit être rechargée régulièrement, on mettant la fiche dans la prise.

Pendant les phases d'accélération, le moteur transforme l'énergie électrique en travail (phase « moteur ») tandis que lors des phases de freinage, ils transforment la force d'inertie du véhicule en énergie électrique (phase « générateur ») permettant ainsi de recharger la batterie. Un système de régulation bidirectionnel gère les échanges entre les moteurs, générateurs et la batterie. Des variantes à la classique batterie d'accumulateurs électrochimiques fournissant l'énergie électrique, sont en cours de développement, notamment **les systèmes de pile à combustible**.

I.2.2.1.3. Types de moteur

Deux types de moteurs électriques peuvent propulser une automobile : les moteurs à courant alternatif (Moteurs AC) et les moteurs à courant continu (Moteurs DC).

a) Moteurs AC

- Synchrones

Un champ magnétique tourne à la circonférence du stator. La rotation du champ est causée par un courant alternatif aux pôles du stator.

Le champ magnétique dans le rotor est fixe par rapport à la position angulaire du rotor.

Le rotor tourne exactement à la même vitesse que le champ du stator par le principe du magnétisme.

La vitesse de rotation est précise indépendamment de la charge.

Nécessite un courant continu pour le champ du rotor dans le cas d'un champ électro magnétique (wound field rotor).

La procédure de démarrage peut nécessiter un lanceur séparé pour vaincre le couple de démarrage.

Le moteur s'arrête brutalement en cas de surcharge.

- Asynchrones

Un champ magnétique tourne à la circonférence du stator. La rotation du champ est causée par un courant alternatif aux pôles du stator.

Ce champ magnétique induit un courant dans les conducteurs du rotor qui en réponse génèrent un champ.

Le rotor tourne à une vitesse inférieure à celle du champ dans le stator. Cette vitesse est dépendante de la charge.

La construction du moteur est simple et peu coûteuse. Les courants de démarrage sont 5 à 8 fois supérieurs au courant nominal.

b) Moteurs DC

- A aimant permanent

Le champ magnétique du stator est stationnaire.

C'est le courant dans le rotor qui est la cause de la rotation.

La polarité des bobines change quand le moteur tourne.

Il est très facile de faire varier la vitesse de rotation.

Le moteur est silencieux.

L'utilisation d'un système mécanique de balais pour la commutation n'autorise que des applications de puissance faible (arc électriques lors des commutations).

Une commutation électrique est adaptée aux fortes puissances.

- **Wound Field**

Le stator est bobiné.

I.2.2.1.4. Utilisation pour la propulsion

Les véhicules électriques utilisent des moteurs aussi bien AC que DC.

Les moteurs AC sont triphasés alimentés en 240 volts.

L'utilisation de moteur AC permet de régénérer l'énergie au freinage en passant an générateur pour recharger les batteries.

I.2.2.1.5. Energie utilisée et sont stockage

L'énergie utilisée par les voitures électriques c'est l'électricité.

L'électricité est une source d'énergie que l'on utilise pour produire une autre énergie: de la lumière, de la chaleur, du son ou du mouvement. Quant au courant électrique qui arrive dans toutes les prises des maisons, il est produit dans d'énormes centrales électriques. Ces centrales fonctionnent au charbon, au gaz, au mazout ou à l'énergie nucléaire.

L'électricité générée au départ de sources d'énergie non polluantes, comme le vent ou l'eau, est appelée «électricité verte».

Dans une voiture l'électricité est stockée en permanence dans le composant le plus couramment utilisé qui est la batterie ou bien produite par **une pile à combustible**.

a) Utilisation des batteries

L'énergie, capable de faire rouler les voitures et faire fonctionner tout appareil électrique, est certainement représentée par des batteries électriques (**figure 1-3 (a)**). Les batteries électriques présentent une solution réelle à court terme. En effet, celles-ci présentent quelques avantages dont les plus importants sont l'absence de rejet de matières polluantes, absence de nuisance sonore etc.... Néanmoins, La source de cette énergie électrique reste les centrales nucléaires ou les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole). Il est donc plus judicieux de réfléchir à des objectifs à moyen et plus long terme.

Différents types de batterie

La batterie influence directement sur les performances et surtout l'autonomie de l'automobile.

Les batteries au plomb sont parmi les moins chères mais elles sont aussi les plus lourdes et peu performantes. D'autres technologies, ayant généralement un meilleur rendement et sont plus légères peuvent être utilisées, comme par exemple le Nickel Métal Hydrure, le Lithium Ion (permettent d'améliorer considérablement les caractéristiques techniques des véhicules électriques et rend leur utilisation possible). D'autres composants ont été envisagés pour le stockage de l'énergie : les supercapacités et les volants d'inertie mais leur usage reste relativement marginal. Il semble que l'association de batteries et de supercapacités soit une solution intéressante d'un point de vue technique mais relativement coûteuse à mettre en œuvre (**tableau 1.2.**).

Tableau 1.2. : Différents types de batterie [8]

Batteries	Pb Acide	Ni-Cd	Ni-MH	Zebra	Li-Ions
Energie utile spécifique [w.h/kg]	35-70	38	70-90	90-100	100-130
Puissance spécifique [w/kg]	100-400	79	200-400	200	200-400
Rendement (charge – décharge) [%]	80	65	70	85	85
Durée de vie [cycles]	500-1000	1200	750-1200	1200	1200

Pour réaliser des batteries capables de rendre crédible une offre de voiture électrique sur le marché, les chercheurs du monde entier travaillent à relever différents défis.

De tous les systèmes de stockage d'énergie rechargeables, les accumulateurs Li-ion sont aujourd'hui ceux qui offrent les meilleures performances : 400 à 550 Wh/L et 140 à 200 Wh/kg pour une tension nominale d'environ 3,7 V, et dans une gamme de température de fonctionnement étendue (- 20 à + 65 °C).

Les applications de la filière Li-ion s'élargit. Les premières voitures hybrides équipées de cette technologie ont été commercialisées en 2009-2010 ; il s'agit de voitures haut de gamme des constructeurs Mercedes-Benz et BMW [9]

b) Utilisation de la pile à combustion

La pile à combustible est une autre alternative intéressante, on ne dit pas pour le stockage de l'énergie mais aussi bien plus sa production (**figure 1-3 (b)**).

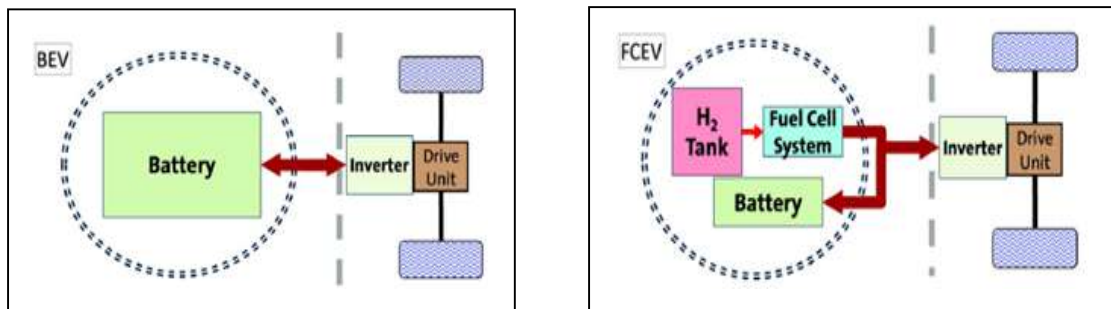
Une pile à combustible est un dispositif permettant la conversion direct en énergie électrique, de l'énergie libre d'une réaction chimique d'oxydoréduction. En utilisant comme carburant de l'hydrogène et de l'oxygène, la pile à combustible produit directement de l'électricité. Le système est efficace et propre parce qu'il ne produit aucun rejet de gaz toxiques.

Dans son principe, une pile à combustible se différencie des accumulateurs et des piles classiques par la nature de ses électrodes qui ne subissent aucune modification de structure au cours des réactions électrochimiques mais servent uniquement de support à ces réactions.

Une pile de zinc, par exemple, doit être jetée lorsque le combustible est épuisé (pile primaire) et une batterie (pile secondaire) doit être rechargée pour que les réactifs soient régénérés. Dans une pile à combustible, il suffit de remplir le réservoir de combustible et de l'alimenter en air pour continuer à obtenir du courant électrique.

De nombreux constructeurs d'automobiles développent depuis plusieurs années des prototypes de voitures à pile à combustible (c'est-à-dire utilisant le dihydrogène comme combustible). Même si l'on ne les rencontre pas encore habituellement sur les routes, ces prototypes ont déjà parcouru, tous modèles confondus, des centaines de milliers de kilomètres avec une autonomie variant de 300 à 500km.

Les puissances et les vitesses atteintes par ces véhicules ne sont pas différentes de celles des modèles à essence. Le dihydrogène, combustible de ces voitures, peut être stocké sous diverses formes : gazeuse sous pression de 150, 350 et 700 bars, reformé à partir de méthanol (liquide) stocké dans un réservoir d'une quarantaine de litres, ou bien encore produit à partir d'autres sources.



(a)

Pour une autonomie < 150 km,
la meilleure option est le véhicule
électrique à batterie (BEV)

(b)

Pour une autonomie > 150 km et jusqu'à 500
km, la meilleure option est le véhicule
électrique à pile à combustible (FCEV)

Figure I.3. : Chaîne de traction d'une voiture électrique [10]

Comparaison aux voitures actuelles

Les points forts d'une telle technologie comparée à celle d'un moteur traditionnel sont :

-que le véhicule est silencieux, non polluant (pas d'émission), et souple de conduite

-l'absence d'embrayage, de boîte de vitesse, de pot d'échappement...

- un très bon rendement énergétique de la motorisation électrique (au moins 70% de l'énergie électrique est transformée en énergie motrice, contrairement aux moteurs thermiques où moins de 30% de l'énergie contenue dans le carburant est transformée en mouvement).

-la transformation de l'énergie cinétique en énergie électrique (décélération et freinage), le moteur devient un générateur qui permet de recharger la batterie

I.2.2.2. Moteurs hybrides

D'après les analyses effectuées sur les deux systèmes précédents, nous constatons que l'utilisation de véhicules purement électriques ou thermiques provoqué des inconvénients majeurs, que ce soit de grande pollution, stockage de l'énergie, de coût ou tout simplement de distance moyenne parcourue par le véhicule. Une autre solution apparus l'hybride (Fusion des deux moteurs), disposer de plusieurs motorisations et plusieurs sources afin d'en exploiter leur caractéristiques.

Les premiers véhicules hybrides étaient montrés au salon de Paris en 1899, ce n'est qu'à la fin du 20ème siècle, précisément en 1997, que la commercialisation des premières voitures hybrides a commencé avec la Toyota Prius et la Honda Insight. [11]

Un véhicule hybride, est la combinaison d'une motorisation électrique avec une motorisation thermique, assurant la propulsion du véhicule. Par ce biais, nous pouvons assurer la baisse de pollution en ville ainsi que la puissance et l'endurance du véhicule sur route.

Une technologie hybride permet un usage sélectif des moteurs thermique et électrique pour limiter la consommation en carburant, ainsi une baisse de la pollution atmosphérique.

I.2.2.2.1. Composants utilisés dans les véhicules hybrides

En bref on retrouve évidemment les composants servant à stocker l'énergie, deux organes de traction de type différent (électrique et mécanique) ainsi que des éléments de transmission.

Souvent, pour des raisons évidentes de coût, les principaux composants et/ou technologies mis en œuvre dans les véhicules hybrides sont déjà utilisés dans l'automobile.

• Moteurs :

Toutes les technologies du moteur thermique sont envisageables. On peut citer, par exemple, les moteurs diesel, essence, GPL ou bien encore au gaz naturel. Chacune de ces technologies a des caractéristiques différentes que ce soit en termes de pollution, de performance, de rendement, d'encombrement et de poids, ou de consommation. Les technologies les plus couramment utilisées pour les applications au véhicule hybride sont les moteurs diesel et essence.

Pour les moteurs électriques, toutes les technologies sont également envisageables : moteur à courant continu, synchrone ou asynchrone, etc. Une des caractéristiques essentielles des véhicules hybrides est le taux d'hybridation, c'est à dire le rapport entre la puissance du moteur thermique et la puissance totale installée dans le véhicule.

Lorsque le taux d'hybridation est proche de 1, le moteur électrique a une faible puissance. Lorsque le taux d'hybridation est proche de 0.5 le ou les moteurs électriques participent à la propulsion du véhicule et/ou à la recharge des batteries. Généralement, les moteurs de traction sont intégrés dans le groupe motopropulseur, mais pour certaines applications, les moteurs roues sont situés dans le moyeu de chaque roue.

• Transmissions

Les transmissions mécaniques sont celles couramment utilisées dans les véhicules conventionnels : embrayage (utilisé pour accoupler/désaccoupler deux ensembles mécaniques), boîte de vitesses (manuelle ou automatique) ou variateur continu de vitesse, train planétaire (système mécanique à trois arbres dans lequel le régime de l'arbre de sortie est égal à la somme des régimes des arbres d'entrées), différents types de réducteurs (à courroie, chaîne ou engrenages), etc.

Les différentes façons d'associer ces composants permettent de définir plusieurs architectures de groupes motopropulseurs.

I.2.2.2.2. Concept d'une chaîne de traction hybride [11]

Une chaîne de traction hybride est généralement formée de deux sources d'énergie associées à des convertisseurs d'énergie correspondants, comme montré sur la **figure 1.4**. Une de ces sources, source 2 dans la figure, considérée comme bidirectionnelle, sert d'une part à fournir l'énergie nécessaire et d'autre part à absorber et stocker une partie de l'énergie pour une utilisation ultérieure. Cette structure hybride offre plusieurs chemins de flux de puissance permettant ainsi différentes stratégies de commande. Ainsi les différents scénarios de cheminement de puissance sont décrits comme suit :

1. La source 1 fournit la puissance nécessaire à la charge (chemin 1 sur la figure).
2. La source 2 fournit la puissance nécessaire à la charge (chemin 2 sur la figure).
3. Les deux sources 1 et 2 fournissent la puissance en même temps (chemins 1 et 2).
4. La source 2 absorbe la puissance à partir de la charge (chemin 4).
5. La source 2 absorbe la puissance à partir de la source 1 (chemin 3).
6. La source 2 reçoit la puissance à partir de la charge et de la source 1 simultanément (chemins 3 et 4).
7. La source 1 délivre la puissance à la charge et à la source 2 en même temps (chemins 1 et 3).
8. La source 1 délivre la puissance à la source 2 et la source 2 délivre la puissance à la charge (chemins 2 et 3).
9. La source 1 fournit la puissance à la charge et la charge délivre la puissance à la source 2 (chemins 1 et 4).

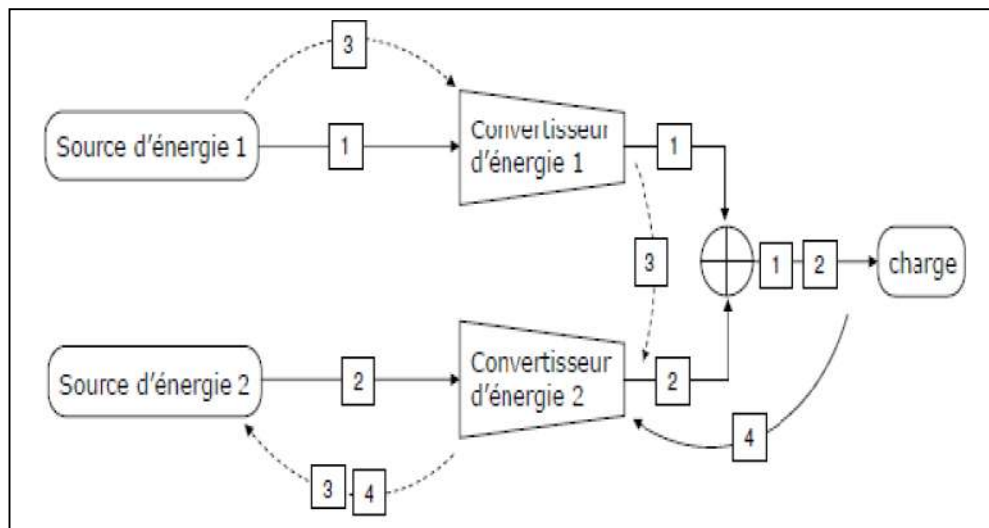


Figure I.4. : Schéma illustrant le concept d'un véhicule hybride [1]

Cela dit, dans un véhicule hybride conventionnel, une première source est le réservoir de combustible associé à un convertisseur d'énergie qui est dans ce cas un moteur à combustion interne alors que la deuxième est un accumulateur électrique combiné à un moteur électrique.

Ce couplage de sources va permettre la minimisation de consommation tout en assurant une bonne performance du véhicule et une diminution de la taille du moteur à combustion interne.

Cela est assuré en faisant fonctionner les éléments près de leurs points de rendements maximaux avec une stratégie de commande adéquate et grâce au freinage régénératif. Ce dernier n'est autre que l'utilisation de l'énergie cinétique produite par la rotation des roues transformée

en électricité par le fonctionnement en générateur du moteur électrique, ce qui permet simultanément de recharger l'élément de stockage et de freiner le véhicule.

I.2.2.2.3. Principales architectures de véhicules hybrides

Le concept de cette chaîne de traction hybride peut être implanté par différentes architectures ou configurations. Les constructeurs automobiles, utilisent chacun une technologie différente mais dont les principaux composants restent toutefois les mêmes.

Généralement il existe deux types d'hybridations, à savoir les architectures série et parallèle. La différence entre ces deux configurations est principalement le nœud liant les sources d'énergie. Sauf que, de nos jours, de nouveaux véhicules hybrides possèdent une configuration plus ou moins complexe donnant lieu à de nouveaux types d'hybridation notamment une hybridation série - parallèle ou une hybridation complexe qui ont été proposées mais elles sont généralement plus complexes (plusieurs embrayages, 3 moteurs électriques, etc.)

On représente les configurations les plus utilisées : série et parallèle

Série : le moteur électrique dirige seul la rotation des roues en utilisant la puissance générée par le moteur thermique. (**Figure I.5**)

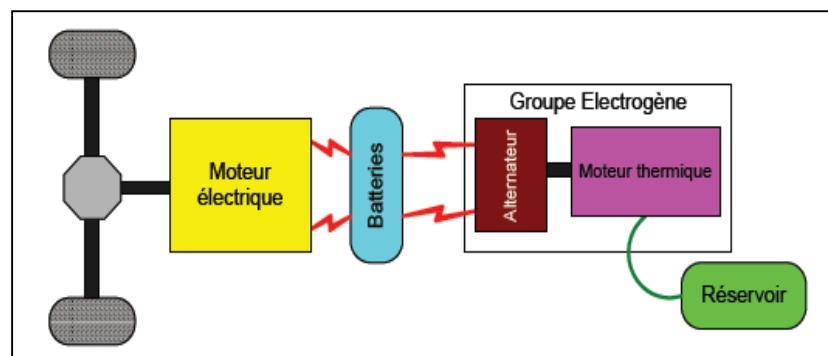


Figure I.5. : L'architecture hybride série [12]

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.

Parallèle : le moteur électrique et thermique assurent tous les deux la rotation des roues, par contre, c'est le moteur électrique qui recharge la batterie.

Lorsque les différents moteurs sont solidaires du même arbre, (**Figure I.6**), on parle d'architecture hybride parallèle simple arbre.

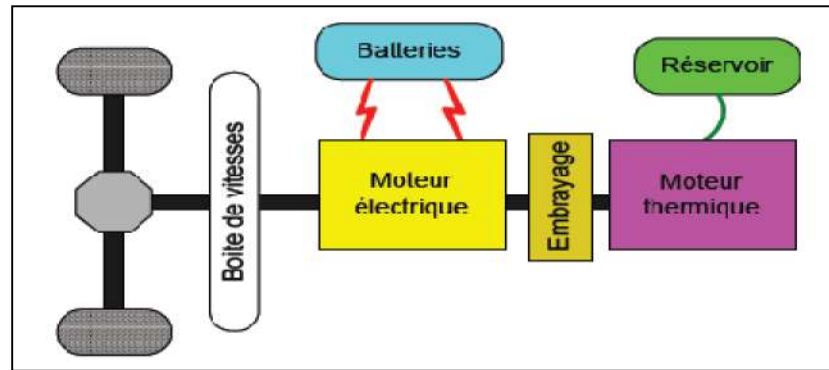


Figure I.6.: L'architecture hybride parallèle simple arbre [12]

Lorsque les deux moteurs ont des puissances similaires, le moteur électrique est placé entre l'embrayage et la boîte de vitesses. Les régimes des deux moteurs sont linéairement dépendants du régime des roues. Il s'agit alors de répartir le couple aux roues nécessaire à la propulsion du véhicule entre les deux moteurs, en tenant compte des rapports de boîte. L'un des inconvénients inhérent à cette architecture est la perte de couple aux roues apparaissant lors des changements de rapports, qui dégrade le confort de conduite.

