

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT GÉNIE  
ELECTRIQUE



DOMAINE : SCIENCE ET  
TECHNOLOGIES

FILIERE : AUTOMATIQUE

OPTION : AUTOMATIQUE ET  
SYSTEMS

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par:**

Cherigui Ameer

Badra Abdelmounaim

**Intitulé**

**Modélisation et Simulation d'un Véhicule  
Electrique à Piles à Combustible**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Dr. BENGUESMIA Hani	Université Mohamed Boudiaf – M'sila	Président
Dr. OUAGUENI Fayssal	Université Mohamed Boudiaf – M'sila	Rapporteur
Dr. ZEMIT Abderrahim	Université Mohamed Boudiaf – M'sila	Examineur

**Année universitaire: 2021/2022**

## Remerciements

*Tout d'abord on remercie « الله » le tout puissant de m'avoir donné la santé la volonté et de la patience qu'il nous a donnée tout au long de notre étude.*

*Nous remercions Très sincèrement Dr. FAYSSAL OUAGUENI notre promoteur de ce travail, pour ses conseils pertinents, et ses orientations judicieuses sa patience et diligence, et par ses suggestions à grandement facilité ce travail.*

*Notre profonde gratitude à tous les enseignants du département génie électrique, et particulier nous remercions vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

*Et enfin, que nos chers parents et familles, et bien avant tout, trouvent ici l'expression de nos remerciement les plus sincères et les plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices, aides, soutien et encouragement afin de nous assurer cette formation dans les meilleurs conditions*

# *Dédicaces*

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

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

*A mon cher père, qui m'a toujours soutenu et m'a aider à  
affronte les difficultés ;*

*A tous ces mes chères sœurs et mes chers frères*

*A mes tontes et mes oncles et ma grand-mère.*

*A tous ma famille Cherigui et Khadraoui.*

*A l'âme de mes chers Ali et Mohamed et mon grand père*

*Ahmed Pour tous ceux qui ont fait pour que je puisse les  
honorer.*

*A tous mes amis et mes collègues.*

*A tous les enseignants du département de génie électrique.*

*Je dédie ce modeste travail.*

**Ameur**

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A Toute ma famille*

*A Mes très chers parents*

*A Mes très chers frères*

*A Mes très chères sœurs*

*A Tous les camarades de la promotion*

*A Mes très chers amis*

*Abdelmounaim*

## Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre d'utilisation de la pile à combustible pour la traction automobile. Nous avons mentionné l'utilité de la pile à combustible (PEMFC), différents utilisations de la pile à combustible, leur l'utilité de et son emplacement, son mode de fonctionnement, les systèmes qui l'accompagnent (ces auxiliaires) et à quel point son utilisation intéresse les constructeurs de voiture.

L'objectif de ce travail est la modélisation d'une véhicule électrique à pile à combustible PEMFC et la simulation par le langage de simulation MATLAB, afin d'obtenir les caractéristiques de cette véhicule.

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

## ملخص

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

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

**الكلمات المفتاحية:** خلية وقود, سيارة كهربائية, الطاقة, الهيدروجين.

## Abstract

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

It is certain that in the coming decades we will see the emergence of the hydrogen sector in our daily life as an energy vector. The choice of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) technology is implicit in view of the interesting performances (low weight, robust, solid electrolyte, fast start, etc.)

The choice of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) technology is implicit in view of the interesting performances (low weight, robust, solid electrolyte, fast start, etc.). It is therefore important to push research / development efforts around this technology even further in order to be able to master it and extend its application.

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

**Keywords:** Fuel cell, Electric car, power.

# Sommaire

---

## Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### *Chapitre I : Les piles à combustible*

I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique des piles à combustible .....	3
I.3. Généralités sur la pile à combustible .....	4
I.3.1. Définition .....	4
I.3.2. Structure générale.....	4
I.3.3. Types des piles à combustible.....	5
I.4. La pile à membrane électrolyte polymérique (PEMFC).....	6
I.4.1. Structure d'une PEMFC .....	6
I.4.2. Constitution d'une pile à combustible PEMFC .....	7
I.4.2.1. Membrane polymère échangeuse de protons.....	7
I.4.2.2. Les électrodes .....	8
I.4.2.3. L'électrolyte.....	8
I.4.2.4. Les plaques bipolaires .....	8
I.5. Principe de fonctionnement .....	9
I.6. Systèmes de piles à combustible.....	11
I.6.1. Processeur de combustible .....	11
I.6.2. Conditionneurs d'alimentation.....	11
I.6.3. Compresseurs d'air.....	12
I.6.4. Humidificateurs .....	12
I.7. Applications des piles à combustibles .....	12
I.7.1. Applications stationnaires .....	12
I.7.2. Applications transport .....	13
I.7.3. Applications portables.....	13

---

I.8. Caractéristiques de technologie des piles à combustible .....	13
I.8.1. Densité de courant .....	13
I.8.2. Tension réelle .....	13
I.9. Modélisation de la pile à combustible de type PEMFC.....	15
I.9.1. Performances idéales d'une cellule PEMFC .....	15
I.9.1.1. Energie libre de Gibbs .....	15
I.9.1.2. Equation de Nernst .....	16
I.9.1.3. Les débits molaires .....	17
I.9.1.4. Les pressions partielles .....	18
I.9.2. Performances réelles d'une cellule PEMFC.....	20
I.9.2.1. Les pertes ohmiques .....	20
I.9.2.2. Les pertes d'activation.....	20
I.9.2.3. Les pertes de concentration .....	21
I.9.3. Expression de la tension de sortie de la pile à combustible .....	21
I.10. Les avantages et les inconvénients des piles à combustibles.....	23
I.10.1. Les avantages .....	23
I.10.2. Les inconvénients .....	24
I.11. Conclusion .....	24

## ***Chapitre II : Les véhicules électriques***

II.1. Introduction .....	24
II.2. Historique .....	24
II.3. Définition d'un véhicule électrique.....	26
II.4. Architecture d'un véhicule à pile à combustible .....	26
II.5. Classification des véhicules électriques .....	27
II.5.1. Véhicules tout électrique.....	27
II.5.1.1. Véhicules électriques à batteries rechargeables par prise de courant.....	27
II.5.1.2. Véhicules électriques à alimentation par une pile à combustible.....	28

---

II.5.2. Véhicules hybrides.....	28
II.6. Fonctionnement d'un véhicule électrique.....	30
II.7. Description générale de la chaîne de traction.....	31
II.8. Stockage d'énergie .....	31
II.9. La batterie .....	32
II.10. Le chargeur .....	33
II.11. L'électronique de puissance dans le véhicule électrique.....	33
II.11.1. Les redresseurs (AC/DC).....	33
II.11.2. Les onduleurs (DC-AC).....	34
II.11.3. Les hacheurs (DC-DC) .....	34
II.12. Le moteur électrique.....	35
II.12.1. Le moteur à courant continu (MCC).....	35
II.12.2. Le moteur asynchrone (MAS) .....	35
II.12.3. Le moteur synchrone.....	36
II.13. Avantages et inconvénient des véhicules électriques .....	36
II.13.1. Avantages.....	36
II.13.2. Inconvénients .....	37
II.14. Conclusion:.....	37

### ***chapitre III: Modélisation d'un véhicule électrique à piles à combustible***

III.1. Introduction .....	38
III.2. Modèle de la chaîne de traction.....	38
III.4. Modélisation des convertisseurs.....	38
III.4.1. Hacheur élévateur de tension.....	38
III.4.2. Onduleur de tension.....	40
III.4.2.1. Modélisation de l'onduleur de tension .....	41
III.5. La machine asynchrone.....	42
III.5.1. Constitution et principe de fonctionnement.....	42

III.5.1.1. Définition : .....	42
III.5.1.2. Constitution.....	43
III.5.2. Modélisation de la machine asynchrone.....	44
III.5.2.1. Équations générales de la machine asynchrone triphasée : .....	44
III.5.2.2. Equations électriques .....	44
III.5.2.3. Equations magnétiques .....	46
III.5.2.4. Equations mécanique .....	47
III.5.2.5. Modèle d'état de la machine asynchrone .....	48
III. Conclusion .....	52
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>52</b>
Bibliographie .....	55

## *Liste des acronymes*

<b>PEMFC</b>	Proton Exchange Membrane Fuel Cell.
<b>ANR</b>	Agence Nationale de la Recherche .
<b>PAC</b>	Pile à Combustible.
<b>PEM</b>	Proton Exchange Membrane.
<b>AFC</b>	Alcaline Fuel Cell.
<b>MCFC</b>	Molten Carbonate Fuel Cell.
<b>SOFC</b>	Solid Oxide Fuel Cell.
<b>PAFC</b>	Phosphoric Acid Fuel Cell.
<b>DMFC</b>	Direct Methanol Fuel Cell.
<b>DC</b>	Direct Current.
<b>AC</b>	Alternate Current.
<b>MAS</b>	Machine Asynchrone.
<b>VEs</b>	Les Véhicules Electriques.
<b>VHEs</b>	Les Véhicules Hybrides Electriques.
<b>F.E.M</b>	Force Electro Motrice.
<b>MCC</b>	Moteur à Courant Continu.

## *Liste des symboles*

<b>T</b>	Constante de temps (s).
<b>H<sub>2</sub></b>	Hydrogène.
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxygène.
<b>N<sub>2</sub></b>	Nitrogen.
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Eau.
<b>KOH</b>	Hydroxide de Potassium.
<b>W<sub>el</sub></b>	Travail électrique.
<b>ΔG</b>	Variation de l'énergie libre de Gibbs.
<b>N</b>	Nombre d'électrons participants à la réaction, où n=2 dans notre cas.
<b>F</b>	Constante de Faraday, qui correspond à la charge d'une mole d'électrons.
<b>N</b>	Nombre d'Avogadro.
<b>E</b>	Tension idéale dite aussi tension réversible (i=0).
<b>ΔH</b>	Variation de l'enthalpie en [J/mol].
<b>ΔS</b>	Variation de l'entropie en [J/mol/K].
<b>ΔG<sup>0</sup></b>	Variation de l'énergie libre de Gibbs à pression standard (1bar≈1atm) qui dépend de la température.
<b>R</b>	Constante des gaz parfaits ( $R=8.314$ [J/mol/K]).
<b>E<sup>0</sup></b>	Tension standard (pression standard et température variable).
<b>T</b>	Température de fonctionnement en Kelvin
<b><i>P<sub>H<sub>2</sub></sub>, P<sub>O<sub>2</sub></sub> et P<sub>H<sub>2</sub>O</sub></i></b>	Les pressions partielles de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'eau respectivement en [atm].

$q_{H_2}^{in}$	Débit d'hydrogène qui entre dans le compartiment anodique.
$q_{O_2}^{in}$	Débit d'oxygène qui entre dans le compartiment cathodique.
$q_{H_2}^r$	Débit d'hydrogène consommé se qui réagit avec l'oxygène pour former de l'eau et de l'électricité.
$q_{H_2}^{out}$	Débit d'hydrogène qui sort de la pile.
$P_{H_2}^*$	Pression partielle dans le canal anodique.
$P_{O_2}^*$	Pression partielle dans le canal cathodique.
$X_{H_2O}^{channel}$	Fraction molaire de H <sub>2</sub> O du canal.
$l_a$	Épaisseur entre l'anode et le catalyseur [m].
$P_a$	Pression de l'anode [pascal].
$D_{H_2O,H_2}$	Diffusivité entre H <sub>2</sub> O et H <sub>2</sub> [m <sup>2</sup> /s].
$l_c$	Épaisseur entre la cathode et le catalyseur [m].
$P_c$	Pression de la cathode.
$D_{H_2O,O_2}$	Diffusivité entre H <sub>2</sub> O et O <sub>2</sub> [m <sup>2</sup> /s].
$V_{act}$	Les pertes d'activation.
$\xi_i$	Coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile où $i = 1, \dots, 7$ .
$V_{conc}$	Pertes de concentration.
$V_S$	Tension à la sortie du 'stack'.
$V_{an}, V_{bn}$ et $V_{cn}$	Tensions des phases de la charge (valeur alternative),
$V_{no}$	Tension de neutre de la charge par rapport au point fictif «0».
$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$	Tensions appliquées aux trois phases statoriques.
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	Courants qui traversent les trois phases statoriques.
$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$	Flux totaux à travers ces enroulements.
$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$	Tensions rotoriques.
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	Courants rotoriques.

$\varphi_{ra}, \varphi_{rb}, \varphi_{rc}$	Flux rotoriques.
$R_s$	Résistance d'une phase statorique
$R_r$	Résistance d'une phase rotorique
$\theta$	Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statoriques et les axes rotoriques qui sont choisis comme axes des références.
$\Omega$	Vitesse de rotation de l'arbre du moteur.
$C_{em}$	Couple électromagnétique.
$C_r$	Couple résistant.
$j$	Moment d'inertie de l'arbre moteur;
$f$	Coefficient de frottement
$P$	Nombre de paires de pôles.

# *Liste des tableaux*

<b>Tableau (I.1) :</b> Les différents types des piles à combustible.	<b>6</b>
<b>Tableau (I.2) :</b> Paramètre de simulation de la PEMFC.	<b>23</b>
<b>Tableau (II.1) :</b> Tableau comparatif des technologies des batteries.	<b>32</b>

# *Liste des figures*

<i>Chapitre I</i>	
<b>Figure (I.1) :</b> Expérience de Sir W. Grove en 1839.	<b>4</b>
<b>Figure (I.2) :</b> Structure générale d'une cellule d'une pile à combustible	<b>5</b>
<b>Figure (I.3) :</b> Structure d'un empilement des cellules PEM.	<b>7</b>
<b>Figure (I.4) :</b> Structure chimique générale des différents électrolytes	<b>8</b>
<b>Figure (I.5) :</b> Plaque bipolaire.	<b>9</b>
<b>Figure (I.6) :</b> Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC.	<b>10</b>
<b>Figure (I.7) :</b> Equivalent électrique d'une pile à combustible.	<b>14</b>
<b>Figure(I.8) :</b> Influence de la polarisation sur la tension.	<b>14</b>
<b>Figure(I.9) :</b> Circuit équivalent de la pile PEMFC.	<b>21</b>
<b>figure(I.10) :</b> Caractéristique Puissance/Courant (puissance par cellule).	<b>22</b>
<b>figure(I.11) :</b> Caractéristique Tension/Courant (tension par cellule).	<b>22</b>
<i>Chapitre II</i>	
<b>Figure (II.1) :</b> Première voiture au monde.	<b>24</b>
<b>Figure (II.2) :</b> Première voiture électrique créée par Camille Jenatzy en 1899.	<b>24</b>
<b>Figure (II.3) :</b> Système de propulsion d'un VE.	<b>25</b>
<b>Figure (II.4) :</b> Schéma général d'un véhicule à pile à combustible - Source Renault – PSA, 1998.	<b>26</b>

