REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

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

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie électrique

Spécialité : Instrumentation

Gestion de l'énergie dans un véhicule hybride intégrant une pile à combustible

Présentés par :

MAADADI Souhila.

SEMMANA Assia.

Proposés et Dirigés par :

Dr. BENTOUATI Smain.

Promotion 2022

Remerciements

Nos remerciements s'adressent tout d'abord au Dieu tout puissant de m'avoir donné tous ce que je possède et de guider mes pas vers le chemin du savoir.

Nous tenons à exprimer notre haute gratitude, nos profonds respects et nos sincères remerciements et reconnaissances d'abord à Monsieur BENTOUATI Smain maître au département de génie électrique, Université YAHIA FARES Médéa, qui nous a guidées avec grande patience tout au long de l'élaboration de ce travail.

Nos sincères remerciements sont adressés à Monsieur HANINI Noureddin Maître au département de génie électrique, Université YAHIA FARES Médéa, qui nous fait l'honneur de s'intéresser à ce travail, et de nous avoir honoré de son approbation pour superviser ce modeste travail.

Dédicace

‘’ Louange à dieu, le seul et unique’’

A mes très chers parents et mes frères et sœurs,

A nos encadreurs Mr.BENTOUATI Smain ET

Mr.HANINI Noureddine,

A tous notre amis, A tous ceux qui ont participés de

près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Souhila

Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux deux êtres qui me sont les plus chères au monde : mon père et ma mère, que dieu me les garde pour toujours (inchallah).

A mes sœurs et le reste de la famille,

Et à tous que je connais de près ou de loin.

Assia

الملخص

تمثل السيارة الكهربائية الهجينة التي تعمل بخلايا الوقود نظامًا يجمع بين مصدرين مختلفين للطاقة، والمصدر الأساسي هو خلية الوقود والمصدر الإضافي هو عنصر تخزين ويتم تعريف عنصرين على أنهما البطارية والمكثف الفائق. الغرض من هذه الأطروحة هو تحسين استهلاك الوقود الذي يعد المصدر الوحيد للطاقة في المركبات التقليدية، وللأسف فإن هذا النوع من المركبات له تأثير خطير للغاية على الغلاف الجوي والاحتباس الحراري بسبب انبعاثات الغازات السامة **(CO2)**. لذا فإن الحل لحماية كوكبنا هو الجيل الجديد من المركبات المتقدمة التي تعتمد على مصادر الطاقة النظيفة للتحقق من الدفع؛ هي مركبات كهربائية. تبدأ دراستنا بإعطاء بعض المعلومات العامة عن المركبات الكهربائية، ثم قدمنا نموذجًا لمركبة كهربائية هجينة تعمل بخلايا الوقود وشرحنا إدارة الطاقة بين الأجزاء المختلفة لمجموعة نقل الحركة الخاصة بها. أخيرًا، ندعم المخططات وأنظمة المعادلات المعادلة المستخدمة في نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها في إطار برنامج MATLAB / Simulink.

الكلمات المفتاحية: إدارة النظام الهجين، السيارة الهجينة، السيارة الكهربائية، المحرك الحراري، المحرك الكهربائي، البطارية، المكثف الفائق، خلية الوقود، محول ثابت.

Résumé

Le véhicule électrique hybride à pile à combustible représente un system qui combine deux sources différentes d'énergies, la source essentielle est la pile à combustible et la source auxiliaires est élément de stockage et on définit deux éléments sont la batterie et le supercondensateur. Le but de ce mémoire est d'optimiser la consommation de carburant qu'est la seule source d'énergie dans les véhicules conventionnelles, malheureusement ce type de véhicule a un effet très dangereux sur l'atmosphère et le réchauffement climatique à cause de l'émissions de gazes toxiques (**CO_2**). Donc la solution pour protéger notre planète est la nouvelle génération des véhicules évolués qui sont basé sur les sources propres d'énergie pour vérifier la propulsion ; sont les véhicules électriques. Notre étude commencer par donner quelques généralités sur les véhicules électriques, puis nous avons présentés une modélisation de véhicule électrique hybride à pile à combustible et expliqués la gestion d'énergie entre les différentes parties de sa chaine de traction. Finalement nous soutenons les schémas équivalents et les systèmes des équations on utilisons par les résultats de simulation obtenue dans le cadre du programme MATLAB/Simulink.

Mots clés : véhicule électrique, véhicule hybride, pile à combustible, batterie, supercondensateur, gestion d'énergie, convertisseur statique.

Abstract

A fuel cell hybrid electric vehicle is a system that combines two different energy sources, the primary source is the fuel cell and the auxiliary source is a storage element and two elements are defined as the battery and the supercapacitor. The aim of this thesis is to improve fuel consumption which is the only source of energy in conventional vehicles, unfortunately this type of vehicle has a very significant impact on the atmosphere and global warming due to toxic gas emissions. (**CO_2**). The solution to protecting our planet is therefore the next generation of advanced vehicles that rely on clean energy sources for propulsion verification; They are electric vehicles. Our study begins by giving some generalities about electric vehicles, then we present a fuel cell hybrid electric vehicle model and explain the energy management between the different parts of its powertrain. Finally, we support plots and equivalent systems of equations used in simulation results obtained under MATLAB/Simulink software.

Mots clés : véhicule électrique, véhicule hybride, pile à combustible, batterie, supercondensateur, gestion d'énergie, static converter.

Symboles et notations

Pile à combustible

$\boldsymbol{V_{pack}}$ Tension de pack

$\boldsymbol{E}$ Tension théorique à vide

$\boldsymbol{V_{act}}$ Surtension d'activation

$\boldsymbol{V_{ohm}}$ Surtension ohmique

$\boldsymbol{V_{conc}}$ Surtension de concentration

$\Delta\boldsymbol{V_{act}}$ Chute de tension à cause de pertes d'activation en volt [V].

A Pente de la droite de « Tafel » qui est de l'ordre de 0.06V [9].

$\boldsymbol{i_{cell}}$ Courant délivré par la cellule PEM [mA.cm-2].

$\boldsymbol{i_0}$ Courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode électrolyte [mA.cm-2].

$\boldsymbol{i_n}$ Courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte [mA.cm-2].

$\Delta\boldsymbol{V_{cons}}$ Chute de tension due aux pertes de concentration en volt [V].

$\boldsymbol{B}$ Constante de transport ou de transfert de masse (la pente de droit de Tafel).

$\boldsymbol{i_L}$ Courant limite en Ampère [A].

$\Delta\boldsymbol{V_{ohm}}$ Chute de tension due aux pertes ohmiques [V].

$\boldsymbol{R_m}$ Résistance totale de la pile à combustible [kΩ.cm2].

Batterie

$\boldsymbol{r_s}$ Résistance série.

$\boldsymbol{C_{DL}}$ Capacité de couche double.

$\boldsymbol{E_{th}}$ Tension d'équilibre d'électrode.

$\boldsymbol{Z_F}$ Impédance faradique

$\boldsymbol{V_B}$ Tension de la batterie en volt [V].

$\boldsymbol{E_0}$ Tension à vide de batterie en volt [V].

R_B Résistance de batterie en ohm[Ω].

i_b Courant de batterie en ampère [A].

C_b Capacité de batterie en farad [F].

N_{bas} Nombre de batterie.

C_{ban} Capacité nominale de stack de batterie.

Q_{mba} Quantité de charge manquante dans la batterie.

Supercondensateur

V_{sc} Tension de supercondensateur.

V_{Cel} Tension d'élément condensateur.

I_{sc} Courant de supercondensateur.

R_{el} Élément Résistance.

P_{sc} Puissance de supercondensateur.

Q Quantité de charge stocké sur le supercondensateur.

E_{util} Puissance utilisable.

K la profondeur de décharge pour un élément

E_{Max} Énergie maximale.

Convertisseur statique

v_{fc} Tension de pile à combustible.

v_{ba} Tension de batterie.

v_{sc} Tension de supercondensateur.

v_C Tension appliquée au supercondensateur.

v_t Tension aux bornes de la bobine.

Véhicule

A_f Surface frontale [m^2]

C_r Coefficient de résistance au roulement [-].

C_{roue} Couple de la roue [N.m].

C_x	Coefficient de résistance aérodynamique [-]
F_{areo}	Effort résistant aérodynamique [N].
F_{pente}	Effort résistant en montée[N].
F_{roul}	Effort résistant de roulement [N].
$F_{traction}$	Effort de traction appliquée à la caisse du véhicule [N].
g	Constante de gravité (g = 9.81 *m 1*s 2) [m/s^2].
J_{roue}	Inertie d'une roue [Kg.m^2].
J_{GMP}	Inertie du groupe-motopropulseur ramenée aux roues [Kg.m^2].
M_{SSE}	Masse de la source secondaire d'énergie [kg].
M_{veh}	Masse totale du véhicule [kg].
M_{veh}^{0}	Masse à vide du véhicule [kg].
M_{eq}	Masse équivalente des éléments en rotation [kg].
C_{roue}	Rayon de la roue [m].
V_{veh}	Vitesse du véhicule [m/s].
α	Pente de la route [rad].
ρ_{air}	Densité de l'air *(Pair* = 1, 29 *kg 1m3)* [kg/m^3].
ω_{roue}	Régime des roues [rad/s].

Liste des abréviations

VE	Véhicule électrique.
BMS	système de gestion de batterie.
VEH	véhicule électrique hybride.
VTE	Véhicule toute électrique.
MT	Moteur thermique.
MAS	moteur à synchrone.
MCC	moteur à courant continu.
MTH	moteur thermique
ME	Machine électrique
FCVEH	Fuel cell vehicle electric hybrid.
VE	Véhicule électrique.
PEMFC	Membrane échangeuse de protons.
P. à C.	Pile à combustible.
Ni-Cd	Nickel-Cadmium.
Li-ion	Lithium ion
EDLC	Condensateur électrique double couche.
DC-DC	courant continu- courant continu.
DC-AC	courant continu- courant alternatif

Liste des figures

Figure I. 1.le premier véhicule électrique au monde [1]. 4
Figure I. 2. L'Electroboat [4]. 4
Figure I. 3. Synoptique d'un system de propulsion [5]. 5
Figure I. 4. Couple Puissance-Vitesse requises pour VE [6]. 6
Figure I. 5. Le redresseur AC/DC. 11
Figure I. 6. L'architecture hybride série [17]. 15
Figure I. 7. L'architecture hybride parallèle simple arbre [17]. 16
Figure I. 8.L'architecture hybride parallèle double arbre [17]. 17
Figure I. 9. L'architecture hybride série-parallèle [9]. 18
Figure I. 10. L'architecture hybride complexe [9]. 18
Figure I. 11. Structure d'un véhicule hybride à pile à combustible [18]. 19

Figure II. 1. Schéma de principe d'une cellule de pile à combustible [22]. 24
Figure II. 2. Système PAC et auxiliaires [20]. 27
Figure II. 3. Exemple d'architecture de véhicule à pile à combustible hybride [23]. 31
Figure II. 4. Diagramme de Ragone [24]. 31
Figure II. 5. Une cellule de batterie électrochimique typique [21]. 32
Figure II. 6. Différence entre un condensateur classique (à gauche) et un supercondensateur (à droite) [29]. 34
Figure II. 7. Structure de moteur synchrone à aimants permanents [34]. 36
Figure II. 8. Schéma de bobinages statoriques 37

Figure III. 1. Caractéristique statique d'une cellule de P. à C [7]. 44
Figure III. 2. Schéma équivalent d'un système électrochimique électrode – électrolyte [40]. 47
Figure III. 3. Modèle R-C série d'une batterie lithium-ion [22]. 47
Figure III. 4. Circuit Equivalent d'un seul élément Super Condensateur [41]. 48
Figure III. 5. Schéma équivalent d'un pack supercondensateur [37]. 50
Figure III. 6 Le schéma électrique du système hybride à piles à combustible [22]. 53
Figure III. 7 Représentation de la transformation de Park **[10].** 56
Figure III. 8. Evolution de tension (V), courant (A) et état de charge de batterie (%) en fonction de temps (s). 63
Figure III. 9. Evolution de tension(V), courant (A), consommation de carburant (L/min et g) dans une pile à combustible en fonction de temps (s). 64