Pour remédier à cet inconvénient, la boîte de vitesses peut être remplacée par un variateur continu de vitesse. Le moteur électrique peut également être connecté sur un arbre différent, on parle dans ce cas d'architecture double arbre, (**Figure I.7**). On s'aperçoit que le dimensionnement des composants et la répartition de puissance sur les deux chaînes de traction sont moins contraints.

Dans l'architecture double arbre, les deux moteurs ont des régimes indépendants et à tout moment la traction du véhicule est assurée par un des deux moteurs.

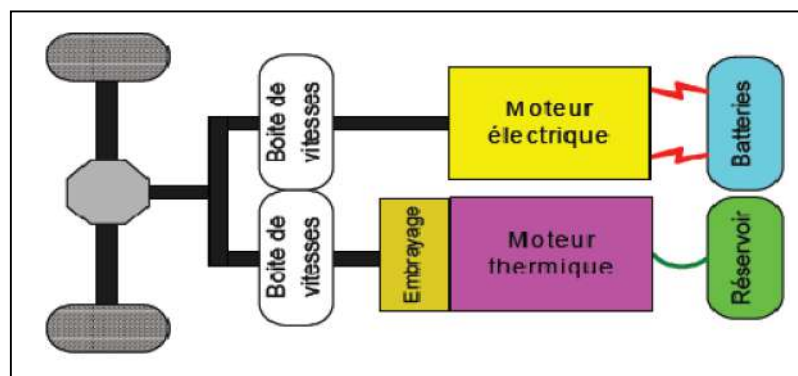
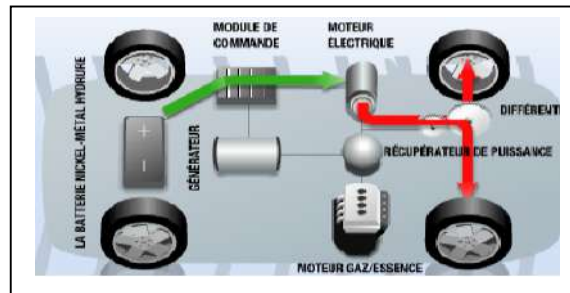


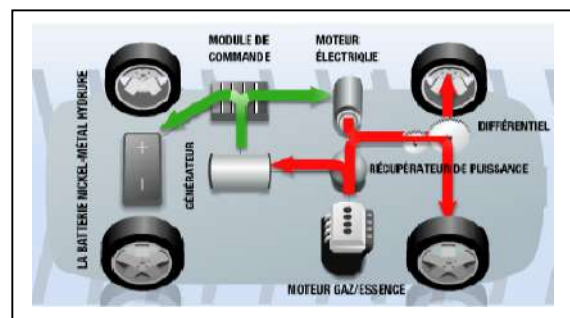
Figure I.7. : L'architecture double arbre [12]

I.2.2.2.4. Différents fonctionnements suivant le régime

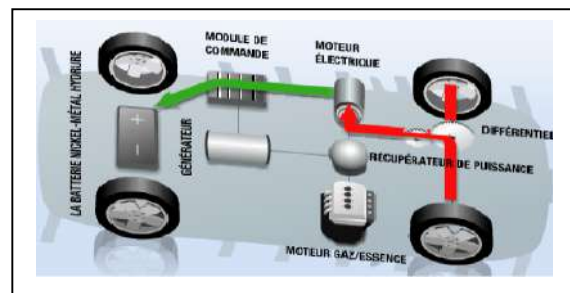
Les ingénieurs et constructeurs ont déterminé différentes phases (démarrage, vitesse de croisière, freinage = récupération d'énergie). Pour économiser le carburant consommé, un usage sélectif du moteur thermique et électrique a fait naissance.



(a)



(b)



(c)

Figure I.8. : Différents fonctionnements suivant le régime [13] (a) **Démarrage** Vitesse basse : le moteur thermique n'est pas assez puissant, seul le moteur électrique est utilisé. (b) **Vitesse de croisière** Le moteur thermique est efficace pour la rotation des roues mais aussi pour alimenter le générateur qui lui va alimenter le moteur électrique ou la batterie. (c) **Décélération ou freinage**, récupération de l'énergie cinétique de la rotation des roues en faisant fonctionner le moteur électrique en tant que générateur pour recharger les batteries.

Une fois l'architecture sélectionnée, le choix des technologies et le dimensionnement des composants sont essentiels car ils déterminent non seulement les performances dynamiques du véhicule (accélération maximale, vitesse maximale, etc.) mais aussi la consommation moyenne

du véhicule et ses émissions de polluants. Généralement, ces choix sont des compromis entre performances dynamiques, consommation et émissions, et bien sur, coût de fabrication.

Un des éléments qui détermine en partie l'utilisation possible du véhicule hybride est la capacité de la batterie car elle détermine l'autonomie du véhicule en mode électrique pur. Actuellement, le prix des batteries est relativement élevé et donc, dans l'immédiat, les premiers véhicules hybrides commercialisés (Toyota *Prius*, Nissan *Tino*, Honda *Insight*) ne disposent que d'une faible capacité de batterie ne permettant pas le fonctionnement en mode électrique pur.

On peut émettre l'hypothèse qu'avec l'introduction de la pile à combustible, le véhicule hybride pourrait alors être utilisé en mode électrique pur pour assurer la plupart des petits trajets quotidiens. Les kilomètres effectués en mode électrique pur auront un prix de revient très faible en comparaison à celui du carburant.

I.2.2.2.5. Véhicules hybrides à pile à combustible

Un véhicule hybride à pile à combustible se classe dans la catégorie des véhicules à architecture d'hybridation série dans laquelle l'ensemble moteur à combustion interne et générateur électrique est remplacé par une pile à combustible. Cette dernière est chargée de fournir l'énergie électrique nécessaire à la traction à partir d'une réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène.

La structure d'un véhicule hybride à pile à combustible est montrée dans la **figure 1.9**. Ce véhicule est un hybride électrique-électrique, puisqu'il contient une batterie (qui peut alimenter un moteur électrique) et une PAC (qui peut alimenter le moteur électrique ou la batterie).

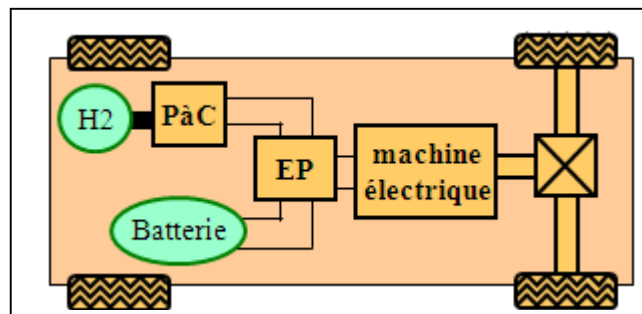


Figure I.9 : Structure d'un véhicule hybride à pile à combustible [7]

Remarque : la terminologie « hybride » est utilisée aussi bien pour l'hybride thermique – batterie que pour l'hybride pile à combustible – batterie (dans le cas présent).

Dans un véhicule à pile à combustible hybride, c'est la source de puissance qui est hybride, la motorisation restant entièrement électrique. Un véhicule à pile à combustible hybride utilise donc

une source secondaire d'énergie électrique réversible en puissance (fonctionnement en charge et en décharge). Les rôles de la source secondaire d'énergie sont :

- **Assister en puissance la pile à combustible :**

La source secondaire fournit le complément de puissance lorsque la pile atteint sa puissance maximale (par exemple lors d'accélération du véhicule).

- **Récupérer l'énergie cinétique lors des freinages :**

La récupération de l'énergie cinétique lors des phases de freinage permet d'économiser de l'hydrogène et d'augmenter l'autonomie du véhicule.

- **Introduire un degré de liberté dans la répartition des puissances :**

L'hybridation permet de répartir la demande de puissance entre le système pile à combustible et la source secondaire d'énergie. Les points de fonctionnement du système PAC peuvent ainsi être déplacés vers les zones de meilleurs rendements en utilisant des stratégies de commande adaptées, ce qui permet de réduire la consommation d'hydrogène.

-Dans un véhicule à pile à combustible hybride, deux technologies sont généralement retenues pour constituer la source secondaire d'énergie : les batteries et les supercondensateurs.

Une batterie est un convertisseur d'énergie électrochimique qui emmagasine l'énergie de manière chimique.

Un supercondensateur (ou encore condensateur à doubles couches) stocke l'énergie de manière électrostatique en polarisant une solution électrolytique. Il n'y a pas de réaction chimique mise en jeu, ce qui permet d'obtenir des durées de vie élevées (un supercondensateur peut être chargé et déchargé des centaines de milliers de fois)

Une pile à combustible, une batterie et un supercondensateur ont des caractéristiques électriques extrêmement différentes. Le plan de Ragone (**figure 1.12**) illustre les différences en termes de puissances spécifiques et de capacités spécifiques des différentes sources de puissance. La pile à combustible et l'hydrogène disposent de la capacité spécifique la plus élevée, suivies des batteries puis des supercondensateurs. A l'inverse, les supercondensateurs disposent de la puissance spécifique la plus importante, suivies des batteries puis de la pile à combustible.

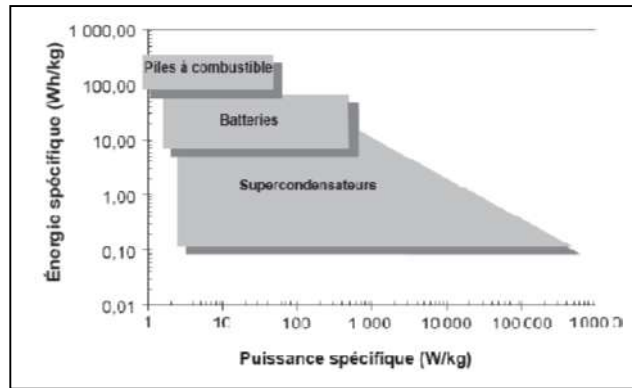


Figure I-10 : Plan de Ragone [14]

- 100 % piles ou piles + batterie... [14]

Il faut distinguer deux types principaux de véhicules à pile à combustible. D'une part, les voitures 100 % hydrogène, comme la Classe B de Mercedes, qui devrait sortir en pré-séries d'ici 2014, la FCX de Honda ou encore la Q5 d'Audi. Le mode d'alimentation en œuvre rappelle celui des véhicules thermiques : le carburant (ici de l'hydrogène en lieu et place de l'essence) est injecté sous forme gazeuse, depuis une station-service, dans le réservoir du véhicule. Là, la pile à combustible transforme ce gaz en courant électrique pour faire tourner le moteur et le fournir en énergie.

Parallèlement à ces modèles 100 % hydrogène, existent également des véhicules hybrides, dans lesquels la pile constitue le moteur principal et est couplée à une batterie d'appoint. C'est le cas du SUV FCHV-Adv de Toyota : "A basse vitesse, le moteur électrique est alimenté par la batterie. A partir d'une vitesse moyenne, entre en jeu l'alimentation par la pile à combustible". Principal point fort de ces deux types de véhicules par rapport aux électriques à batterie classiques : des performances beaucoup plus satisfaisantes en matière d'autonomie.

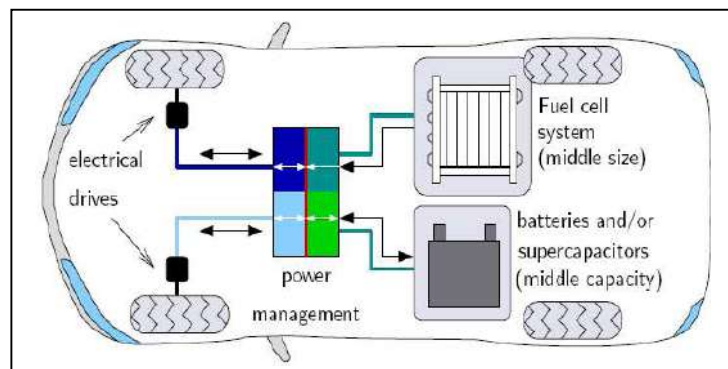


Figure I.11. : PAC principale et batterie secondaire [15]

... Ou batterie + piles

Mais ce n'est pas tout. Conscients des capacités de cette technologie et allant plus loin dans la réflexion, des constructeurs ont commencé ces dernières années à envisager la pile à combustible, en lui conférant un nouveau rôle : celui de prolongateur d'autonomie pour un véhicule électrique à batterie pour augmenter l'autonomie du véhicule.

Pour résumer, quand la batterie classique est épuisée, la pile à combustible prend le relais. Une sorte d'hybride inversé : ici, la source d'énergie principale reste la batterie, et la pile sert de moteur d'appoint. Actuellement, plusieurs projets de recherche avancent dans cette direction on associant une pile à combustible et des batteries Lithium-Ion. C'est également l'occasion de résoudre le problème majeur du véhicule électrique, c'est-à-dire son manque d'autonomie.

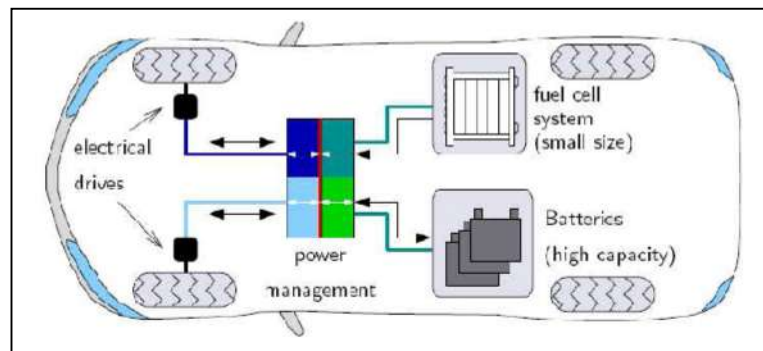


Figure I.12. : Batterie principale et PAC secondaire [15]

Plusieurs autres technologies peuvent être existées en utilisant la PAC comme celle présentée par Renault (figure:1.13) dont la pile à combustible sert à alimenter les auxiliaires d'une voiture

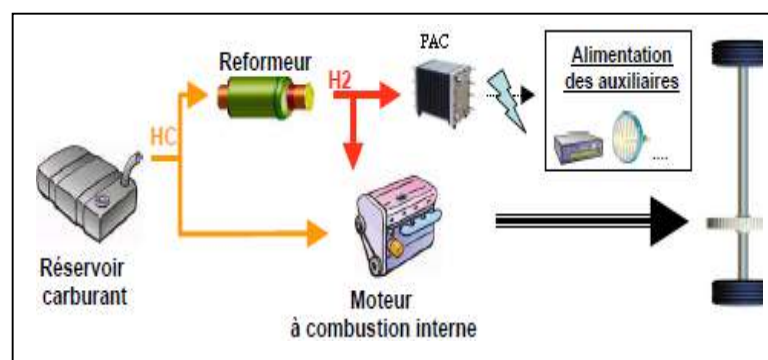


Figure I.13. PAC pour l'alimentation des auxiliaires [16]

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter les types de motorisation existant à bord d'un véhicule, et leurs chaînes de traction. On a trouvé que la pile à combustible peut exister :

Soit la PAC peut être associé à une chaîne de traction électrique 100 % PAC (la batterie n'intervient pas à la propulsion de la voiture, seulement pour alimenté les accessoires).

Ou hybride électrique dont la pile remplace le groupe motopropulseur dans l'architecture hybride série. Ici la terminologie « hybride » veut dire, la source de puissance qui est hybride,(piles + batterie) la motorisation restant entièrement électrique. Deux solutions sont possible soit la pile principale et la batterie secondaire ou bien le contraire.

Et on peut trouver la PAC introduite aussi dans la motorisation actuelle ou elle remplace la batterie pour alimenter les auxiliaires son carburant et le même que celui du moteur thermique en présence d'un reformeur.

Le véhicule du futur ne sera pas unique Plusieurs architectures seront développées en fonction de l'utilisation. Et avec les nombreux efforts déployés par les chercheurs, l'avenir des voitures sera au mieux de ce qui est maintenant.

Chapitre II

Application du système PAC dans les voitures

Introduction

Ce chapitre présente les technologies de pile à combustible et en particulier celles utilisées dans le domaine automobile. On a commencé par la présentation de la chaîne de traction d'une voiture équipée d'une PAC. Tous types de piles à combustibles(PAC) seront présentés, leurs caractéristiques de puissance et de température de fonctionnement. Et puisque les limites d'utilisation liées à l'environnement automobile favorisent l'usage d'une technologie en particulier certes la **pile PEMFC (Proton Exchange Membrane fuel Cell)**, son principe de fonctionnement est décrit.

Les réacteurs piles à combustible sont comme les blocs moteurs des automobiles, ils sont entourés par un ensemble d'objets technologiques auxiliaires, qui en assure l'approvisionnement en combustible et comburant dans les conditions optimales pour la pile (composition, pression, température...), l'évacuation des productions électriques et de chaleur, de plus des organes de régulation et de commande sont nécessaires à la gestion de la sécurité et de l'efficacité énergétique de l'ensemble. Tout cet environnement, appelé système pile à combustible, à été présenté.

On a présentés aussi quelques modèles de piles à combustible PEMFC et quelques Exemples de véhicule à PAC comme dernier point vue dans ce chapitre.

II.1. Bref historique des piles à combustible et application transport

William Grove a inventé la pile à combustible en 1839, elle est utilisé pour la première fois dans le domaine de transport en 1959 (tracteur) ainsi au début des années 60 Le programme spatial de la NASA piles à combustible utilisés sur les programmes Gemini et Apollo [17].

Et depuis les années 1970, de nombreux efforts de recherche ont été entrepris par de très grosses entreprises industrielles, très souvent aidés par des fonds publics Et à nos jours la technologie de la PAC est proche de la maturité après avoir présenté des milliers de prototypes de véhicules [18].

II.2. Chaîne de traction d'une voiture équipée d'une PAC

La chaîne de traction d'un véhicule équipé d'une PAC se compose des éléments suivants (figure II.1) :

- **Réservoir de carburant** : hydrogène gazeux (200 à 700 bars), hydrogène liquide (- 253 °C), méthanol (liquide), gaz naturel ou bien sous forme solide dans des hydrures métalliques

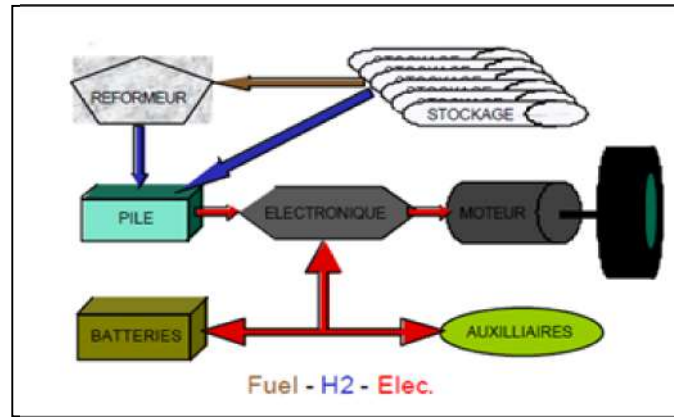


Figure II.1. : Schéma d'ensemble d'une chaîne de traction PAC [19]

- **Reformeur** : sa fonction est d'extraire l'hydrogène du carburant utilisé. Cet élément n'est pas nécessaire lorsque le système fonctionne à l'hydrogène pur ou par oxydation directe du carburant au cœur de pile.

- **Pile ou module "stack"** : c'est le réacteur électrochimique. Une pile à combustible est constituée d'un empilement d'éléments anode-électrolyte-cathode reliés par l'intermédiaire d'inter connecteurs (ou plaques bipolaires) formant ainsi une « stack » (ou module)

- **Auxiliaires** : le fonctionnement correct de la pile nécessite un certain nombre de dispositifs annexes comme : un circuit de refroidissement, un compresseur, des régulateurs, etc...

- **Electronique de puissance** : elle assure l'interface électrique entre la pile et la motorisation.

- **Moteurs électriques** : tous types de moteurs peuvent être utilisés.

II.3. Types de piles à combustible

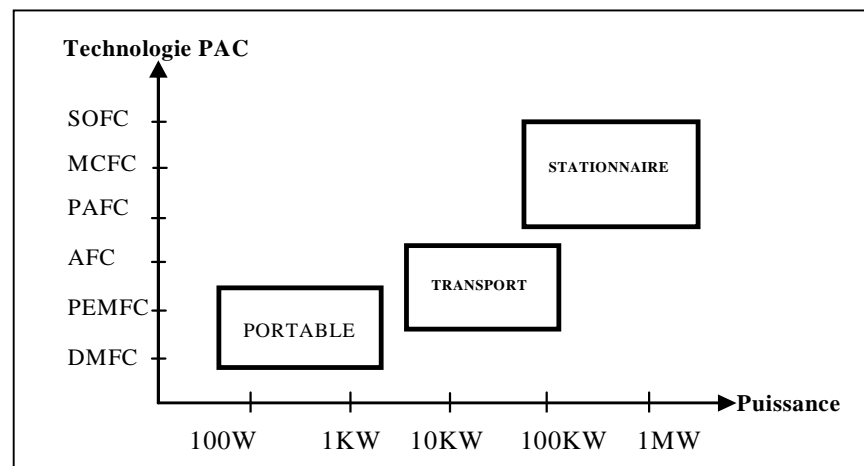
Dans une pile à combustible typique, l'anode (l'électrode négative) est alimentée en permanence en combustible et la cathode (l'électrode positive) en comburant qui est souvent l'oxygène de l'air. Les réactions électrochimiques ont lieu au niveau des électrodes pour produire un déplacement d'ions à travers l'électrolyte tout en créant un courant électrique complémentaire qui effectue un travail sur la charge. Les piles à combustible sont classées selon le choix de l'électrolyte et du combustible utilisé déterminant ainsi les réactions aux électrodes et le type d'ions qui traversent l'électrolyte et conditionne de plus la température de fonctionnement de la pile.