<b>Figure (II.5) : Architecture hybride série.</b>	<b>27</b>
<b>Figure (II.6) : Architecture hybride parallèle (arbre simple).</b>	<b>28</b>
<b>Figure (II.7) : Architecture hybride mixte.</b>	<b>28</b>
<b>Figure (II.8) : Eléments du système de traction d'une voiture électrique.</b>	<b>29</b>
<b>Figure (II.9) : Structure de la chaîne de traction dans un VE.</b>	<b>30</b>
<b>Figure (II.10) : La vue interne d'une batterie.</b>	<b>31</b>
<b>Figure (II.11) : Schéma détaillé d'un redresseur.</b>	<b>33</b>
<b>Figure (II.12) : Schéma détaillé d'un Hacheur élévateur bidirectionnel.</b>	<b>34</b>
<b>Figure (II.13) : Photo d'une machine asynchrone avec le Stator et le Rotor qui la constituent.</b>	<b>35</b>
<b><i>Chapitre III</i></b>	
<b>Figure (III.1) : Modèle complet du véhicule électrique.</b>	<b>37</b>
<b>Figure (III.2) : Montage du hacheur parallèle.</b>	<b>38</b>
<b>Figure (III.3) : Allure des tensions et des courants au niveau du hacheur.</b>	<b>38</b>
<b>Figure (III.4) : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux.</b>	<b>39</b>
<b>Figure (III.5) : Machine asynchrone à bagues.</b>	<b>42</b>
<b>Figure (III.6) : Rotor d'une machine asynchrone à cage.</b>	<b>42</b>
<b>Figure (III.7) : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.</b>	<b>43</b>
<b>Figure (III.8) : Modèle du véhicule électrique à pile à combustible sur l'environnement Matlab/Simulink</b>	<b>48</b>
<b>Figure (III.9) : Position de la pédale</b>	<b>49</b>
<b>Figure (III.10) : Courant de la pile</b>	<b>49</b>
<b>Figure (III.11) : Couple moteur</b>	<b>50</b>

<b>Figure (III.12) : Vitesse du véhicule(Km/h).</b>	<b>50</b>
<b>Figure (III.13) : Vitesse du moteur.</b>	<b>51</b>
<b>Figure (III.14) : Tension de la pile à combustible.</b>	<b>51</b>

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Les enjeux énergétiques et environnementaux font aujourd'hui partie des préoccupations majeures au niveau international. L'accroissement de la population mondiale ainsi que l'activité industrielle des pays développés et des puissances économiques émergentes ont entraîné une explosion des besoins en énergie. L'utilisation des ressources fossiles pour satisfaire cette « boulimie » énergétique est responsable de la majeure partie des rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ; cette pollution est à l'origine du réchauffement de la planète et des bouleversements climatiques qui en découlent. Outre les problèmes liés à l'environnement, les réserves d'énergies fossiles sont limitées et ne pourront satisfaire à moyen terme la demande mondiale [1].

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

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

Les véhicules hybrides dans lesquels une source secondaire d'énergie électrique vient soutenir le moteur à combustion interne sont une alternative prometteuse à court terme favorisant la limitation en consommation de combustible et constituant une étape intermédiaire vers un «tout électrique».

Le véhicule électrique hybride à pile à combustible est un système équipé d'une propulsion intégralement électrique et composé de :

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

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

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

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

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

# Les Piles à Combustible

---

## I.1. Introduction

Dans ce chapitre introductif, nous tenterons d'écrire un bref historique de l'évolution des piles à combustible. Ensuite, nous introduisons leur structure générale, leur principe de fonctionnement, leurs types et leurs différents domaines d'application.

Selon notre besoin en source d'alimentation et notre domaine d'application, dans ce travail nous intéressons seulement à la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC).

## I.2. Historique des piles à combustible

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

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

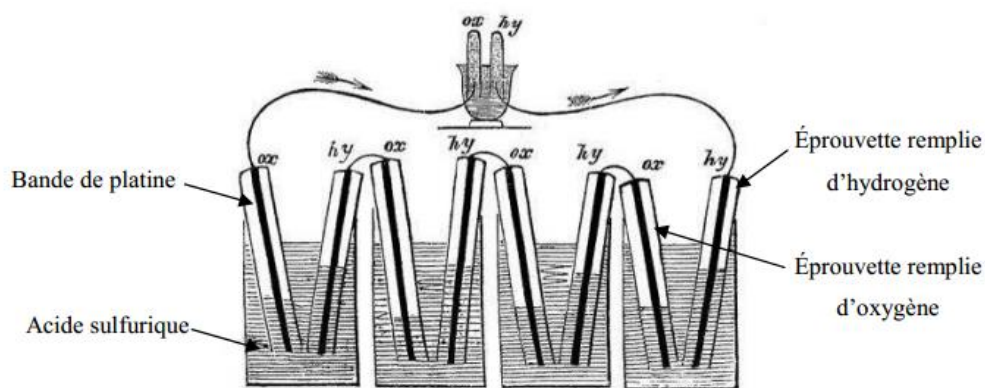
Le premier pas vers la pile à combustible a été réalisé en 1806 par le chimiste et physicien anglais Sir Humphry Davy qui en réalisant l'électrolyse de l'eau pure obtient distinctement de l'hydrogène et de l'oxygène dont il constate qu'ils sont les seuls produits. L'électrolyse de l'eau consistant, à l'aide d'un courant électrique (décomposer l'eau en hydrogène et oxygène gazeux), certains scientifiques se sont alors intéressés à effectuer le processus inverse afin de générer un courant électrique à partir de l'hydrogène et de l'oxygène.

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

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

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

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



**Figure (I.1) :** Expérience de Sir W. Grove en 1839.

### I.3. Généralités sur la pile à combustible

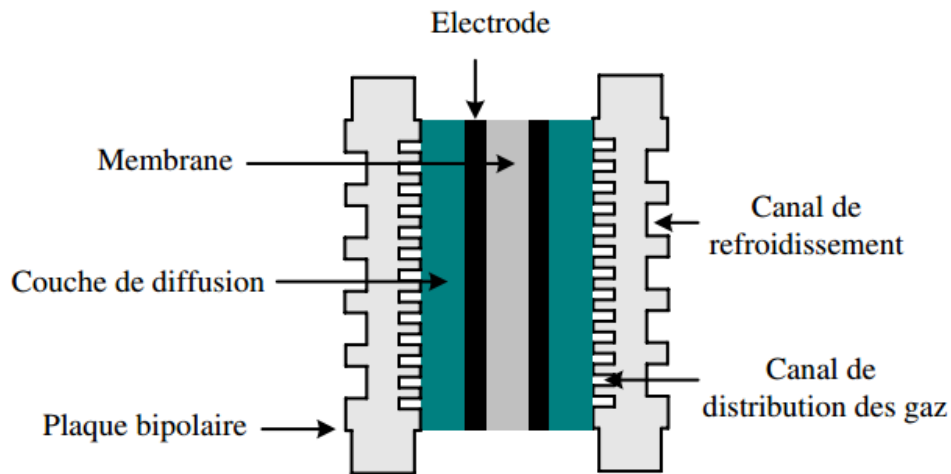
#### I.3.1. Définition

La pile à combustible est un convertisseur électrochimique qui permet de transformer l'énergie chimique d'un gaz ou d'un liquide combustible en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique.

#### I.3.2. Structure générale

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules. Chaque cellule est constituée de :

- Deux plaques bipolaires.
- Deux électrodes (anode et cathode).
- Electrolyte.



**Figure (I.2) :** Structure générale d'une cellule d'une pile à combustible

Alimentée par :

- Un combustible : on utilise le méthanol ou  $H_2$  (pur ou reformé).
- Un oxydant : soit l'oxygène pur ou l'air.

### I.3.3. Types des piles à combustible

En règle générale, les piles à combustible sont classées selon le type d'électrolyte utilisé (liquide ou solide) et leur température de fonctionnement (basse ou haute).

Nous pouvons distinguer six types de piles soient [5] :

- Les piles à acide phosphorique (PAFC Phosphoric Acid Fuel Cell).
- Les piles alcalines (AFC Alkaline Fuel Cell).
- Les piles à oxydes solides (SOFC Solid Oxide Fuel Cell).
- Les piles à carbonates fondus (MCFC Molten Carbonate Fuel Cell).
- Les piles au méthanol direct (DMFC Direct Methanol Fuel Cell).
- Les piles à membranes polymère échangeuse de protons (PEMFC Proton Exchange Membranes Fuel Cell).

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

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

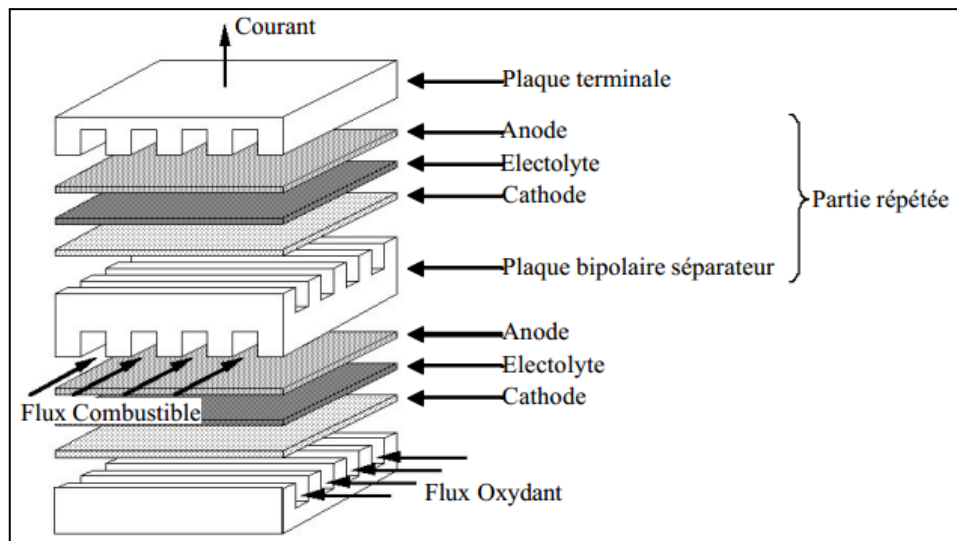
**Tableau I.1 :** Les différents types des piles à combustible.

## I.4. La pile à membrane électrolyte polymérique (PEMFC)

### I.4.1. Structure d'une PEMFC

Comme on a dit précédemment, qu'une cellule élémentaire est constituée d'un électrolyte, des électrodes et des plaques bipolaires. L'électrolyte dans une PEMFC est une membrane solide. L'association de nombreuses cellules va former une pile, ou on peut utiliser un autre nom qui est le "stack".

La figure suivante représente la structure d'un empilement de deux cellules.



**Figure (I.3) :** Structure d'un empilement des cellules PEM.

## 1.4.2. Constitution d'une pile à combustible PEMFC

### 1.4.2.1. Membrane polymère échangeuse de protons

Le rôle de la membrane est de transporter les protons résultants de la demi-réaction d'oxydation de l'hydrogène de l'anode vers la cathode (à travers lui-même). Leur localisation entre les électrodes conditionne qu'elle doit être isolante électroniquement, supporter les efforts mécanique qu'elle peut subir lors du serrage et imperméable pour l'hydrogène et l'oxygène, aussi elle doit supporter la température et être inerte chimiquement. Les matériaux des électrolytes actuels sont [6] :

- Le Nafion<sup>®</sup> et le Gore de Dupont<sup>™</sup>.
- Le DOW<sup>®</sup> de DOW Chemical<sup>™</sup>.
- L'Aciplex<sup>®</sup> d'Asahi Chemical Industry Company.

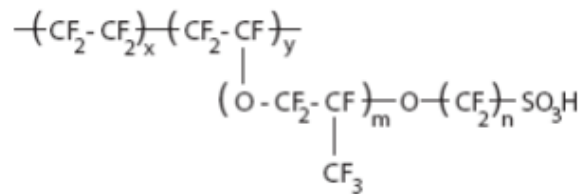
®: Marque déposée      ™: Trade marque

La figure I-4 donne la structure chimique générale de ces électrolytes, où on a [7] :

Pour le : Nafion 117 :  $m \geq 1$ ,  $n=2$ ,  $x=5-13.5$ ,  $y=1000$

L'Aciplex:  $m=0.3$ ,  $n=2-5$ ,  $x=1.5-14$

DOW:  $m=0$ ,  $n=2$ ,  $x=3.6-10$



**Figure (I.4) :** Structure chimique générale des différents électrolytes [7].

#### I.4.2.2. Les électrodes

Les électrodes sont le siège des réactions chimiques mettant en jeu des réactifs (hydrogène ou oxygène par exemple) qui sont consommés au fur et à mesure qu'ils diffusent dans l'électrode, ils ont plusieurs fonctions:

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

#### I.4.2.3. L'électrolyte

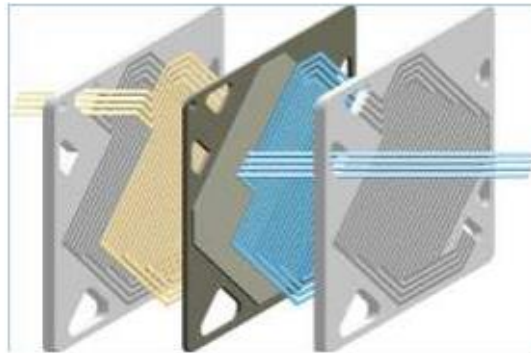
L'électrolyte varie en fonction du type de pile : par exemple pour la pile utilisée dans l'automobile, une membrane échangeuse d'ions pour les PEMFC est utilisée. Elle permet que les espèces ioniques (et non pas les électrons) passent de l'anode vers la cathode.

En solution ou à l'état liquide, l'électrolyte est conducteur et se dissocie en anions et en cations par l'action d'un courant électrique. L'électrolyte est un élément de l'électrolyse.

#### I.4.2.4. Les plaques bipolaires

Ces plaques sont collées aux supports de l'anode et de la cathode. Elles permettent de :

- Canaliser les gaz venant de l'extérieur
- Collecter le courant
- Gérer les flux



**Figure (I.5) :** Plaque bipolaire [8]

Généralement en graphite, ces plaques doivent conduire le courant, mais aussi permettre de diffuser des gaz jusqu'aux électrodes (pour les piles de type PEMFC). Elles doivent résister aux agressions du milieu (acide ou basique) et aussi être imperméables aux gaz réagissant (sous peine de provoquer un court-circuit chimique). Situées au cœur des piles à combustible, les plaques bipolaires assurent la conduction des électrons, ce qui permet l'alimentation en gaz et l'évacuation de l'eau formée.

## I.5. Principe de fonctionnement

La pile à combustible est un générateur d'électricité et de chaleur, fonctionnant grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible (hydrogène par exemple) associée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène et l'air. La pile à combustible ne rejette que de l'eau, ce qui en fait un générateur complètement propre.

Elle fonctionne sur l'inverse du principe de l'électrolyse et transforme de l'énergie chimique en énergie électrique.

Dans ce travail nous intéresserons à la pile à combustible de type PEMFC. Elle possède une cathode et une anode séparées par une membrane poreuse hydratée servant d'électrolyte. (L'anode est l'électrode où a lieu une réaction électrochimique d'oxydation (menant à la production d'électrons) par opposition à la cathode où se produit une réaction électrochimique de réduction (menant à la consommation d'électrons)).

Comme une pile classique, elle consomme son oxydant (ici le dioxygène  $O_2$ ) et son réducteur (ici le dihydrogène  $H_2$ ). Elle continue de fonctionner tant qu'elle est approvisionnée en dihydrogène et dioxygène.