Liste des tableaux

Tableau I. 1. Comparaison entre quatre moteurs [4]..... 9

Tableau I. 2. Classification de VEH selon son type d'hybridation [15]. 14

Tableau I. 3. Avantages et inconvénients des différents VEH suivant l'architecture [8]. 20

Tableau II. 1 Différents types de pile à combustible 25

Tableau II. 2. Les différents types d'accumulateurs [28]..... 32

Table des matières

Introduction générale 1
Chapitre I : le véhicule électrique et apport de la source hybride 3
I .1. Introduction 3
I .2. Historique de véhicule électrique brièvement 3
I. 3. Définition de véhicule électrique 5
I. 4. Description de la chaine de traction 5
I. 4.1. Le bloc moteur électrique d'entrainement 6
I. 4. 1.1. Evaluation des moteurs de traction des véhicules électriques 6
I. 4. 1.2. Comparaison entre les différents moteurs d'entrainement 9
I. 4.2. Le bloc de commande et de contrôle 10
I. 4.3. Le bloc de puissance 10
I. 4. 3.1. Le convertisseur DC/AC [10] 10
I. 4. 3.2. Le convertisseur AC/DC [10] 10
I. 4. 3.2. Le convertisseur AC/AC [10] 11
I. 5. Principales configurations des véhicules électriques 11
I.5.1. Les véhicules tout électriques 11
I.5.2. Les véhicules électriques hybrides 12
I.5.2.1. Le mode de fonctionnement 12
I.5.2.2. Classification des véhicules hybride 13
I.5.2.3. Véhicules hybrides à pile à combustible 19
I.6.1. Avantages de véhicule toute électrique [19] 19
I.6.2. Inconvénients de véhicule toute électrique [19] 20
I.7.Avantages et inconvénients des différents VEH's suivant l'architecture 20
I.8. Combinaison du véhicule électrique 21
I.8.1 Critères de choix des roues motrices 21
I.8.2. Critères de choix des roues libres 21
I.8.conclusion 21
Chapitre II : Véhicule électrique hybride à Pile à Combustible 23
FCHEV 23
II.1. Introduction 23
II.2. Définition de FCVEH 23
II.3. Historique de FCVEH 23

II.3. La source d'énergie d'un FCVEH 24
II.3.1. La pile à combustible 24
II.3.2. Les différents types de la pile à combustible 24
II.3.3. Principe de fonctionnement de P. à C 25
II.3.3.1. Rôle du catalyseur 26
II.3.3.2. Rôle de l'électrolyte 26
II.3.3. Système P. à C. et auxiliaires 26
II.3.5. Applications des piles à combustible 28
II.3.5.1. Applications portables 28
II.5.3.2. Application automobile : 29
II.5.3.3. Applications stationnaires 29
II.3.5.4. Applications embarquées 30
II.4. La source secondaire d'énergie 30
II.4.1. Batterie 31
II.4.2. Supercondensateur 33
II.4.3. Applications courantes des super condensateurs 34
II.4.4. Applications potentielles des super condensateurs 35
II.4.5. La différence entre les batteries et les supercondensateurs 35
II.4.6. Association batterie/super condensateur 35
II.5. Moteurs synchrones à aimants permanents 36
II.5.1. Présentation de la machine synchrone a aiment permanent 36
II.5.2. Constitution de la machine synchrone à aimants permanents 36
II.5.2.1. Structure de stator 36
II.5.3. Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents 39
II.5.4. Les avantages et les inconvénients de la machine synchrone à aimants permanents 39
II.5.4.1. Les avantages 39
II.5.4.2. Les inconvénients 40
II.5.5. Les Domaines d'application de MSAP 40
Chapitre III : Modélisation d'un véhicule électrique hybride à P.A C 43
III .1. Introduction 43
III .2. Modélisation du stack de pile à combustible (PEMFC) 43
III .2.1. Caractéristiques statiques d'une cellule de la P.A C. 43
III .2.1.2. Les pertes de concentration 45
III .2.1.3. Pertes ohmiques 45
III .2.1.4. Expression de la tension aux bornes du stack en fonction de courant débité 46
III.4. Modélisation du pack de Supercondensateurs 48
III.5. Modélisation de convertisseur statique 51

III.6. Modélisation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents 53
III.6. 1. Présentation de la MSAP 53
III.6. 2. Hypothèses de modélisation 54
III.6.3. Application de la transformation de Park 55
III.6.4. Interprétation physique de la transformation de Park 55
III.6.5. Equations de la MSAP dans les axes d-q [10] 56
III.7. Le véhicule et son groupe motopropulseur 58
II.7. 1.Le véhicule 58
II.7. 2. Les roues mécaniques 59
II.7. 3. Le réducteur et la transmission 61
II.7. 3. Le réducteur et la transmission 62
III.8. Résultats de simulation pour un FCVEH 63
III.9. Conclusion 64
Conclusion générale 68
Références Bibliographique 70

Introduction générale

Introduction générale

L'évolution de la technologie et le développement de l'activité industrielle grâce à l'augmentation de la population mondiale implique une forte demande de l'énergie pour rependre aux besoins de monde. Etant donné que les ressources fossiles telles que le pétrole et le gaz sont Le source principale de cette énergie. Les activités des êtres humaines provoquent une pollution de l'environnement et un réchauffement climatique (effet de serre) qui affectent négativement l'atmosphère et la nature sur notre planète. Le réchauffement climatique est causé par les émissions de gaz toxiques tels que **co_2**. Sachent que ce gaz est considéré comme un problématique a été apparu depuis des années. Parmi les principales sources d'émission de gaz **co_2** est les horribles nombres des véhicules classiques (conventionnels) puisqu'ils sont besoins de carburant comme sources principales d'énergie.

Aujourd'hui, Les grands gouvernements dans le monde entier ont toujours essayé de réduire le niveau de gazes toxiques dans l'atmosphère en fournissant désormais toutes les catégories du soutien aux chercheures et ingénieurs pour trouver une solution écologique pour ce problème international [1].

Après des années, les résultats ont soutenu de recherche l'idée d'orientation vers les véhicules électriques hybrides (VEH) et les véhicules tout électriques (VTE) ; pour remplacer les véhicules traditionnels graduellement surtout dans les grandes villes afin de protéger cette planète et fournir un milieu propre pour les générations de futures. Donc les véhicules qui consomme moins de carburant fossile sera l'objectif le plus importante chez les spécialistes [1].

Actuellement, l'énergie de l'hydrogène sera le centre d'intention dans l'industrie automobile grâce à ses caractéristiques bienfisses telle que la haut pouvoir calorifique et une combustion propre sans produire de polluant. La pile à combustible qui marche avec l'énergie de l'hydrogène reste une technologie au cours de recherche et de développement encor plus pour arriver au model d'un véhicule fonctionne de manière parfaite et répond à tous les besoins de conduite conforte et ne menace pas nos vies [2].

Dans ce contexte, notre mémoire consiste à proposer et en étude d'un nouveau système de véhicule électrique hybride alimenté par la pile à combustible qu'est la source essentielle d'énergie. Ce nouveau system est composé par trois éléments nécessaires, à savoir le pack de la pile à combustible qui besoins d'un réservoir d'hydrogène, le pack du la batterie et le pack

d'un supercondensateur, ces deux derniers repensent des éléments de stockage de l'énergie. Les trois sources mentionnent besoins des convertisseurs statiques pour le bon fonctionnement. Donc notre contribution est de faire une étude électrique et énergétique et la soutenu par les équations mathématiques et les graphes à l'aide de MATLAB/Simulink [1, 2].

Ce mémoire est organisé en trois chapitres principaux.

Le premier chapitre, a été consacré à décrire l'historique et l'évolution pour les véhicules électriques et mentionner chaque fois comment les développeurs changeaient les composantes et la structure de la chaine de traction de véhicule électrique et expliquer pourquoi les Scientifiques s'orienter de véhicule tout électrique vers le véhicule électrique hybride donc nous avons donnés une étude théorique représenté par une définition de chaque type, explication de le fonctionnement aussi les avantages et les inconvénients pour ces deux types de véhicule.

Le deuxième chapitre, nous avons étudiés et analysés un nouveau type de véhicule, c'est le véhicule électrique hybride à pile à combustible qui appartient à la catégorie de véhicule électrique hybride d'architecture série. Alors nous avons défini ce véhicule ainsi expliqués le fonctionnement et les types existants dans la pile à combustible et en passent vers l'explication de rôle de le system auxiliaire de P. à C de type PEM. Ensuite on traite et prouve le choix d'accumulateur utilisée parmi les autres et identifier la différence de fonctionnement entre eux aussi on parle sur le fonctionnement d'un supercondensateur, ces deux derniers repensent une source secondaire d'énergie.

Le dernier chapitre a été sujet à la modélisation et la commande des différentes sources et leurs convertisseurs associés ; donc il détaillera les lois de commande optées pour la gestion de l'énergie du système hybride associant des piles à combustible PEM, des batteries aux lithium-ion et des supercondensateurs. De plus nous utilisons le logiciel MATLAB/Simulink pour extraire les courbes présentent les gestions de flux de puissance.

Enfin, notre travail est clôturé par une conclusion générale résumant les trois chapitres, avec la citation de quelques recommandations.

Chapitre I

Le véhicule électrique et apport de la source hybride

Chapitre I : le véhicule électrique et apport de la source hybride

I .1. Introduction

A cause de la pollution et l'effet de serre et les changements climatiques qui apparaissent à travers le grand nombre des incendies tous ces facteurs ont contribué à la détérioration de l'équilibre écologique. Actuellement nous souffrons d'une pénurie de ressources hydrique, forestières et animales. C'est pourquoi le monde a accepté de changer le mode de vie et d'aller vers des sources d'énergie propre et parmi les nouvelles inventions les plus importantes qui soutiennent cette décision c'est bien clair le véhicule électrique avec ses deux types : véhicule toute électrique et véhicule hybride électrique [1].

Dans ce contexte nous allons expliquer l'historique du développement du véhicule électrique avec le temps et donner une définition et une description de la chaine de traction de ce dernier. Ensuite nous montrons et identifions chaque type de véhicule électrique et analysons leurs caractéristiques puis nous clarifions les mode fonctionnement aussi la méthode pour classifier les VEHs. Finalement nous mentionnons les avantages et les incontinents de VTEs et terminons avec une conclusion qui résume tout le chapitre.

I .2. Historique de véhicule électrique brièvement

Le 19e siècle est le début de développement des véhicules électriques (VEs), et depuis ce temps-là les scientifiques n'arrêter pas les recherches et les expériences pour réussir de construire un véhicule prend l'électricité comme source unique de l'énergie. Le premier véhicule électrique est partagé dans l'U.K. et les États-Unis qui sous forme d'un chariot électrique construit par Robert Anderson [1] tandis que 1834 un mécanicien nommé Thomas Davenport construit un petit véhicule fonctionnait sur une batterie non-rechargeable et réussissait à parcourir un court trajet à Brandon, en Grande Bretagne [2]. La batterie rechargeable au plomb acide a été inventé par le français Gaston planta en 1856 et cette dernière sera amélioré par Camille Faure en 1881 [3].la première voiture électrique à quatre roues a été développé par Thomas Parker en 1884 et ce n'est qu'en 2009 qu'une photographie la reprenant a apparu au public (voir la figure I. 1) [1].



Figure I. 1.le premier véhicule électrique au monde [1].

En 1894, le premier véhicule électrique était commercialisé nommé l'Electroboat de Morris et Salom (voir la figure I. 1). Les inventeurs de ce dernier, l'exploité comme un taxi par leur société. Malgré le cout élevé de L'Electroboat (environ 3000 contre 1200$ à l'époque) mais il est plus rentable [4].