Chaque type de pile à combustible a un domaine d'application privilégié (tableau II.1). Les piles dites à basses températures sont plutôt destinées aux applications mobiles, alors que les piles dites à hautes températures sont généralement destinées aux applications stationnaires.

Tableau II.1. : Les principaux types de piles à combustible [1]

	Nom	Electrolyte	Plage de puissance	Température de fonctionnement	Domaines d'applications
PAC à bases températures	DMFC « Direct methanol fuel cell »	Membrane polymère	1mW à 100kW	60-90°C	Portable
	PEMFC «Proton exchange membrane feul cell »	Membrane polymère	100W à 500kW	60-90°C	Transport portable Stationnaire
	AFC «alkaline fuel cell »	Solution alcaline aqueuse	10kW à 100kW	50-250°C	Transport spatial
	PAFC «phosphoric acid fuel cell »	Acide phosphorique	Jusqu'à 10MW	160-220°C	Stationnaire
PAC à hautes températures	MCFC «Molten carbonate fuel cell »	Carbonate fondu	Jusqu'à 100MW	650°C	Stationnaire
	SOFC «Solid oxide fuel cell»	Oxyde solide	Jusqu'à 100MW	750-1050°C	Stationnaire

Les principales applications mobiles concernent les appareils électroniques portables (ordinateur, téléphone cellulaire...) et le domaine des transports (voiture, bus...) ; les applications stationnaires concernent la production décentralisée d'énergie électrique (habitats collectifs ou individuels...). Dans ces dernières, la chaleur produite par les piles de hautes températures peut être récupérée par des procédés de cogénération ce qui augmente le rendement global du système PAC. A la figure 2-2, les différents types de pile à combustible et les plages de puissance sont liés par leurs domaines possibles d'application.

**Figure II.2. : Technologies des piles à combustible et domaines d'application. [1]**

Notre étude portant sur des applications de transport en particulier des véhicules de passagers, la pile de type PEMFC se montre comme le choix le plus adéquat, car comparée à la pile DMFC, cette dernière présente l'inconvénient de son faible rendement et le fait de ne fonctionner qu'au

méthanol ce qui la place dans une catégorie à part. Quant à la pile de type AFC, elle souffre de l'incompatibilité avec le CO_2 , ce qui limite son application au domaine spatial ou sous-marin. Pour les piles fonctionnant à haute température, la dégradation des matériaux est assez élevée et par suite la durée de vie reste un défi énorme, ajouté à cela la nécessité d'un temps de démarrage relativement long (une dizaine de minutes pour une pile SOFC démarrant à froid) mais n'empêche pas son utilisation en tant qu'unité de puissance auxiliaire à bord d'un véhicule. En ajoutant les avantages que possède la pile PEMFC avec sa membrane solide (pas de fuites dues aux vibrations) et surtout avec sa densité massique de puissance la plus élevée la rendant assez compacte et économique, les études se concentrent sur ce type afin de surmonter les défis techniques et économiques permettant sa commercialisation. C'est donc une pile de type PEMFC que nous allons aborder dans la suite de notre étude.

II.4. Piles PEMFC

Les piles PEMFC sont actuellement le type de pile le plus étudié. Leurs applications sont multiples autant dans le domaine automobile que dans le domaine stationnaire et portable. Elles portent également d'autres noms : SPEFC (Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell), SEFC (Solid Electrolyte Fuel Cell) ou encore IEMFC (Ion Exchange Membrane Fuel Cell).

Si elles sont si populaires par rapport aux autres types de piles, c'est qu'elles présentent plusieurs avantages : elles ne sont pas sensibles au CO_2 (comme l'est l'AFC) présent dans l'air, leur faible température de fonctionnement, permettent un démarrage rapide, une plus grande souplesse de fonctionnement et une meilleure gestion thermique (moins de chaleur à évacuer), elles sont multi-usages et couvrent un large spectre de puissance.

Cependant, elles présentent encore des problèmes qui doivent être réglés : elles sont très sensibles au monoxyde de carbone et au soufre qui peuvent contaminer la membrane, leur faible température de fonctionnement entraîne une mauvaise valorisation de la chaleur (notamment dans le cas d'applications stationnaires), le catalyseur (platine) coûte cher, de même que les plaques bipolaires et la membrane. Elles ne supportent pas un grand nombre de cycles de fonctionnement.

II.4.1 Caractéristiques

II.4.1.1. 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 PEMFC répond le mieux à ces contraintes avec une densité de puissance comprise entre 1 kg/kW et 3 kg/kW. [1]

II.4.1.2. Température de fonctionnement

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

II.4.1.3. Structure solide

La pile à combustible PEMFC 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.

II.4.1.4. Description

Les piles à combustible sont élaborées à partir d'un empilement de cellules électrochimiques élémentaires (**Figure II-3**) branchées en série les unes aux autres.

Une cellule élémentaire est constituée des éléments suivants **Figure II.3** :

- Un assemblage Electrode Membrane Electrode, dit E.M.E ,
- Des plaques bipolaires pour l'alimentation des gaz.

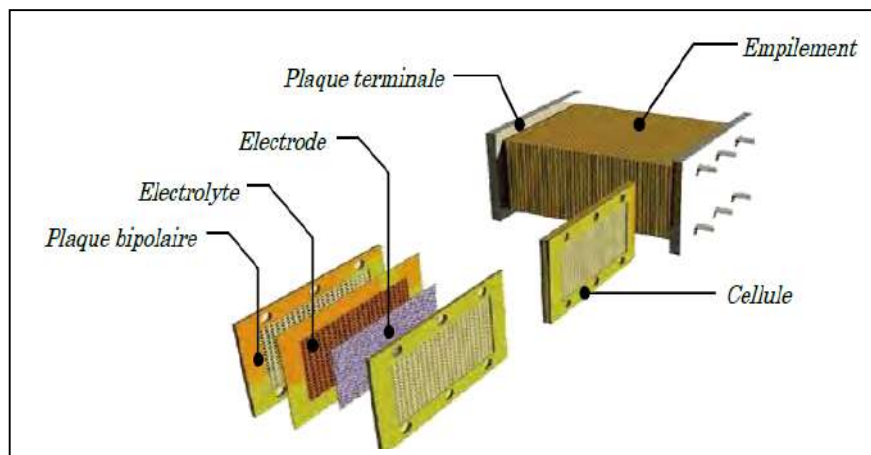


Figure II.3 : vue éclatée d'une cellule élémentaire de pile à combustible [20]

- **Les électrodes** sont le siège des réactions d'oxydation de l'hydrogène à l'anode et de réduction de l'oxygène à la cathode en présence du catalyseur. Elles sont constituées par un papier de carbone de structure poreuse dont la face en contact avec l'électrolyte est enduite d'une pâte contenant du carbone platiné. La première zone permet l'accès des gaz, et la deuxième où est déposé le catalyseur provoquant la réaction électrochimique.

- **L'électrolyte** (Membrane), c'est ce qui caractérise les piles à combustibles de type PEM. L'électrolyte est utilisé sous forme de membranes (très faible épaisseur : de 25 à 250 μm) en polymère perfluoré sulfuré. Elles assurent le transfert des protons de l'anode vers la cathode, sous l'influence d'un champ électrique. Elles doivent donc être de bons conducteurs ioniques et de bons isolants électriques. De plus, elles doivent avoir une perméabilité minimale aux gaz réactifs tout en étant stable thermiquement et mécaniquement. Le matériau le plus couramment employé est le Nafion[®].
- **Les plaques bipolaires** représentent les frontières entre deux cellules élémentaires. Elles interviennent dans leur tenue mécanique et permettent la distribution des gaz dans les chambres anodique et cathodique de la cellule. Elles sont réalisées en aluminium traité ou en graphite, car elles assurent la liaison électrique entre les cellules et le circuit externe.

II.4.1.5. Montage d'une pile

Dans une cellule élémentaire, la tension nominale est de l'ordre de 0,7V. Ainsi pour atteindre les niveaux de tension demandés pour des applications à plus large échelle de puissance, plusieurs cellules doivent être connectées en série pour former une pile ou module (en anglais stack) Ceci dit, l'abréviation PAC **figure II.4**.

La puissance du stack dépend du nombre de cellules et de leur surface.

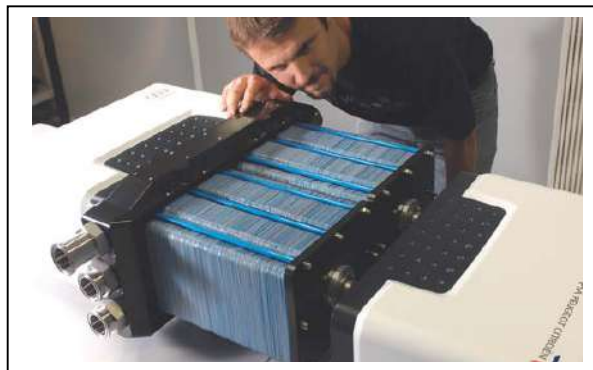


Figure II.4 : Vue éclatée de la pile GENEPAC (4 modules)

Le CEA, associé à PSA Peugeot-Citroën, dans le cadre du projet Genepac (pour Générateur électrique à pile à combustible) a développé une pile de 80 kW pour l'application automobile développée en 2006 [21].

II.4.1.6. principe de fonctionnement

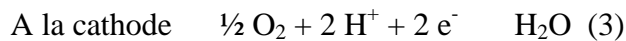
Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est décrit par une relation chimique.

Cette réaction chimique est une oxydoréduction électrochimique. Elle fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur, selon la réaction chimique globale suivante [22]:



Son principe est représenté sur la **Figure II.5**.

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



Ces réactions d'oxydation de l'hydrogène (à l'anode) et de réduction de l'oxygène (à la cathode) s'effectuent à l'interface électrolyte/électrode en présence d'un catalyseur (platine)

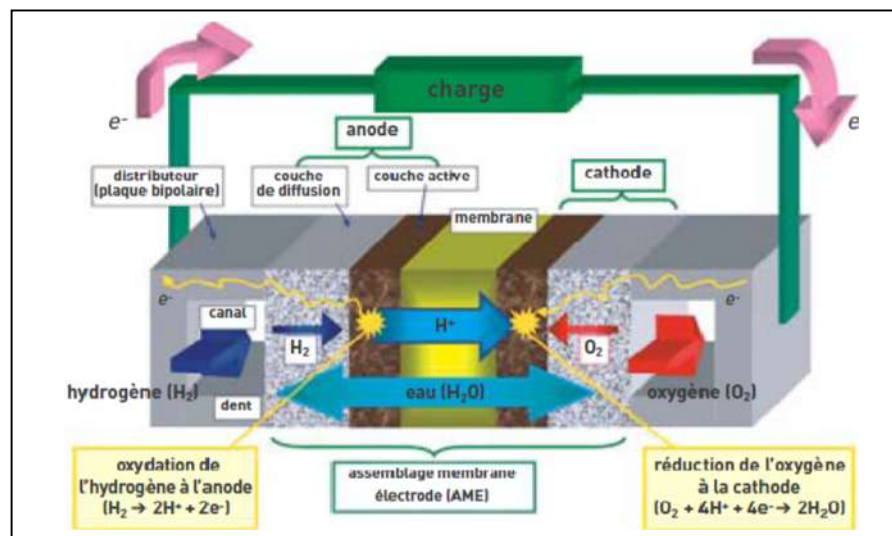


Figure II.5 : Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC [21]

II.4.1.7 Performances

Elles sont résumées sur la **Figure II.6**, essentiellement sous la forme de la caractéristique courant – tension (I, V), appelée encore courbe de polarisation (courbe en jaune, dénommée V).

La tension à courant nul, V_0 , à 25°C, pour le couple hydrogène-oxygène est de **1,23 Volt**.

Le point de fonctionnement nominal d'une cellule est généralement pris autour des valeurs

suivantes (point marqué VN sur la courbe de polarisation) :

$$V_N = 0,7 \text{ Volt et } I_N = 0,45 \text{ A/cm}^2$$

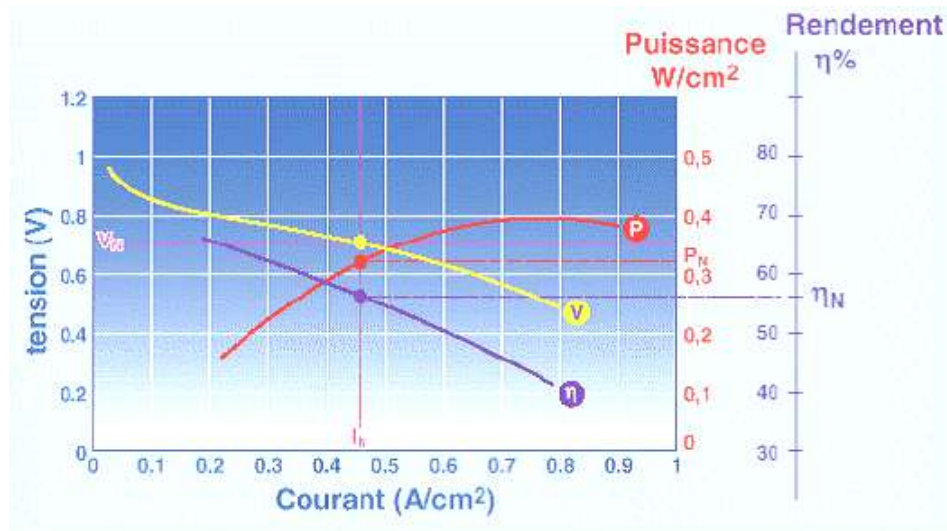


Figure II.6 : Caractéristiques électriques d'une cellule PEMFC [23]

Le rendement énergétique (représenté sur l'échelle de droite de la **figure II.6** s'exprime par la relation :

$$= 1 - T S / H$$

Avec : H, la chaleur de réaction à pression constante et T S la chaleur isotherme réversible échangée avec le milieu extérieur.

Ce rendement s'exprime de façon plus simple, en tout point défini par la tension V, par la relation :

$$= V/V_0 \text{ ou } V/1,23 \text{ (pour le couple H}_2\text{/O}_2\text{)}$$

Sa variation avec le courant est représentée par la courbe violette, repérée η sur la **figure II.6**. Sa valeur est voisine de 57% au point nominal choisi.

La puissance P s'exprime par le produit $V \times I$: sa variation est représentée par la courbe rouge, repérée P, sur la **figure II.6**. Sa valeur est voisine de 0,32 W/cm² au point nominal choisi.

Remarque : le point de fonctionnement nominal choisi n'est pas au point de puissance maximum (comme sur un moteur thermique), car le rendement est alors trop faible, de l'ordre de 40% ; cette caractéristique permet donc à la pile, en cas de besoin, de fournir environ 25% de puissance supplémentaire, ce qui est intéressant, en particulier pour les applications automobiles.

Au plan des performances **massique** et **volumique** du module de conversion seul, les valeurs obtenues pour les meilleures technologies (Ballard, General Motors, UTC Fuel Cells ...) sont

voisines des valeurs suivantes, **2,9 kW/litre** et **1,4 kW/kilogramme** (pour le stack) C'est à dire des valeurs voisines de celles d'un moteur thermique.

II.4.2 Auxiliaires du système PAC

Le système ou générateur PAC se compose de la pile et de composants auxiliaires destinés à la faire fonctionner. La figure ci-dessous fait apparaître un exemple de schéma relatif à un système PAC embarqué.

Il est bien évident qu'une pile embarquée dans un satellite, et, dans une moindre mesure, dans un véhicule automobile, n'aura pas les mêmes contraintes que celle qui sera installée dans un site industriel en environnement " technologique ", ou encore au fond du garage d'une maison individuelle, ou embarquée dans un sous-marin.

La pile à combustible à besoin d'un ensemble de conditions pour produire de l'énergie électrique elle doit être alimentée en hydrogène et en air, la membrane doit être en permanence humidifiée, et la chaleur produite doit être évacuée. Les composants auxiliaires ont pour rôle d'assurer le bon fonctionnement de la pile à combustible. L'ensemble composé de la pile à combustible et de ses composants auxiliaires est appelé *système* pile à combustible.

Les *systèmes* de piles à combustibles sont généralement conçus spécifiquement pour une application en particulier. Il existe donc de nombreuses architectures possibles. Une architecture classique est donnée **figure II.7**.

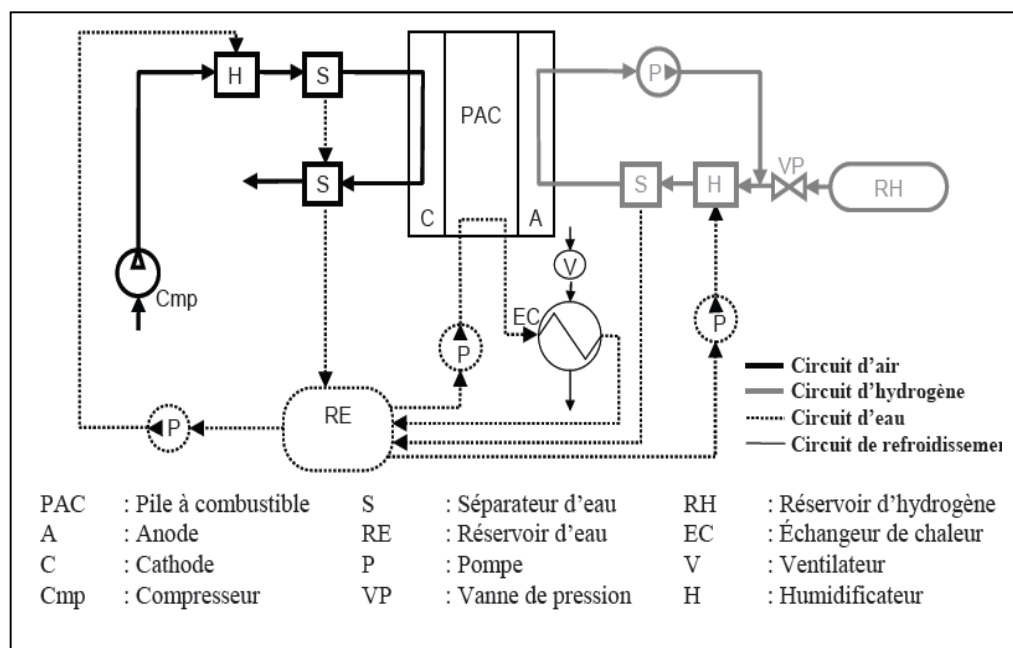


Figure II.7 : nomenclatures des principaux composants d'un système PAC [1]

- **Circuit d'hydrogène (circuit fermé) :**

Il alimente l'anode en hydrogène gazeux. L'hydrogène non consommé à la sortie de la PAC peut être réinjecté à l'entrée de celle-ci par l'intermédiaire d'une pompe de recirculation. Si le carburant n'est pas de l'hydrogène pur un reformeur est nécessaire comme sur la **Figure II.8**.

- **Circuit d'air (circuit ouvert) figure (II.7 :9)**

L'oxygène alimentant la pile à combustible est généralement prélevé dans l'air ambiant afin d'éviter le stockage de l'oxygène. Cependant, l'air ne contient que 21 % d'oxygène. Afin d'augmenter la concentration d'oxygène et parfois nécessaire (pour les puissances élevées) de comprimer l'air, et il devra être dépoussiéré. Dans certains cas, l'énergie disponible dans les gaz de sortie de la pile peut être récupérée par une turbine. Pour les petites puissances, une soufflante peut suffire. L'utilisation d'un compresseur n'est pas sans conséquences sur le rendement global du système. Celui-ci est alimenté par la pile à combustible et lui prélève une puissance non négligeable qui peut représenter jusqu'à 25 % de la puissance électrique délivrée par la pile. Il doit permettre l'alimentation en air, l'évacuation de l'eau produite sans assécher la membrane de la pile et assurer une bonne dynamique du système (c.-à-d., répondre en temps réel aux sollicitations du système).

- **Circuit de refroidissement figure (II.7 :9)**

La conversion électrochimique de l'hydrogène et de l'oxygène en électricité produit également de la chaleur. Celle-ci doit être évacuée afin de maintenir la température de la pile constante, donc le circuit de refroidissement est une partie essentielle du système pile à combustible.

Pour des petites puissances, le refroidissement peut être réalisée avec un ventilateur (convection forcée d'air) qui peut être le même que celui alimentant la pile en air.

Dans le cas des piles de plus fortes puissances, la convection forcée à air ne suffit plus à évacuer la chaleur. On a donc recours à d'autres types de refroidissement plus complexes tel que le refroidissement à eau. Ce système fonctionne en boucle fermée grâce à une pompe qui fait circuler de l'eau déminéralisée dans un circuit secondaire à l'intérieur de la pile. Cette eau est refroidie au moyen d'un échangeur air/eau (radiateur).