Au sein de la pile à combustible se produisent des réactions d'oxydoréduction :

À l'anode, a lieu la réaction d'oxydation suivante :

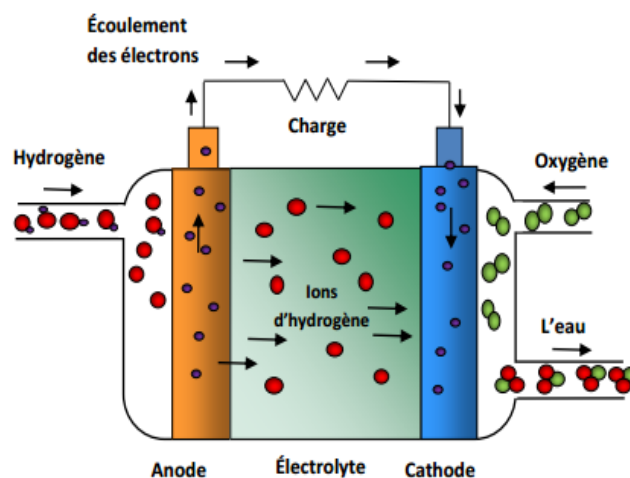


La membrane, imperméable à l'hydrogène, ne laisse passer que les protons. Les électrons sont donc acheminés par un circuit électrique extérieur vers l'autre électrode, la cathode, où ils se combinent à l'oxygène et aux protons pour produire de l'eau, selon la réaction de réduction suivante :



La principale différence entre une pile classique et la pile à combustible réside dans le fait que les électrodes d'une pile à combustible ne subissent aucune modification structurale lors des réactions électrochimiques mais servent uniquement de support à ces réactions. Comme les réactifs ne sont pas partie intégrante du système, la pile à combustible peut fonctionner en continu et n'a besoin que d'un apport en combustible à l'anode et en oxydant à la cathode.

Il faut ensuite également remarquer qu'outre un courant électrique continu, la réaction électrochimique d'une pile à combustible produit également de la chaleur. Cette chaleur peut être réutilisée pour alimenter un générateur thermique et ainsi augmenter le rendement du système. Ce procédé s'appelle la cogénération (principe de production simultanée d'électricité et de chaleur) [9].



**Figure (I.6) :** Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC.

Ainsi, le principe de la pile à combustible ne repose pas sur une combustion mais sur une réaction électrochimique.

## **I.6. Systèmes de piles à combustible**

### **I.6.1. Processeur de combustible**

Le processeur de combustible dans les systèmes à pile à combustible est l'élément responsable de la conversion, la principale source de combustible dans la forme de combustible utilisable qui convient à chaque type de pile à combustible. Selon le type de pile à combustible dispose du système, le processeur de combustible peut être un filtre simple pour éliminer les impuretés ou un système plus complexe avec des réacteurs et filtres.

Pour les systèmes utilisant des carburants tels que le méthanol, le charbon gazéifié, l'essence ou le diesel, le dispositif conventionnel largement utilisé est un reformer, utilisé pour convertir les hydrocarbures en gaz de synthèse.

Pour d'autres systèmes utilisant des combustibles comme le carbonate en fusion ou l'oxyde solide, le reformage peut être fait à l'intérieur de la pile à combustible en profitant de la haute température de fonctionnement de la pile à combustible. Ce processus est appelé réforme interne. Toutefois, ce processus encore besoin de filtres pour retenir les impuretés avant que le combustible reformé atteigne la pile à combustible [10].

### **I.6.2. Conditionneurs d'alimentation**

Les conditionneurs d'alimentation sont essentiels pour contrôler tous les paramètres d'un courant électrique afin de répondre aux spécifications du système. Ces paramètres comprennent la tension, le courant, la fréquence, etc.

Les piles à combustible produisent un courant continu, bien que de nombreux éléments du système de piles à combustible fonctionnent avec un courant continu, d'autres fonctionnent avec un courant alternatif, comme c'est le cas du moteur. Pour chaque cas, nous avons besoin de deux types différents de contrôleurs ou de conditionneurs:

- D'une part, et afin de fonctionner avec les courants continus (DC), les convertisseurs DC/DC (conversion continu/continu) sont raccordés, généralement des convertisseurs de suralimentation pour augmenter les tensions entre la batterie et l'onduleur.

- D'autre part, pour travailler avec des courants alternatifs (AC), il est habituel de mettre en œuvre un onduleur capable de transformer un certain courant DC en un courant AC avec l'amplitude et la fréquence souhaitées. Ceci est nécessaire parce que l'un des éléments les plus importants dans le système de pile à combustible (comme dit précédemment, le moteur), fonctionne dans la majorité des cas avec des courants AC.

Ainsi, ces processus de conversion et de conditionnement entraînent également une réduction de l'efficacité, qui va entre 2% et 6%.

### **I.6.3. Compresseurs d'air**

À mesure que le rendement global du réservoir de combustible augmente lorsque la pression du réactif augmente également, les systèmes de combustible comprennent des compresseurs qui augmentent normalement la pression de l'entrée d'air jusqu'à 2 à 4 fois la pression atmosphérique.

En ce qui concerne le transport, les compresseurs d'air devraient avoir une efficacité d'au moins 75 % et dans certains cas, un détendeur est également utilisé pour récupérer une partie de la puissance des gaz d'échappement à haute pression. L'efficacité de l'extenseur devrait être d'au moins 80%.

### **I.6.4. Humidificateurs**

Les membranes électrolytiques en polymère ne fonctionnent pas bien lorsqu'elles sont complètement sèches mais lorsqu'il est maintenu à un certain niveau d'humidité. Pour cette raison, de nombreux systèmes de piles à combustible inclure des humidificateurs afin d'augmenter l'humidité de l'air d'entrée dans la pile à combustible.

Ainsi, l'humidificateur est fabriqué à partir du même matériau que l'électrolyte polymère membrane. Cela permet au système d'obtenir l'humidité de l'eau produite dans la pile à combustible et donc maintenir l'humidité dans la pile à combustible au bon niveau.

## **I.7. Applications des piles à combustibles**

### **I.7.1. Applications stationnaires**

Dans ce domaine, les piles à combustible sont utilisées pour produire l'énergie électrique et la distribuée à travers un réseau. On distingue deux secteurs d'applications: la

production collective où la puissance varie de 200kW à quelque MW et la production domestique, où la puissance varie de 2 à 7kW. Un grand nombre d'installations de démonstration avec une puissance entre 1 kW pour des maisons individuelles et quelques centaines de kW pour des résidences a été installé dans différents pays [11]. Les piles les plus utilisés sont qui ont une température de fonctionnement élevée (SOFC, MCFC), où l'utilisation de la chaleur dégagée pour le chauffage et la production de la vapeur d'eau permet d'accéder le maximum rendement énergétique.

### **I.7.2. Applications transport**

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90 [12]. On distingue deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd.

Ce domaine conditionne que la pile à utiliser soit prête à l'utilisation dans un temps le plus court possible, a une durée de vie importante et a une densité de puissance volumique et massique acceptable. Sa convient avec les piles qui ont une température de fonctionnement basse, particulièrement les piles de type PEMFC.

### **I.7.3. Applications portables**

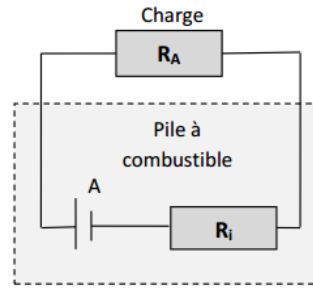
Dans les applications portables, sa concerne le téléphone mobile et l'ordinateur portable. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement. Les piles les plus utilisées dans ce domaine sont de type DMFC.

## **I.8. Caractéristiques de technologie des piles à combustible**

### **I.8.1. Densité de courant**

La réaction électrochimique étant des réactions de surface, la densité de courant est donc une grandeur caractéristique d'une pile à combustible. Elle est exprimée en ampères par centimètre carré (ramenée à la surface physique de l'électrode). Elle est en fonction de plusieurs paramètres (type de pile à combustible, débit de combustible,... etc).

### **I.8.2. Tension réelle**

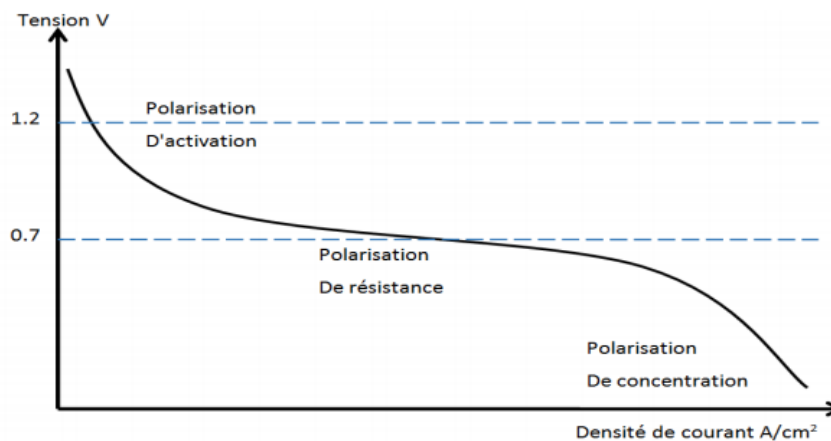


**Figure (I.7) :** Equivalent électrique d'une pile à combustible.

La tension théorique est celle d'une pile à combustible en circuit ouvert ne débitant pas. Lorsque l'on relie les bornes de la pile à combustible à la charge, elle sera traversée par un courant d'intensité  $i$ , la tension aux bornes de la pile diminue par rapport à la tension théorique suite aux phénomènes de polarisation dont on distingue trois formes :

- **Polarisation d'activation** qui concerne la diffusion des ions à l'interface électrode/électrolyte (transfert de charges).
- **polarisation de résistance** qui est la résultante de la résistance électrique des différents éléments de la pile et surtout de l'électrolyte.
- **polarisation de concentration** qui dépend de la concentration de l'électrolyte autour des électrodes.

Les trois différentes zones illustres dans la figure I.8.



**Figure (I.8) :** Influence de la polarisation sur la tension.

La courbe [tension]/ [densité de courant] caractérise une pile à combustible [13].

## I.9. Modélisation de la pile à combustible de type PEMFC

### I.9.1. Performances idéales d'une cellule PEMFC

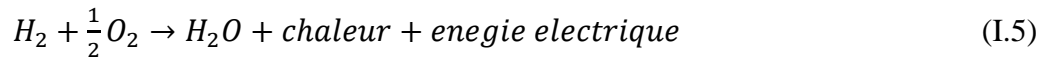
Pour les piles à combustible avec un électrolyte conducteur de protons (PEMFC), l'hydrogène est oxydé à l'anode et les protons sont transportés à travers la membrane vers la cathode selon la réaction:



Et à la cathode, l'oxygène est réduit selon la réaction :



Les électrons circulent par le circuit externe durant ces réactions. Une fois arrivés à la cathode, les protons se recombinaient avec les ions d'oxygène pour former de l'eau selon la réaction:



#### I.9.1.1. Energie libre de Gibbs

Le travail  $W_{el}$ , ou énergie électrique, fourni par une cellule de pile correspond au déplacement des charges électriques (ions et électrons) entre les deux niveaux de potentiel de ses électrodes. Il est égal à la variation d'enthalpie libre au cours de la réaction chimique effectuée:

$$W_{el} = \Delta G \quad (I.6)$$

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

$$W_{el} = -nFE \quad (I.7)$$

Alors:

$$\Delta G = -nFE \quad (\text{I.8})$$

- $n$  : nombre d'électrons échangés dans la réaction électrochimique élémentaire ( $n = 2$ ).
- $F$  : constante de Faraday (charge électrique d'une mole d'électrons ( $F = 96485 \text{ C}$ )).  
 $F = |e^-| N = (1.602 \cdot 10^{-19})(6.023 \cdot 10^{23}) \approx 96488 \text{ [C/mol]}$
- $N$  : nombre d'Avogadro.
- $E$  : tension idéale dite aussi tension réversible ( $i=0$ ).

D'autre part, d'après la seconde loi de la thermodynamique, la variation de l'énergie libre de Gibbs est donnée comme suit:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (\text{I.9})$$

Avec:

- $\Delta H$  : la variation de l'enthalpie en [J/mol].
- $\Delta S$  : la variation de l'entropie en [J/mol/K].
- $T$  : la température de fonctionnement de la pile en [K].

### I.9.1.2. Equation de Nernst

Le bilan d'une réaction chimique s'écrit généralement sous la forme suivante:



$A$  et  $B$  sont les réactants et  $C$  est le produit de la réaction.  $x$ ,  $y$  et  $z$  sont les coefficients stœchiométriques.

Les variations de l'énergie libre de Gibbs dépendent de la température mais aussi de la pression des gaz par l'intermédiaire de la loi de Nernst:

$$\Delta G = \Delta G^0 - RT \ln \left( \frac{a_A^\alpha a_B^\beta}{a_C^\gamma} \right) \quad (\text{I.11})$$

- $\Delta G^0$  : la variation de l'énergie libre de Gibbs à pression standard (1bar $\approx$ 1atm) qui dépend de la température.
- $R$  : constante des gaz parfaits ( $R=8.314 \text{ [J/mol/K]}$ ).

- $T$  : la température de fonctionnement en [K].
- $a$  : l'activité (sans unité).

Substituant les équations dans on obtient:

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{a_A^\alpha a_B^\alpha}{a_C^\gamma}\right) \quad (\text{I.12})$$

Cette équation est la forme générale de la loi de Nernst.

Dans notre cas, les réactants sont des gaz considérés parfaits; l'activité est:

$$E = \frac{P_{partielle}}{P_0} \quad (\text{I.13})$$

$P_{H_2}$  et  $P_{O_2}$  sont respectivement les pressions partielles de l'hydrogène et de l'oxygène à l'interface de la membrane.

L'eau produite peut être sous une forme gazeuse, ou sous une forme liquide. Mais à raison qu'une pile PEM fonctionne à température inférieure à 100°C, donc on prend le cas où l'eau est sous forme liquide, où son activité est égale à 1.

Les valeurs des coefficients stœchiométriques sont :  $x=1$ ,  $y=1/2$  et  $z=1$ .

L'équation précédente devient alors pour  $n = 2$  :

$$E = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln(P_{H_2}(P_{O_2})^{1/2}) \quad (\text{I.14})$$

### I.9.1.3. Les débits molaires

L'ensemble des débits molaires qu'on peut les définir sont :

- Le débit d'hydrogène qui entre dans le compartiment anodique définie par  $q_{H_2}^{in}$ .
- Le débit d'oxygène qui entre dans le compartiment cathodique définie par  $q_{O_2}^{in}$ .
- Le débit d'hydrogène consommé ce qui réagit avec l'oxygène pour former de l'eau et de l'électricité définie par  $q_{H_2}^r$ .
- Le débit d'hydrogène qui sort de la pile  $q_{H_2}^{out}$ .