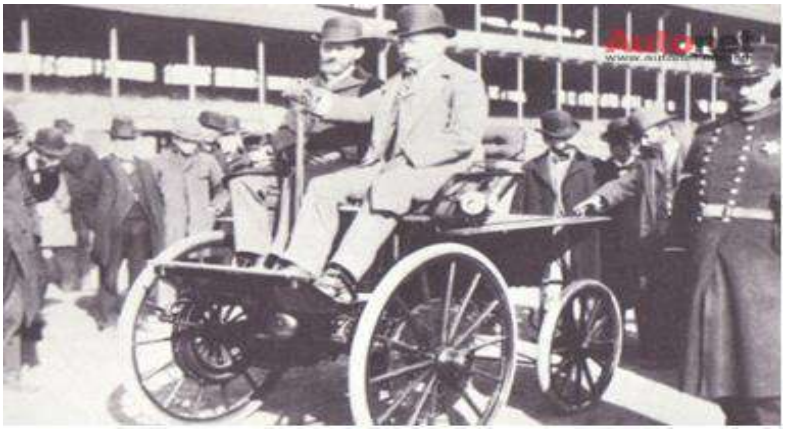


Figure I. 2. L'Electroboat [4].

Les inventions de véhicule électrique développés de façon continu mais l'ère des voitures électriques modernes a atteint son apogée dans les années 1980 et au début des années 1990 avec la sortie de quelques voitures réalistes par des entreprises comme GM avec l'EV1 et PSA avec la 106 Electric. Bien que ces véhicules soient une véritable prouesse, surtout lorsque Par rapport aux premières réalisations, il est devenu clair au début des années 1990 que les voitures électriques ne pourraient jamais rivaliser avec les voitures à essence en termes d'autonomie et de performances [4] , parmi les principales obstacle rencontré sont que la faiblesse de l'autonomie (due aux limitations de la technologie des batteries le rendu incompatible avec les nouveaux usages et les réseaux routiers qui s'étendent, le manque de

l'infrastructure de recharges et la disponibilité du pétrole [1] et le plus élément gênant c'est le poids élevé de voiture électrique.

Dans le 21ème siècle, le réchauffement climatique et la diminution la quantité de pétrole sous-sol poussent les développeurs de l'industrie mécanique de réfléchir encore fois sur les véhicules électrique mais de façon nouvelle c'est d'ajouter une source hybride de l'énergie pour alimenter ces véhicules.

I. 3. Définition de véhicule électrique

Le véhicule électrique dépend principalement du moteur électrique pour la propulsion, contrairement à la voiture traditionnelle qui utilise le moteur à combustion interne. La configuration de véhicule électrique classique de chaine de traction basé sur le moteur électrique qui marche soit avec un courant direct ou alternatif, un contrôleur pour le moteur, la batterie qui est la source d'énergie, un système de gestion de batterie (BMS), le convertisseur d'électronique de puissance soit onduleur, hacheur et redresseur et un réducteur de vitesse (voir le figure I. 3) [5].

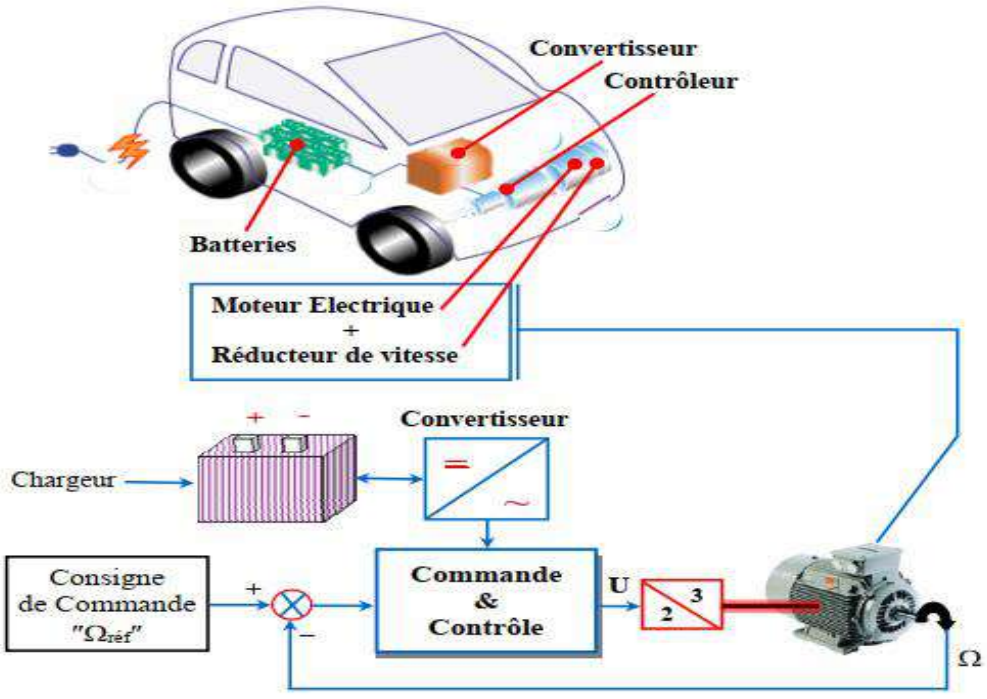


Figure I. 3. Synoptique d'un system de propulsion [5].

I. 4. Description de la chaine de traction

Le system de propulsion décompose de trois blocs principaux sont :

I. 4.1. Le bloc moteur électrique d'entrainement

Le composant essentielle de ce véhicule est bien le moteur électrique donc le faut être fort, robuste et manque un peu d'entretien. De plus les performances globales d'un véhicule électrique dépendent du type de moteur d'entrainement employé. Pratiquement il y a plusieurs types de moteurs existés alors on choisit le type selon la méthode de propulsion (véhicule lourd ou léger, fiable ou grande puissance, etc.) [5]. Pour être plus professionnel, le choix du moteur d'un véhicule électrique de sa transmission puissance dépond des caractéristiques de fonctionnement : [6]

- Assurer un démarrage en cote du VE (couple élevé),
- Obtenir une vitesse maximale,
- Stratégie de pilotage optimisant continuellement la consommation d'énergie (aspect
  rendement : rendement élevé en étant employé à différentes vitesses).
- Faible ou grande puissance ;
- Faible ou grande vitesse

Ces caractéristiques sont illustrées dans la figure suivante qui montre l'évolution de couple puissance par rapport la vitesse.

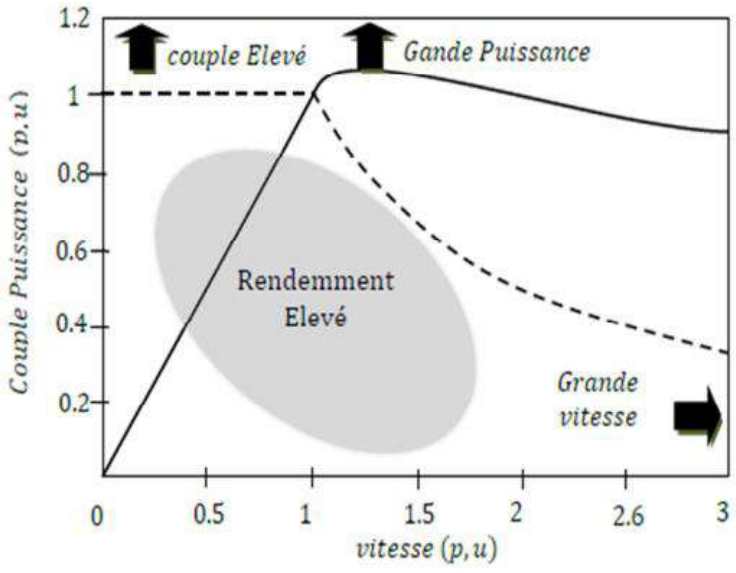


Figure I. 4. Couple Puissance-Vitesse requises pour VE [6].

I. 4. 1.1. Evaluation des moteurs de traction des véhicules électriques

Au niveau de l'industrie d'automobile, les fabricants utilisent plus qu'un modèle de moteur électrique et les tous seul mémé description de fabrication, ils sont constitués

généralement d'un élément fixe (le stator) et élément mobile (rotor). Le phénomène de champs magnétique excité par le courant parcouru provoque des mouvements sur le niveau de rotor du moteur grâce à la loi de Lorentz [7].

Dans un véhicule tout électrique le rôle de moteur électrique est transformée l'énergie électrique stockée dans les accumulateurs en une énergie mécanique pour vérifier la propulsion de ce véhicule grâces aux roues. Par contre dans les véhicules électriques hybrides la traction est assurée par le moteur électrique et à combustion interne qui sont montés en série ou en parallèle. Le principale avantage de moteur électrique si on le comparé avec le moteur thermique est que le couple complet qui fournit à bas régime et que la puissance nominale instantanée est deux ou trois fois supérieurs au laquelle de moteur thermique [7].

A) Entrainement par moteur à courant continu

La source d'énergie d'un véhicule électrique est la batterie et elle délivre un courant continu, alors elle est très évidente pour choisir le moteur à courant continu, avant des années ce choix est le meilleur parmi les autres moteurs pour commercialiser les premières générations de véhicules électriques à cause de son control de vitesse simple aussi représente la solution la plus économique grâce à son convertisseur de type hacheur de puissance agissant sur l'induit [8].

Par contre, ce moteur présente quelques inconvénients comme [7] :

- Usure des brosses nécessitant un entretien élevé ;
- Vitesse maximale faible ;
- Faible rapport poids / puissance ;
- Le coût de construction est ´élevé car la machine est complexe : collecteur, bobinage de l'induit.

C'est pour ces raisons les développeurs prennent le chemin vers des machines alternatives triphasées.

B) Entrainement par moteur asynchrones (MAS)

Le moteur asynchrone appelé moteur à induction interne. Ce type de moteur est fabriqué en grande série puisqu'il sera la meilleure solution et le plus utilisé pour la propulsion de véhicule électrique. On distingue deux catégories de ce moteur : la machine asynchrone à rotor à bagues et la machine asynchrone à cage d'écureuil, la dernière catégorie est la plus utilisée [6].

Son niveau de robustesse et de fiabilité allié à un faible coût en a fait une machine de référence, ainsi il est moins couteaux et facile à industrialisée. De bonnes performances dynamiques du control de couple peuvent être réalisées par le control vectoriel ou bien par la commande directe du couple [8].

Pour réaliser ses commandes il est nécessaire d'un convertisseur DC-AC pour onduler le courant continu de sources d'énergie de véhicule électrique en courant alternatif triphasé. Aussi nécessite un contrôleur pour contrôler le fonctionnement de moteur et un convertisseur AC-DC pour convertir le courant alternatif délivré par le moteur en courant continu pour recharger la batterie et soutenu le freinage de moteur [8].

Cependant, les avantages de ce moteur asynchrone il reste moins performant et présente un rendement plus faible par rapport le moteur synchrone. On remarque lors de l'utilisation de MAS un faible couple de démarrage et une commande complexe. On peut dire que le fonctionnement à puissance constante limite la vitesse par le rapport couple maximal sur le couple nominal ce qui amènera à une sous-utilisation de la machine en couple pour étendre sa plage de vitesse. Donc les scientifiques s'orientent vers les moteurs synchrones pour bénéfices de leurs avantages [9].

C) Entrainement par moteurs synchrones *à aiment permanent*

Le moteur synchrone à aiment permanent représente un choix important dans la chaine de traction des véhicules électriques car il délivre une puissance importante avec un petit volume, aussi il présent un bon rendement et une meilleure dissipation des pertes.il peut être considéré comme un croisement entre les MASs et les MCCs sans balais. L'excitation dans ce cas est créée par les aimants permanents.

Le plus important avantage de MSAP est les valeurs élevées des rapports couple/masse et puissance/masse ainsi que leur bon rendement. Mais il présent des inconvénients comme le prix élevé des aiment et sa résistance mécanique fait une difficulté d'établir un couple plus élevé dans le moteur. Le champ de l'aimant varie avec le temps et la température mais de manière non significative. Pour atteindre des vitesses élevées, il sera nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes joule statorique [10].

D) Entrainement par moteurs synchrones *à rotor bobiné*

La différence avec les machines à aiment permanent, est la présence de rotor bobiné à la place des aimants permanents. Il dispose d'un degré de liberté supplémentaire, il présente un couple maximum et son fonctionnement à puissance maximale constante est aisé à obtenir sur uns très plage de vitesse et le prix est moins couteaux. Cependant, Les contacts glissants (balais- bagues) limitant le fonctionnement à très haute vitesse et par conséquent l'usure des balais. Le refroidissement des bobines d'excitation est difficile, son rendement est relativement faible [11].