- **Circuit d'eau : (Circuit d'humidification) figure (II.7 :9)**

L'humidification des membranes se fait par les gaz entrants (air et hydrogène) via le circuit

d'eau (**figure II-7**). L'eau contribue également au refroidissement de la pile à combustible lors de son passage dans l'échangeur de chaleur.

Généralement les piles de type PEMFC requièrent un circuit d'humidification des gaz afin que la membrane ne soit pas déshydratée (augmentation de la résistance ionique de la membrane) ou que les électrodes ne soient pas noyées en raison d'un excédent d'eau. Ce circuit a donc pour rôle d'humidifier les gaz en entrée de la pile, généralement à partir de l'eau produite par la pile, récupérée en moyen d'un condenseur.

- **Convertisseur statique figure (II. 9)**

Les convertisseurs de puissances permettent d'adapter les courants et tensions entre deux organes électriques. Les différents types de convertisseurs sont classés selon les types (alternatif ou continu) et les caractéristiques des énergies électriques manipulées

- **hacheurs** pour la conversion continu-continu (DC/DC) ;
- **onduleurs** pour la conversion continu-alternatif (DC/AC);
- **redresseurs** pour la conversion alternatif-continu (AC/DC) ;
- ...

Le convertisseur statique permet généralement de faire l'interface entre la pile à combustible et un bus continu où sont connectés, suivant l'application, d'autres composants de stockage énergétique tels que les batteries ou les supercondensateurs et d'autres convertisseurs, ou qui permettent de faire l'interface entre le bus continu et la charge (p.ex., moteur électrique).

Enfin, les convertisseurs disposent d'une commande locale qui intègre généralement des limitations en courant, tension et/ou puissance, assurant ainsi une partie de la protection des organes auquel il est relié.

- **Système de contrôle (Figure II.11)**

Comme cela a été vu précédemment, le système dispose d'un grand nombre d'auxiliaires interconnectés et interdépendants. Afin d'assurer un bon fonctionnement du système (rendement global, sécurité de fonctionnement, prise en compte des contraintes), il est nécessaire d'avoir un système de contrôle global permettant d'agir sur les différents sous systèmes (convertisseur statique, débit des gaz, contrôle du compresseur, pompe à eau nécessaire au refroidissement, température de l'humidificateur, etc.).

II.4.3 Stockage de l'hydrogène :

Plusieurs technologies de stockage d'hydrogène ont été envisagées pour l'automobile mais ne permettent pas encore de stocker suffisamment d'hydrogène pour assurer une autonomie similaire à celle d'un véhicule conventionnel.

- **Stockage sous forme gazeuse (figures II. (8,9,10))** : l'hydrogène est stocké dans des réservoirs métalliques ou en matériaux composites, pressurisés entre 300 bar et 700 bar (l'hydrogène ne peut pas être stocké à la pression atmosphérique à cause de sa densité énergétique volumique très faible). A titre de comparaison, le volume d'hydrogène requis, à pression atmosphérique serait 3000 fois supérieur au volume d'essence pour une quantité énergétique équivalente [24]. C'est la solution la plus simple et la moins coûteuse pour stocker de l'hydrogène.

- **Stockage sous forme liquide** : l'hydrogène est stocké sous forme liquide à très basse température (-253 °C) dans des réservoirs cryogéniques.

- **Reformage (figures II.8)** : l'hydrogène est produit à bord du véhicule par un reformeur. Un reformeur est une « mini-raffinerie » qui extrait de l'hydrogène à partir de carburants liquides hydrogénés (par exemple le méthanol).

- **Stockage « solide » (figures II.11)** : l'hydrogène peut être stocké dans des réservoirs d'hydrure métallique. Un hydrure métallique capture les molécules d'hydrogène lorsqu'il est sous pression et les libère lorsque l'on augmente sa température. Le principal inconvénient de cette solution est la masse importante du réservoir. Le stockage d'hydrogène dans des nanostructures et des nanotubes est également rapporté dans la littérature, mais la capacité réelle d'absorption de l'hydrogène est un sujet controversé et semble éloignée des besoins de l'automobile

Voici maintenant quelques schémas de différents systèmes pile à combustible

1- Présence d'un reformeur

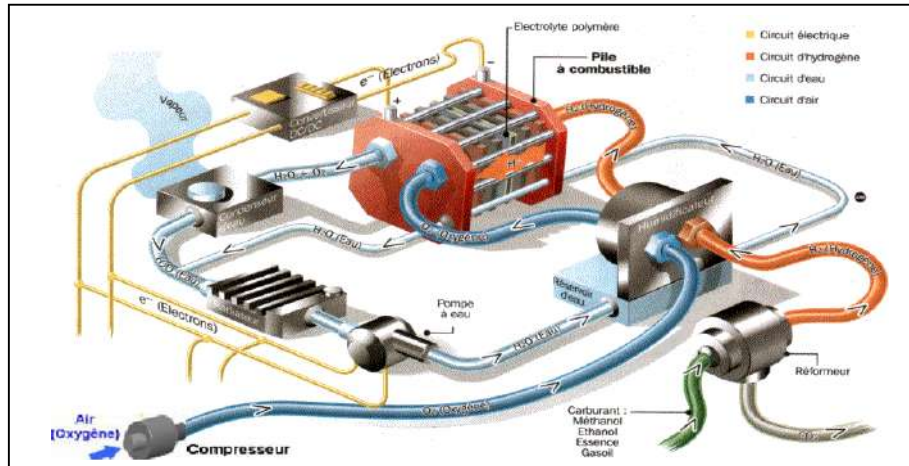


Figure II.8 : Schéma illustrant les différents éléments d'un système PAC [17]

2- Pile GENEPAC avec un réservoir à hydrogène pur

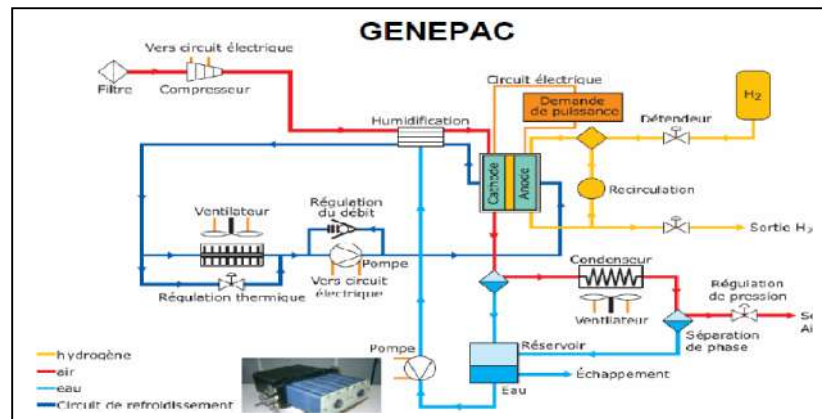


Figure II.9 : Schéma la pile GENEPAC avec un réservoir à hydrogène pur [17]

3- Présentation des points de contrôle

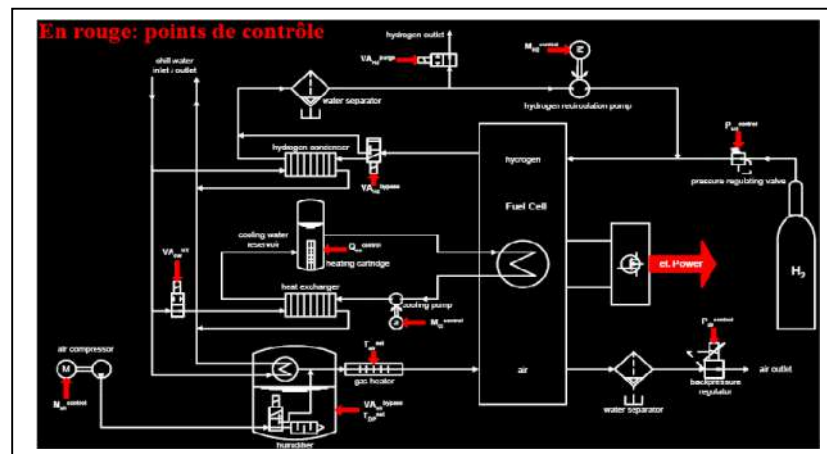


Figure II.10 : organes de contrôle de la pile PEMFC [17]

4- Un système avec l'hydrogène sous forme solide

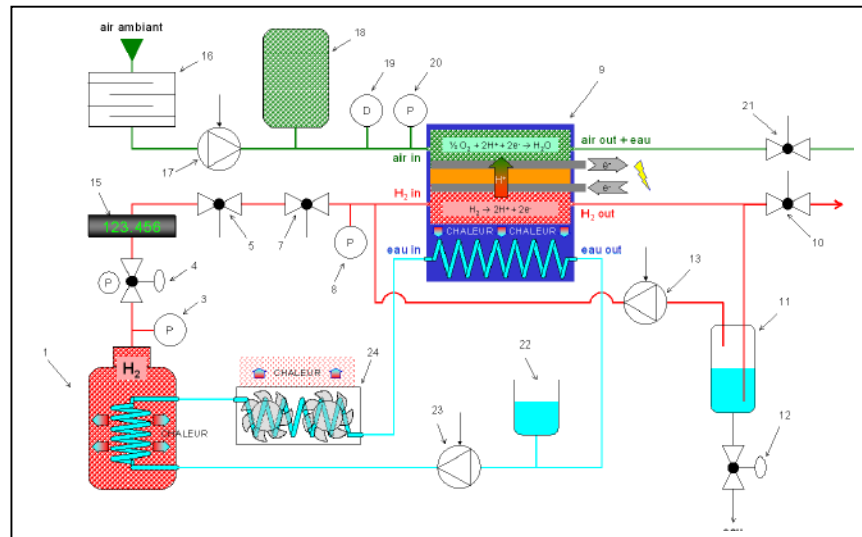


Figure II.11 : nomenclature du système pile à combustible de PAC-Car [25]

- | | |
|---|--|
| 1 Réservoir d'hydrogène à hydrures métalliques | 13 Pompe de recirculation d'H ₂ |
| 3 Capteur de pression (pour le pilotage du ventilateur de 24) | 15 Débitmètre d'H ₂ électronique (mesure de la consommation de carburant) |
| 4 Régulateur de pression manuel | 16 Filtre à air |
| 5 Vanne d'arrêt rapide télécommandée (arrêts d'urgence) | 17 Compresseur d'air piloté |
| 7 Vanne de régulation de pression télécommandée | 18 Accumulateur d'air |
| 8 Capteur de pression (pour le pilotage de 7) | 19 Débitmètre d'air (pour le pilotage de 9) |
| 9 Pile à combustible | 20 Capteur de pression d'air (pour le pilotage de 21) |
| 10 Vanne de purge télécommandée | 21 Vanne de régulation de pression du circuit d'air |
| 11 Séparateur d'eau | 22 Vase d'expansion |
| 12 Vanne de purge automatique du séparateur d'eau | 23 Pompe à eau |
| | 24 Radiateur calorifugé avec ventilation pilotée |

II.4.4. Prototypes de voitures

De nombreux constructeurs d'automobiles développent depuis plusieurs années des prototypes de voitures à pile à combustible (c'est-à-dire utilisant le dihydrogène comme combustible). Même si l'on ne les rencontre pas encore habituellement sur les routes, ces prototypes ont déjà parcouru, tous modèles confondus, des centaines de milliers de kilomètres avec une autonomie variant de 300 à 500km et jusqu'à des records de 800 à 900 km. [26]

Voici quelques exemples d'intégration de la PAC dans une voiture.

- Le schéma fonctionnel suivant présente le principe d'un véhicule électrique à pile à combustible de Daimler. [27]

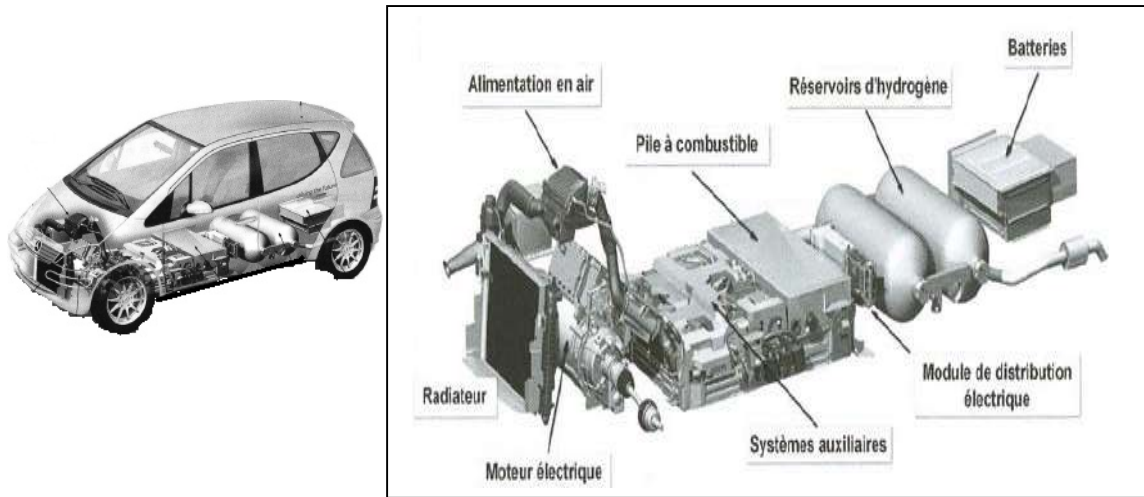


Figure II.12 : Structure du système de propulsion du véhicule Daimler F-CELL (vus éclatée).

- pour la première fois, un véhicule de Honda à pile à combustible est loué pour deux ans à des particuliers, ce qui démontre la confiance du constructeur vis-à-vis de sa technologie. [28]

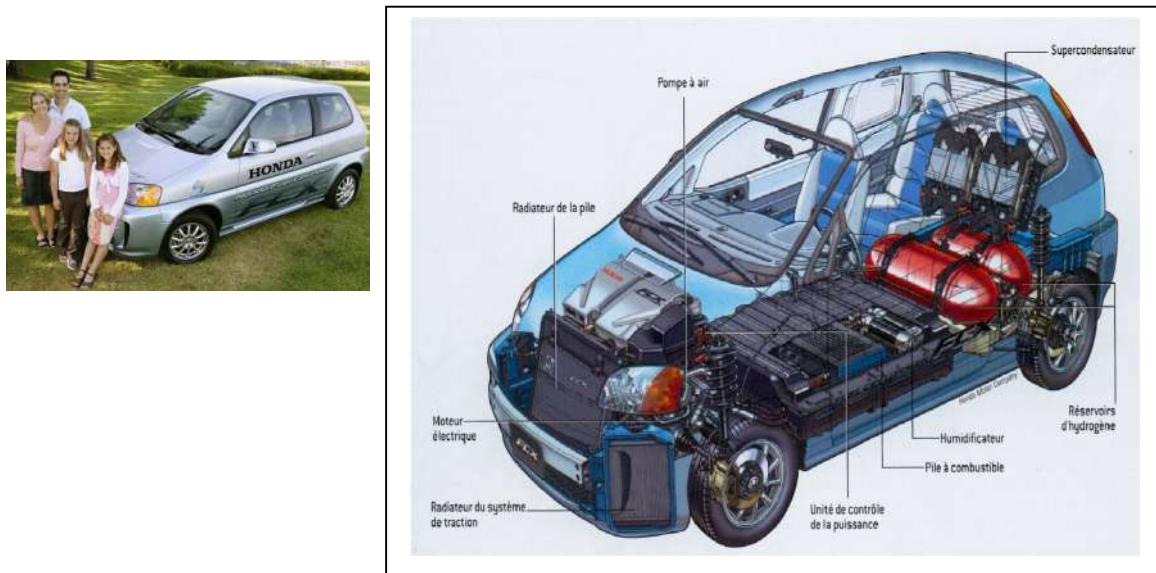


Figure II.13 : Une FCX 2005 de Honda ; louée à des particuliers (à gauche), vue éclatée (à droite)

- La Lada Antel 2 tous les ensembles du groupe électrogène et du système de commande sont installés dans le compartiment moteur et sous le plancher, ce qui permet de placer 5 personnes dans l'habitacle et de conserver son plein volume au coffre à bagages. [29]

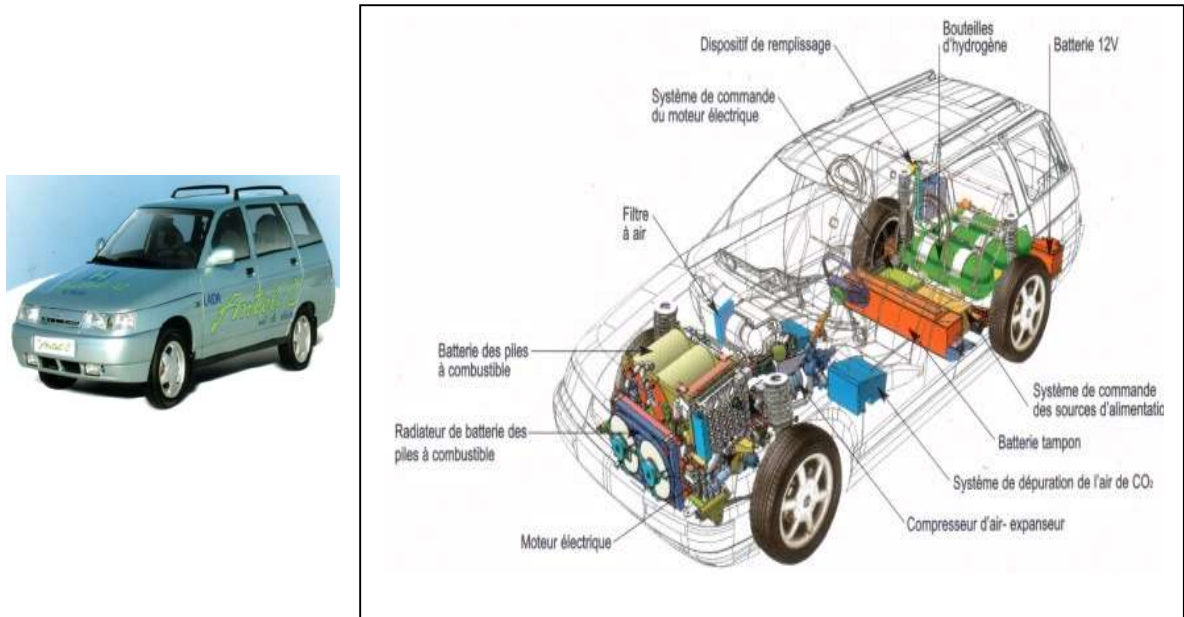


Figure II.14 : La Lada Antel 2

- La FINE-N (203) de TOYOTA une intégration complète dans le plancher avec un moteur par roue (25 kW) [30]

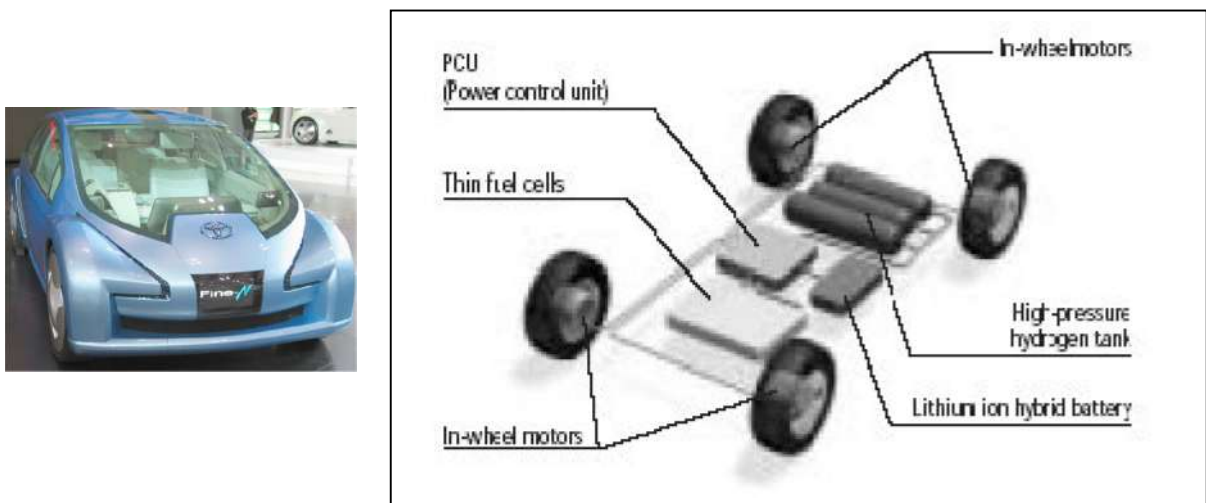


Figure II.15 : Le prototype FINE-N

3. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons décrit l'ensemble d'une chaîne de traction PAC suivis d'un bref sur les principaux types de piles à combustible. Chaque type de pile a ses propres conditions de fonctionnement : milieu acide ou alcalin, température haute ou basse et électrolyte liquide ou solide. Après une présentation des six types de piles actuellement existants, la pile de type PEMFC a été choisie comme étant la plus adaptée dans le domaine de transport, c'est pour cela on a décrit, ces composants, son principe de fonctionnement, ces auxiliaires qui ont pour rôle d'assurer le bon fonctionnement de la pile à combustible. Il existe de nombreuses architectures d'ensemble composé de la pile à combustible et de ses composants auxiliaires, on a donné quelques exemples. Et pour finir on a présentés quelques Exemples de l'intégration du système PAC dans les véhicules.