### I.9.1.4. Les pressions partielles

#### a) Pression partielle dans le canal anodique $P_{H_2}^*$

Dans le canal anodique, le courant de gaz est un mélange de  $H_2$  et  $O_2$ . Le flux molaire de l'eau (en phase gazeuse) normal à la surface anodique peut être mis à zéro selon les hypothèses. Dans le processus de transport à une dimension le long de l'axe, la diffusion de l'eau peut être simplifiée par :

$$\begin{aligned} \frac{dx_{H_2O}}{dx} &= \frac{RT}{P_a} \left( \frac{x_{H_2O} N_{H_2} - x_{H_2} N_{H_2O}}{D_{H_2O,H_2}} \right) \\ &= \frac{RT}{P_a} \left( \frac{x_{H_2O} N_{H_2}}{D_{H_2O,H_2}} \right) \end{aligned} \quad (I.15)$$

Le flux superficiel de l'eau est très petit devant celui de l'hydrogène d'où on néglige le terme  $x_{H_2} N_{H_2O}$  devant  $x_{H_2O} N_{H_2}$ . Le flux molaire peut être déterminé par la loi Faraday.

$$N_{H_2} = \frac{I_{den}}{2F} \quad (I.16)$$

Avec :

$I_{den}$ : Densité de courant [ $A/m^2$ ].

$F$ : Constante de Faraday (96487 [coulombes/mole])

En intégrant l'expression par rapport au canal de l'anode à la surface du catalyseur, on a :

$$x_{H_2O}^* = x_{H_2O}^{channel} \exp\left(\frac{RT I_{den} l_a}{2F P_a D_{H_2O,H_2}}\right) \quad (I.17)$$

Avec:

$x_{H_2O}^{channel}$ : Fraction molaire de  $H_2O$  du canal.

$l_a$  : Epaisseur entre l'anode et le catalyseur [m]

$P_a$  : Pression de l'anode [pascal].

$D_{H_2O,H_2}$  : Diffusivité entre  $H_2O$  et  $H_2$  [ $m^2/s$ ].

Comme  $x_{H_2O}^* + x_{H_2}^* = 1$ , la pression effective partielle de  $H_2$  est :

$$P_{H_2O}^* = \frac{P_{H_2O}^*}{x_{H_2O}^*} (1 - x_{H_2O}^*) \quad (I.17)$$

### b) Pression partielle dans le canal cathodique $P_{O_2}^*$

Les gaz circulant dans le canal cathodique sont  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$  et  $CO_2$ , la diffusion de  $H_2O$  sur le côté cathodique peut être obtenue à partir de :

$$\frac{dx_{H_2O}}{dx} = \frac{RT}{P_c} \left( \frac{x_{O_2} N_{H_2O} - x_{H_2O} N_{O_2}}{D_{H_2O, O_2}} \right)$$

$$\frac{dx_{H_2O}}{dx} = \frac{RT}{P_c} \left( \frac{-x_{H_2O} N_{O_2}}{D_{H_2O, O_2}} \right) \quad (I.17)$$

Comme pour l'analyse de l'anode, la fraction molaire efficace de l'eau à l'interface catalyseur de la cathode peut être trouvée comme suit :

$$x_{H_2O}^* = x_{H_2O}^{channel} \exp\left(\frac{RT I_{den} l_c}{4F P_c D_{H_2O, O_2}}\right) \quad (I.18)$$

Avec:

$l_c$ : Epaisseur entre la cathode et le catalyseur [m].

$P_c$ : Pression de la cathode.

$D_{H_2O, O_2}$  : Diffusivité entre  $H_2O$  et  $O_2$  [ $m^2/s$ ].

Grâce à des procédures d'analyse similaires, la fraction molaire efficace du  $N_2$  et  $CO_2$  peut également être déterminée par :

$$x_{N_2}^* = x_{N_2}^{channel} \exp\left(\frac{RT I_{den} l_c}{4F P_c D_{N_2, O_2}}\right) \quad (I.19)$$

$$x_{CO_2}^* = x_{CO_2}^{channel} \exp\left(\frac{RT I_{den} l_c}{4F P_c D_{CO_2, O_2}}\right) \quad (I.20)$$

La fraction molaire efficace de l' $O_2$  est:

$$x_{O_2}^* = 1 - x_{H_2O}^* - x_{N_2}^* - x_{CO_2}^* \quad (I.21)$$

Et la pression effective partielle d'O<sub>2</sub> correspondante est :

$$P_{O_2}^* = \frac{P_{H_2O}^*}{x_{H_2O}^*} x_{O_2}^* = \frac{P_{H_2O}^*}{x_{H_2O}^*} (1 - x_{H_2O}^* - x_{N_2}^* - x_{CO_2}^*) \quad (I.22)$$

Les pressions P\*<sub>H2</sub> et P\*<sub>O2</sub> données par les équations précédent seront utilisées dans l'équation de Nernst pour trouver la tension de sortie de la pile à combustible.

## I.9.2. Performances réelles d'une cellule PEMFC

### I.9.2.1. Les pertes ohmiques

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qui oppose les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. Elles sont données par l'équation suivante:

$$V_{ohm} = R_t i \quad (I.23)$$

R<sub>t</sub>: résistance totale d'une cellule exprimée en [ $\Omega \cdot cm^2$ ] ;

i: la densité de courant exprimée en [ $A/cm^2$ ].

### I.9.2.2. Les pertes d'activation

Les pertes d'activation 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.

$$V_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \times \ln(C_{O_2}) + \xi_4 T \times \ln(I_{PAC}) \quad (I.24)$$

CO<sub>2</sub>: 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/cm<sup>3</sup>)

$\xi_i$  : Coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile où  $i = 1, \dots, 7$ .

T: Température opératoire absolue de la pile,

B: constante d'activation de tension ( $A^{-1}$ )

C: facteur d'échelle m/s.

I: Courant électrique(A).

### I.9.2.3. Les pertes de concentration

Des gradients de concentration se forment lorsqu'il y a une perte de potentiel aux électrodes en raison de l'incapacité du système à maintenir la concentration initiale des réactifs. La polarisation de concentration peut être causée par un certain nombre de facteurs: mauvaise diffusion des gaz à travers les électrodes poreuses, dissolution des réactifs ou des produits dans l'électrolyte, diffusion des réactifs ou des produits du site de réaction dans l'électrolyte ou vice versa. ont ajouté qu'à des densités de courant élevées, la vitesse de transport lente des réactifs ou des produits vers le site de réaction est la principale contribution à la polarisation de concentration.

Ces pertes sont données par la relation suivante :

$$V_{conc} = -\frac{RT}{nF} \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (I.23)$$

$V_{conc}$ : pertes par diffusion globale en [V].

$i_L$ : La densité de courant limite (maximale) en [A/cm<sup>2</sup>].

### I.10.3. Expression de la tension de sortie de la pile à combustible

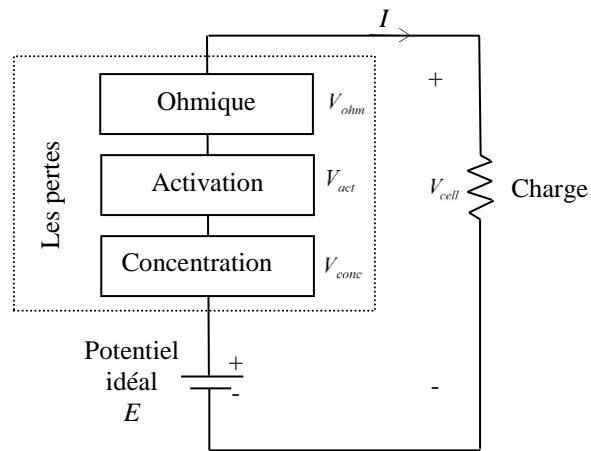
En appliquant le modèle de la tension donné dans précédemment, l'expression de la tension en charge aux bornes d'une cellule est comme suit :

$$V_{cell} = E - V_{ohm} - V_{act} - V_{conc} \quad (I.24)$$

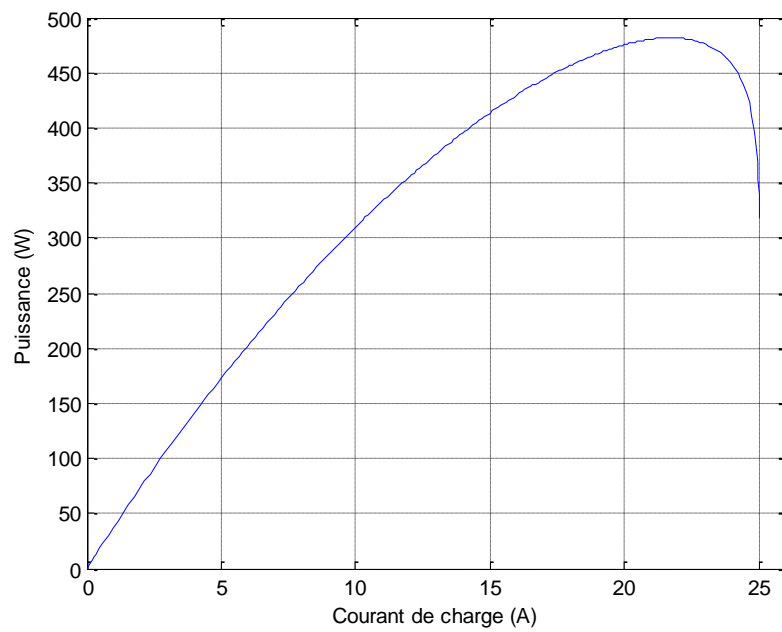
La tension à la sortie du 'stack' est calculée par cette expression :

$$V_S = N_{cell} V_{cell} \quad (I.25)$$

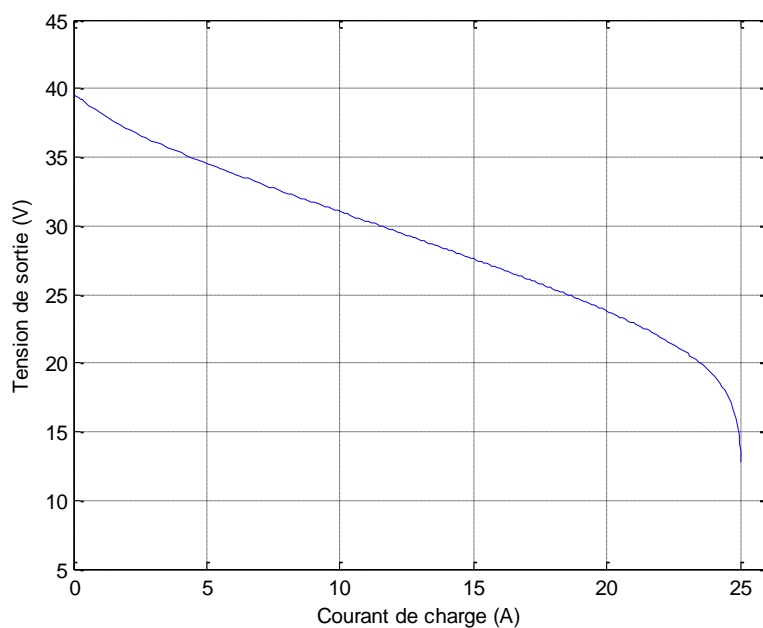
La puissance est définie comme le produit entre le courant et la tension figure (I.10), Elle permet de décrire la courbe caractéristique densité de Puissance /Densité de courant (par cellule).



**Figure (I.9) :** Circuit équivalent de la pile PEMFC.



**Figure (I.10) :** Caractéristique Puissance/Courant (puissance par cellule).



**Figure (I.11):** Caractéristique Tension/Courant (tension par cellule).

Les paramètres de simulation de la PEMFC dans le tableau suivant:

Paramètre	Valeur	Unité	Représentation
$T$	343	K	Température absolue
$R$	8.3143	J/(mol.K)	Constante universelle des gaz
$N_{cell}$	48	-	Nombre des cellules dans le « stack »
$F$	96487	C/mol	Constante de Faraday
$P_a$	1.5	atm	Pression globale du gaz à l'anode
$P_c$	1	atm	Pression globale du gaz à la cathode
$E^0$	1.18	V	Tension standard

**Tableau (I.2) :** Paramètre de simulation de la PEMFC.

## I.10. Les avantages et les inconvénients des piles à combustibles

### I.10.1. Les avantages

Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique, de l'automobile. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages [16] :

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

### **I.10.2. Les inconvénients**

Si les piles sont si intéressantes, pourquoi ne les trouve-t-on pas sur le marché ? En fait, il reste de nombreux points faibles qui sont à régler [16]:

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

### **I.11. Conclusion**

Les recherches scientifiques et techniques ont contribué à faire largement apparaître les piles à combustible comme une solution prometteuse aux problèmes de l'énergie et de la pollution.

Des applications potentielles ont été imaginées dans de nombreux secteurs: le transport, la production décentralisée d'électricité et la cogénération, les appareils nomades (téléphone, ordinateurs portables, etc...).

Dans ce travail nous sommes intéressés dans ce travail qu'à la pile à membrane polymère échangeuse de protons (PEMFC). Cette technologie semble effectivement être la plus mûre et la plus proche du stade commercial. Elle est considérée actuellement comme étant la mieux adaptée pour le secteur d'automobile.



# **Les Véhicules Electriques**

---

## II.1. Introduction

Dans un temps où l'activité humaine et le potentiel économique ne cessent d'évoluer, le XX<sup>ème</sup> siècle a connu un réchauffement climatique jamais enregistré dans les temps de nos ancêtres. Les causes ne sont pas tant à rechercher dans la nature que dans la concentration dans l'atmosphère de  $CO_2$  et des autres gaz dus à l'activité humaine [17].

Le secteur des transports est désormais le secteur le plus émetteur de gaz à effet de serre, c'est là pour ça que l'industrie de l'automobile s'intéresse précieusement au phénomène de la pollution afin d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre et de contribuer dans son domaine à une vie plus saine, et propose le véhicule électrique pour améliorer la qualité de l'air grâce à des émissions nulles en échappement. Les véhicules électriques (VEs) et hybrides (VHEs) constituent actuellement une alternative possible aux véhicules conventionnels, permettant aux constructeurs de véhicules de pouvoir répondre aux exigences demandées par les utilisateurs des véhicules (performances et consommation du carburant) et les lois de protection de l'atmosphère (réduction des émissions de polluants) [18].

## II.2. Historique

Aujourd'hui, la voiture propre est un problème sur lequel travaillent nombre d'industriels de l'automobile, pour répondre aux problèmes que pose la pollution atmosphérique. La voiture électrique, que l'on présente d'ailleurs comme "la solution" au problème de la pollution des gaz d'échappement, ne date pas d'hier. Déjà, à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, au début de l'automobile, plusieurs modes de propulsion étaient en compétition (le moteur électrique, le moteur à vapeur et le moteur thermique). D'ailleurs, les performances des premiers prototypes de véhicule électrique n'avaient rien à envier à celles des véhicules à propulsion thermique de l'époque.

Le premier véhicule électrique fit son apparition dans les années 1830 (1832-1839). La première personne à avoir inventé une voiture électrique fut Robert Anderson, un homme d'affaire écossais. Il s'agissait plutôt d'une carriole électrique. Vers 1835, l'américain Thomas Davenport construit une petite locomotive électrique [19].

Vers 1838, l'écossais Robert Davidson arriva avec un modèle similaire qui pouvait rouler jusqu'à 6 km/h. En 1859, le français Gaston Planté inventa la batterie rechargeable au plomb acide, qui sera améliorée par Camille Faure en 1881. En 1884, on voit sur la photo de la figure II.2, Thomas Parker assis dans une voiture électrique, qui est la première au monde.