E) Le moteur synchrone à réluctance variable

Ce type de moteur prend l'attention de constructeurs puisqu'il est robuste est y a une construction simple sans balais donc sans usure ou entretien et les caractéristiques couple-puissance exceptionnels. Le moteur a un couple de démarrage élevé et un rapport couple-inertie élevé aussi. Parmi les problèmes de ce moteur est le bruit acoustique généré de plus les vibrations mécaniques [6].

I. 4. 1.2. Comparaison entre les différents moteurs d'entrainement

Le choix de type du moteur électrique utilisé pour la fabrication de véhicule électrique est dépendu de quelques critères tels que le prix, le poids la facilité de fabrication et méthode de fonctionnent par rapport les besoins. Le tableau ci-dessous fait une comparaison entre quatre types de moteur électrique sont le moteur à synchrone (moteur à induction), moteur à courant continu, moteur synchrone à aiment permanant et moteur à reluctance variable [4].

Tableau I. 1. Comparaison entre quatre moteurs [4].

Critères	MAS	MCC	MSAP	MRV
Efficacité	Elevé	Moyen	Elevé	Elevé
Le poids	Moyen	Moyen	Elevé	Faible
Le cout	Moyen	Faible	Elevé	Elevé

Si nous nous soucions du prix, alors le bon choix est les moteurs à courant continu MCC, au point de vue l'efficacité, le MSAP représente la meilleure construction. Si nous si intéressons au poids donc le moteur à reluctance variable MRV est disponible avec poids léger par rapport les autre.

Si on prend au calcule les trois critères mentionnant, le moteur à réluctance variable est le choix préféré par rapport les autres moteurs [4].

I. 4.2. Le bloc de commande et de contrôle

Pour une bonne consommation de l'énergie on utilise le bloc de commande et de control, puisqu'il est capté les informations d'état du système (vitesse de rotation, courant, etc.) de les traiter et d'agir en conséquence pour la génération des signaux de commande, appliquées au moteur électrique [5]. Ce bloc simuler un processeur de moteur.

I. 4.3. Le bloc de puissance

L'invention et l'évolution de semi-conducteurs ont contribué au développement de véhicule électrique. Dans lequel, la construction de convertisseurs de puissance qu'est à la base de semi-conducteurs permette maintenant d'élargir le champ d'application des machines électrique par ce qu'il assure la liaison entre la source d'énergie '' batteries'' et la machine à commander en modulant l'énergie disponible pour le besoin [5].

Au niveau de la chaine de traction de véhicule électrique on trouve deux types de convertisseurs de courant sont les convertisseurs (DC/AC) et le convertisseur (AC/DC).

I. 4. 3.1. Le convertisseur DC/AC [10]

Est un onduleur qui transforme le courant continu délivré par la batterie en un courant alternatif pour faire démarrer le moteur électrique qui entrainé avec le courant alternatif, aussi il réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de vitesse.

Actuellement, il y a plusieurs types de ce convertisseur dans le marché mais le type le plus demandé est l'onduleur à 6 interrupteurs bidirectionnels qu'il branché en parallèle avec une diode.

I. 4. 3.2. Le convertisseur AC/DC [10]

C'est composant d'électronique de puissance appelé redresseur, son rôle est redressé le courant alternatif en un courant continu pour recharger la batterie électrochimique d'après la

marche de moteur électrique alternatif. Nous informons qu'il existe plusieurs types de redresseur sont :

- Les redresseurs à diodes, ils sont construits une relation dure entre la tension continue de
  sortie et la tension alternative d'entrée.
- Les redresseurs à thyristors, ils sont donnés la capacité de varier commander le rapport entre la tension de sortie avec la tension d'entré en agissant sur l'angle d'amorçage du thyristor.
- Les redresseurs mixtes, c'est un rassemblement de deux types convertisseurs mentionnant au-dessus (voir la figure I.5)

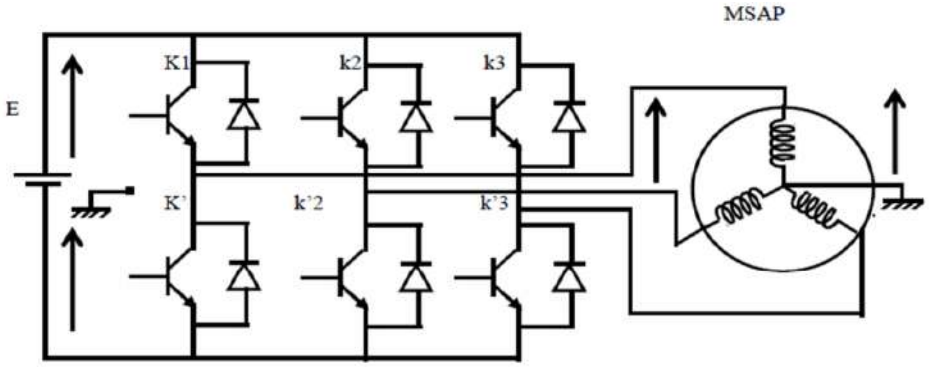


Figure I. 5. Le redresseur AC/DC.

I. 4. 3.2. Le convertisseur AC/AC [10]

Dans le cas on utilise un moteur électrique à courant continu MCC, doit être utilisé un hacheur pour alimenter ce moteur puisqu'il est indispensable pour adapter la tension délivrée par les accumulateurs pour être convient à celle de tension de fonctionnement de moteur. Cette adaptation est aussi nécessaire pour les capteurs et les régulateurs…etc.

I. 5. Principales configurations des véhicules électriques

Nous distinguons deux types de véhicules électriques : véhicule tout électrique et véhicule hybride.

I.5.1. Les véhicules tout électriques

On dit un véhicule électrique pur tout véhicule s'appuyant sur une seule source d'énergie qu'est la batterie électrochimique (accumulateur).

Par rapport aux technologies de batterie conventionnel (plomb-acide et cadmium-Nikel), l'autonomie de véhicule tout électrique est comprise entre 70 et 120 km et cadmium-nickel et de 150 à 200 km avec des batteries Nickel-Métal-Hydrure et Lithium [10].

I.5.2. Les véhicules électriques hybrides

Ce terme signifie que ce véhicule combine deux types de sources d'énergie à la fois pour assurer sa propulsion. Généralement la source primaire est l'énergie chimique du carburant et la seconde source c'est énergie électrique, énergie pneumatique ou hydraulique d'un fluide sous pression, énergie cinétique d'un volant d'inertie d'une batterie ou d'un supercondensateur, etc…, cette dernière source d'un stockage réversible d'énergie [12].

Le terme hybridation est aussi signifié l'opération de combiner un moteur électrique avec un moteur thermique (moteur à combustion interne) dans la chaine de traction.

Si nous adoptons à cette définition on distingue plusieurs modes de fonctionnement de ce type de véhicule [2].

I.5.2.1. Le mode de fonctionnement

L'avantage qui cela donné par le véhicule hybride c'est la possibilité de choisir le moteur de propulsion selon les besoins de conducteur et pour fournir un confort de conduite meilleure contrairement au moteur conventionnel. Ce choix peut être réalisé manuellement par le conducteur ou automatiquement par une stratégie de gestion énergétique embarquée [13]. On distingue quatre modes de fonctionnement sont :

- ***Mode thermique***

  Dans ce mode, le moteur thermique fournit toute la puissance de traction de demandée aux roues et la machine électrique est en état d'arrêt [13].la consommation du carburant et le degré de pollution est le même avec le véhicule traditionnel [14].

- ***Mode électrique***

  Dans ce mode, le véhicule hybride est propulsé par le moteur électrique étant que le moteur thermique est dans un état de repos, dans ce cas on profite tous les bénéficiers de véhicule électrique comme zéro émission de gaz $\mathbf{co_2}$, zéro consommation du carburant, plus de confort de conduite. L'énergie électrique disponible déduire la durée d'activation de ce mode [13].

- ***Mode hybride***

A travers ce mode, on peut profiter à la fois de moteur électrique et thermique simultanément. Alors pour la propulsion de véhicule hybride on utilise le moteur thermique à combustion interne et le moteur électrique a le rôle de contrôler la quantité d'énergie délivrer au la chaine de traction, si la quantité est plus que le nécessaire la machine électrique la stocker dans la batterie afin de l'utiliser ultérieurement. Cette fonctionnalité s'appelle aussi le mode « régénération » dans certains ouvrages. Par contre si la puissance demandée par les roues motrice est supérieure à la puissance délivrée par le moteur thermique, le moteur électrique fournit une puissance afin de compenser ce manque et garantir le démarrage de la chaine de traction [13].

- ***Mode freinage récupératif***

Ce mode peut être couplé avec les modes électrique et hybride, il est signifié que on peut récupérer l'énergie cinétique dissipé au temps de freinage sous forme d'énergie électrique et la stocké dans une batterie [13].

I.5.2.2. Classification des véhicules hybride

Pour classer les différents types de véhicules hybrides, il y a deux catégories des conditions sont :

a) Hybridation du véhicule (rapport entre la puissance du moteur thermique par rapport à la puissance du moteur électrique [15]).

b) Architecture utilisée.

a. Classification par hybridation du véhicule

Cette classification donne une importance au les fonctionnalités qu'elle peut réaliser en fonction de son taux d'hybridation c'est pour ça elle est très utilisée par les constructeurs et les équipementiers alors on peut classifier les véhicules hybride en quatre niveau tels que : le micro hybride, le mild hybride, full hybride et le plug-in hybride [15].

On résume dans le tableau suivant la différence de chaque type

Tableau I. 2. Classification de VEH selon son type d'hybridation [15].

Type d'hybride	**Fonctions**	**Gain en carburant**	**Exemple de véhicule**
Micro hybride	Arrêt du moteur thermique (Mth) : chaque fois que le véhicule est à l'arrêt, le Mth est stoppé afin de moins consommer ; Redémarrage du Mth : la machine électrique (ME) (alterno-démarreur) intégré redémarre le Mth quand le conducteur active la pédale d'accélérateur ; Accélération : L'alterno-démarreur peut aider le Mth au démarrage et pendant de courtes accélérations ; Mode normal : le Mth fonctionne seul ; Un couple supplémentaire de la ME peut être fourni pour pallier les acyclismes du Mth.	5 à 8 %	Citroën *C3* Toyota *Crown* GM *Saturn*
Mild hybride	La principale différence entre le Micro et le Mild hybride est que l'altreno-démarreur intégré est remplacé par une ME séparé ; La ME propulse rarement le véhicule seul, elle assiste plutôt le Mth ; Comparé au Micro hybride, la ME, l'alternateur et les batteries sont plus puissants et donc jouent un rôle plus important dans le fonctionnement du véhicule.	20 à 30 %	Honda *insight* Honda *Civic* Honda *Accord*
Full hybride	Sa configuration est quasiment la même que le Mild hybride sauf que les composantes sont encore plus puissantes ; La ME peut propulser souvent le véhicule seul, particulièrement pour une conduite en ville ; Le Mth peut être plus petit car la ME est de plus grande puissance et peut donc fournir un plus grand couple dans une gamme de régime donnée. Le système de commande est plus complexe afin d'optimiser la gestion de puissance.	30 à 40%	Toyota *Prius* Ford *Escape*
Plug- in hybride	Son architecture est semblable au full hybride avec cependant une sortie de connexion au niveau de la batterie afin de recharge celle -ci par une source extérieure (réseau) ; La ME, L'alternateur et les batteries sont considérable de plus grandes puissance ; Le système de commande doit empêcher de recharger la batterie tant que celle-ci n'a pas atteint un nouveau minimal. Si celui est atteint alors on passe en fonctionnement Full hybride	Aucun carburant consommé en mode tout électrique. Quand le Mth est alimenté : comparable au full hybride	Gruau Microbus Dassault-Heuliez Cleanova Daimler-chrysler Sprinter

b. Classification par l'architecture employé

On est d'accord que le véhicule hybride s'appuyant sur deux sources d'énergie alors ce type d'architecture montrant la façon de raccordement ou montage de ces sources. Les architectures les plus basiques et connus sont série, parallèle et série-parallèle [16].