Chapitre III

*Développement de la PEMFC et les projets
des voitures qui l'incluent.*

Introduction

La pile de type PEMFC a été choisie comme étant la plus adaptée dans le domaine de transport. Ses avantages qui sont, sa basse température de fonctionnement, son état de développement relativement avancé par rapport aux autres types de pile. De plus, sa taille est réduite, son temps de démarrage court et présente un intérêt potentiel dans de multiples applications.

Mais malgré ces nombreux avantages qu'elles présentent, la durée de vie et le coût de ces systèmes freinent encore leur commercialisation.

Dans ce chapitre on va présenter les différents fabricants de piles à combustible PEMFC, suivis des projets des voitures à pile à combustible réalisés par les grandes marques de voitures.

III.1. Acteurs industriels de la pile à combustible de type PEM

Le transport est le domaine d'application qui est à l'origine du développement de la pile à combustible à partir du début des années 90, de nombreux prototypes ont vu le jour depuis 1993, tous de type PEMFC

Ce type de pile est celui sur lequel sont actuellement concentrés les plus gros efforts de développement grâce essentiellement à la disponibilité d'une membrane électrolyte à conduction protonique qui a été conçue. La pile PEM a été retenue par tous les grands constructeurs automobiles. Ces derniers fabriquent le plus souvent leurs propres piles PEM, tels que General Motors, Honda, Nissan, Toyota, Hyundai, le chinois SAIC.... ou les développent en collaboration avec un laboratoire de recherche, comme PSA avec le CEA (pile GENEPAC) ou Michelin (véhicule Hy-LIGHT) avec l'Institut Paul Scherrer en Suisse.

L'entreprise Ballard Power Systems est incontestablement le pionnier des piles à combustibles au Canada et est citée en général comme le leader mondial. Elle a été créée en 1979 sous le nom de Ballard Research inc. pour conduire la recherche et le développement des batteries de lithium d'énergie élevée. En 1983, elle a commencé à développer ses piles PEMFC. Elle a ouvert son capital à Daimler Chrysler et à Ford.

Ballard pèse actuellement d'un poids très lourd sur la scène mondiale des piles à combustible. Elle possède, tout au moins d'après ce que l'on peut savoir, une avance technique certaine. Il est donc très difficile à l'heure actuelle d'exister dans le domaine de la pile à combustible de type PEMFC en dehors de Ballard. [31]

De nombreux industriels affichent des ambitions commerciales dans le domaine de la pile à combustible de type PEM. [43]

En France, les principaux sont :

- Air Liquide/AXANE : www.axanefuelcell.com et www.airliquide-hydrogen-energy.com/
- Areva/Héliion : www.helion-fuelcells.com
- Paxitech : www.paxitech.com
- Pragma Industries : www.pragma-industries.com
- SymbioFCCell : www.symbiofcell.com/j/home.html

Les principaux, hors France, sont les suivants :

- Ballard Power Systems (Canada): www.ballard.com
- Nuvera Fuel Cells (Italie), adresse : www.nuvera.com/
- UTC Power (USA): www.utcfuelcells.com/
- Hydrogenics (Canada): www.hydrogenics.com/
- Siemens (Allemagne): www.siemens.com
- Intelligent Energy (Grande Bretagne): www.intelligent-energy.com
- Horizon Fuel Cells (Singapour): <http://horizonfuelcell.com/>
- Plug Power (USA): www.plugpower.com

La **figure II.5** (dans le chapitre précédent) représente un exemple de la pile PEMFC GENEPAC (de CEA, associé à PSA Peugeot-Citroën), et Voici quelques autres exemples :



Figure III.1: PEMFC dédiée à la traction électrique Ballard (Mark 902) 85 KW [32]



Figure III.2 : PEMFC HT système de 2.5kw 5.0kw composé de deux modules [33]

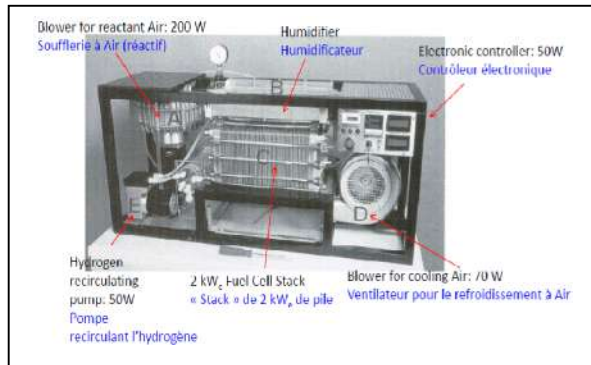


Figure III.3 : PEMFC de 2kW de l'institut Paul Scherrer [10]



Figure III.4 Pile ZSW 20 cellules [34]

III.2. Projets des voitures à pile à combustible [35]2012

Alors que la commercialisation de véhicules électriques à batteries démarre lentement, plusieurs grands constructeurs automobiles finalisent le développement de la voiture électrique à pile à combustible.

La technologie a atteint sa maturité. Techniquement les véhicules sont prêts. Après plusieurs années de développement, Dès 1996, toutes les grandes marques automobiles sont impliquées dans des projets de voitures à pile à combustible : BMW, General Motors, Honda, Hyundai, Mazda, Mercedes, Nissan, Toyota..., font rouler depuis plusieurs années des prototypes de développement et de démonstration de la technologie hydrogène.

Des alliances se créent entre organismes privés et publics pour former de véritables réseaux de recherche et développement.

On recense environ 200 stations de distribution d'hydrogène bi-pression (350 et 700 bar) qui permettent aux véhicules de faire le plein dans le monde.

Voici un historique de développement des véhicules à pile à combustible pour quelques constructeurs célèbres dans ce domaine.

III.2.1. Programme de FORD [36]

Le développement de véhicules à pile à combustible chez Ford semble avoir démarré vers 1994. Contrairement à General Motors qui avait fait le choix initial de s'appuyer sur le constructeur canadien Ballard (le plus avancé à l'époque sur les PAC), la stratégie initiale de Ford a été de motiver les constructeurs de piles à combustible américains (qui avaient pris du retard sur les canadiens), excluant Ballard, probablement à la demande du DOE qui, par ailleurs, se faisait son opinion via General Motors. Finalement, Ford est revenu assez vite vers Ballard dont il est devenu l'un des plus fidèles supporters.

Janvier 1999, Ford a présenté son premier prototype, Baptisé **P2000 HFC**. Il était équipé de deux réservoirs d'hydrogène sous pression, en technologie composite, et contenant au total 1,4 kg de gaz, ainsi d'une pile Ballard constituée de 3 modules de 25 kW de type Mark 700 délivrant une puissance nette de 60 kW à un moteur triphasé.

Au début 2000, Ford a présenté son prototype baptisé **TH!NK FCV**, équipé de modules Mark 900 de Ballard, pour une puissance de 75 kW. La pile est alimentée en hydrogène à partir d'un réservoir stockant 2kg, sous pression de 350 bars, le réservoir étant dans le coffre.

La même année, Ford a présenté son prototype **TH!NK FC5**, équipé d'une pile Ballard Mark 901 qui a la particularité d'être alimentée à partir d'un reformeur à méthanol.

septembre 2002, Ford a franchi une nouvelle étape en présentant, la Ford **Focus FCV Hybrid** ou **C 264**, premier véhicule hybride³ de la marque et dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

- pile Ballard Mark 902, puissance nominale 68 Kw ,
- système de contrôle empêchant la sur-alimentation en hydrogène pendant les accélérations,
- Hybridation avec une batterie 216 volts, type NiMH de 1,14 kWh (récupération sur freinage), capable d'ajouter 18 kW de puissance au moteur électrique.
- moteur électrique triphasé (rendement de 91%, 16 kg, couple 230 Nxm, 12500 t/mn max), vitesse max : 128 km/h, atteinte en 25 secondes,
- consommation en cycle combiné ville-route : 4,58 l/100km (équivalent essence),
- Hydrogène (4 kg) stocké à 350 bars dans un réservoir de 178 litres, autonomie 320 km.
- Poids du véhicule : 1600 kg.

En novembre 2006, Ford présente son prototype « **Explorer** », dont les caractéristiques sont les suivantes:

- Poids 2560 kg,
- Capacité 6 passagers,
- Hydrogène 10 kg à 700 bars,
- Autonomie 560 km,
- Puissance de la pile 60 kW,
- Moteur électrique 130 kW (2x 65 kW),
- Batteries 50 kW,

En janvier 2007, Ford présente un nouveau prototype hybride baptisé "**Ford Airstream Concept**". Il s'agit en fait d'un véhicule électrique (batteries Li-ion) équipé d'une pile Ballard 35 kW (chargeur de batterie), encore appelé hybride série. La pile est alimentée à partir d'un

stockage de 4,5 kg d'hydrogène sous 350 bars, pour une autonomie totale de 360 km (40 km en batterie seule + 320 km avec la recharge de la pile à combustible).

En février 2007, Ford présente un autre prototype utilisant la même technologie, la Ford Edge.



Figure III.5: Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « FORD »

III.2.2. Programme de TOYOTA GET THE FEELING. [30]

Toyota est le premier constructeur japonais à avoir dévoilé, dès 1996, ses activités dans le domaine des véhicules à pile à combustible.

Ces piles sont toutes de type PEMFC, conçues dans les laboratoires de Toyota.

En octobre 1996, a été présenté le premier prototype **RAV4-EV1**. il comportait une pile à combustible d'une puissance de 20 kW, couplée à une batterie au plomb (110 kg), le tout alimentant un moteur électrique synchrone à aimant permanent de 45 kW. La pile, de conception « maison », était réalisée autour d'une membrane Nafion® avec un catalyseur Pt-Ru à l'anode. L'hydrogène (2kg) était stocké dans un hydrure métallique (100 kg) à base d'alliage de titane (appelé bêta Ti) et donnait une autonomie de l'ordre de 150 km.

En 1997, un deuxième prototype **RAV4-EV2** a été présenté. Il différait du précédent par :

- une pile à combustible un peu plus puissante (25 kW) située au milieu du véhicule, sous les passagers, alimentant un moteur électrique de 50 kW.

- un concept hybride, puisque l'énergie de freinage était récupérée dans une batterie (NiMH).

- une alimentation en hydrogène via un reformeur à méthanol situé sous les sièges arrière.

En 2001, un troisième prototype baptisé **FCHV-3**, a été présenté et comportait une pile à combustible « maison » de 90 kW, hybridée avec une batterie NiMH de 21 kW et alimentant un moteur électrique (de même type que les précédents) d'une puissance de 80 kW. Cette pile était alimentée en hydrogène à partir d'un réservoir à hydrures, similaire à celui de la RAV4-EV1.

En juin 2001, a été présentée la **FCHV-4**, ne différant de la précédente que par le type de réservoir d'hydrogène : gaz sous pression de 250 bars, dans 4 cylindres composites pour une autonomie de 250 km.

En octobre 2001, a été présentée la **FCHV-5**, ne différant des deux précédentes que par le système d'alimentation en hydrogène : il s'agit là d'un reformeur (volume de 120 litres) alimenté à partir d'un réservoir de 35 litres d'essence désulfurée. On trouve toujours un concept hybride (avec récupération d'une partie de l'énergie de freinage) sur un pack de batteries NiMH.

En février 2002, Toyota annonce que le modèle **FCHV-4** amélioré (hydrogène stocké à 350 bars, autonomie de 290 km, vitesse 155 km/h, pile de 90 kW, moteur électrique de 80 kW) a été choisi pour la réalisation d'une première flotte de véhicules.

En janvier 2003, Toyota a présenté son nouveau concept **FINE-S**, véhicule hybride à hydrogène.

En octobre 2003, a été présentée la **FINE-N**, une intégration complète dans le plancher avec un moteur par roue (25 kW), un stockage à 700 bars, une pile à combustible extra-plate et une hybridation avec une batterie Li-ion.

En mars 2004, a été présenté le concept-car **MTRC**, équipé d'une pile de 90 kW et 4 moteurs roues.

En octobre 2005, a été présenté un nouveau concept-car : **la FINE-X** à 4 moteurs roue indépendantes et réservoir d'hydrogène sous 700 bars.

En septembre 2007, Toyota annonce la sortie d'une version améliorée de son prototype **FCHV** dont l'autonomie atteint 560 km (au lieu de 290 km pour le précédent. Les performances de ce modèle sont données comme suit : la vitesse max est de 155 km/h, équipé d'une pile de la maison de 90kw de puissance, hydrogène stocké sous pression à 700 bars, et la batterie type Nickel-métal hydride.

En juin 2008, Toyota annonce la sortie d'une nouvelle version baptisée **FCHV-adv** équipée d'une nouvelle pile capable de démarrer à basse température (jusqu'à -30°C) et dotée de nombreuses améliorations (amélioration du rendement de la pile de 25%, amélioration du système de récupération d'énergie au freinage, réduction de consommation des auxiliaires, contrôle de la dégradation des cellules). L'autonomie annoncée est de 800 km.



Figure III.6 : Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « TOYOTA »

III.2.3. Programme de MAZDA [37]

C'est apparemment, parmi les constructeurs automobiles japonais, le premier qui a montré son intérêt pour l'hydrogène. Contrairement à tous les autres qui avaient fait leur choix dès l'origine quant au mode de conversion de l'hydrogène (BMW pour le moteur thermique, les autres constructeurs pour la pile à combustible), Mazda s'est distingué, dès 1990, en étudiant les deux voies en parallèle, puis finir, en 2001, par faire le choix du moteur thermique.



Figure III.7 : Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « MAZDA »

III.2.4. Programme de GENERAL MOTORS (GM) [38]

Le programme de développement de véhicules à pile à combustible chez *General Motors* a démarré en 1990.

Sa stratégie programme de développement a été de démarrer en s'appuyant sur la meilleure technologie disponible à l'époque (Ballard), tout en développant sa propre technologie qui équipe dorénavant ses prototypes actuels.

(août 1995 – fin 97) s'est achevée par la démonstration d'un prototype complet (c'est-à-dire avec tous ses auxiliaires) de 60 kW, composé de deux modules Ballard de 30 kW, ainsi que d'une batterie capable de fournir 30 kW. L'hydrogène nécessaire était fourni par un reformeur méthanol.

(Fin 97 – 1999) incluait la démonstration de plusieurs véhicules tous se composent d'une pile Ballard jusqu'à 50kW couplé d'une batterie et un reformeur méthanol.

En janvier 2000 le prototype était équipé d'une pile délivrant 75 kW nominal avec 400 cellules (1kW/l et 1 kW/kg) et d'un stockage d'hydrogène (4,9 kg) sur hydrures. La densité de stockage annoncée (4 à 5%).

En mars 2000, a été présenté le prototype **HydroGen1**. Qui possède les caractéristiques suivantes : Il est équipé d'un réservoir contenant 75l d'hydrogène liquide (équivalent à 5 kg d'hydrogène). La pile à combustible est « maison » : sa puissance nominale est de 86 kW; elle comporte 200 cellules, pour une masse de 86 kg. Sa propulsion est assurée par un moteur électrique triphasé de 55 kW. Le véhicule pèse 1575 kg. L'autonomie est de 400 km pour une vitesse max. de 140 km/h.

En juin 2001, le prototype **HydroGen2**. Il était présenté comme plus performant que son aîné: une pile « maison » PEM de 94 kW, plus compacte et plus légère (1,6 kW/l), le système d'humidification externe ayant été supprimé et la pile fonctionnant à une pression proche de la pression atmosphérique.

En septembre 2001, le modèle **HydroGen3** est équipé d'une pile délivrant 94 kW, dont les dimensions sont de 820x140x500, constitué de 640 cellules. La pleine puissance est obtenue en 30s à partir d'une température de -20°C. Les caractéristiques spécifiques sont : 1.75 kW/l et 1.27 kW/kg.

Selon les versions, HydroGen3 est équipé soit d'un réservoir d'hydrogène liquide (4,6 kg) soit d'un réservoir d'hydrogène sous pression à 350 bars.

En octobre 2001, un prototype **Chevrolet S-10** son originalité est de comporter un reformeur. Il est équipé d'une PEM de 25 kW. Le rendement total du système est donné à 40%.

En janvier 2002, GM a présenté son nouveau concept **AUTOmomy**. Il s'agit d'un châssis polyvalent avec 4 roues motrices dans lequel tout le système énergétique est intégré.

En août 2002, GM a présenté la **Hy-Wire**, premier prototype basé sur le concept AUTOmomy. Il est équipé d'une pile PEM de 94 kW (1,6 kW/l et 0,94 kW/kg) et l'hydrogène (2 kg environ) est stocké sous 350 bars, dans 3 cylindres

En janvier 2005, GM a sorti un nouveau prototype sur la base de sa plate-forme AUTOmomy **la Sequel**. Il est équipé d'un moteur électrique de 60 kW pour entraîner les roues avant et de moteurs roues de 25 kW pour chacune des roues arrière. La pile de 73 kW est hybridée avec une batterie Li-ion capable de fournir une puissance de 65 kW. Le véhicule embarque 8kg d'hydrogène stocké à 700 bars, pour une autonomie de 480 km.

En septembre 2006, GM présente son nouveau prototype baptisé « **Equinox** », La pile à combustible qui l'équipe est dite « génération 4 » et peut démarrer sous des températures négatives, Sa puissance spécifique atteint 2,9 kW/litre. A noter GM annonce le lancement en

production de 100 exemplaires. Ce prototype sera baptisé GM **HydroGen4** en Europe et mis en oeuvre par le constructeur Opel.

En mai 2007, GM annonce que sa Chevy Sequel entre dans le livre des records : c'est la première fois qu'un véhicule à pile à combustible atteint une autonomie de 300 miles (480 km).

En septembre 2007, GM annonce le démarrage d'une phase de tests de 18 mois portant sur les 100 prototypes de l'Equinox qui circuleront sur les routes américaines dans le cadre du « Project Driveway ». GM a mis en place une division de recherche baptisée FCA (Fuel CellActivities) qui devrait réunir 600 personnes dont 400 ingénieurs. Courant 2008, il est prévu de mettre une dizaine d'exemplaires en test à Berlin dans le cadre du Clean Energy Partnership (CEP).

En avril 2009, General Motors Corp. et Shanghai Automotive Industry Corp. Group (SAIC), qui ont signé des accords de collaboration, annoncent le lancement du prototype **SAIC's Shanghai Brand Fuel Cell Vehicle** équipé de la pile GM génération 4 et du même réservoir 700 bars que l'Equinox. Dix prototypes seront construits et seront mis en service à l'occasion de l'Expo Shanghai 2010.

En mai 2009, GM confirme sa collaboration avec le japonais Suzuki Motor Co. Ltd. avec qui a été conçu le prototype **SX4-FCV** présenté en octobre 2009 au Tokyo Motor Show. Il utilise la pile GM hybridée avec une supercapacité et un réservoir à 700 bars.

En août 2009, GM présente la **génération 5**. Elle gagne beaucoup en taille et en masse. En particulier la masse de platine utilisée est passée de 80g à 30g. Les ingénieurs de GM prévoient que cette génération 5 aura une durée de vie de 120 000 miles (près de 200 000 km).



Figure III.8 : De la *génération 4* (à gauche) à la *génération 5* (à droite)

Les principaux choix techniques retenus par General Motors, en 2009, sont les suivants :

- la pile à combustible (Ballard à l'origine) est maintenant de conception « maison » et apparemment très performante comparée à ses concurrentes, en particulier la toute nouvelle génération 5.

- après avoir testé plusieurs modes de stockage de l'hydrogène, GM a fait le choix de l'hydrogène sous pression à 700 bars (technologie composite Quantum).

- l'hybridation est mise en œuvre avec des batteries lithium, mais G.M. suit la solution « supercapacité grâce à sa collaboration avec Suzuki.



Figure III.9: Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « GENERAL MOTORS»

III.2.5 Programme de NISSAN [39]

Nissan Motor, est le troisième constructeur japonais à être entré dans le créneau des véhicules à pile à combustible, après Toyota (1996) et Mazda (1997).

Le premier concept de véhicule à pile à combustible est apparu chez Nissan en 1997, au *Tokyo Motor Show*, et le premier modèle de démonstration en 1999.

En mai 99, le premier prototype de véhicule conçu sur un principe hybride avec récupération de l'énergie de freinage, il était équipé d'une pile PEM Ballard de 10 kW, couplée à une batterie lithium-ion (100 kg), le tout alimentant un moteur synchrone à aimant permanent. La pile était alimentée en hydrogène par un reformeur de méthanol (réservoir de 40 litres).

En avril 2001, Nissan a conçu un deuxième prototype. Peu d'informations ont été révélées sur les caractéristiques de ce prototype si ce n'est que la pile à combustible (probablement de type Ballard) est alimentée en hydrogène stocké à 250 bars dans un réservoir sous pression.