**Figure (II.1) :** Première voiture au monde.

En 1899 en Belgique, une société a construit " La Jamais Contente ", la première voiture électrique à dépasser les 100 km/h (elle atteindra les 105 km/h). La voiture était pilotée par le belge Camille Jenatzy et elle était en forme de torpille (Figure II.2). Dès 1900, la voiture électrique connaît ses beaux jours. Plus du tiers des voitures en circulation sont électriques, le reste étant des voitures à essence et à vapeur.

Dans les années 1920, certains facteurs mèneront au déclin de la voiture électrique. On peut citer leur faible autonomie, leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que ceux à essence.

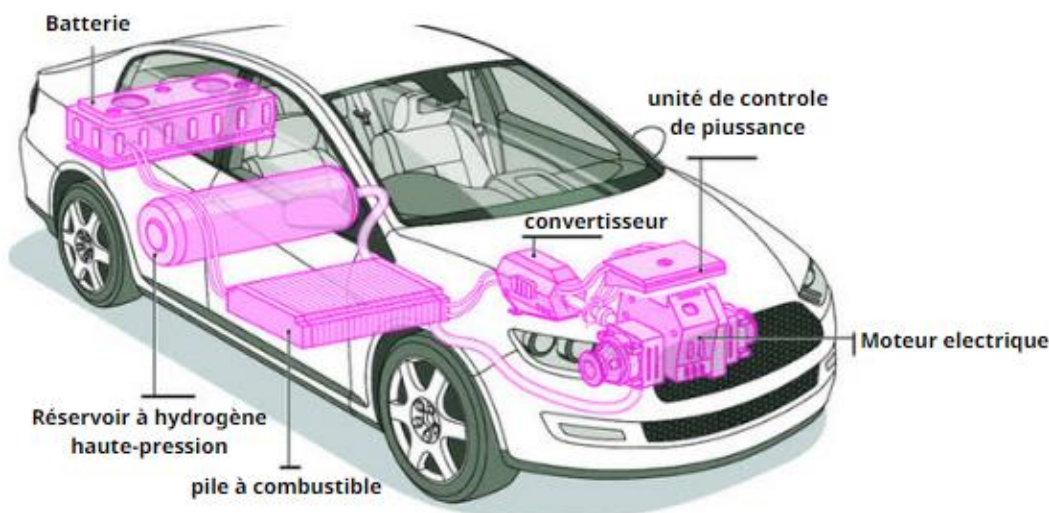


**Figure (II.2) :** Première voiture électrique créée par Camille Jenatzy en 1899.

### II.3. Définition d'un véhicule électrique

Le véhicule électrique VE est une automobile dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Contrairement aux véhicules à carburant, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue [20].

Compte tenu des progrès scientifiques et technologiques accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, les systèmes de gestion de l'énergie,... etc. beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions sont explorées pour développer ce mode de propulsion. Le système de propulsion électrique a une architecture très simple. Il est constitué d'un actionneur électrique, un dispositif de transmission, et des roues (figure II.3) [21].



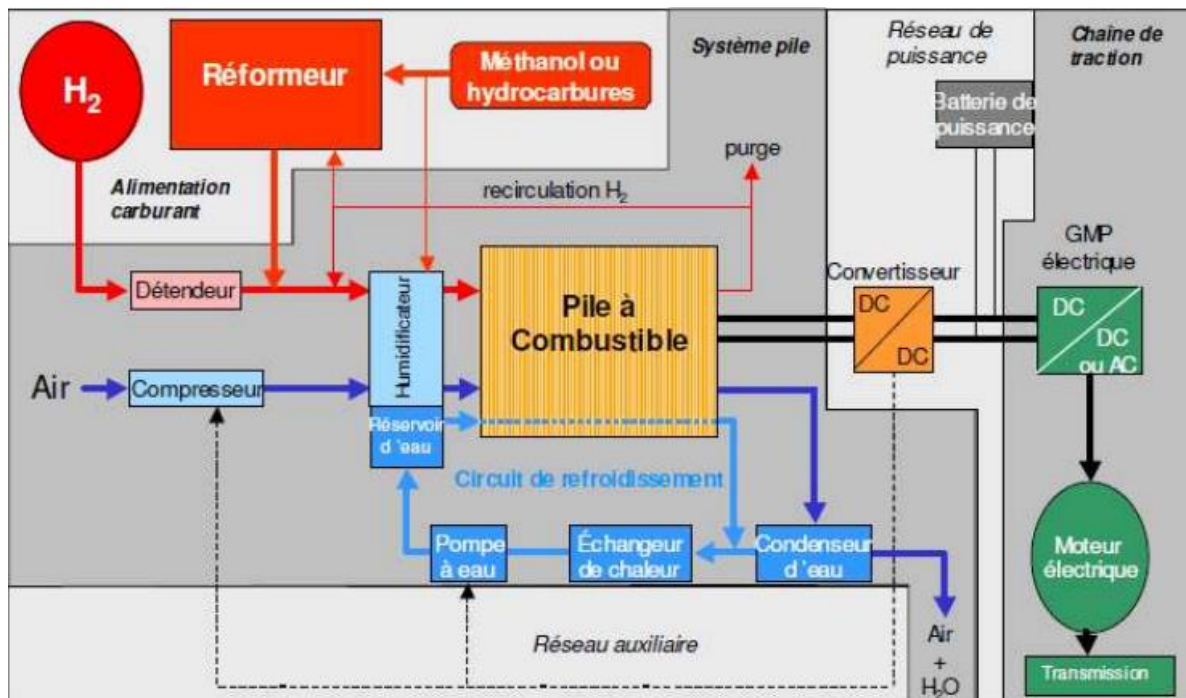
**Figure (II.3):** Système de propulsion d'un VE.

### II.4. Architecture d'un véhicule à pile à combustible

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

- ✓ Un stockage d'hydrogène ou un système de production d'hydrogène (reformeur par exemple).
- ✓ Une pile à combustible.
- ✓ Un système de stockage d'électricité fonctionnant en parallèle avec la pile (batterie ou super capacités).

- ✓ Un moteur électrique entraînant les roues,
- ✓ Un compresseur d'air (les piles fonctionnent avec de l'air à une pression comprise entre 1,2 et 5 bars absolus).
- ✓ Des échangeurs de chaleurs et un radiateur pour évacuer la chaleur produite par la pile.
- ✓ Divers composants spécifiques: pompes, capteurs, séparateurs, convertisseur de courant, contrôle commande...



**Figure (II.4) :** Schéma général d'un véhicule à pile à combustible - Source Renault – PSA, 1998.

La qualité, la fiabilité, les coûts de ces composants seront évidemment des facteurs clés d'une introduction plus ou moins rapide de ce type de véhicule [1].

## II.5. Classification des véhicules électriques

### II.5.1. Véhicules tout électrique

#### II.5.1.1. Véhicules électriques à batteries rechargeables par prise de courant

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

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

### II.5.1.2. Véhicules électriques à alimentation par une pile à combustible

Les VE à pile à combustible sont semblables aux autres véhicules électriques sauf qu'ils produisent leur propre électricité à bord. La source de cette électricité est la pile à combustible, un dispositif électrochimique semblable à une batterie à plusieurs égards. Plutôt que de stocker et relâcher l'énergie électrique comme une batterie, une pile à combustible produit toutefois de l'électricité par réaction chimique aussi longtemps qu'elle reste alimentée en carburant [22].

### 1.5.2. Véhicules hybrides

Il existe trois principales topologies d'hybridation: hybridation série, hybridation parallèle et hybridation série-parallèle:

- **Hybridation série:** Le véhicule est propulsé uniquement par un moteur électrique. Ce moteur est alimenté par des batteries qui sont rechargées par une deuxième source d'énergie et un freinage régénératif. La seconde source peut être thermique ou électrique.

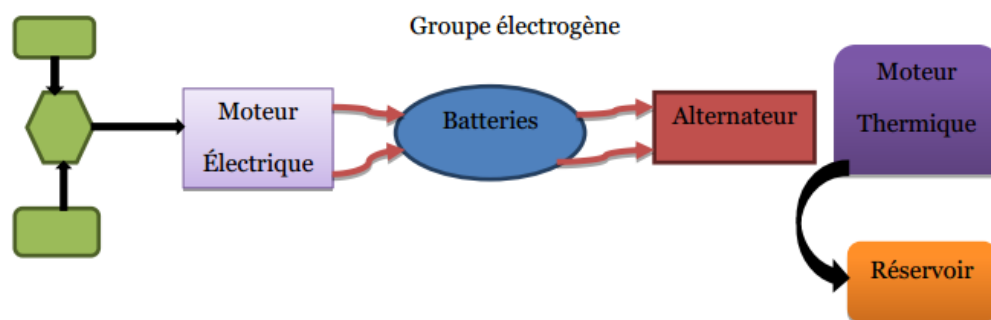
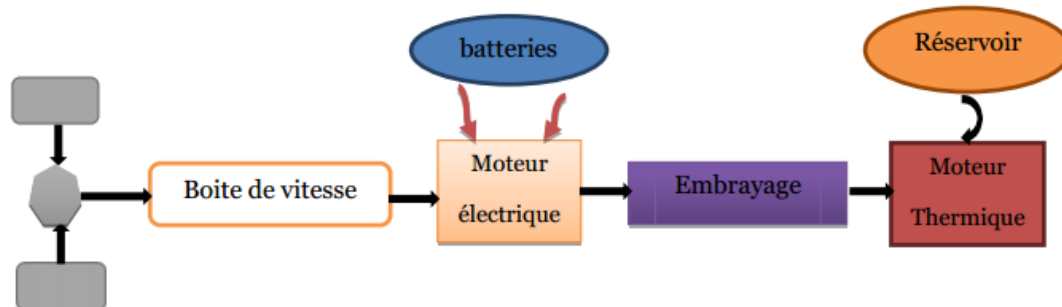


Figure (II.5) : Architecture hybride série.

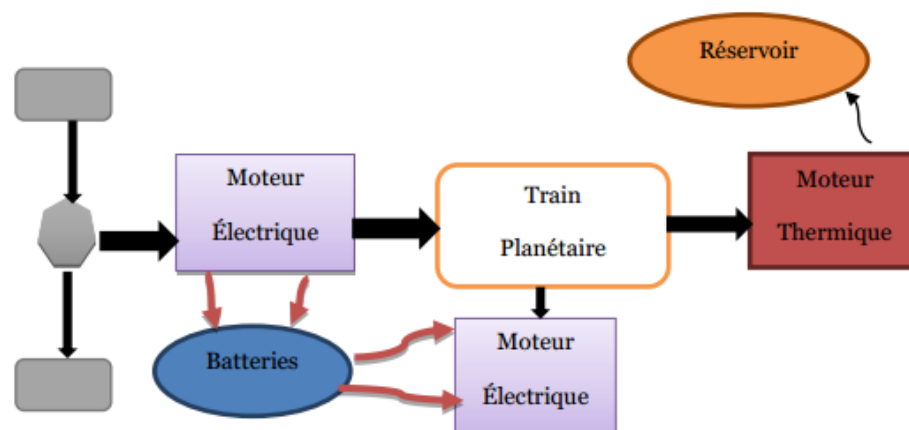
- **Hybridation parallèle :** Si l'hybridation est électrique-thermique, les deux moteurs additionnent mécaniquement pour propulser le véhicule. Si l'hybridation est électrique-électrique, la puissance nécessaire pour propulser le véhicule est divisée

entre les deux sources d'énergie selon leurs dimensions à l'aide d'un système de commande électrique.



**Figure (II.6):** Architecture hybride parallèle (arbre simple).

- **Hybridation série-parallèle:** Cette topologie combine les deux principales topologies citées précédemment. En effet, si l'hybridation est électrique-thermique, un train épicycloïdale permet aux deux moteurs de tourner à différentes vitesses afin d'améliorer les performances du véhicule. Si l'hybridation est électrique-électrique, selon la méthode de gestion de l'énergie, le système de commande électrique sélectionne la topologie adéquate. En partant de ces trois topologies, on peut concevoir d'autres plus complexes et plus spécifiques aux objectifs des constructeurs [23].



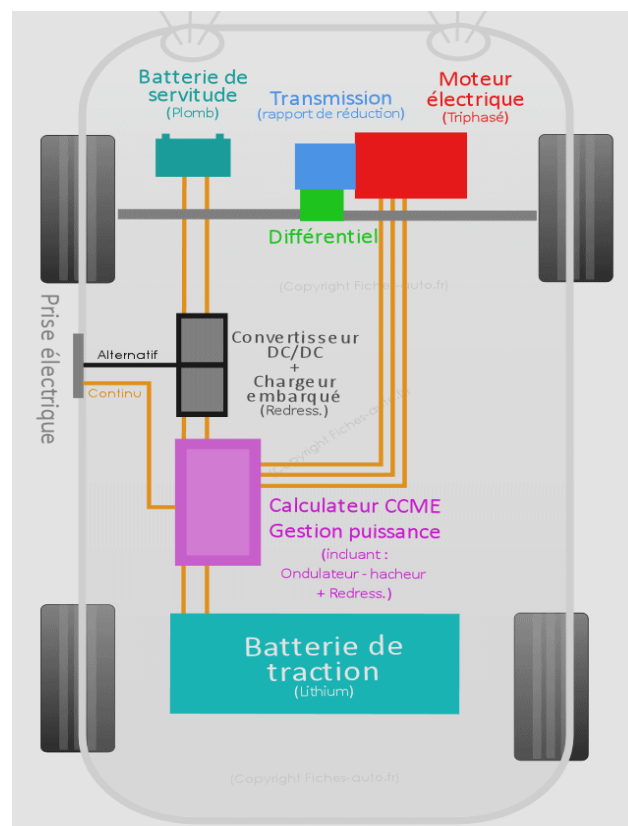
**Figure (II.7):** Architecture hybride mixte.

## II.6. Fonctionnement d'un véhicule électrique

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

La batterie est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. Le régulateur sert à régler l'intensité du courant qui alimente le moteur. Son fonctionnement est assez simple : lorsque le conducteur du véhicule appuie sur la pédale de l'accélérateur, la batterie libère du courant. Le convertisseur transforme alors le courant continu (DC) de la batterie en courant alternatif (AC) pour alimenter le moteur (cas d'un moteur AC).

Le convertisseur est une partie intégrante du moteur. Le point fort du véhicule électrique est la chaîne de transmission électromécanique. En effet, un véhicule a besoin d'un couple élevé à basses vitesses afin de pouvoir accélérer et d'un couple moins important à des vitesses de croisière. Ces spécificités sont celles d'un moteur électrique [24].



**Figure (II.8) :** Eléments du système de traction d'une voiture électrique.

## II.7. Description générale de la chaîne de traction

La chaîne de traction d'un VE est plus simple que celle d'un véhicule thermique. le choix et l'arrangement des composants qui constituent la chaîne de traction.