Pour cette raison nous allons donner une description ou explication ci-dessous pour chaque architecture mentionnée [16].

a.1. Architecture série

Cette architecture assure la propulsion totale avec le moteur électrique qui est peut alimenter par les batteries ou /et le groupe électrogène. Généralement, ce type d'architecture demande un moteur électrique puissante car il fournir la propulsion tout seul, alors Le taux d'hybridation est généralement élevé. On trouve cette architecture beaucoup plus dans les bus hybrides [17].

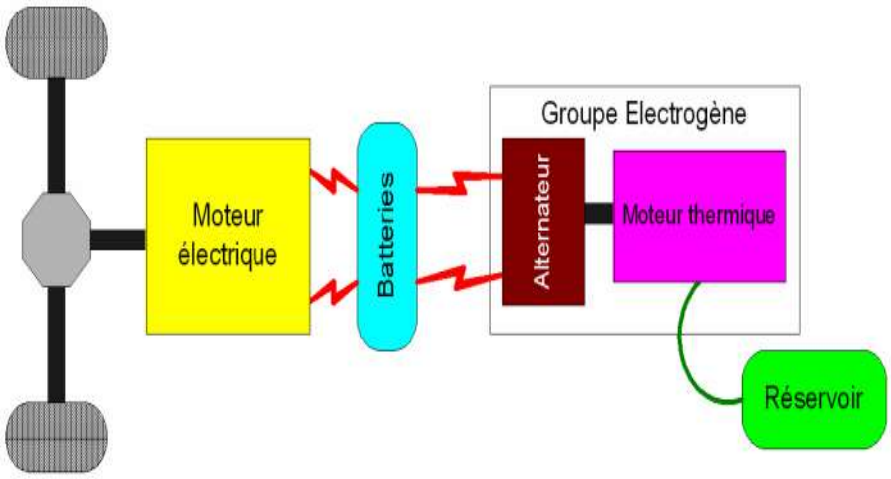


Figure I. 6. L'architecture hybride série [17].

L'inconvénient majeur de ce type d'architecture est son faible rendement car l'énergie totale délivrée par le moteur soit convertir en une énergie électrique par l'alternateur ou bien stockée dans des batteries puis reconvertie en puissance mécanique par le moteur électrique. On dit au niveau de puissance que l'architecture série offre deux degrés de liberté : le régime et le couple du moteur thermique peuvent être choisis quasiment indépendamment des conditions de conduite [17].

a. 2. Architecture parallèle

Dans l'architecture parallèle, on raccorde les différentes chaines de traction mécaniquement. Si la connexion de moteurs de propulsion du même arbre (voir la figure I.5), nous appelons ça architecture hybride parallèle simple arbre [17].

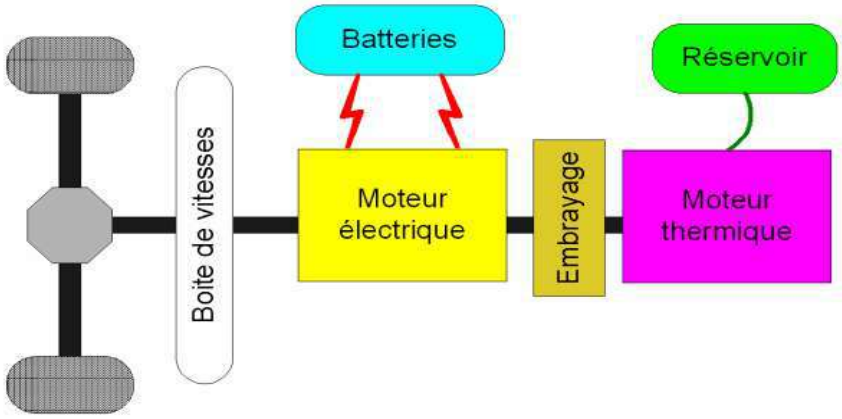


Figure I. 7. L'architecture hybride parallèle simple arbre [17].

Lorsque le moteur électrique donne une puissance très faible, alors on parle d'alterno-démarreur qu'il placé avant l'embrayage et à cause de ça la propulsion assuré presque par le moteur thermique et le rôle d'alterno-démarreur représenté que dans la phase de démarrage de moteur thermique à chaque fois que le véhicule s'arrête, le moteur arrête aussi afin de réduire les émissions de gaz toxiques (**CO_2**) [17].

Si les deux moteurs délivrent la même puissance, on place le moteur électrique entre l'embrayage et la boite de vitesses. Dans ce cas-là les deux moteurs ont un régime dépend du régime des roues et la répartition de couple aux roues nécessaire à la propulsion du véhicule entre les deux moteurs, prendre en considération le rapport de boite de vitesse [17].

Inconvénient principale de cette architecture est le manque de confort au cours de conduite à cause de la perte de couple aux roues apparaissant lors des changements de rapports, pour résoudre ce problème on peut remplacer la boite de vitesse par un variateur continu de vitesse. Le moteur électrique peut également être connecté sur un arbre différent de même architecture que nous parlerons ci-dessous [17].

Dans l'architecture parallèle double arbre, la propulsion de roues est réalisée par un des moteurs par ce que les deux moteurs marchent en façon indépendante (voir la figure I.6)

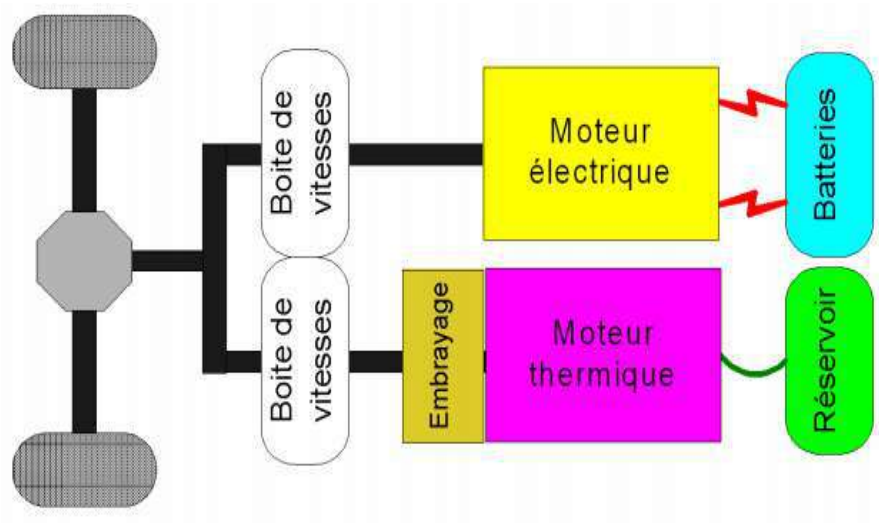


Figure I. 8.L'architecture hybride parallèle double arbre [17].

a. 3. Architecture série-parallèle

On trouve dans la configuration hybride série - parallèle que les sources de puissance sont couplées mécaniquement et électriquement à la fois, cela à été fait par coupler le moteur électrique et le moteur thermique avec un composant mécanique appelé engrenage planétaire en plus de moteur thermique aussi couplé à la transmission électrique à l'aide d'un générateur [9].

Dans cette configuration on profite les avantages de configuration série et parallèle de VEH mais aussi elle combine les inconvénients de ces architectures n'ajoutant une machine électrique supplémentaire à commander et à intégrer dans le système. Malgré la complication de construction et le prix élevé cette architecture reste la préférée parmi les autres et la plus utilisé dans les nouvelles VEHs [9].

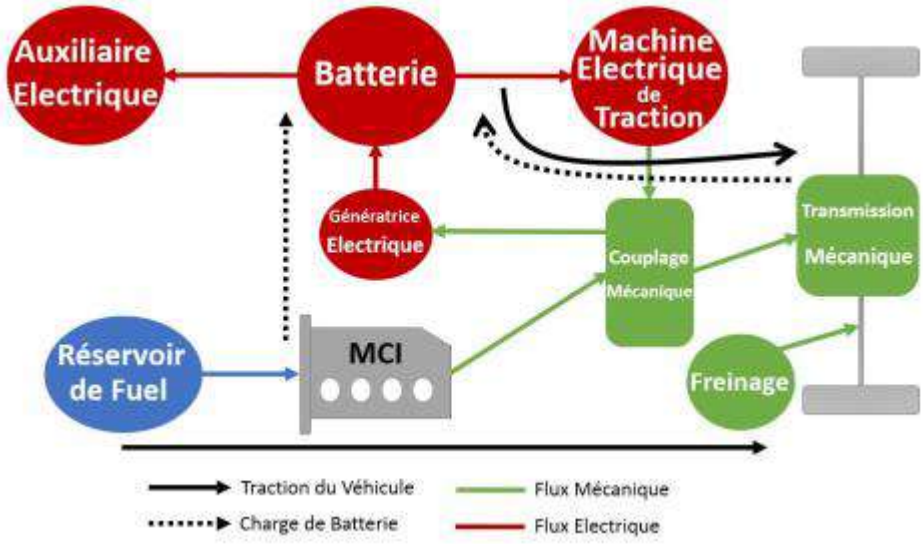


Figure I. 9. L'architecture hybride série-parallèle [9].

a. 4. Architecture complexe

Similaires aux caractéristiques principales de la configuration hybride série - parallèle, la seule différence des VEHs complexes est que leur générateur peut aussi fonctionner comme un moteur électrique et peut générer de la puissance mécanique (dans les structures VEH série – parallèle, le flux de puissance du générateur électrique est unidirectionnel et en VEH complexe il est bidirectionnel). [9]

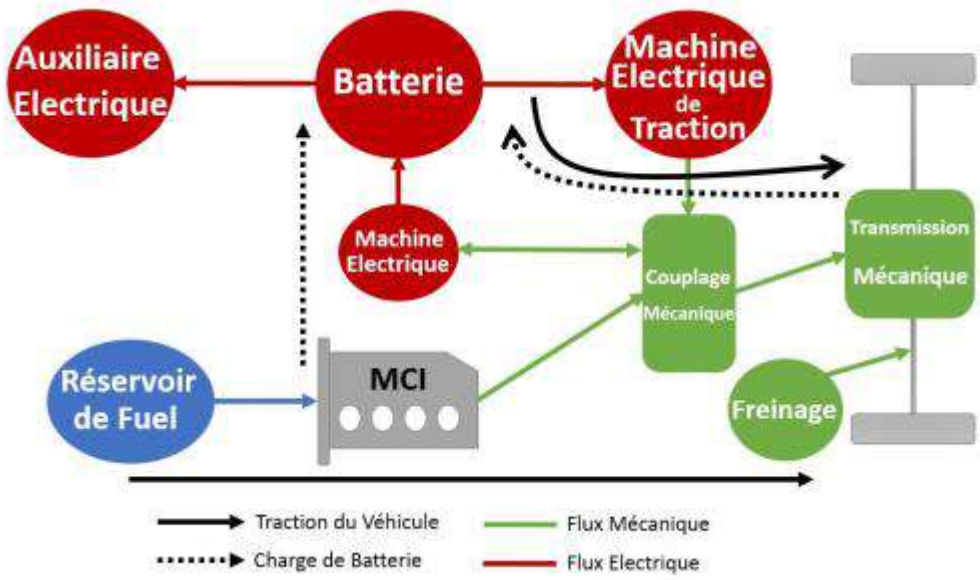


Figure I. 10. L'architecture hybride complexe [9].

I.5.2.3. Véhicules hybrides à pile à combustible

Ce type de véhicule tombe dans la catégorie des véhicules qui ont l'architecture série. Dans ce cas-là nous remplaçons le moteur à combustion interne par une pile à combustible. Le P. à C. génère l'énergie pour assurer la propulsion de la chaine de traction à travées le moteur électrique par une réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène, il faut d'ajouter un accumulateur pour stocker l'énergie produit de la pile ou d'après le moteur électrique durant le fonctionnement ainsi le plus important un réservoir de l'hydrogène [18].