En décembre 2002, Nissan a dévoilé son prototype **X-Trail FCV**, équipé d'une pile de 75 kW fonctionnant à une pression presque atmosphérique), ce qui a permis de simplifier le circuit d'alimentation (suppression du compresseur d'air). Le rendement de cette pile (annoncé par Nissan) était de 2 à 4% supérieur à celui de Ballard d'un concept hybride, alimenté à partir d'un réservoir d'hydrogène comprimé (350 bars). Sa vitesse maximum était de 125 km/h pour une autonomie de 200 km.

Dans le même temps, Nissan a annoncé qu'il avait obtenu, après Toyota et Honda, l'accord des autorités publiques japonaises pour tester ses véhicules à pile à combustible sur route

En octobre 2003, Nissan a présenté, au *Tokyo Motor Show*, un nouveau concept de véhicule à pile à combustible

De 2004 à septembre 2008, Nissan a effectué plusieurs démonstrations en faisant des améliorations au niveau de la pile, l'hybridation avec des batteries Li-ion et des réservoirs d'hydrogène comprimé à 700 bars.



Figure III.10: Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « NISSAN»

III.2.6 Programme de HONDA [28]

Honda Motor est l'un des constructeurs japonais les plus actifs en matière de développement de véhicules propres (véhicules hybrides) et en particulier de véhicules légers hybrides à pile à combustible de type PEM.

Bien qu'ayant débuté leurs recherches sur la pile à combustible en 1989, la partie visible de leurs travaux n'apparaît qu'en 1999 et ce sont les premiers (avec Toyota) à mettre en service, dès la fin 2002, quelques véhicules dans des administrations, aux USA et au Japon.

Année 1999, Honda dévoile ses deux premiers prototypes : **FCX-V1** équipé d'une pile PEM Ballard fournissant 60 kW et alimentant un moteur électrique de 49 kW. L'hydrogène est stocké dans un réservoir à hydrures, et **FCX-V2**, équipé d'une pile « maison » de même puissance. L'hydrogène est fourni par un reformeur embarqué de méthanol. Les deux modèles sont équipés d'une batterie hybridant la pile.

Année 2000, Honda présente la **FCX-V3**, sur le même châssis que les précédentes mais en configuration 4 places, équipée d'une pile Ballard de 62 kW plus légère et de moindre encombrement que la précédente ; la FCX-V3 est de concept hybride (couplage avec une supercapacité). La pile est alimentée en hydrogène stocké à 250 bars (réservoir de 100 litres situé à l'arrière) et son autonomie est de 180 km pour une vitesse max. de 130 km/h. Le moteur électrique a une puissance de 60 kW.

Année 2001, un second prototype du même modèle (FCX-V3), équipé d'une pile « maison » un peu plus puissante (70 kW). Le reste de l'équipement est identique.

Puis elle a présenté la **FCX-V4**, équipée d'une pile Ballard de 78 kW (Mark 901a) alimentée en hydrogène stocké à 350 bars, pour une autonomie de 300 km.

Année 2002, depuis 2002, Honda ne parle plus que de son modèle **Honda FCX**. Il s'agit d'une FCX-V4 légèrement améliorée. La pile Ballard qui l'équipe (type Mark 902) a une puissance de 78 kW, la vitesse max. annoncée est de 150 km/h, l'autonomie est de 355 km et son poids de 1684 kg. Le moteur électrique a toujours une puissance de 60 kW. Le concept hybride avec une super-capacité est conservé. L'hydrogène (3,75 kg) est stocké sous pression à 350 bars.

Année 2003 en octobre, Honda présente le concept-car **Kiwami** dont aucune caractéristique n'est dévoilée.

Et en novembre, Honda annonce l'arrivée d'une nouvelle génération de pile « maison » (Honda FC stack), de performances électriques améliorées grâce à un nouveau type de membrane polymère (dite « alomatique », non fluorée), plus compacte grâce à des plaques bipolaires métalliques (base inox avec inclusions métalliques très conductrices) et capable de démarre dans une ambiance à -20°C

Année 2004, 12 véhicules type **FCX** sont déjà en circulation aux USA, quelques autres au Japon.

Année 2005, 14 prototypes FCX étaient en circulation aux USA. Ensuite, en juillet, Honda a présenté sa **FCX 2005** qui a gagné 25% en autonomie et 33% en puissance max. par rapport à la précédente.

Ces caractéristiques principales sont les suivantes : pile à combustible « Honda » : 86 kW en deux modules, moteur électrique de 80 kW, hydrogène stocké sous 350 bars (2 cylindres de volume total 157 litres), hybridation avec une super-capacité (fabrication Honda) et une autonomie de 430km.

En octobre 2005, la présentation d'un **concept-car**. Il est équipé d'une pile de 100 kW, d'un moteur électrique à l'avant de 80 kW et deux moteurs roue (à l'arrière) de 25 kW chacun.

Grâce à un nouveau système de stockage d'hydrogène, son autonomie est portée à 560 km.

En septembre 2006, un nouveau modèle de la série, baptisé Le **concept-car FCX 2006**, les réservoirs d'hydrogène (en rouge sur la figure ci-dessous) qui sont plus petits. Mais ils contiennent pourtant plus d'hydrogène bien que la pression soit la même (350 bars) : c'est la structure du réservoir qui est nouvelle ; il contient un absorbeur d'hydrogène. Honda a fait ce choix pour des raisons de poids. A masses d'hydrogène identiques, un réservoir à la pression de 700 bars aurait été plus lourd.



Figure III.11: Vue éclatée de la Honda FCX 2006

La pile à combustible a des performances améliorées, de plus elle supporte une température de -30°C et peut démarrer à cette même température. Elle est hybridée avec une batterie Li-ion, plus compacte et plus légère (d'environ 40%) que la supercapacité qui équipait la version précédente.

Novembre 2007, Honda a présenté **FCX Clarity**, elle a été louée à des clients particuliers.

Juin 2008, Honda annonce, qu'il avait démarré la production de la FCX Clarity et remet leurs clefs aux 3 premiers clients.

Et jusqu'à aujourd'hui de grands progrès dans ce domaine.



Figure III.12: Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « HONDA »

III.2.7. Programme de DAIMLER DAIMLER [40]

C'est en **1989** que *Daimler-Benz* entreprend d'évaluer la pile à combustible pour l'application automobile et choisit pour cela la pile *Ballard*.

En avril 1994 a sorti son premier prototype, la **Necar 1** (New Electric CAR), il s'agissait d'un véhicule utilitaire de type Mercedes MB 180. La source était constituée de 12 modules Ballard de type PGS-103 pour une puissance totale de 50 kW. Les piles étaient alimentées par de l'hydrogène gazeux stocké à bord sous 250 bars.

En mai 1996, un deuxième prototype était présenté : la **Necar 2**. Il s'agissait d'un prototype réalisé sur la base d'une Mercedes Classe V, pour la même puissance de 50 kW disponible, seuls deux modules de 25 kW ont été nécessaires. Chaque module était constitué de 150 cellules de

700 cm² et la puissance spécifique du système générateur avait été abaissée à 6 kg/kW et 9 litres/kW. L'hydrogène gazeux était stocké à bord dans deux bouteilles de 140 litres permettant 250 km d'autonomie.

En 1997, le troisième prototype **Necar 3**, était présenté au Salon Automobile de Francfort. La pile était du même type que sur la Necar 2, mais le réservoir d'hydrogène était remplacé par un réservoir de 38 litres de méthanol couplé à un reformeur fonctionnant à 280°C. L'autonomie était voisine de 400 km.

En décembre 1998, soit 7 mois après la fusion des deux constructeurs, DaimlerChrysler présente la **Jeep Commander**, alimentée par une pile à combustible hybridée à des batteries NiMH. Tout comme la Necar 3, elle est équipée d'un reformeur méthanol

En mars 1999, DaimlerChrysler présente la **Necar 4** à Washington, toujours basée sur la Classe A, mais alimentée à partir d'un réservoir de 7 kg d'hydrogène liquide embarqué. Sa pile à combustible fournit maintenant 70 kW avec deux modules de 35 kW. Le véhicule pèse 1580kg, contre 1120 kg pour le modèle à essence. Le rendement total du réservoir à la roue est donné à 37,7%.

En 2000, Daimler présente la **Necar 4 Advanced**. Les modules Ballard qui l'équipent sont du type Mark 900.

En décembre 2001, DaimlerChrysler présente un prototype, nommée **Natrium**, alimenté par un nouveau type de stockage d'hydrogène embarqué : le stockage sur borohydrure de sodium. Ce système donne une autonomie de près de 500 km ; la pile à combustible est hybridée avec une batterie Li-ion capable de fournir 40 kW.

Au printemps 2002, une **Necar 5** à reformeur méthanol traverse les Etats-Unis, parcourant 3200 miles en 15 jours sur des routes publiques : elle nécessitait un plein de méthanol tous les 300 miles.

En octobre 2002, DaimlerChrysler annonce la fabrication d'une série de 60 véhicules de **F-Cell**) la nouvelle génération de sa version Necar 4.

Le concept de la **F-Cell** est de type hybride ; elle est alimentée par une pile Ballard Mark 902, de 72 kW de puissance nette. Le moteur électrique délivre une puissance de 65 kW et son réservoir d'hydrogène sous 350 bars lui donne une autonomie de 150 km. La batterie est de type NiMH.

En mars 2005, DaimlerChrysler présente un prototype construit sur la base du modèle Class-B, baptisée **F-Cell Class B** et d'une puissance disponible de 100 kW (voir figure 12), hybridé avec une batterie Li-ion et équipé d'un réservoir d'hydrogène sous 700 bars lui donnant une

autonomie voisine de 400 km. Daimler annonce une première série de ce modèle en 2010, capable d'un démarrage sous -25°C .

En octobre 2005, DaimlerChrysler présente un prototype basé sur la Class S, équipé d'une pile d'une puissance de 66 kW, et nommée **F600 – Hygenius**.

En 2008, Daimler annonce une amélioration de son modèle F-Cell Class A, nommée **F-Cell Plus**, équipé d'un réservoir d'hydrogène sous 700 bars. Ce sont des véhicules du type 350 bars qui sont modifiés : l'autonomie passe ainsi de 160 km à 230 km. Par ailleurs, Daimler poursuit ses tests sur la F-Cell Class B, en particulier dans des environnements difficiles.



Figure III.13: Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « **DAIMLER**»

III.2.8. Programme de VOLKSWAGEN



[41]

En 1996, qu'a débuté le développement du premier prototype produit par Volkswagen : une **Golf Variant** équipée d'une pile de 20 kW de chez Ballard. L'hydrogène était produit via un reformer de méthanol embarqué.

En novembre 2000 est apparue la **Bora HyMotion** équipée d'une pile *UTC Power* de 28 kW. L'hydrogène était stocké à bord sous forme cryogénique dans un réservoir de 49 litres.

En novembre 2001 cette collaboration a conduit à la présentation, à Berlin, du prototype **Bora HyPower**. Il était équipé d'une pile de 40 kW hybridée avec deux modules de super-capacités capables de délivrer 60 kW. L'hydrogène était stocké à 320 bars.

En septembre 2004, VW présente la **Touran HyMotion** équipée d'une pile Ballard de type Mark 902 de 66 kW hybridée avec une batterie de type NiMH. L'hydrogène (1,9 kg) était stocké à bord à 350 bars.

En septembre 2007, VW présente un véhicule électrique baptisé **Space Up Blue**, (batterie Li-ion de 12 kWh pour une autonomie de 100 km) équipé d'une pile à combustible « haute

température » qui lui assure une autonomie supplémentaire de 250 km. La pile est alimentée en hydrogène (3,3 kg) stocké sous pression. Le moteur électrique a une puissance de 45 kW.

En 2007 est présentée, la **Tiguan HyMotion** équipée d'une pile de 80 kW hybridée avec une batterie Li-ion de 6,8 Ah (puissance 22 kW). L'hydrogène (3,2 kg) est stocké sous 700 bars.

En 2009 est présentée la **Caddy Maxi** équipé d'une pile à combustible de 80 KW hybridée avec une batterie Li-ion de 22 kW. L'hydrogène est stocké à 700 bars.



Figure III.14: Prototypes des Véhicules à pile à combustible chez « VOLKSWAGEN ».

Les démonstrations actuelles attestent un tel niveau d'investissements, ils comptent chacun plus d'une centaine de voitures pile à combustible circulant actuellement dans le monde (voir **tableau III.1**).

Tableau III.1 Plan de démonstration et de commercialisation de voitures pile à combustible [42]

Constructeur	Plans actuels			Première annonce	
	Démonstration	Lancement	Production de masse	Année	Commercialisation
BMW (Allemagne)	2009 100 Série7 ICE-LH ₂				
Daimler (Allemagne)	2009 >100 Classe-A 30 bus Citaro 2010 20 Classe-B	2012 1000 unités	2015 Décision oui/non	1997	2004 40.000 unités
Ford (Etats-Unis)	2005-2010 30 Focus			2002	2004 (lancement) 2010 (commerciale)
GM (Etats-Unis)	2009 115 Chevy Equinox	2012 1000 unités	>2012 1 million/an	2001	2004
Honda (Japon)	2008-2012 200 FCX Clarity		2018 Coût objectif \$65000	2001	2004
Hyundai-Kia (Corée du Sud)	2009 30 unités 2010 200 unités	2012 1000 unités	2018 30.000 unités		
Mazda (Japon)	2008+ 30 RX-8 (HyNor)				
Nissan (Japon)		2009	2014		
Toyota (Japon)	2009 38 FCHV-adv		2015 Coût objectif \$50000	2001	2004
Volkswagen (Allemagne)		2020			

Source: Fuel Cell Today (2009), sites internet des marques.

Conclusion

La liste concernant les maisons, les prototypes des voitures à PAC et leurs nombres de modèles; nous ne pouvant pas les compter ou les donner tous, parce qu'ils sont au nombre croissant et en renouvellement continu. L'importance c'est qu'on a suivi et suivies leurs étapes de développement. Dont on a déduit les points favoris pour chaque maison concernant les types des piles à utiliser leur capacité de puissance, hybridé ou pas, types de batterie, et sous quel état l'hydrogène est stocké et son poids. On a conclu qu'à l'heure actuelle que la plupart des maisons se ressemblent dans leurs choix. Et ce qui le confirme plus la collaboration de deux ou plus de ces maisons l'une avec l'autre pour forcer leurs efforts de recherche et atteindre des résultats plus satisfaisantes, comme l'a fait, GM avec Suzuki et PSA avec Renault en France et plusieurs autres.

Chapitre IV

Caractérisation électrique de la pile PEMFC.

Introduction

Dans une PEMFC l'hydrogène est le combustible qui va permettre la production d'énergie. Les deux électrodes sont séparées l'une de l'autre par un électrolyte conducteur ionique. L'hydrogène est oxydé à l'anode pour donner deux protons et deux électrons. Les électrons parcourent alors le circuit électrique extérieur alors que les protons traversent l'électrolyte. Les électrons en provenance du circuit électrique et les protons seront alors utilisés afin de réduire le dioxygène (comburant) en eau.

Une approche thermodynamique de la pile à combustible permet d'obtenir la tension maximale théorique délivrée par un tel système [44]. Cette valeur maximale de la tension s'obtient par le calcul de la variation d'énergie libre de Gibbs lors de la réaction globale de la pile (équation IV.1).



L'énergie contenue dans un système est appelée l'enthalpie H. L'énergie à l'aide de laquelle du travail peut être effectué lors d'une réaction chimique s'appelle la différence de l'enthalpie libre ou la différence de l'énergie libre de Gibbs G. [45]

Si l'ensemble de l'enthalpie libérée par la réaction pouvait être retrouvée sous forme d'une différence de potentiel, la tension E_{th} délivrée par la pile serait :

$$E_{th} = - \frac{\Delta H}{nF} \quad (\text{IV.2})$$

Avec n : nombre d'électrons et F : constante de Faradays (charge d'une mole d'électrons)

En fait, d'après le second principe de la thermodynamique, la part correspondant à l'entropie ne peut être transformée en travail électrique. Or, le travail est égal à la variation d'enthalpie libre au cours de la réaction chimique.

$$W = - \Delta G \quad (\text{IV.3})$$

Le travail récupérable correspond au déplacement des électrons dans le circuit extérieur. Il est égal à :

$$W = n \cdot F \cdot (E_A - E_C) \quad (\text{IV.4})$$

Avec E_A et E_C les potentiels à l'anode et à la cathode. Le travail maximal récupérable par la pile (quand les pertes peuvent être négligées) est donc :

$$W_{max} = n \cdot F \cdot (E_A - E_C)_{max} \quad (\text{IV.5})$$

La tension maximale (réversible) récupérable est donc E_{rev} :

$$E_{rev} = - \frac{\Delta G}{nF} \quad (\text{IV.6})$$

La tension maximale aux bornes de la pile s'exprime donc en fonction de la température :

$$(E_A - E_C)_{\max} = E_{rev} = \frac{T \cdot S}{nF} \quad (\text{IV.7})$$

Avec H : différence d'enthalpie et S : différence d'entropie.

Dans le cas théorique d'une réaction réversible, la relation (IV.6) nous donne :

$$E_{rev} = -\frac{G}{nF} = \frac{237.10^3}{2 \times 96500} = 1.229 \text{ V} \quad (\text{IV.8})$$

La variation d'entropie étant négative (diminution du nombre de moles), la tension maximale aux bornes de la pile diminue quand la température augmente. Le rendement théorique de la pile, soit le rapport entre E_{rev} et E_{th} , diminue donc lui aussi en fonction de la température.

IV.1. Modélisation de la pile à combustible

Dé 1999, Plusieurs modèles ont été développés selon l'objectif recherché. L'intégration d'une pile à combustible dans un environnement électrique nécessite la connaissance de son modèle électrique. Un modèle de la pile à combustible permet de satisfaire deux besoins d'un point de vue utilisateur.

Premièrement, le fonctionnement interne avec ses effets physiques doit être mieux compris afin d'optimiser les points de fonctionnement. Deuxièmement, on cherche à prédire le comportement de la pile en fonction de ses conditions de fonctionnement, et de celles de la charge. [46]

La modélisation en statique d'une pile à combustible PEM est basée sur l'expression de la tension en fonction du courant débité. Partant de la tension idéale (Le potentiel thermodynamique théorique) issue de l'équation de Nernst (voir **Tableau IV.1**) où apparaissent les conditions de fonctionnement en température, pression et composition du gaz. Cette équation fournit une relation entre le potentiel standard idéal (E_0) et le potentiel idéal à l'équilibre pour d'autres conditions de température et de pression. Mais le potentiel réel (E_{PAC}) de la cellule décroît par rapport au potentiel thermodynamique d'équilibre quand le courant débite, cette déviation est due aux pertes irréversibles appelées polarisations (surtension) qui sont: la polarisation d'activation (η_{act}), la polarisation ohmique (η_{ohm}) et la polarisation de concentration (η_{conc}) (voir **figure IV.1**). Par conséquent, l'expression de la tension d'une cellule issue des modèles semi-empirique et font appels à des paramètres obtenus par ajustement expérimental, est exprimée selon les auteurs dans le **Tableau IV**.

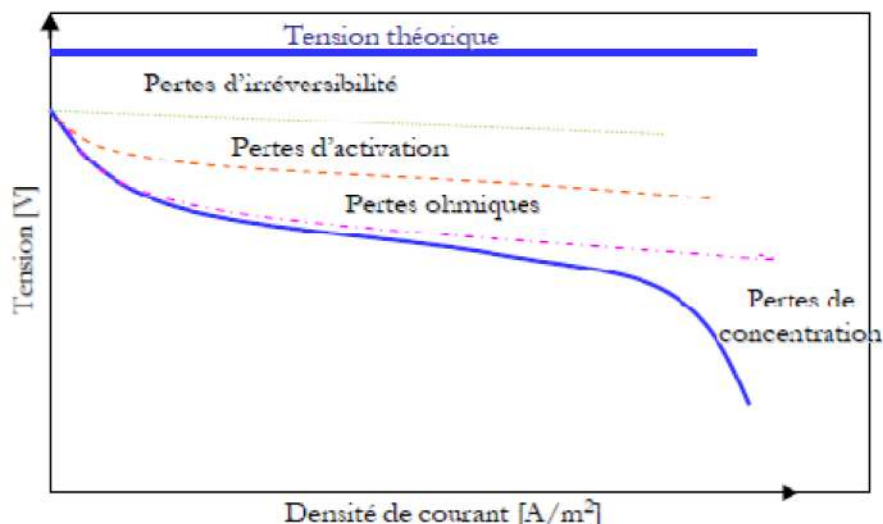


Figure IV.1: Courbe de polarisation [61]

Tableau IV.1 : Les expressions du potentiel

Différentes expressions	références
l'expression du potentiel réel	
a) d'une cellule	
$E_{PAC} = E_{Nernst} + \text{act} + \text{ohm} + \text{conc}$ Les valeurs de ' x ' sont dans le tableau IV.2	[48], [46], [49], [50], [51], [52]
b) de n cellules	
$E_S = n \times E_{PAC}$ la tension (E_S) de (n) piles unitaires reliées en série	[48]. [49],
Potentiel réversible dans les conditions normales pour le couple H2/O2 (i.e. 25 °C, 1 bar)	
$E_0 = 1.229V$	[44], [45], [53]
Equation Nernst (potentiel thermodynamique) (Force électromotrice à l'équilibre d'une pile H2/Air) (fonction de la température et des pressions)	
$E_{Nernst} = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln [p_{H_2}(p_{O_2})^{0.5}]$ R : Constante des gaz parfait, F : constante de Faradays n : Nombre d'électrons, T : température opératoire de la pile.	[54], [55], [56], [57], [58],
$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} \cdot T(\ln p_{H_2} + 0.5 \ln p_{O_2})$ -cas de l'eau liquide qui se produit :	[59], [54], [55], [49], [50], [51], [57], [60],
$P_{O_2} = \frac{1}{2} \cdot P_{cat}$ (Pressions à l'interface de l'oxygène)	[48], [46], [52]
$P_{H_2} = \frac{3}{4} \cdot P_{anode}$ (Pressions à l'interface de l'hydrogène)	

Tableau IV.2 : Mécanismes de pertes en tension et leurs expressions.