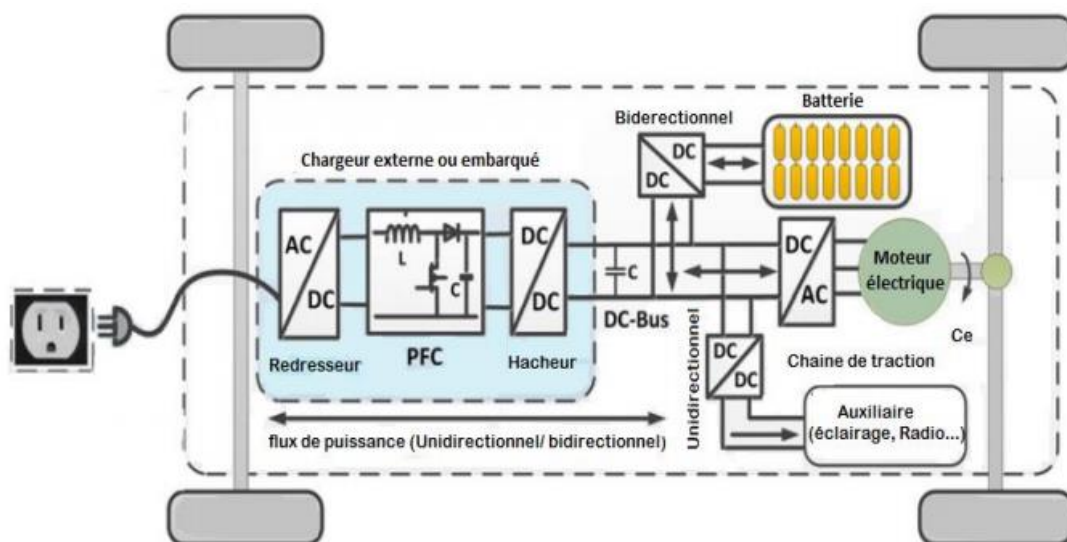


Figure (II.9): Structure de la chaîne de traction dans un VE.

Il s'agit, si l'on part du réseau d'alimentation alternatif, du chargeur de batteries, de la batterie électrochimique de la source embarquée d'énergie électrique, de l'ensemble convertisseur statique du moteur électrique et le contrôle et, enfin, de la transmission mécanique dont la fonction est d'adapter la caractéristique mécanique de la charge à celle du moteur.

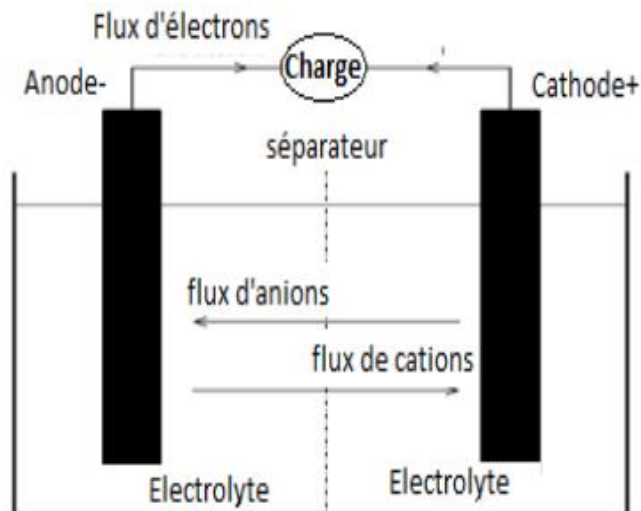
Pour l'analyse de la consommation totale, il faut aussi prendre en compte les auxiliaires comme le système de refroidissement (air ou eau) du moteur et de son convertisseur électronique, ainsi que la gestion des flux d'énergie entre eux restent au stade de la recherche [25].

## II.8. Stockage d'énergie

La source de stockage d'énergie est bien entendu la batterie, qui est associée à un convertisseur DC/DC qui doit être bidirectionnel. Le stockage de l'énergie est un obstacle majeur à l'adoption généralisée des véhicules électriques. La densité énergétique des batteries est inférieure à celle des produits pétroliers, ce qui se traduit par un poids plus important et une autonomie moindre. Le coût et le temps de charge d'une batterie sont beaucoup plus longs qu'avec une pompe à air, ce qui est un autre obstacle.

## I.9. La batterie

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



**Figure (II.10):** La vue interne d'une batterie.

Le principe de fonctionnement de celle-ci est que la réaction chimique entre les électrodes et l'électrolyte provoque une oxydoréduction. Dans ce cas, l'électrode négative subit une oxydation, c'est-à-dire que la réaction chimique libère des électrons, tandis que l'électrode positive subit une réduction, autrement dit elle absorbe des électrons. Ce déséquilibre des charges électriques génère la F.E.M (Force électro Motrice) de l'accumulateur [26].

Il existe différents types de batteries:

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

Le tableau donne une comparaison de différentes technologies des batteries:

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

**Tableau II.1 :** Tableau comparatif des technologies des batteries.

## II.10. Le chargeur

Les chargeurs de batteries sont spécifiques au type d'alimentation électrique à leur emplacement (embarqués ou non au sein du véhicule) et au mode de transmission de l'énergie. Pendant la charge, la batterie se comporte comme un récepteur de courant [25]. Deux grands types des chargeurs ont été définis pour cette fonction :

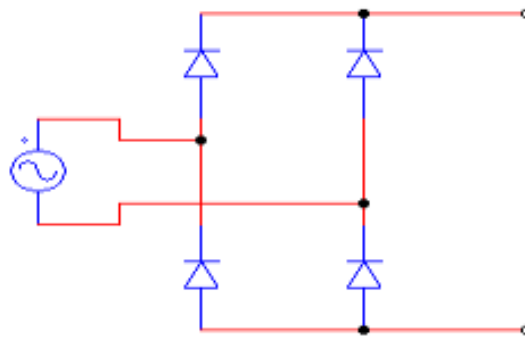
- **les chargeurs de type "lents":** Le chargeur de type lent est un dispositif d'une moyenne, généralement de 3kW. Il nécessite pour une charge complète du pack de batteries une durée de 5 à 8 heures. Cette opération peut donc s'effectuer en heures creuses.
- **les chargeurs de type "rapides":** Les structures, dont la puissance transmise est supérieure à 10 kW, ont été classées dans les chargeurs dits rapides. La puissance maximale atteint aujourd'hui 150 kW. L'objectif de ce type de montage est de permettre, en peu de temps (inférieur à 30 min.) Une recharge partielle (80%) des batteries [26].

## II.11. L'électronique de puissance dans le véhicule électrique

### II.11.1. Les redresseurs (AC/DC)

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

à courant continu qui peut être stockée dans une batterie d'accumulateurs électrochimiques ou dans une batterie de grande capacité [27].



**Figure (II.11):** Schéma détaillé d'un redresseur.

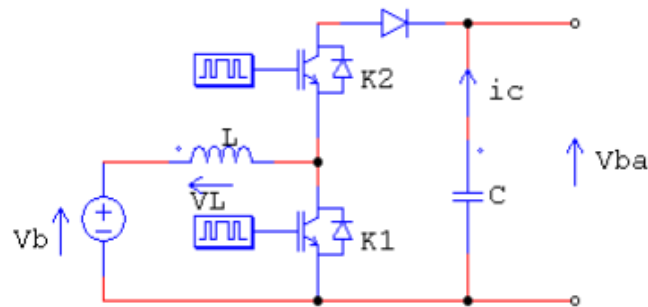
### II.11.2. Les onduleurs (DC-AC)

Dans les véhicules électriques équipés d'un moteur à courant alternatif, il est nécessaire d'interposer entre la source d'énergie et le ou les moteurs de traction un dispositif de conversion appelé onduleur, qui transforme l'énergie électrique à courant continu en énergie électrique à courant alternatif et qui permet de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de la vitesse du véhicule tant en mode traction qu'en mode freinage [27,28].

### II.11.3. Les hacheurs (DC-DC)

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

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



**Figure (II.12) :** Schéma détaillé d'un Hacheur élévateur bidirectionnel.

## II.12. Le moteur électrique

C'est un composant très simple au cœur de la voiture électrique, il joue sur les forces d'interactions (vecteurs forces) entre un électroaimant et un aimant permanent. Il est utilisé pour convertir l'énergie électrique qui provient de la source, en énergie mécanique utilisée pour propulser le véhicule durant les phases de traction, ou inversement l'énergie mécanique en énergie électrique lors des phases de freinage, pour permettre la récupération d'énergie (régénération) Lors du freinage, la chaîne mécanique devient en partie la source de puissance, et la source d'énergie principale (batterie) devient le récepteur [28].

### II.12.1. Le moteur à courant continu (MCC)

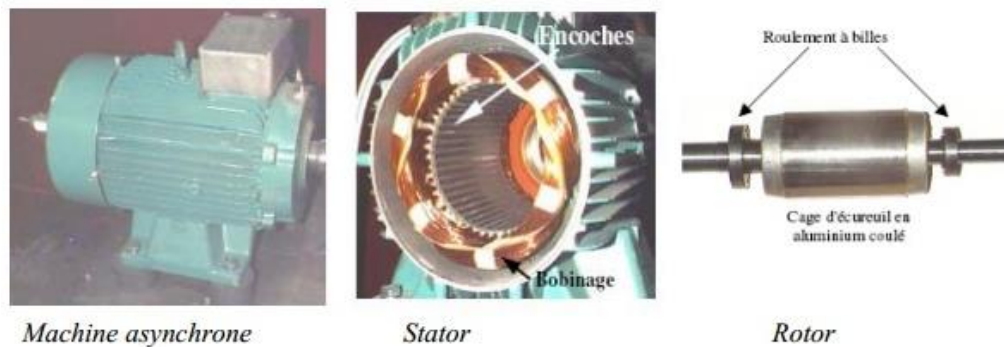
La source d'énergie provenant de la batterie étant à courant continu, le choix d'un moteur à courant continu semble un choix évident. Historiquement, les entraînements utilisant des moteurs à courant continu ont été employés bien en avant dans les véhicules électriques parce qu'ils offrent un contrôle de vitesse simple.

De plus, ce type de moteur dispose d'excellentes caractéristiques pour la propulsion électrique (courbe du couple très favorable à faible vitesse). En revanche, leur fabrication est onéreuse et nécessite l'entretien du système balais-collecteur. Leur vitesse est limitée et ayant une faible puissance massique avoisinant en générale, les 0,3 à 0,5 kW/kg, alors que celle des moteurs à essence est de l'ordre 0,75 à 1,1 kW/kg. Ce qui les rend moins fiables et non appropriés dans ce domaine d'application [21].

### II.12.2. Le moteur asynchrone (MAS)

Le moteur asynchrone est formé d'un stator et d'un rotor:

- ✓ **Stator:** la partie fixe du moteur. Il comporte trois bobinages (ou enroulements) qui peuvent être couplés en étoile (Y) ou en triangle ( $\Delta$ ) selon le réseau d'alimentation.
- ✓ **Rotor:** la partie tournante du moteur. Cylindrique, il porte soit un bobinage (d'ordinaire triphasé comme le stator) accessible par trois bagues et trois balais, soit une cage d'écurie non accessible, à base de barres conductrices en aluminium. Dans les deux cas, le circuit rotorique est mis en court-circuit (par des anneaux ou un rhéostat) [26].



**Figure (II.13):** photo d'une machine asynchrone avec le Stator et le Rotor qui la constituent.

La machine asynchrone, du part sa simplicité de fabrication et d'entretien est actuellement la machine la plus répandue dans le secteur industriel et présente de bien meilleures performances que les autres types de machines. Par ailleurs, ces machines possèdent un couple massique, un rendement et un facteur de puissance plus faible que les machines à aimants.

### II.12.3. Le moteur synchrone

Bien que plus délicats à piloter, plus coûteux et potentiellement moins robuste, le choix du moteur synchrone s'est imposé dans les véhicules électriques et hybrides. La machine synchrone offre le meilleur rendement en mode générateur et moteur. Le moteur synchrone se compose, comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. La seule différence se situe au niveau de la conception du rotor.

## II.13. Avantages et inconvénient des véhicules électriques

### II.13.1. Avantages

- ✓ Pas de moteur thermique, cela veut dire pas d'échappement donc pas de rejets de gaz à effet de serre, gaz polluants ou particules venant de la motorisation lorsque l'on roule.
- ✓ En France, l'origine en grande partie nucléaire de l'électricité du réseau garantit de faibles rejets de  $CO_2$  durant le cycle d'utilisation de la voiture.
- ✓ Pas de nuisances sonores.
- ✓ Pas de vidange, de filtre à air, de filtre à carburant, d'huile de boîte, etc. Un moteur électrique ne demande presque aucune attention et même les disques et plaquettes de freins durent plus longtemps grâce au freinage des moteurs électriques.
- ✓ Le coût d'une charge de batterie en électricité est bien moindre que celui d'un plein de carburant [29].

### II.13.2. Inconvénients

- ✓ Une voiture électrique coûte actuellement cher à développer, à produire et donc à acheter.
- ✓ Même si la capacité d'autonomie s'améliore, les distances parcourues avec une voiture électrique sont inférieures à la voiture thermique.
- ✓ Programmer un long trajet nécessite de prévoir des détours pour recharger. A cela s'ajoute le temps de charge.
- ✓ Plus facile de faire la recharge quand on est propriétaire de maisons individuelles (plus compliqué en immeubles).
- ✓ Il faut inciter le recyclage des batteries lithium-ion.
- ✓ Durée de vie limitée de la batterie [29].

### II.14. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les véhicules électriques dans un contexte général en présentant les différentes technologies disponibles et les éléments de base de la chaîne de traction de ces derniers. Cela nous a permis d'effectuer nos choix concernant l'architecture, le moteur, les convertisseurs, le stockage d'énergies.



# **Modélisation d'un véhicule électrique à pile combustible**

---

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter un système de traction électrique à pile à combustible PEMFC. Ce modèle contient en plus de la pile à combustible, un hacheur, un onduleur et un moteur asynchrone.

Comme nous avons pu le constater dans le premier chapitre, le générateur à pile à combustible est un système complexe qui est composé de plusieurs actionneurs et sous-systèmes. L'utilisation de cette source d'énergie ne peut se faire sans la mise en place de commandes appropriées.

### III.2. Modèle de la chaîne de traction

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

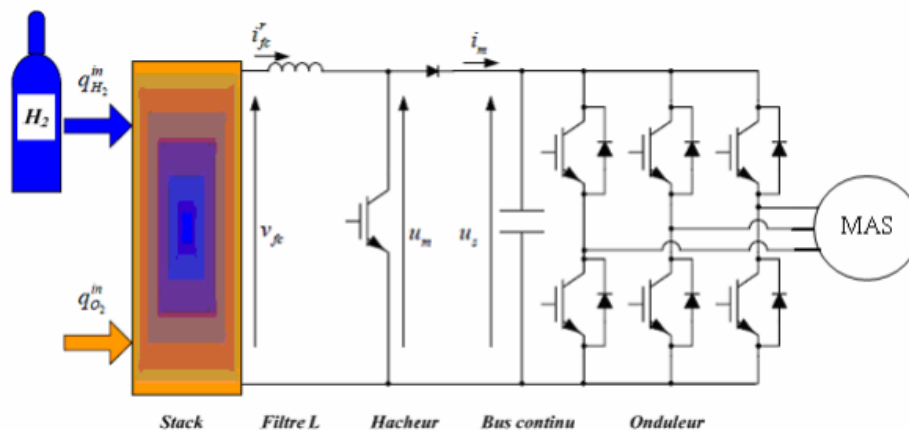


Figure (III.1): modèle complet du véhicule électrique.