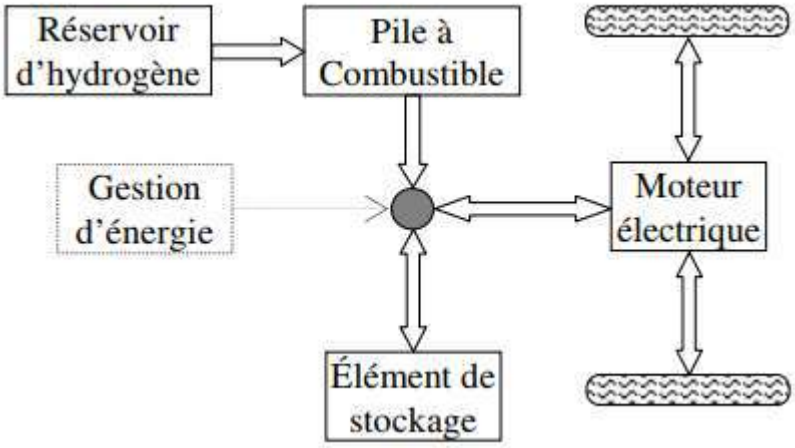


Figure I. 11. Structure d'un véhicule hybride à pile à combustible [18].

I.6.1. Avantages de véhicule toute électrique [19]

- Zéro émission de gazes toxiques CO_2 que les véhicules à carburant ;
- Le prix de consommation de kWh/h est totalement inférieur par rapport au prix payé lors de remplissage le diesel ou essence ;
- Le véhicule tout électrique manque un peu d'entretien alors réduire les frais pour la maintenance puisqu'il se compose de moins des pièces dans la chaine de traction par rapport au véhicule thermique et il n'est pas besoin de changer plusieurs fois d'huile, liquide de refroidissement, d'eau ou d'étincelles de démarrage du moteur ;
- Il est habituel d'utiliser système de freinage moteur régénératif dans les véhicules électriques, ce system contribue à augmenter la durée de vie de plaquette de frein aussi recharger la batterie à la fois avec le freinage si on lève le pied à la pédale de l'accélérateur ;
- Actuellement, on peut dire que la performance dans le véhicule électrique est au moins 90% par contre avec les véhicules conventionnels on trouve que l'efficacité est entre 25% et 35% ;

- L'effet positif de véhicule électrique est on prend un couple dans l'état de l'arrêt, et nous ne trouvons pas ça dans le véhicule à moteur à combustion interne car le couple dans ce cas-là est réalisé sauf qu'à haut régime ce qui fait si le véhicule est dans une situation de circulation ou un dépassement, il peut fournir la puissance demandée ;
- Absence de nuisances sonores pendant la conduite.

I.6.2. Inconvénients de véhicule toute électrique [19]

- Inconvénient majeur de véhicule tout électrique c'est la vitesse maximale qu'elle fournir aux conducteurs qu'est environ de 80 à 160 km qui est bien inférieure à celle de véhicule conventionnel sur une seule charge, sauf la Tesla qu'arrive à 500kmh mais elle trop chère. Cela empêche l'achat de ces voitures Surtout les personnes qui parcourent de longues distances et il faut noter que la vitesse de les VTEs se diminue au cours de conduite ;
- Manque de nombre de réseau des bornes de recharge pour la batterie dans les villes pousse les gens de recharger leurs véhicules pendant la nuit au niveau de garage et les autres cherchent des bornes de recharge publique ;
- Le prix d'achat est trop élevé par rapport au véhicule conventionnel et la raison de cout élevé est le prix de batterie principalement.

I.7.Avantages et inconvénients des différents VEH's suivant l'architecture

Le tableau ci-dessous montre les avantages et les inconvénients pour chaque architecture d'un véhicule électrique hybride.

Tableau I. 3. Avantages et inconvénients des différents VEH suivant l'architecture [8].

Configuration	Avantages	Inconvénients
Hybride série	-Autonome -Puissance comparable aux véhicules thermiques -batterie largement sous dimensionnée -Fonctionnement en mode zéro émission	-Tout repose sur la performance du ME -masse élevée -coût élevé
Hybride parallèle	-Autonome et performant - zéro émissions en mode tout électrique	-Encombrement du système -masse élevée -coût élevé

Hybride série-parallèle	Autonomie élevée -moins polluant	Complexité de commande -Coût et masse élevée
Toute électrique	Zéro émissions -silencieux	-Autonomie réduite -Coût élevé

I.8. Combinaison du véhicule électrique

On prend une plate-forme rectangulaire monté sur quatre roues pour finir l'architecture de véhicule électrique. Les deux roues motrices branché en parallèle dans l'arrière de véhicule et les deux roues libres en avant. Chaque paire de roue fonctionne de façon indépendante l'un de l'autre et sont entrainés par un actionneur à courant continu.

Nous gardons l'équilibre de ce véhicule grâce à les roues libre en avant et le changement de vitesse est réalisé par les roues motrices en arrière, ainsi que l'actionneur garent le changement de direction [11].

I.8.1 Critères de choix des roues motrices

Le performent de véhicule dépend essentiellement au leurs dimensions, donc les rayons de roues motrice commandent et ont un effet sur la vitesse et le couple fournit par le moteur électrique utilisé.

Il faut choisir des rayons faibles dans les roues motrices pour exploiter une accélération intéressante par ce que l'inertie de rotation vue par le moteur est directement proportionnelle à ce rayon au carré, mais il faut citer que c'est indésirable de diminuer trop les rayons de ces roues puisqu'ils sont inversement proportionnels à la vitesse. Le pneu de ours affect aussi l'accélération de véhicule [11].

I.8.2. Critères de choix des roues libres

Les différents mouvements possibles de véhicule créent par le véhicule besoin une stabilité, pour assurer une bonne stabilité de véhicule, il ne faut pas choisir des roues libres avec un poids élevé et une friction élevée, puisque ces deux derniers critères font une perturbation plus grande. Alor il faut prend des roues libres avec un facteur de friction faible [11].

I.8.conclusion

Dans ce contexte nous confirmons l'importance d'un véhicule électrique soit VEH ou VTE dans nos vies et son rôle pour vivre dans une nature verte et propre en réduisant la

quantité d'émissions de gazes toxiques dans l'atmosphère. Cela se voit clairement dans ce chapitre par explication physique, électrique et technique de ce type de véhicule à traves citer les configurations d'un véhicule électrique et identifier les différentes constituantes de la chaine de traction de ce dernier aussi identifier comment on commande les différents composants et comment elles sont réagies entre eux durant le démarrage, accélération et la conduite dans les cas critique et normale de véhicule.

Nous avons mentionné les avantages de véhicule tout électrique et véhicule électrique hybride mais cela n'empêche pas que ces voitures présentent quelques inconvénients que nous mentionner aussi.

Dans le prochain chapitre nous allons faire une description globale sur comment on gestionne et gère les sources d'énergie dans les véhicules hybrides à pile à combustible qui appartiennent à la catégorie la catégorie de véhicule électrique hybride série.

Chapitre II

Le véhicule électrique hybride à Pile à Combustible

Chapitre II : Véhicule électrique hybride à Pile à Combustible FCHEV

II.1. Introduction

Pour le but d'assurer l'énergie dans un VEH et stocker dans lui-même, nous présentons deux parties nécessaires afin de comprendre cette nouvelle technologie, le premier consacré pour mentionner et étudier les sources d'énergie hybride pour un véhicule électrique hybride qui sont la pile à combustible, la batterie électrochimique et le supercondensateur et citer leurs caractéristiques et leurs fonctionnements.

La deuxième partie nous analysons la méthode de gestion de l'énergie dans un VEH afin d'assurer la bonne utilisation de cette énergie et éviter au maximum le gaspillage d'énergie pendant toute la conduite.

II.2. Définition de FCVEH

Un véhicule hybride à pile à combustible se classe dans la catégorie des véhicules à architecture d'hybridation série dans laquelle l'ensemble moteur à combustion interne et générateur électrique est remplacé par une pile à combustible. Cette dernière est chargée de fournir l'énergie électrique nécessaire à la traction à partir d'une réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène [20].

II.3. Historique de FCVEH

La découvrir de la possibilité de générer l'électricité si en inverse l'opération de l'électrolyse d'eau est faite par Sir William Grove (souvent appelé le « père de la pile à combustible ») dans l'année 1839 mais jusqu'à l'année 1889 les deux chercheurs Charles Langer et Ludwig Mond ont inventé la première pile à combustible qui marche en utilisant l'aire et gaz de l'huile. Les inventions se sont poursuivies jusqu'au début des années 1900 afin de développer de plus les P. à C. mais le moteur à combustion interne Contribuer à stopper toute nouvelle recherche sur cette technologie [21].

En 1932, Francis Bacon inventé la première pile à combustible réussite qui marche avec l'hydrogène et l'oxygène ainsi la NASA soutient les recherches scientifiques en 1950 pour intégrer les piles à combustibles dans les instrumentes utilises dans les missions spatiales [21].

Au cours des dernières années, il y a des quelques sociétés de construction automobiles orientent vers utilisation de pile à combustible basée sur l'énergie de l'hydrogène dans la chaine de traction des véhicules [21].

II.3. La source d'énergie d'un FCVEH

II.3.1. La pile à combustible

Par définition, la pile à combustible (fuel cell) est un générateur d'électricité s'appuyant sur l'inversion de l'opération de l'électrolyseur d'eau. Donc elle convertit l'énergie chimique de combustible en énergie électrique [22].

Le P. à C. contient deux électrodes l'un est positif (nommé cathode) et le deuxième est négative (nommé anode). Pour simplifier le fonctionnement d'un P. à C. Nous pouvons dire que la cathode est alimentée par le combustible d'une façon permanent (hydrogène) tandis que l'anode est un oxydant en utilisant l'oxygène qui retrouve dans l'aire souvent. Pendant cette opération nous obtient l'électricité à travers un circuit externe vers une charge, l'eau et la chaleur [23].

Il faut dire que le rendement d'une P. à C. est de l'ordre de 35 % à 55 % par contre le rendement d'un moteur à combustion est de l'ordre de 20 %. L'hydrogène nécessaire pour alimenter P. à C. est stockée sous une haute tension par contre l'oxygène est tiré de l'aire autour de pile un compresseur [24].

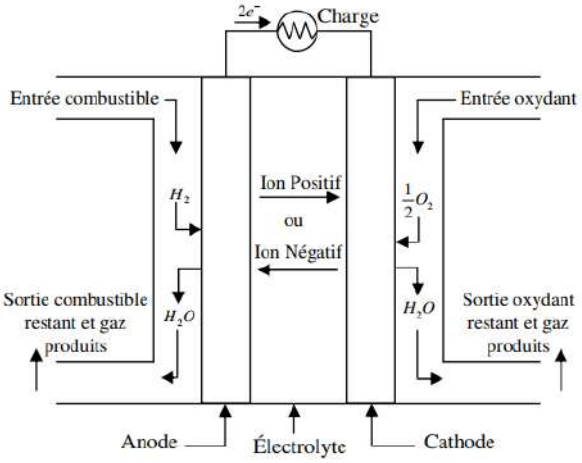


Figure II. 1. Schéma de principe d'une cellule de pile à combustible [22].

II.3.2. Les différents types de la pile à combustible

On distingue différents types de construction de piles à combustible selon des caractéristiques bien précises, nous les regroupons dans le tableau ci-dessous [22].

Tableau II. 1. Différents types de pile à combustible.