Equations	références
1. Surtensions d'activation (les pertes d'activations)	
$\eta_{act} = \xi_1 + \xi_2 \times T + \xi_3 \times T \times \ln(C_{O_2}) + \xi_4 \times T \times \ln(I_{PAC})$ <p>C_{O_2} : les concentrations de l'oxygène dissout dans un film d'eau à l'interface de la membrane gaz/liquide sur la surface catalytique de la cathode (mol/cm³)</p> $C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{(5.08 \times 10^6 \exp(-498/T))}$ <p>* Les valeurs de ' i ' sont dans le tableau IV.3</p>	<p>[59], [48], [54], [46], [56], [49], [60], [58].</p> <p>[59], [48], [46], [49], [51], [55], [57], [53], [60], [58], [52]</p>
2. Chute ohmique (polarisation ohmique)	
$\eta_{ohm} = -I_{PAC} \cdot (R_M + R_C)$ $R_M = \frac{r_M \cdot l}{A}$ <p>R_C : Résistante équivalente de contacte à la conduction des électrons et elle est donnée ().</p> <p>R_M : Résistante équivalente de la membrane à la conduction des protons().</p> $r_M = \frac{181.6 \left 1 + 0.03 \cdot \left[\frac{I_{PAC}}{A} \right] + 0.062 \left[\frac{T}{303} \right]^2 \cdot \left[\frac{I_{PAC}}{A} \right]^{2.5} \right }{\left \lambda_{H_2O/SO_3^-} - 0.634 - 3 \cdot \left[\frac{I_{PAC}}{A} \right] \right \cdot \exp \left 4.18 \left[\frac{T - 303}{T} \right] \right }$ <p>I_{PAC} : Courant de fonctionnement de la pile (A)</p> <p>l : L'épaisseur de la membrane en (cm),</p> <p>A : surface active de la pile (cm²)</p> <p>r_M : Résistance spécifique de la membrane (Ω.cm)</p> <p>λ_{H_2O/SO_3^-} : La teneur en eau dans la membrane (sa valeur varie entre 0 et 22)</p>	<p>[48], [46], [56], [51].</p> <p>[56], [48], [46], [52]</p> <p>[56], [49], [50].</p> <p>[50]</p>
3. polarisation de concentration	
$\eta_{con} = B \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right)$ <p>B: Constante empirique qui dépend du type de pile et de son fonctionnement.</p> <p>J: est la densité de courant du fonctionnement permanente</p> <p>J_{max} : Densité de courant maximale</p>	<p>[48], [46], [52]</p>

Tableau IV.3 : Coefficients paramétriques appropriés à quelques types de piles à combustible PEMFC (extraites des publications).

Valeurs des coefficients paramétriques empiriques	Références
$\xi_1 = -0.9514$ $\xi_2 = 0.00312$ $\xi_3 = 7.4 \times 10^{-5}$ $\xi_4 = -0.000187$	[59], [48], [56], [54], [51], [57], [55], [60] (extraites des expériences d'Amphlet 1995)
$\xi_1 = -0.944$ $\xi_2 = 0.00354$ $\xi_3 = 7.80 \times 10^{-5}$ $\xi_4 = -0.000196$	[48], [56] (extraite des expériences d'Amphlet 1996)
$\xi_1 = -0.948 \pm 0.004$ $\xi_2 = 0.00286 + 0.0002 \ln A + (4.3 \times 10^{-5}) \cdot \ln(C_{H_2})$ avec $C_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{(1.09 \times 10^6 \exp(77/T))}$ $\xi_3 = 7.60 \cdot 10^{-5}$, $\xi_4 = -0.000193$	[56], [49], [52].

Les pertes d'activations sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode. Il s'ensuit que les pertes d'activations sont essentiellement dues aux réactions cathodiques. La relation entre les pertes d'activations et la densité de courant est exprimée dans le **tableau IV.2**

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qu'opposent les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. La chute de tension correspondante est écrite dans le **tableau IV.2**.

Les pertes 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. Ajoutant qu'à 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. On peut exprimer ces pertes par l'équation dans le **tableau IV.2**.

IV.2 Puissance de la pile

La puissance P_{PAC} délivrée par la pile, s'exprimant comme le produit de la tension de pile E_{PAC} et du courant de pile I_{PAC} .

$$P_{PAC} = E_{PAC} \times I_{PAC}$$

Pour les véhicules légers la puissance électrique de la PAC nécessaire pour la motorisation Sans hybridation est de 75 à 80 kW, et avec hybridation de 15 à 30 kW cela dépend du pourcentage d'hybridation [34]

IV.2.1 Dimensionnement d'une pile selon la puissance désirée

Afin de dimensionner une pile selon la puissance désirée, on dispose d'un degré de liberté puisqu'il est possible soit de privilégier un courant nominal important (en augmentant la surface des cellules et même en assemblant en parallèle plusieurs stacks) soit la tension (en augmentant le nombre de cellules du stack et même en assemblant en série plusieurs stacks). Néanmoins des exigences imposent une surface maximale (300 cm^2) pour la cellule élémentaire ainsi qu'un nombre de cellules maximal pour le stack (une centaine) [61].

Du point de vue de l'utilisation, il est intéressant d'avoir une tension de PAC la plus élevée possible afin de limiter le courant demandé, car ainsi les pertes joule dans le système sont réduites. Ceci est obtenu d'une part, par l'augmentation du nombre de cellules jusqu'à la limite technologique permise et d'autre part, par l'augmentation de la tension par cellule, en diminuant la densité de courant donc en augmentant la surface de cellule. En revanche, augmenter la surface de la pile pénalise le cout et l'encombrement du système. On est donc conduit à utiliser la surface de la membrane jusqu'à sa densité de courant maximale ; une limite aujourd'hui admise pour la technologie PEM est une densité de courant nominale de $0,6 \text{ A/cm}^2$ correspondant a une tension de cellule en pleine charge d'environ $0,6 \text{ V}$ (pouvant diminuer jusqu'à $0,4 \text{ V}$ a $0,5 \text{ V}$ au cours du vieillissement et lors de fonctionnement en conditions opératoires non-optimales) [61].

a) Détermination du nombre de cellules.

La puissance électrique brute de l'empilement se calcule par la relation suivante : [62]

$$P_{pile} = N_{cell} \cdot E_{cell} \cdot j \cdot A \quad (\text{IV.9})$$

Ou :

- P_{pile} : Puissance électrique du stack (W)
- N_{cell} : Nombre de cellules de l'empilement
- E_{cell} : Tension par cellule (V)
- j : Densité de courant (A/cm^2)
- A : Surface active des cellules (cm^2).

Si on veut par exemple dimensionner une pile pour une voiture sans hybridation et qui nécessite une puissance de 80 KW, on prend l'exemple de la pile utilisée par [63] (pour une PAC de 20 KW, une tension cellulaire de 0.63V, et une densité de courant de $1.3 A/cm^2$) et on cherche à trouver le nombre de cellules nécessaire pour délivrer une puissance de 80 KW.

- Pour une cellule de $200 cm^2$ de surface (A).

$$N = \frac{P}{E_{cell} \cdot j \cdot S_{pile}} \quad \text{donc : } N = \frac{80000}{0.63 \cdot 1.3 \cdot 200} = 488 \text{ cellules}$$

Equivalent à $\frac{488}{122} = 4$ stacks en série.

Dans ce cas le courant maximal correspondant sera 260 A calculé par

$$I = \frac{P}{N \times E_{cell}} \quad \text{ou bien: } I = A \times j$$

b) Détermination de la surface des cellules

- Augmentant la surface en plaçant plusieurs stacks en parallèles, Par exemple :

Mettre deux stacks en parallèles et obtenir une surface de $400cm^2$ donc le nombre de cellules en série sera baisser à la moitié, et si on prend le même nombre de cellules par stack (122), cela nous donne une pile constitué de deux blocs montés en parallèle, chaque bloc contient deux stacks qui est un ensemble de 122 cellules montés en série. Le courant maximal sera doublé, alors que le potentiel sera diminué à la moitié.

c) Influence des paramètres de fonctionnement

Une fois la pile est dimensionnée, ces performances seront influencées par les paramètres de fonctionnement (température, pression, composition de gaz, densité de courant), ainsi que par d'autres facteurs (impuretés de gaz et état de vieillissement de la pile). C'est ce qui est apparu

dans les équations précédentes. Ces paramètres influencent directement sur la tension de la pile et sur sa puissance.

L'association des équations des potentiels contenus dans les tableaux précédents, nous donnent l'expression du potentiel réel sous forme d'une équation non linéaire en fonction de plusieurs paramètres.

Utilisant les équations et les paramètres donnée par les publications, et les grandeurs prise dans l'exemple de dimensionnement voir **Tableau IV.4**, et voyons l'influence de la température, la pression des gaz ainsi que l'épaisseur de la membrane sur le potentiel (sachant que celui-ci varie proportionnellement avec la puissance).

Tableau IV.4 : Tableaux des données

paramètres	Description	valeurs	Références
A	Surface active de la pile	200 cm ²	[63]
T	Température de la pile	(333, 343, 353) K	[64], [50]
P _{anode}	Pression de l'hydrogène	(2,5 . 3 . 3,3) atm	[50]
P _{cath}	Pression de l'oxygène	2,5 atm	[50]
R _c	Résistance équivalente de contact à la conduction des électrons	0,0003 Ω	[46]
l	Epaisseur de la membrane	(0,016, 0,018, 0,02) cm	[50]
B	Constante empirique qui dépend du type de pile	0,016 V	[46]
i ₁	Coefficients empiriques	- 0,9514	[46]
i ₂	Coefficients empiriques	3 ,12.10 ⁻³	[46]
i ₃	Coefficients empiriques	1,96.10 ⁻⁴	[46]
i ₄	Coefficients empiriques	- 1,87.10 ⁻⁴	[46]
λ _{H₂O/SO₃⁻}	Teneur de l'eau dans la membrane	14 molH ₂ O/molSO ₃	[46]
J _{max}	Densité de courant maximale	1,3 A/ cm ²	[63]

Manipulant ces données dans les équations et voir l'évolution du potentiel ainsi la puissance pour une cellule en fonction de la densité de courant en variant une fois la température ensuite la pression des gaz, puis l'épaisseur de la membrane. En utilisant le programme Fortron 6.6, et les résultats traduits à des courbes par l'OriginPro 7.5, et présentés après l'organigramme si dessus.

IV.3. Organigramme de calcul

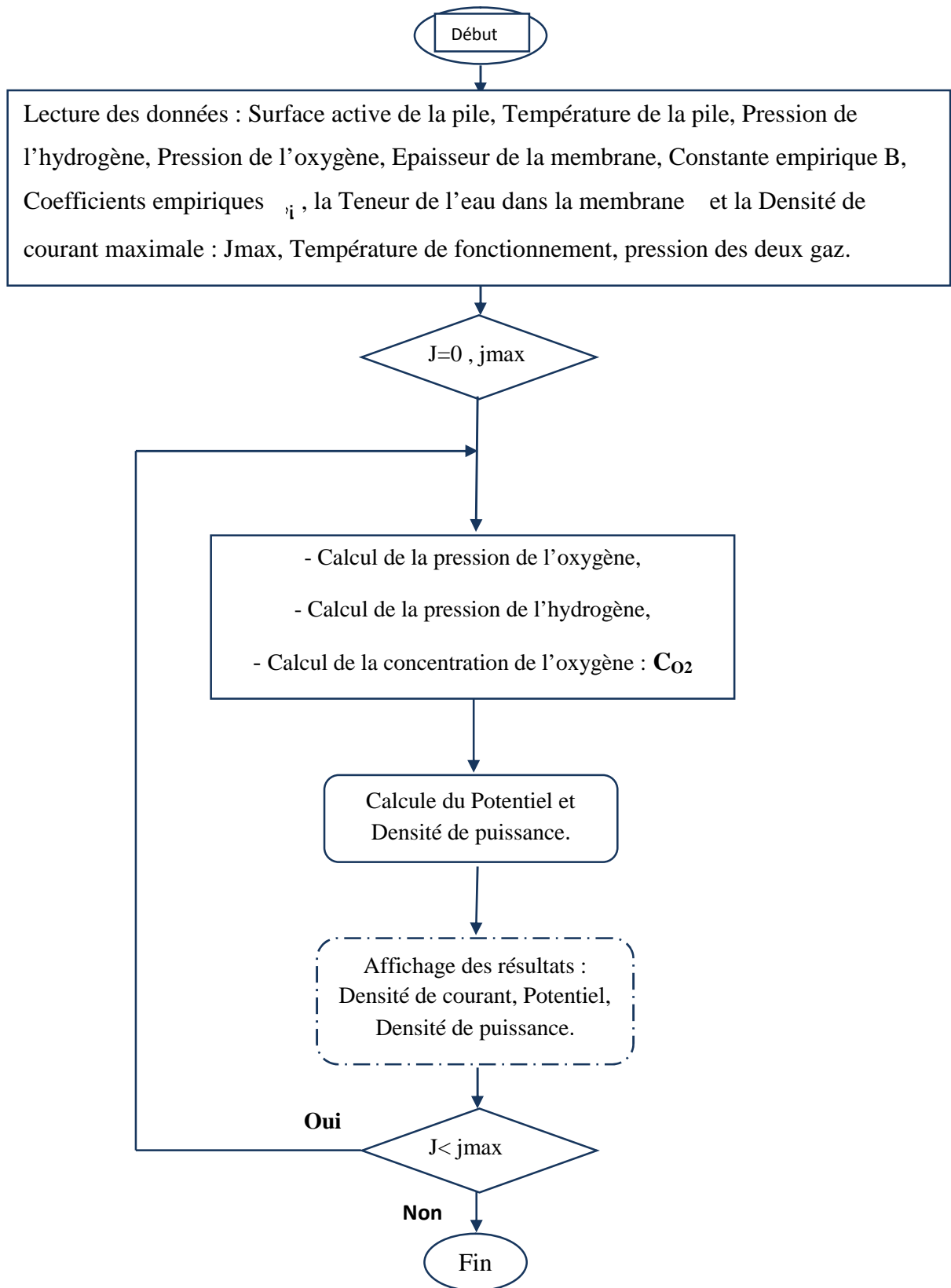


Figure IV.2 : Organigramme de calcul

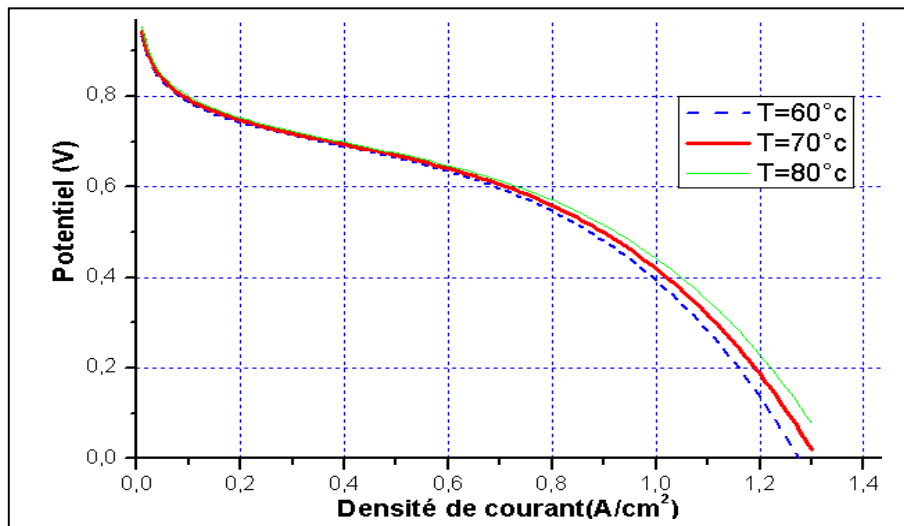


Figure IV.3: Influence de la température sur la tension de la cellule

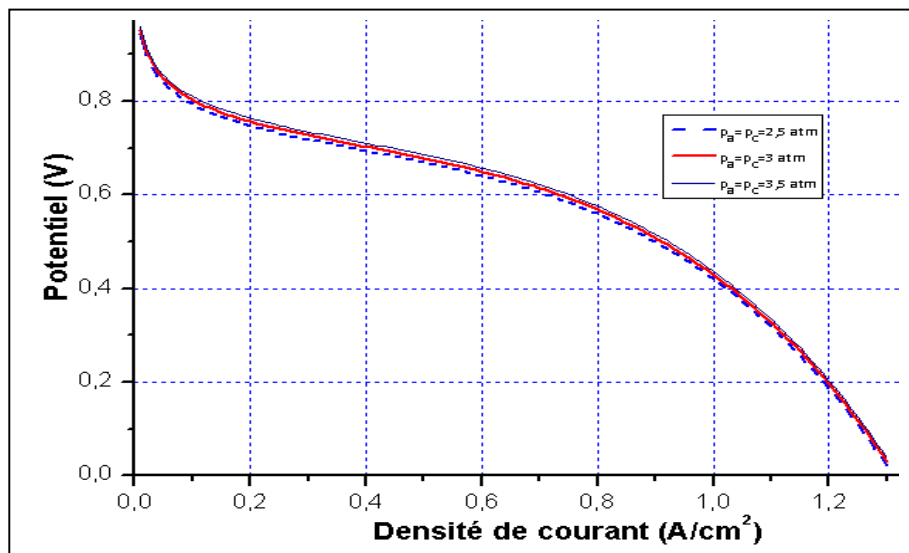


Figure IV.4: Influence de la pression sur la tension de la cellule

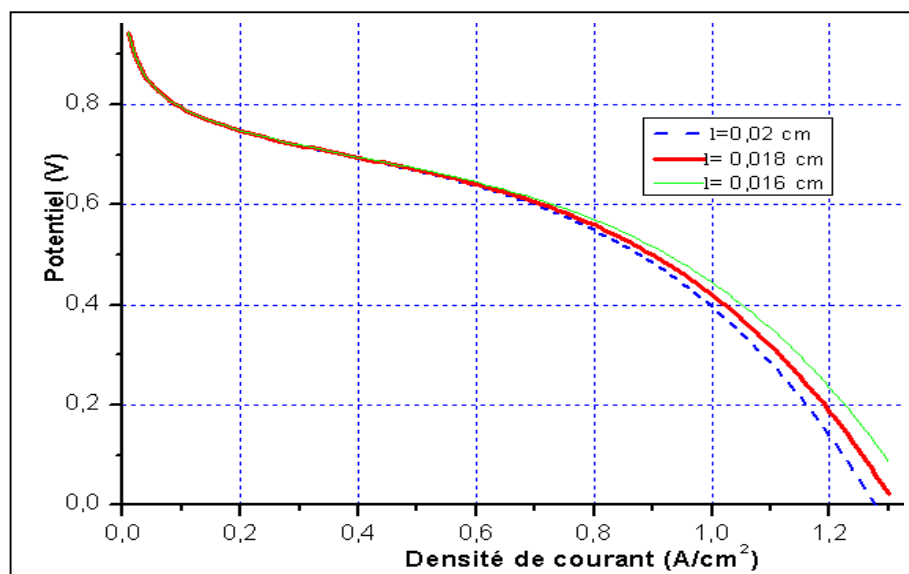


Figure IV.5 : Influence de l'épaisseur de la membrane sur la tension de la cellule