### III.4. Modélisation des convertisseurs

#### III.4.1. Hacheur élévateur de tension (BOOST)

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

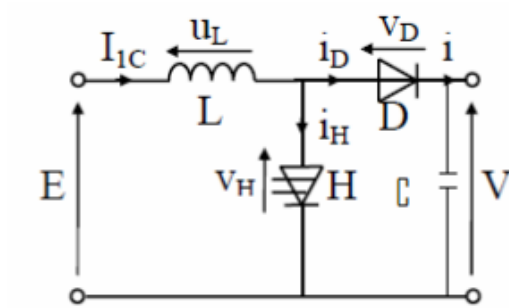


Figure (III.2): Montage du hacheur parallèle.

**a) H passant**

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

**b) H bloqué**

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

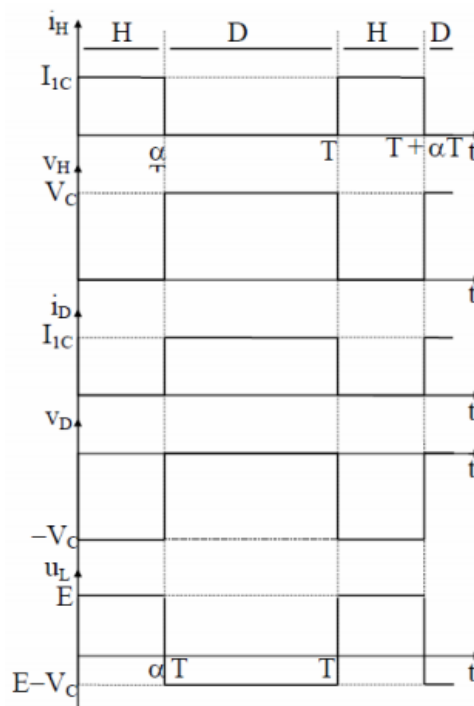


Figure (III.3): Allure des tensions et des courants au niveau du hacheur.

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

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

On en déduit

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

Soit

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

D'où finalement

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

### III.4.2. L'onduleur de tension

L'onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue - alternative. Chaque bras de l'onduleur est constitué de deux transistors shuntés en antiparallèle par des diodes de récupération permettant de renvoyer le courant négatif vers le condensateur de filtrage mis à l'entrée de l'onduleur.

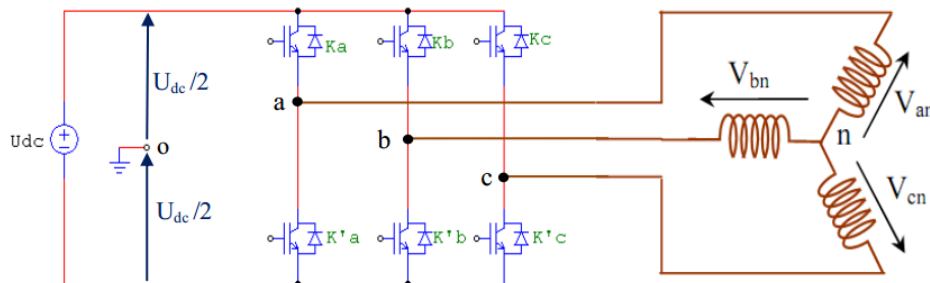


Figure (III.4): onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

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

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

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

$$i_e = [F][I] = F_1 i_a + F_2 i_b + F_3 i_c \quad (\text{III.6})$$

### III.4.2.1. Modélisation de l'onduleur de tension

Les hypothèses simplificatrices:

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

On a, donc:

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

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

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

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

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

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

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

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

Après la substitution aboutit à :

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

on obtient:

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

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

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

Telle que:

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

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

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

## III.5. La machine asynchrone

### III.5.1 Constitution et principe de fonctionnement

#### III.5.1.1 Définition

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif appelée aussi machine à induction, utilisée le plus souvent comme moteur, et caractérisée par le fait que son rotor ne

tourne pas à la même vitesse que le champ tournant dans l'entrefer qui est la vitesse de synchronisme, d'où le nom asynchrone [30,31,33-35].

### III.5.1.2. Constitution

Il se compose d'un inducteur fixe appelé stator et d'une induit mobile appelée rotor, qui est un transformateur de champ tournant dont le primaire et le stator et le secondaire sont court-circuités et libres de tourner est le rotor.

#### a) Stator

Le stator est la partie fixe de la machine, appelé aussi primaire, il est parfaitement feuilleté et comporte des encoches régulièrement réparties. Dans ces encoches sont logés trois enroulements identiques à  $p$  paires de pôles fictifs, qui créent un champ tournant lorsqu'ils sont parcourus par des courants alternatifs triphasés, leurs axes sont décalés d'un angle de  $\frac{2\pi}{3}$  [rd].

#### b) Rotor

C'est un cylindre fait de tôles empilées clavetées sur l'arbre du moteur, des encoches sont percées dans les tôles de la surface extérieur du cylindre, des conducteur passent dans ces encoches, ils sont réunis en court-circuit, l'ensemble forme un bobinage polyphasés ayant le même nombre de pôles que le stator. Il y a deux types de structure électrique pour le rotor :

- à **bagues** où les trois phases sont reliées à la boîte à bornes par l'intermédiaire de bagues collectrices.
- à **cage d'écureuil** où chaque encoche comporte une barre Figure (III.6)

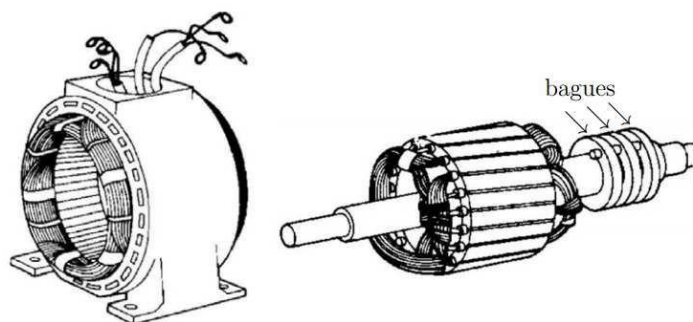
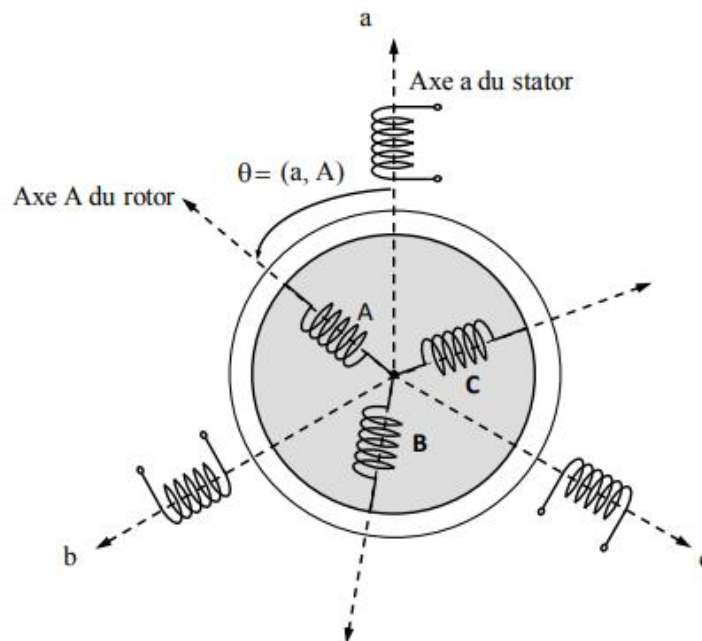


Figure (III.5): Machine asynchrone à bagues.



**Figure (III.6):** Rotor d'une machine asynchrone à cage.

### III.5.2. Modélisation de la machine asynchrone



**Figure (III.7):** Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.

#### III.5.2.1. Équations générales de la machine asynchrone triphasée :

La machine asynchrone peut être traduite par trois types d'équations :

- Equations électriques.
- Equations magnétiques.
- Equation mécanique.

#### III.5.2.2. Equations électriques

Les équations de tension des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques sont:

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \varphi_{sa} \\ V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \varphi_{sb} \\ V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \varphi_{sc} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

De même pour le rotor:

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \varphi_{ra} \\ V_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \varphi_{rb} \\ V_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \varphi_{rc} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : Tensions appliquées aux trois phases statoriques.

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : Courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$  : Flux totaux à travers ces enroulements.

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : Tensions rotoriques

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : Courants rotoriques

$\varphi_{ra}, \varphi_{rb}, \varphi_{rc}$  : Flux rotoriques

$R_s$  : Résistance d'une phase statorique.

$R_r$  : Résistance d'une phase rotorique

Les équations précédentes peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante:

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

Pour le rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

### III.5.2.3. Equations magnétiques

Les hypothèses simplificatrices citées antérieurement conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants de la machine asynchrone, ces relations s'écrivent matriciellement comme suit:

Pour le stator:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

Telque:

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T \quad (\text{III.20})$$

On désigne par:

$[L_s]$ : Matrice des inductances statoriques.

$[L_r]$ : Matrice des inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$ : Matrice des inductances mutuelles statoriques.

$[M_{rs}]$ : Matrice des inductances mutuelles rotoriques.

Où :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

Ainsi :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

Avec:

$l_s$ : Inductance propre d'une phase statorique.

$l_r$ : Inductance propre d'une phase rotorique.

$M_s$  : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

$M_r$ : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

$\theta$ : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statoriques et les axes rotoriques qui sont choisis comme axes des références.

$M$ : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase Correspondent du rotor.

#### III.5.2.4. Equations mécanique

L'équation mécanique est donnée par l'expression suivante:

$$C_{em} - C_r = j \frac{d\Omega}{dx} + f\Omega \quad (\text{III.24})$$

Avec :

$\Omega$ : est la vitesse de rotation de l'arbre du moteur.

$C_{em}$ : est le couple électromagnétique;

$C_r$ : est le couple résistant.

$j$ : moment d'inertie de l'arbre moteur;

$f$ : est le coefficient de frottement;

$P$ : nombre de paires de pôles.

Le couple électromagnétique est donné par l'expression qui suit :

$$C_{em} = P(i_{as}i_{bs}i_{cs}) \frac{d}{d\theta} \left( [M_{sr}] \begin{pmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{pmatrix} \right) \quad (\text{III.25})$$

Les équations précédées sont difficiles à résoudre à cause de :

- L'ordre des équations élevées ;
- Les matrices d'inductances mutuelles sont en fonction du temps.

### III.5.2.5. Modèle d'état de la machine asynchrone

La forme générale de l'équation d'état s'écrit de la façon suivante :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (\text{III.26})$$

Avec :

$[X] = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ \varphi_{s\alpha} \ \varphi_{s\beta}]^T$  : Vecteur d'état

$[U] = [V_{s\alpha} \ V_{s\beta}]$  : Vecteur de commande.

$[A]$  : Matrice évaluation d'état du système.

$[B]$  : Matrice du système de commande.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = -\left(\frac{R_t}{L_s\sigma}\right) i_{s\alpha} + \frac{1-\sigma}{MT_s\sigma} \varphi_{r\alpha} + \frac{1-\sigma}{M\sigma} \omega \varphi_{r\beta} + \frac{1-\sigma}{L_s\sigma} V_{s\alpha} \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = -\left(\frac{R_t}{L_s\sigma}\right) i_{s\beta} + \frac{1-\sigma}{MT_s\sigma} \varphi_{s\alpha} + \frac{1-\sigma}{M\sigma} \omega \varphi_{r\beta} + \frac{1-\sigma}{L_s\sigma} V_{s\beta} \\ \frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \varphi_{r\alpha} - \omega \varphi_{r\beta} \\ \frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} = -\frac{M}{T_r} i_{s\beta} - \omega \varphi_{r\alpha} - \frac{1}{T_r} \varphi_{r\beta} \end{array} \right. \quad (\text{III.27})$$

Avec :

$T_s = \frac{L_s}{R_s}$  et  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$  : constante de temps statorique et rotorique.

$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$  : Coefficient de dispersion.

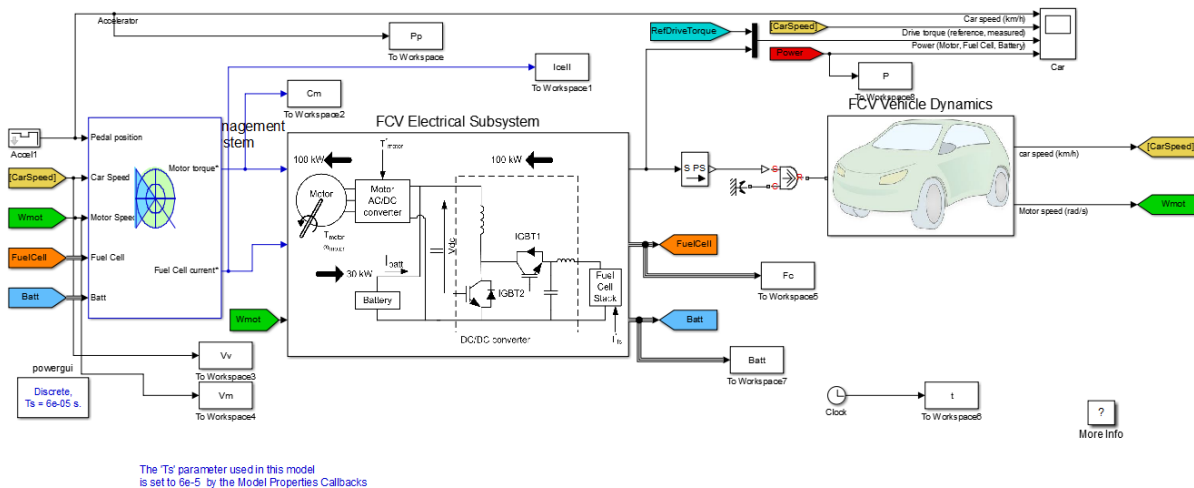
$$A = \begin{bmatrix} \frac{di_{\alpha s}}{dt} \\ \frac{di_{\beta s}}{dt} \\ \frac{d\varphi_{\alpha r}}{dx} \\ \frac{dy_{\beta r}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_s\sigma} \left( R_s + \frac{L_m^2}{t_r L_r} \right) & 0 & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r t_r} & -\frac{p L_m}{\sigma L_s L_r} \Omega \\ 0 & -\frac{1}{L_s\sigma} & -\frac{p L_m}{\sigma L_s L_r} \Omega & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r t_r} \\ \frac{L_m}{t_r} & 0 & -\frac{1}{t_r} & -P\Omega \\ 0 & \frac{L_m}{t_r} & P\Omega & -\frac{1}{t_r} \end{bmatrix} \quad (III.28)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s\sigma} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (III.29)$$

Le couple électromagnétique développé par la machine asynchrone donné par la relation suivante :