Type de la PAC	Electrolyte	Combustible possible	Température de fonctionnement	Gamme de puissance	Rendement électrique	Applications possibles
AFC	Potasse (KOH) liquide	Hydrogène	50 à 250°C	1W à 100kW	55 – 60%	Spatial, Défense, Equipements portables
DMFC	Membrane en polymère solide	Méthanol	70 à 90°C	1W à plusieurs kW	30 – 45%	Transport, Equipements portable
PEM	Membrane en polymère solide	Hydrogène	70 à 100°C	1W à 10MW	30 – 45%	Spatial, Transport, Stationnaire, Equipements portable
PAFC	Acide phosphorique liquide	Hydrogène, gaz naturel (reformage)	150 à 220°C	200kW à 10MW	35 – 45% 75% en cogénération	Stationnaire, Cogénération, Transport
MCFC	Sel de carbonate fondu liquide	Hydrogène, gaz naturel, méthanol…	600 à 800°C	500kW à 10MW	50 – 60%	Stationnaire, Cogénération
SOFC	Céramique solide	Hydrogène, gaz naturel, méthanol…	700 à 1050°C	1kW à 100MW	50 – 55% 70% en cogénération	Stationnaire, Cogénération

Le type le plus utiliser de P. à C. pour les applications de transport est le membrane échangeuse de protons (PEM) afin que ses caractéristiques pour le fonctionnement soient : la basse température (prend un court temps pour le fonctionnement et la repense rapide à la demande de puissance), un électrolyte solide (absence de vibration ou des fuites) [24].

II.3.3. Principe de fonctionnement de P. à C

Le principe de fonctionnement de la P. à C. est assez simple, il est basé sur le procédé inverse de l'électrolyse. Ce générateur fonctionne sur le mécanisme de l'oxydoréduction. Elle comporte deux électrodes : une anode oxydante et une cathode réductrice, séparées d'un électrolyte

central par des catalyseurs. Liquide ou solide, le matériau conducteur de l'électrolyte permet de maîtriser le passage des électrons. Un réservoir fournit en continu l'anode et la cathode en combustible : dans le cas d'une pile à hydrogène, l'anode reçoit de l'hydrogène et la cathode de l'oxygène, autrement dit de l'air. L'anode provoque l'oxydation du combustible et la libération d'électrons, contraints par l'électrolyte chargé en ions de passer par un circuit externe. Ce circuit externe offre donc un courant électrique en continu [25]

Ions et électrons, réunis dans la cathode, se recombinent ensuite avec le second combustible, généralement l'oxygène. Il s'agit de la réduction, générant de l'eau et de la chaleur en plus du courant électrique. Tant qu'elle est approvisionnée, la pile fonctionne en continu [25].

On peut résumer la réaction chimique qui a lieu pour la production de l'électricité en utilisant le PFM par les équations suivantes :

$$2H^+ + 2e^- + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \qquad \text{À la cathode} \qquad \text{(II.1)}$$

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \qquad \text{À l'anode} \qquad \text{(II.2)}$$

Alors la réaction chimique totale est :

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \qquad \text{(II.3)}$$

II.3.3.1. Rôle du catalyseur

Pour que le catalyseur puisse travailler efficacement, la création de zones actives doit être assurée. Ces zones mettent en présence à la fois le gaz réactif, les électrons, les protons et le catalyseur, cela se réalise au niveau de l'interface électrode-électrolyte [26].

II.3.3.2. Rôle de l'électrolyte

Les électrolytes utilisés dans les PAC sont soit liquide, soit solide. Leur rôle est d'une part de permettre la migration des ions d'une électrode à l'autre, et d'autre part la séparation physique des deux compartiments anodique et cathodique. Le type d'électrolyte détermine la température de fonctionnement de la pile [26].

II.3.3. Système P. à C. et auxiliaires

Pour assurer le bon fonctionnement d'une P. à C. il faut l'ajouter des composantes supplémentaires qui forment un système complet (voir la Figure II.2).

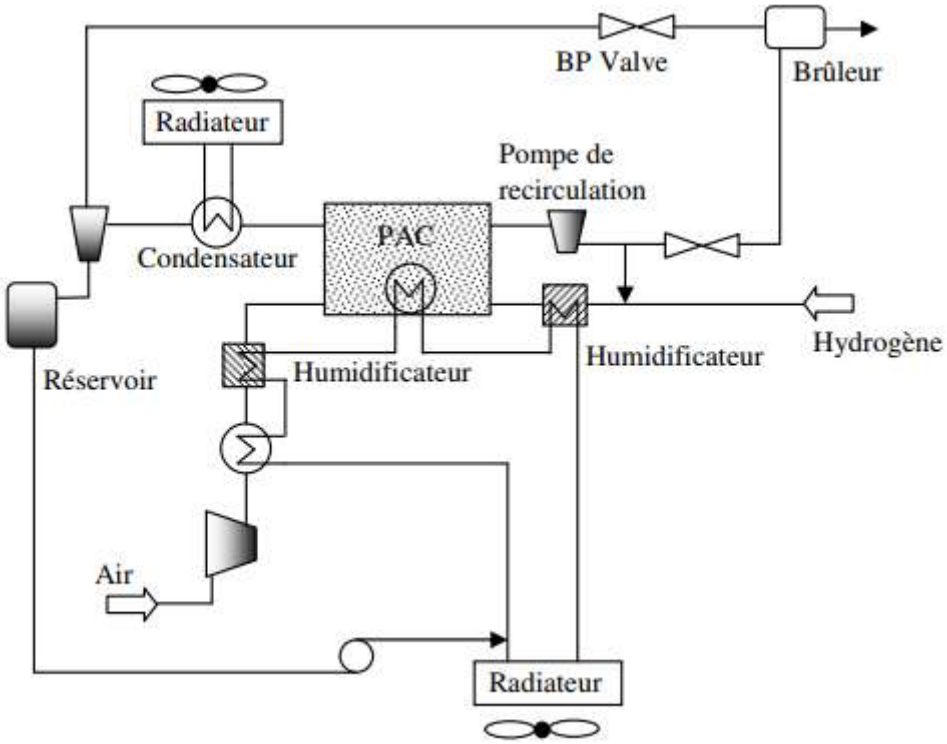


Figure II. 2. Système PAC et auxiliaires [20].

On peut deviser ce system en quatre éléments principaux sont la pile elle-même, le circuit d'alimentation en hydrogène, le circuit d'alimentation en air et enfin le sous-système de gestion de l'eau et de la température.

- ***Circuit d'alimentation en hydrogène***

Vu que la pile à combustible besoins de l'hydrogène, alors il faut fournir un circuit simple pour assure ce gaz si nécessaire et le stocker sous pression environ (300 à 700 bars) dans des réservoirs. L'hydrogène est ensuite recerclé moyennant une pompe pour maintenir une distribution de flux dans le compartiment anodique.

L'anode peut également fonctionner en régime fermé et dans ce cas une purge occasionnelle contrôlée par une valve doit être effectuée pour éviter la stratification de l'azote susceptible d'avoir traversé la membrane. Le résidu d'hydrogène est consommé dans un petit bruleur catalytique. Éventuellement, l'hydrogène est humidifié avec de l'eau dé-ionisée moyennant un système d'humidification à membrane [20].

- ***Circuit d'alimentation en air***

Le rôle de compresseur est garanti l'arrivé de l'oxygène à la cathode de la P. à C. avec conditionnement externe de la température et de l'humidification. Il y a une vanne dans

l'entrée de la pile afin de contrôler la pression. Typiquement, l'air à la sortie sert à alimenter le brûleur catalytique en oxydant. L'air à la sortie du compresseur est conditionné à la température de la pile en utilisant un échangeur de chaleur alimenté avec l'eau du circuit de refroidissement. Comme l'anode, l'humidification de l'air est assurée par un humidificateur à membrane [20].

On a choisi les convertisseurs de type volumétriques par ce qu'ils convient plus afin de traiter les débits de fluide relativement faibles.il y a deux catégories de convertisseurs volumétriques utilises sont : Les compresseurs alternatifs et Les compresseurs rotatifs mais dans le cas d'un véhicule hybride à pile à combustible de type PEM on utilise le compresseur rotatif globalement car il ne besoins pas de lubrification [20].

- ***Sous-systèmes de gestion d'eau et de température***

Malgré que l'efficacité de la pile à combustible pour la production d'électricité mais nous avons observés le problème de réchauffement de cette dernière. La température peut atteindre typiquement entre 60° et 80 °C pendant le fonctionnement donc il est nécessaire d'ajouter un system de refroidissement. Les échangeurs de chaleur utilisés pour cela, effectuent en parallèle différentes autres fonctions notamment le conditionnement de l'air à la sortie du compresseur à la température de la pile et la condensation de l'eau pour l'utiliser dans l'humidification de la pile [20].

La gestion de l'eau dans un système pile est essentielle pour maintenir une humidification continue de la membrane à travers l'humidification des gaz d'entrée. Différents systèmes plus ou moins compliqués assurent cette fonctionnalité. L'eau nécessaire à l'humidification est typiquement récupérée à la sortie de la cathode. Un condensateur à la sortie de la pile peut être utilisé en fonction de la température et de la pression comme montré dans la figure II.2. [20].

II.3.5. Applications des piles à combustible

On distingue habituellement les applications des piles à combustible entre applications portables, stationnaires et embarquées.

II.3.5.1. Applications portables

Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une

très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. 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. La technologie qui est utilisée est la pile PEM du fait de sa basse température de fonctionnement et de sa technologie tout solide alimentée soit directement en hydrogène, soit avec du méthanol. Concernant le coût, la référence est celle de la meilleure batterie actuelle soit environ 0,80 €/Wh [27].

II.5.3.2. Application automobile :

Pour la traction automobile, seules les PEMFC sont pressenties. Leur température de fonctionnement relativement faible (proche de 80˚C) permet d'assurer une plus grande souplesse de fonctionnement. La montée en température de la pile est plus facile et plus rapide pour les piles « basses températures » que pour les piles « hautes températures » nécessitant un système de préchauffe important. Un démarrage rapide « à froid » est alors envisageable. Au niveau environnemental, les nuisances sonores sont faibles car les applications envisagées ne possèdent pas de pièces mobiles. Seuls les différents auxiliaires du système peuvent être source de bruit. Il faut également noter que les produits de réaction des piles sont non polluants et par conséquent les émissions de gaz nocifs de la pile seule sont nulles. Cependant, il faut également considérer la fabrication de combustible. L'utilisation d'un reformeur produit des émissions de $\mathbf{CO_2}$, de particules et de $\mathbf{NO_x}$ non nulles mais souvent inférieures à celles des véhicules à moteur thermique. Remarquons toutefois que les émissions de gaz polluants varient fortement avec le procédé de production de l'hydrogène. Les piles à combustibles peuvent être utilisées en complément d'une motorisation quelconque pour l'alimentation en électricité des appareils de bords (climatisation, appareils électroniques, confort...) en tant qu'APU (Auxiliary Power Unit). Pour ces applications embarquées, les P. à C sont en concurrence avec les piles SOFC et AFC [27].

II.5.3.3. Applications stationnaires

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW).

De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. Ils sont généralement basés autour de la technologie PEMFC même si d'autres technologies (MCFC, SOFC) font également l'objet de tests mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation. Dans le deuxième domaine, plusieurs projets sont également en cours de réalisation. Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle. Ces appareils basés sur une technologie de type P. à C fournissent électricité et chaleur (chauffage et eau chaude). Ils sont alimentés par des combustibles classiques : un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible [27].

II.3.5.4. Applications embarquées

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou marchandises) exige une durée de fonctionnement bien plus importante [27].

II.4. La source secondaire d'énergie

Afin de garantir le bon fonctionnement de ce type de véhicule il faut soutenir la pile à combustible par une source secondaire d'énergie et parmi les principales causes est le temps de repense de la pile est un peu lent et ce dernier peut affect négativement sur la performance du véhicule en cas d'accélération [23].la figure ci-dessous montre un exemple pour un véhicule électrique hybride à pile à combustible avec la source d'énergie secondaire.

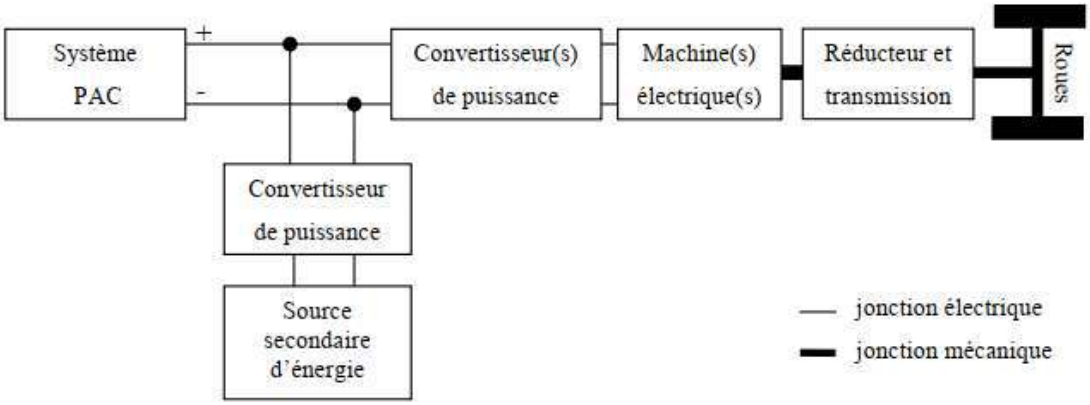


Figure II. 3. Exemple d'architecture de véhicule à pile à combustible hybride [23].