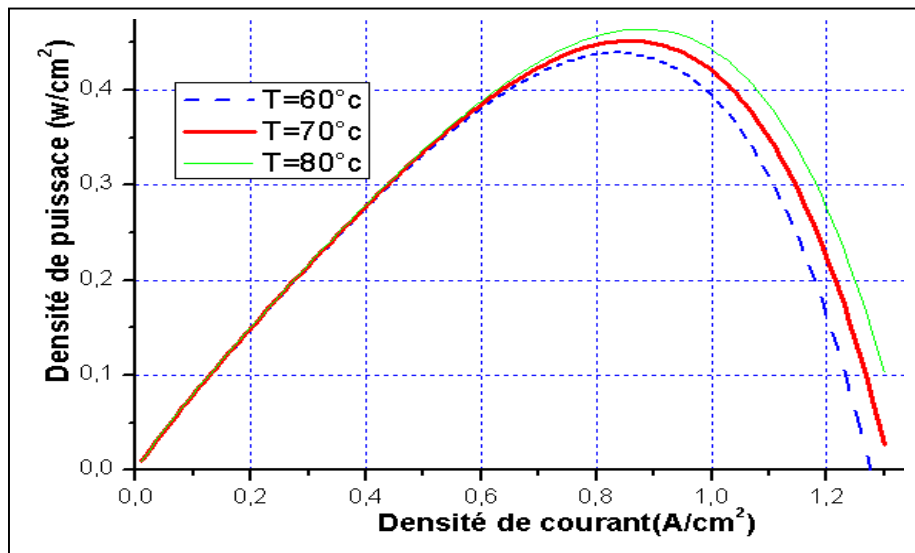


Figure IV.6: Influence de la température sur la puissance de la cellule

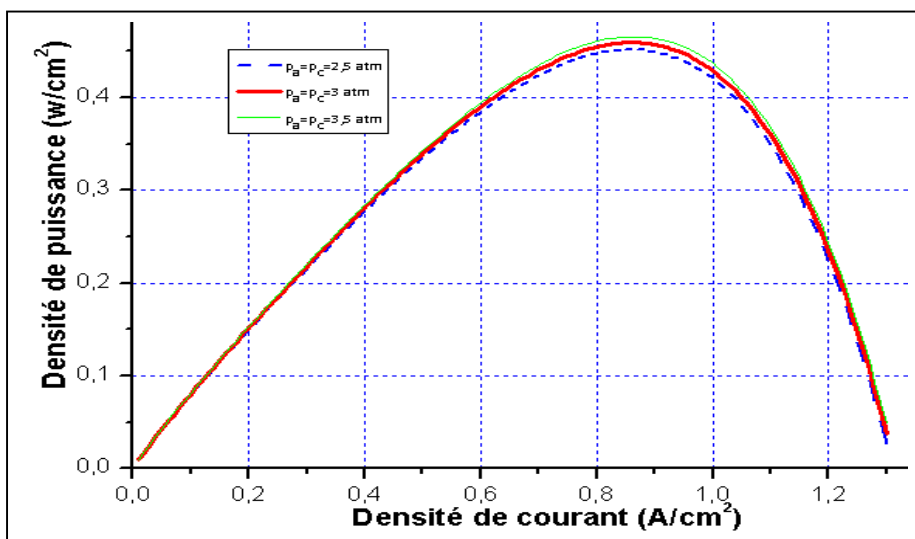


Figure IV.7: Influence de la pression sur la puissance de la cellule

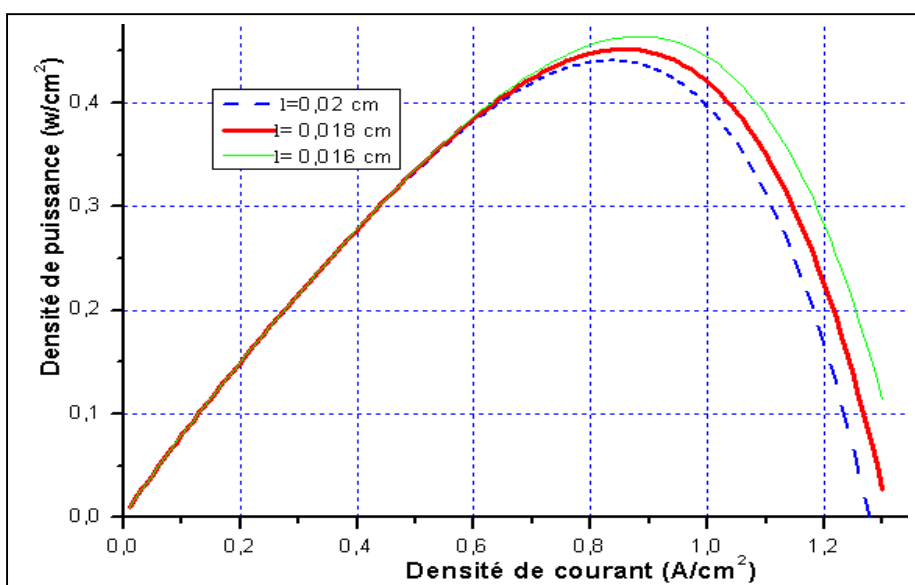


Figure IV.8: Influence de l'épaisseur de la membrane sur la puissance de la cellule

IV.4. Interprétation des résultats et conclusion:

Pour voir l'influence de certaines conditions opératoires sur le fonctionnement de la pile (pile unitaire) puis pour un assemblage (stack), et trouver les meilleures performances des puissances :

Premièrement on a varié la température (**Figure IV.3**) et (**Figure IV.6**), et le résultat a montré que la dynamique de la tension et celle de la puissance suit la variation de la température, sauf pour les faibles courants, où elle est presque invariable.

Deuxièmement, Nous avons maintenu la température constante à différentes valeurs de pression. Une augmentation de cette dernière a une incidence positive sur la tension de sortie et donc sur la puissance (**Figure IV.4**) et (**Figure IV.7**). Cette augmentation ne pose pas de problème côté hydrogène car la source est souvent constituée de bouteilles d'hydrogène à des pressions de l'ordre de 350-700 bars et la pile est alimentée à partir d'un système de régulation qui impose le débit souhaité (ou encore la puissance désirée) sous une pression sensiblement égale à la pression cathodique (pour limiter les efforts mécaniques transverses sur la membrane électrolyte). Il n'en est pas de même côté air (la pression différentielle entre anode et cathode est limitée) où il faut mettre en œuvre un compresseur. Celui-ci est gros consommateur d'énergie et ceci agit négativement et fortement sur le rendement global de la pile. Ainsi l'augmentation de la pression provoque une détérioration des joints d'étanchéités et par conséquent les performances de la pile diminuent. Même pour les valeurs de pressions prises, la variation de la tension et de la puissance est presque invisible.

Finalement les deux paramètres variés précédemment sont fixés et on a varié cette fois la valeur de l'épaisseur de la membrane et on a remarqué qu'une couche mince augmenterait la tension évidemment la puissance et le plus important c'est que le prix sera diminué (**Figure IV.5**) et (**Figure IV.8**).

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 PEM 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. [31]

Dans ce mémoire on a commencé en bref, par la présentation de la chaîne de traction d'une voiture actuelle et celle de la voiture à PAC, ensuite la pile elle-même, ces composants, ces périphériques. C'est ce qui nous a fait connaître mieux la multiplicité des architectures surtout dans le cas hybridation.

L'analyse des programmes des voitures à pile à combustible selon les maisons nous a aidé d'extraire les points marquants ces quinze dernières années dans l'utilisation de la pile à combustible dans le domaine de transport est qui sont les suivants :

- les piles à combustible sont toutes de types PEMFC et issus du constructeur canadien Ballard : sauf pour quelques maisons qui ont tenté leurs modules « maison ».
- le bloc de puissance est intégré dans le châssis des véhicules avec un moteur électrique unique et rarement pour quelques uns les moteurs intégrés aux roues (exemple : Toyota).
- tous ont testé divers types de source d'hydrogène : sous pression, cryogénique, reformage de méthanol, borohydrure de sodium et semble maintenant se concentrer sur le stockage gazeux à 700 bars.
- si les premiers prototypes ne comportaient pas de batteries en hybridation (en particulier pour la récupération d'énergie au freinage), leur présence sur les prototypes les plus récents montre une évolution de leur stratégie. Les batteries sont maintenant le plus souvent de la technologie Li-ion.

Finalement nous avons confirmé que la manipulation de la modélisation électrochimique semi empirique extraite des travaux expérimentaux d'Amphlett appliqué par différents auteurs et

sur différents modèles est applicable pour le modèle choisi tel que pour:

- *La variation de la température le résultat montre que la dynamique de la tension et celle de la puissance suit la variation de la température,*
- *L'augmentation de la pression des gaz a une incidence positive sur la tension de sortie et donc sur la puissance*
- *Et la diminution de l'épaisseur de la membrane augmenterait la tension évidemment la puissance, et le plus important c'est que le prix de la pile sera diminuée*

Perspectives :

Beaucoup d'efforts sont faits pour que les piles à combustibles remplacent les moteurs thermiques. Il reste quelques problèmes à résoudre comme :

- *L'étude des méthodes de production et le stockage de l'H₂*
- *Le choix des matériaux destinés à la fabrication de la pile*

Ce qui nécessite que cette étude sera complétée en déployant un de ces états.

Références bibliographique

-
- [1] Jérôme BERNARD. *Véhicules hybrides à pile à combustible: dimensionnement et stratégies de commande*. Thèse de doctorat. Université de Valenciennes (2007).
- [2] Pierre Duysinx . *Le système véhicule et ses constituant* .Université de Liège. 2011-2012
- [3] http://fr.wikipedia.org/wiki/Fonctionnement_de_l'automobile
- [4] <http://www.autobrico.com/organes-mecaniques-automobile/circuit-alimentation/circuit-alimentation.html>
- [5] MM Fall, Guissé & Bâ du L.T.I.D. de DAKAR. *Généralités; du moteur* source: www.seneauto.com le portail de l'automobile.
- [6] <http://www.scribd.com/doc/46519055/Le-Moteur-Diesel>.
- [7] Alain BOUSCAYROL (Univ. Lille 1), Prof. Kodjo AGBOSSOU (Univ. Québec à Trois Rivières). *Gestion d'Énergie d'un Véhicule Pile à Combustible*. projet GeVePaC (2009).
- [8] Pierre Duysinx. *Véhicules électriques, hybrides et à pile a combustible*. Université de Liège.2011-2012.
- [9] CEA Saclay / Siège - Direction de la Communication - Service Information-Média. *Les recherches du CEA sur les batteries pour véhicules électriques*. Dossier de presse (2010) source: http://www.cea.fr/energie/le_stockage_de_l_electricite_le_defi_technolog.
- [10] Jean-Pol Dodelet, INRS-Énergie, Matériaux et Télécommunications Varennes Québec Canada, Patrick Bertrand Professeur Université catholique de Louvain Louvain-la-Neuve, Belgique. *Trouvez-vous un jour une pile à combustible sous le capot de votre voiture?* Collège Belgique (2011).
- [11] Walid Hankache. *Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à Pile à Combustible*. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse (2008).
- [12] Sébastien DELPRAT. *Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles*. Thèse de doctorat. Université de valenciennes et du hainaut-cambresis (2002).
- [13] CARTON Romain, STRASSER Caroline. *Les technologies hybrides*. Rapport de TIPE. 2005/2006.
- [14] [www.Véhicules électriques Autonomie & recharge Le nouvel Economiste.mht](http://www.Véhicules_électriques_Autonomie_&_recharge_Le_nouvel_Economiste.mht)
- [15] David BOUQUAIN. *Les véhicules hybrides, électriques et à PAC*. laboratoire des systèmes de transport, utbm (2010).
- [16] Philippe Schulz. *Applications automobiles des piles à combustible: Enjeux et défis*. Fuel Cell Systems & Electrochemistry Manager.
- [17] Bruno FRANCOIS. *Pile à combustible*. Master(Recherche) Sciences et Technologies. Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance, centrale Lille
- [18] Jean Jacques BEZIAN. *Systèmes de piles à combustible pour la cogénération (état de l'art)*. Centre d'Énergétique de l'Ecole des Mines de Paris. (1998).

- [19] M. Stéphane BISCAGLIA. *La pile à combustible pour l'automobile de demain. 5e Journée de l'Environnement et du Développement Durable - DESS Gestion de la Planète / Association GAÏA - Nice ADEME - Département Technologies des Transports.* (2008).
- [20] EL-HASSANE AGLZIM. *Caractérisation par spectroscopie d'impédance de l'impédance complexe d'une pile à combustible en charge. « évaluation de l'influence de l'humidité ».* Thèse de doctorat. Laboratoire d'Instrumentation Electronique de Nancy (2009).
- [21] Hélène Burlet. *La pile à combustible PEMFC: une solution très crédible.* Institut Liten. Direction de la recherche technologique CEA Centre de Grenoble. CLEFS CEA - N° 59 - (2010).
- [22] Jérémie Haller, Adrien Aymon. *Production et stockage de l'hydrogène et les différentes piles à combustibles.* Travail de maturité (2008).
- [23] Thierry Alleau. Mémento de l'Hydrogène. FICHE 5.2.2. *La pile PEMFC.* Source: AFHYPAC. (2011).
- [24] Benjamin Blunier et Abdellatif Miraoui. *20 questions sur la pile à combustible, l'hydrogène vecteur d'énergie de demain?* Livre Editions TECHNIP paris, (2009).
- [25] Prof Lino Guzzella et all. *Véhicules ultra efficient à pile à combustible.* compte rendu de projet. Institut für Mess- und Regeltechnik (2003).
- [26] Michel Le breton. *Des sources d'énergies nouvelles pour se déplacer ? La voiture à pile à combustible.* Bac Pro, Lycée Viollet le Duc. (2009-2010).
- [27] Michel Junker Directeur d'ALPHEA HYDROGENE. *Livre Blanc des compétences disponibles en Lorraine pour le développement de la Filière Hydrogène* (2008).
- [28] Thierry Alleau. Mémento de l'Hydrogène FICHE 9.1.7. *Le programme Honda.* Source : AFHYPAC (2011).
- [29] http://www.philippe.boursin.perso.sfr.fr/velec/gifmcar/pile08.jpg&imgrefurl=http://philippe.boursin.perso.sfr.fr/velec/pile3.htm&usg=__nAaJGmyZfCXoAm88W32uGUH1M
- [30] Thierry Alleau. Mémento de l'Hydrogène FICHE 9.1.5. *Le programme Toyota.* Source : AFHYPAC (2009).
- [31] Thierry Alleau. Mémento de l'Hydrogène FICHE 5.2.1. *Les piles à combustible.* Source: AFH2. (2011).
- [32] Renaud Signoret. *Conception et analyse du fonctionnement en charge nominale et partielle d'un groupe moto-compresseur pour pile à combustible* (2003).
- [33] Thierry PRIEM. Responsable du Programme Hydrogène & Piles à Combustible. CEA Grenoble. *La Pile à Combustible et la cogénération.* (Salon Interclima, 10 février 2010).
- [34] Marie-Cécile PERA. *Systèmes Pile à Combustible Enjeux – Technologies Applications – Perspectives.* Laboratoire de recherche en électronique et électrotechnique et systèmes, utbm. . 2004/2005.
- [35] Eric Houguet. *Le véhicule électrique à hydrogène en approche.* Copyright © LaTribuneAuto (2011).
- [36] Thierry Alleau. Mémento de l'Hydrogène FICHE 9.1.4. *Le programme Ford motor company.* Source: AFH2 (2009).

- [37] Thierry Alleau. Mémento de l'Hydrogène FICHE 9.1.8. *Le programme Mazda*. Source : AFHYPAC (2012).
- [38] Thierry Alleau. Mémento de l'Hydrogène FICHE 9.1.2. *Le programme General Motors*. Source: AFH2 (2009).
- [39] Thierry Alleau. Mémento de l'Hydrogène FICHE 9.1.6. *Le programme Nissan*. Source: AFH2. (2009).
- [40] Thierry Alleau. Mémento de l'Hydrogène FICHE 9.1.1. *Le programme Daimler*. Source: AFH2. (2009).
- [41] Thierry Alleau. Mémento de l'Hydrogène FICHE 9.1.11. *Le programme Volkswagen*. Source: AFHYPAC (2011).
- [42] Nuno Bento, Jean-Pierre Angelier. *La transition vers l'hydrogène est-elle bloquée par un verrouillage technologique au profit des énergies fossiles ?* LEPII - Université de Grenoble- CNRS. Cahier de recherche N° 27. 2009.
- [43] Thierry Alleau. Mémento de l'Hydrogène FICHE 9.1.11. *La pile PEMFC Proton Exchange Membrane Fuel Cell*. Source: AFHYPAC (2011).
- [44] Cédric Grolleau *Etude d'électrocatalyseurs pour PEMFC en couche mince*. Thèse de doctorat. L'université de poitiers (2006).
- [45] El-Hassane Aglzim. *Caractérisation par spectroscopie d'impédance de l'impédance complexe d'une pile à combustible en Charge. – évaluation de l'influence de l'humidité –* Laboratoire d'Instrumentation Electronique de Nancy (2009).
- [46] M. Belatel , F.Z. Aissous et F. Ferhat. *Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte*. Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine (2012).
- [47] Tilda Akiki. *Modélisation de la dégradation de la production de puissance d'une PAC suite aux sollicitations mécaniques*. Thèse de doctorat. Université de technologie de Belfort-montbéliard (2011).
- [48] F. Amrouche, B. Mahmah, M. Belhamel et H. Benmoussa. *Modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation expérimentale*. Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 109 – 121.
- [49] G. Naga Srinivasulu, T. Subrahmanyam, V. Dharma Ra. *Parametric sensitivity analysis of PEM fuel cell electrochemical Model*. International journal of hydrogen energy 36 (2011) 14838 -14844.
- [50] S.O. Mert, I. Dincer, Z. Ozcelik. *Exergoeconomic analysis of a vehicular PEM fuel cell system*. Journal of Power Sources 165 (2007) 244–252
- [51] J. Wishart, M. Secanell et Z. Dong. *Optimization of a fuel cell system based on empirical data of a PEM fuel cell stack and the generalized electrochemical model*. IGEC-1 Proceedings of the International Green Energy Conference 12-16 June 2005, Waterloo, Ontario, Canada Paper No. 126.
- [52] Amrouche fethia. *Caractérisation expérimentale d'un assemblage stacks de piles à combustible à membrane échangeuse de protons*. Mémoire d'ingénieur d'état université USTHB (2004).

- [53] Christos A. Frangopoulos, Lambros G. Nakos. *Development of a model for thermoeconomic design and operation optimization of a PEM fuel cell system*. Energy 31 (2006) 1501–1519.
- [54] Christos N. Maxoulis, Dimitrios N. Tsinoglou, Grigorios C. Koltsakis. Modeling of automotive fuel cell operation in driving cycles. Energy Conversion and Management 45 (2004) 559–573.
- [55] J. C. Amphlett, R. M. Baumert, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge et T. J. Harris. *Performance Modeling of the Ballard Mark IV solid Polymer Electrolyte Fuel Cell I. Mechanistic Model Development*. J. Electrochem. Soc., Vol. 142, No. 1, 1995.
- [56] Ronald F. Mann, John C. Amphlett, Michael A.I. Hooper, Heidi M. Jensen, Brant A. Peppley, Pierre R. Roberge. *Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell*. Journal of Power Sources 86 (2000). 173–180.
- [57] D. Xue, Z. Dong. *Optimal fuel cell system design considering functional performance and production costs*. Journal of Power Sources 76 (1998). 69–80.
- [58] Nadine Hassanaly *Modèle dynamique du système d'alimentation d'air pour le contrôle d'une pile à combustible H₂/air de type PEM*. Mémoire. Université du Québec (2009)
- [59] M.J. Khan, M.T. Iqbal. *Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system*. Renewable Energy 30 (2005) 421–439.
- [60] P.R. Pathapati, X. Xue, J. Tang. *A new dynamic model for predicting transient phenomena in a PEM fuel cell system*. Renewable Energy 30 (2005) 1–22.
- [61] Toufik Azib. *Contribution à l'Etude d'Electro-générateurs à Pile à Combustible. Conceptions d'Architectures et de Leurs Commandes*. Thèse de doctorat. Université paris-sud XI (2010).
- [62] 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. L'institut national polytechnique de Toulouse (2004).
- [63] Antonio Delfino. La pile à combustible. Conception et développement Michelin 1762 Givibiez
- [64] F. ROY, J. P. POIROT, S. GARNIT. FiSyPAC project: *The first vehicle integration of GENEPAC fuel cell stack*. World Electric Vehicle Journal Vol. 3. 2009.

:

هذه المذكرة هو خلايا الوقود سيارة. سيارات السيارات الخاصة بهم، لنفهم بعدها مدى أهمية استخدام خلية ها، طريقة عملها، لحقاتها مدى أهمية استعمالها عند صناع السيارات و بد ثم الحالي هذا المياد . الإطلاع على النموذج الكهربائي أوصلنا إلى فهم أكثر لمدى تأثير عوامل التشغيل داخل خلية الوقود على قدرة السيارة.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre d'utilisation de la pile à combustible pour la traction automobile. On a cité les types des motorisations des voitures, leurs sources d'énergie et leurs chaines de traction, pour comprendre mieux l'utilité de la pile à combustible son emplacement, son mode de fonctionnement, les systèmes qui l'accompagnent (ces auxiliaires) et à quel point son utilisation intéresse les constructeurs de voiture et leurs recherches actuelles dans ce domaine. Ainsi voir le modèle électrique nous a permis de comprendre l'influence de quelques paramètres opératoires à l'intérieur de la pile à combustible sur la puissance du véhicule.

Abstract

The work presented in this thesis was realized in the use of fuel cells for car traction. we cited the types of engines of cars, their energy and their traction chains, for understand better later 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 and realm of present search. And see the electric model tends to better understand the influence of some operating parameters inside the fuel cell on its power.