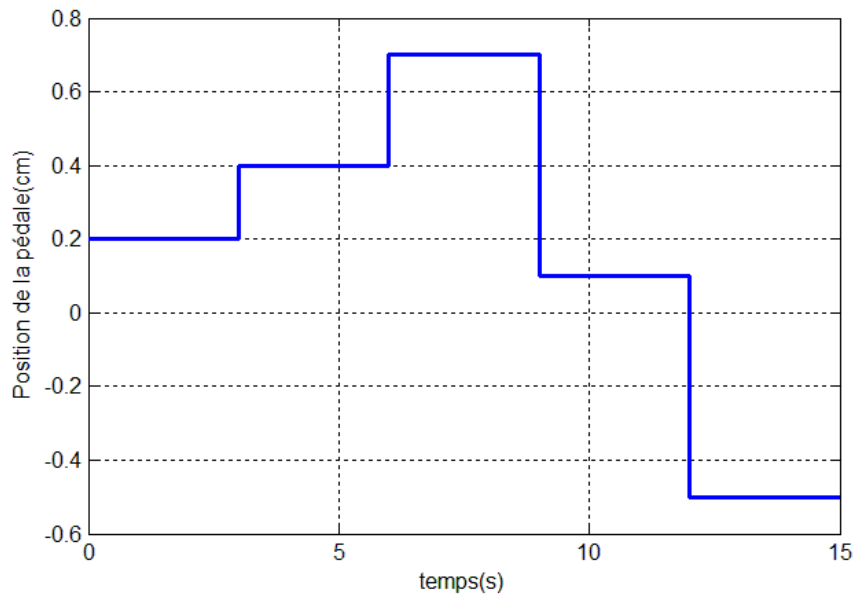
$$C_e = \frac{PM}{L_r} (\varphi_{r\alpha} i_{s\beta} - \varphi_{r\beta} i_{s\alpha}) \quad (III.30)$$

### III.6. Simulation

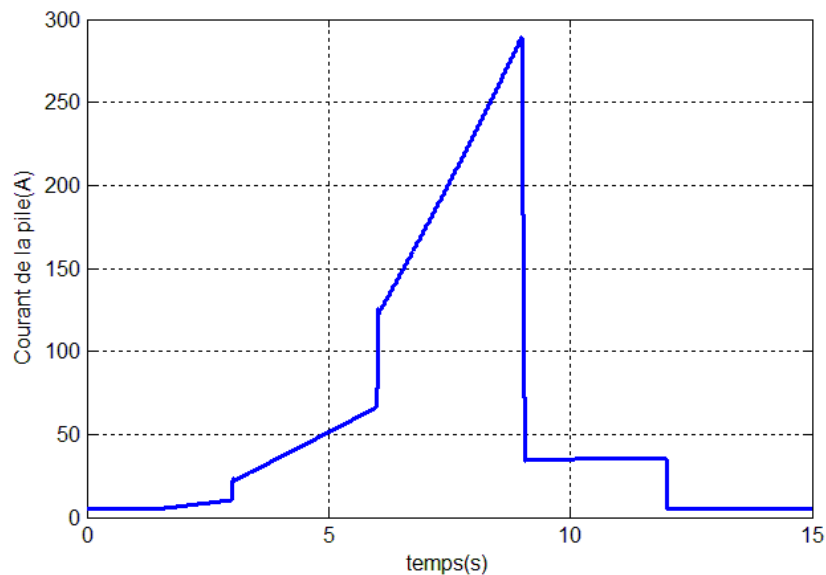


**Figure (III.8):** Modèle du véhicule électrique à pile à combustible sur l'environnement Matlab/Simulink

Après la modélisation faite dans la section précédente, Dans cette section, nous allons validé le modèle mathématique a obtenu sous matlab, La figure (III.8) représente le modèle complet de la chaîne de traction du véhicule électrique qui comporte en plus d'une bouteille d'hydrogène, la pile à combustible, un onduleur et la machine asynchrone.

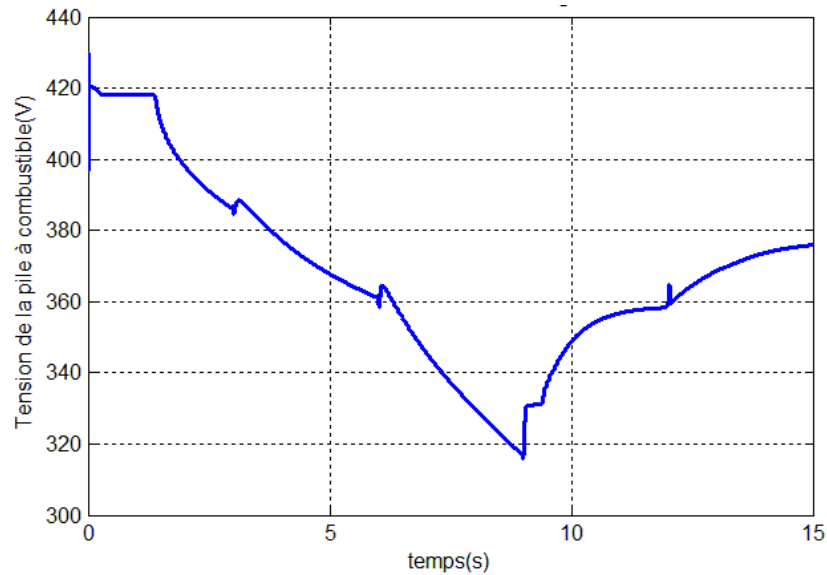


**Figure (III.9):** Position de la pédale (cm).

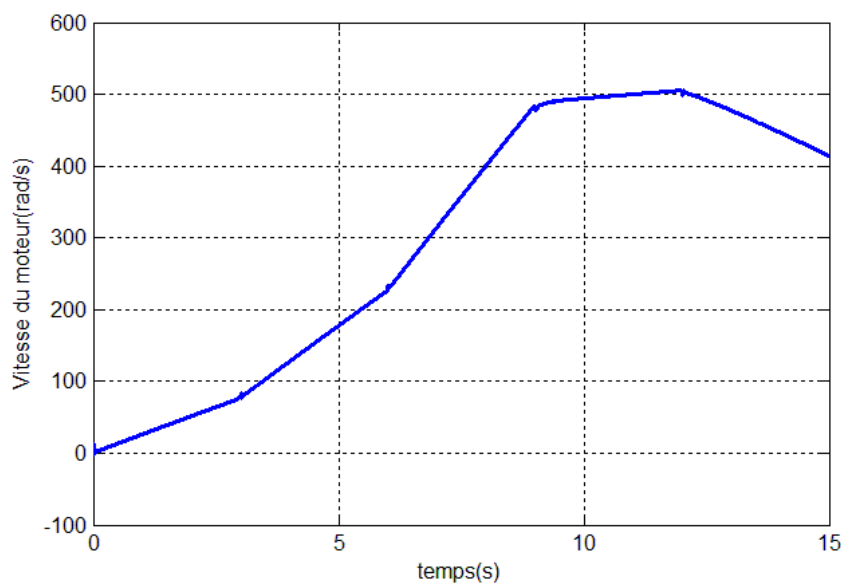


**Figure (III.10) :** Courant de la pile à combustible

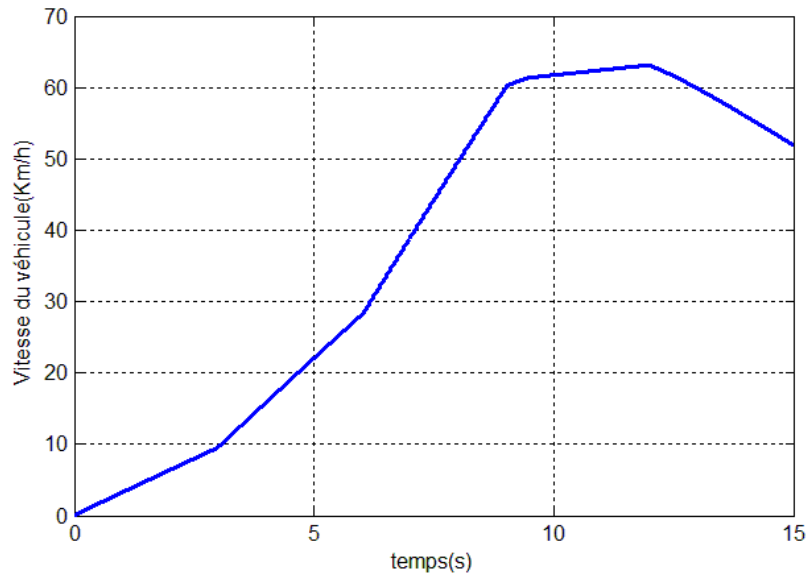
La figure III.9 représente la position de la pédale du véhicule, cette position est varié chaque 3 seconde pour tester la repense du système. Les figures de III.10 à III.13 représentent respectivement ; la variation du courant de la pile, la variation de la tension de la pile, la vitesse du moteur et la vitesse du véhicule.



**Figure (III.11):** Tension de la pile à combustible



**Figure (III.12):** Vitesse du moteur (rad/s).



**Figure (III.13):** Vitesse du véhicule

Les courbes dans la figure III.10 représentent l'effet de la variation de la position de la pédale sur courant fourni par la pile à combustible du véhicule électrique. Si on appuie sur la pédale (varier la position de la pédale figure III.9), le courant électrique fourni par la pile à combustible monte pour augmenter la vitesse du moteur (figure III.12) et donc la vitesse du véhicule est augmenté (figure 13). Tandis que si nous retirons le pied de la pédale, le courant fourni par la pile à combustible diminue, la vitesse du moteur diminue, et donc la vitesse du véhicule diminue.

### III.7. Conclusion

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

La pile à combustible PEMFC a pu délivrer une puissance selon la demande de la MAS (variation de couple et variation de puissance) et la MAS a bien suivi les consignes (vitesse et couple). Le problème majeur est lors du démarrage ou la pile ne peut pas fournir ces valeurs, alors nous sommes obligés de placer une batterie ou un super condensateur.

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

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

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

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

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

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

La modélisation statique d'une pile à combustible de type PEMFC, nous a permis de décrire: la courbe caractéristique tension/densité de courant d'une cellule ainsi que la courbe Caractéristique densité de Puissance /Densité de courant (par cellule).

le système de traction alimenté par une pile à combustible PEMFC qui contient en plus les convertisseurs statique DC/DC et DC/AC et un moteur asynchrone est soumis à deux testes: un changement de couple et une variation de vitesse.

Enfin, Les simulations faites sous Simulink/Matlab montrent un véhicule stable qui suit le cycle de conduite imposé, le choix des composants et les avancées technologiques en matière d'électronique, électronique de puissance et d'automatique ont facilité l'intégration d'une énergie propre aux seins des véhicules traditionnels,

# Bibliographie

---

- [1] S.Meddah, « Modélisation et commande d'un véhicule électrique à pile combustible », Mémoire de Magister de l'université des Sciences et la Technologie d'Oran, Algeria, 2013.
- [2] H.MAKER, « Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : Association Pile à Combustible et super condensateurs », thèse de doctorat, Université de Technologie Belfort Montbéliard, 2008.
- [3] W. VIELSTICH, Handbook of fuel cells. Fundamentals, Technology and Applications.
- [4] Idris SADLI, « Modélisation par impédance d'une pile à combustible PEM utilisation en électronique de puissance », thèse de doctorat INPL, décembre 2006.
- [5] Jérôme LACHAIZE, « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction », thèse de doctorat INPT, septembre 2004.
- [6] Guillaume FONTES, « Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques », thèse doctorat INPT, septembre 2005.
- [7] Matti NOPONEN, « Current distribution measurements and modeling of mass transfer in polymer electrolyte fuel cells », PHD-Helsinki University, mars 2004.
- [8] B.WAHDAME, « Analyse et optimization du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences », thèse de doctorat, université de technologie de belfort montbéliard et de l'université de France – Comté, 2006.
- [9] <https://tpepilecombustible.wordpress.com>
- [10] ALBERT CERDÁN CODINA, « System Level modelling of fuel cell driven electric vehicles » Master's thesis in Electric Engineering, Elteknik Power Electronics Department CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Gothenburg, Sweden 2017.
- [11] Wolfgang FRIEDE, « Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible du type PEM », thèse doctorat INPL, août 2003.
- [12] Amel LACHICHI, « Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant – Application aux convertisseurs pour pile à combustible », thèse doctorat Franche-Comté, novembre 2005.
- [13] Boudellal, Méziane, « La pile à combustible: structure, fonctionnement, applications », Dunod, 2007.
- [14] K. Kordes et G. Simader, « Fuels Cells and Their Applications », ed VCH (1996)
- [15] Fuel Cell Handbook (5ème édition), EG&G Services, Parson, Inc. Sciences Applications International Corporation (CD ROM).

- [16] F. Ouagueni, M. Boumehraz, S. Belhamdi « *A Fuzzy Model Feed Forward Predictive Control of the Nonlinear Tubular Solid-Oxide Fuel Cell System* ». *Advances in Modelling and Analysis C*, V. 74, N°. 2-4, PP. 71-79, 2019.
- [17] F. Ouagueni « *Modélisation et Commande des Piles à Combustible* », Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2021.
- [18] [www.anso.freesurf.fr](http://www.anso.freesurf.fr).
- [19] V. Mester, *Conception optimale systémique des composants des chaînes de traction électrique*, Thèse de doctorat, Ecole central de Lille, Mai 2007.
- [20] F. Khoucha, A. Khoudiri, M. Benbouzid, A. Kheloui, *Commande DTC d'une propulsion moteur asynchrone / onduleur multi niveaux asymétrique pour un véhicule électrique*, *Européen Journal of Electrical Engineering* 14, 2-3 (2011).
- [21] Victor Mester, « *Conception Optimale Systémique des Composants des Chaînes de Traction Electrique* », thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, mai 2007.
- [22] A. Daanoune, *Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides*, Thèse doctorat, Université de Grenoble, décembre 2012.
- [23] D. Benoudjit, *Contribution à l'optimisation et à la commande d'un système de propulsion pour véhicule électrique*, Thèse doctorat, Université de Batna, Janvier 2010.
- [24] Mr. MARIF Ismail, ABDAT Hichem, *La commande en vitesse d'un véhicule Electrique*, Université de Tlemcen.
- [25] Mr. KHALI L MAALEJ, *Méthodes De Gestion D'énergie Pour Un Véhicule Électrique Hybride Et Un Véhicule Électrique À Batteries Utilisant L'estimation en Ligne De La Masse*, Université Du Québec.
- [26] S. Meziani, A. Bourenane, *Contrôle par logique floue d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique basé sur une machine asynchrone à double alimentation*, Mémoire de master, Université Abderahmane Mira Bejaia, 2013.
- [27] H. Benariba, *Contribution à la commande d'un véhicule électrique*, Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Décembre 2018.
- [28] AOZELLAG Haroun. « *Stratégies de commande d'un véhicule hybride* », mémoire de master : université A-Mira Bejaia, 2013.
- [29] A. Nouh, *Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers*, Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard et par l'université de Franche-Comté, Mars 2008.

- [30] S. Zaouzaou, S. Meziani , Etude et simulation des convertisseurs statiques existant dans unvéhicule électrique , Mémoire de Master , Université Abderrahmane Mira de Bejaia , 2017.
- [31] <https://www.fiches-auto.fr/essais-tests>
- [32] Jean Paul Hautier « Les régimes transitoires des machines électriques». Éditions technip. Paris
- [33] Jean Chattelain « Traité d'électricité »Éditions Dunod. Paris, 1984.
- [34] Guy Sturtzer et Eddie Smigiel « Modélisation et commande des moteurs triphasés» Éditions Ellipses. Paris, 2000.
- [35] Phillipe Barret «Les régimes transitoires des machines tournantes électriques». Editions Eyrolles. Paris, 1987.
- [36] H alleg, N chaouche « identification des paramètres et commande vectorielle d'une machine asynchrone ».Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de tizi ouzou 2004.