La source secondaire peut être rechargée par récupération de l'énergie cinétique ou par le système pile à combustible. Cette source caractérisée par la réversible de puissance telle que : la batterie électrochimique et le supercondensateur [23]. La figure suivante appelée diagramme de Ragone identifier les différences en niveau de la puissance spécifiques et l'énergie spécifique :

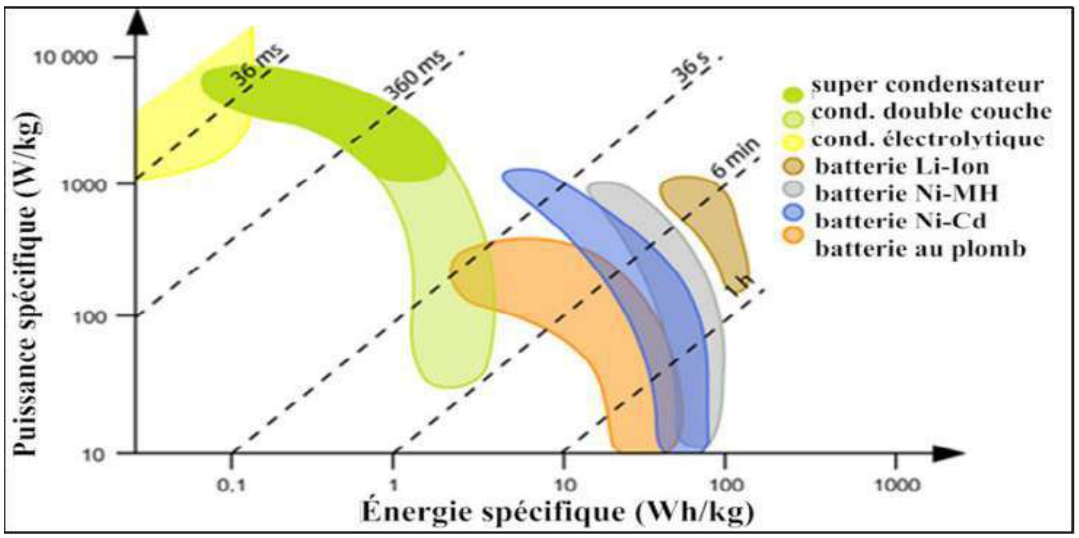


Figure II. 4. Diagramme de Ragone [24].

L'énergie spécifique est la quantité d'énergie par unité de masse qui stocké dans la source d'énergie secondaire par contre la puissance spécifique exprime la quantité de puissance délivré par la source d'énergie-même [24].

II.4.1. Batterie

Les batteries électro-chimiques ou le plus couramment utilisé les batteries sont des dispositifs électroniques qu'on le rôle de convertir l'énergie électrique en énergie électro-chimique en état de charge et faire le contraire dans l'état de décharge. Ce dispositif se

construit d'un pack des cellules, chaque cellule se compose de trois éléments sont : une électrode positive, électrode négative et un électrolyte. On peut dire que L'électrolyte est une interface dans lequel se déroule les réactions d'oxydation et réduction (voir la figure II.5) [21].

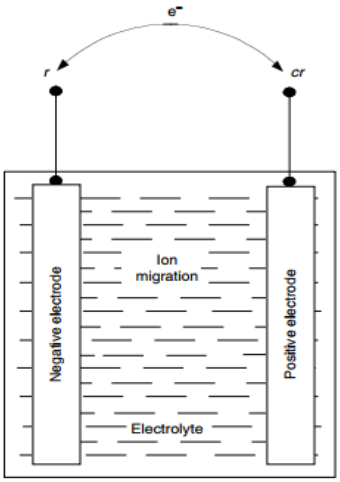


Figure II. 5. Une cellule de batterie électrochimique typique [21].

Pour Producer une grande énergie stockée, il faut un grand nombre d'électrons échangés par mole ainsi qu'une réaction entre un élément très oxydant et un autre très réducteur (le mouvement des ions) [28].

La température est un élément très affecter sur la productivité des accumulateurs selon leurs caractéristique de fabrication, il y a quelque type soient inefficaces à basse température (<0°C) et y a aussi d'autre requièrent une température élevée pour fonctionner (300°C). Afin d'améliorer la quantité de puissance délivrer par la batterie ou bien l'accumulateur il faut prendre aux soins des facteurs tels que la surface et la porosité d'électrodes [28].

Il existe plusieurs familles d'accumulateurs tout dépend la technologie de fabrication nous mentionnons les plus importants dans le tableau suivant :

Tableau II. 2. Les différents types d'accumulateurs **[28].**

Types de batteries	Energie Spécifique (Wh/kg)	Puissance spécifique (W/kg)	Nombre de cycles
Plomb ouvert	30 à 40	100 à 110	1200 à 1500
Plomb étanche	25 à 35	110 à 120	500 à 800
Ni-Cd	40 à 55	170 à 190	2000 à 3000
Ni-Mh	70 à 80	>150	>1500

Lithium-ion	120 à 150	240	>1000

- **L'accumulateur au plomb**

Ce type est adopté par General Motors et considéré parmi le plus ancien et le plus utilisé à cause de son cout qu'il moins cher parmi les autres types, présente une bonne durée de vie, sa tension d'élément est de 2V. Malheureusement son énergie massique faible (environ de 400Wh/Kg) [3].

- **L'accumulateur au Nickel-Cadmium**

Ce type présente une performance meilleure à travers une bonne énergie massique, sa tension est 1.2V donc c'est le plus commercialisé plus que l'accumulateur au plomb. Son inconvénient c'est qu'il a une mauvaise tenue à des températures supérieures à 40°, de plus le cout élevé et la matière toxique utilisé (cadmium). Les constructeurs français dans le domaine automobiles ont choisi ce type pour équiper leurs véhicules commercialisés depuis 1995 [3].

- **La Batterie Lithium-ion**

Le premier annoncement de batterie li-ion est en 1991[4]. Le type Ni-MH est la plus répandue puisqu'il représente une bonne performance au niveau de la capacité, une longue durée vie et aussi moins couteau [4]. Ils sont fort prometteurs étant donné que leur énergie et puissance massiques, respectivement de 150 Wh.kg-1 et 300 W.kg-1, sont très élevées par rapport aux autres technologies. La caractéristique le plus intéressent est le poids léger de lithium parmi le reste des matériaux. Actuellement. Il existe deux familles d'accumulateurs au lithium sont : Les accumulateurs au « Lithium-Carbone » ou « Lithium-Ion » et Les accumulateurs au « Lithium-Métal », la différence entre les deux familles est sur la matière utilisé dans électrode négative soit carbone graphite ou de lithium métallique [22].

II.4.2. Supercondensateur

Le principe d'un supercondensateur a été découvert par le physicien allemand Hermann von Helmholtz dans les années 1853. Ce physicien a été remarqué qu'on peut regrouper les ions de l'électrolyte mis en contact avec les électrodes si on applique une différence de potentiel sur l'électrode [29].

Le supercondensateur est également appelé condensateur électrique double couche (EDLC) [30], est un system électrochimique rassemble les caractéristiques entre les condensateurs électriques et les accumulateurs électrochimiques [7] donc il représente une source d'énergie seconder répand au les demandes fortes et rapide de puissance d'un véhicule hybride à pile à combustible lors des phases de démarrage, d'accélération et de freinage [20]. Le EDLC se compose de deux électrodes de carbone poreuses immergées dans un électrolyte, si on applique une certaine tension sur les électrodes on observe que les ions négatives migrer vers l'électrode positives aussi les ions positives migrer vers l'électrode négative, ce phénomène se déroule dans l'électrolyte [31].

Donc le nom de double couche a été formé à partir de ce phénome (une couche pour chaque électrode). Les supercondensateurs sont caractérisés par la porosité des électrodes et la petite distance entre les couches donc ils aident d'améliorer la capacité de cette composante [31].

La seule différence entre un conventionnel capacité (électrochimique) et super condensateur est l'absence de couche diélectrique dans l'électrolyte [29].

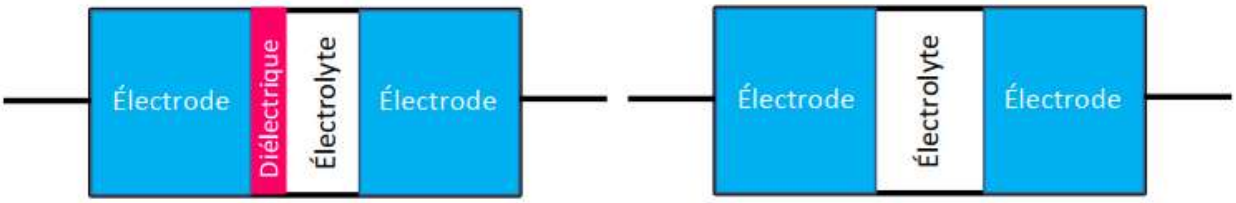


Figure II. 6. Différence entre un condensateur classique (à gauche) et un supercondensateur (à droite) [29].

II.4.3. Applications courantes des super condensateurs

Les supercondensateurs sont utilisés dans les applications du domaine du transport, pour la conception des véhicules électriques et hybrides, dans le but de diminuer l'émission de gaz à effet de serre et de la pollution acoustique, en améliorant l'efficacité énergétique et en minimisant le coût de transport grâce à la récupération d'énergie notamment. Deux exemples d'applications couramment envisagées sont de permettre le démarrage fréquent des moteurs thermiques par des supers condensateurs, en remplacement des batteries (systèmes Stop & Start…). Aussi La traction électrique autonome entre deux stations du transport urbain, basée sur le principe du biberonnage en station pendant l'arrêt [27].

II.4.4. Applications potentielles des super condensateurs

Dans les applications qui se précisent actuellement, les super condensateurs sont utilisés en remplacement et surtout en complément des piles et accumulateurs électrochimiques afin d'assurer la fonction puissance qui leur fait défaut. On trouvera ces composants dans les systèmes nécessitant une importante énergie délivrée en un temps bref. Les principaux secteurs concernés par les super condensateurs sont :

- L'informatique et la télécommunication pour les petits composants à faible énergie spécifique.
- Les alimentations de secours et l'automobile concernant les composants à haut énergie et haute puissance spécifiques.
- Bien d'autres applications sont envisageables, et ce dans de nombreux secteurs d'activités : médical (défibrillateur), industriel (robotique), militaire (canon électromagnétique) [27]

II.4.5. La différence entre les batteries et les supercondensateurs

Le supercondensateur possède une puissance instantanée plus importante que celle des batteries et une énergie plus grande que celle des condensateurs classiques. Sa durée de vie est plus élevée que celle des batteries (environ 10 ans). Les condensateurs électrochimiques possèdent une très grande densité de puissance mais une très faible énergie spécifique. Les SCs sont utilisés généralement pour des constantes de temps inférieures à quelques centaines de (ms). Les batteries ont une densité de puissance très faible et une énergie spécifique élevée. Elles peuvent être utilisées avec une constante de temps supérieure à la mn.

En ce qui concerne la pile à combustible c'est un convertisseur d'énergie et non pas un élément de stockage. Entre les batteries et les condensateurs électrochimiques se trouvent les supercondensateurs qui sont utilisés pour stocker l'énergie avec une constante de temps inférieure à quelques dizaines de secondes. [32].

II.4.6. Association batterie/super condensateur

Il existe plusieurs configurations pour connecter les sources de stockage de l'énergie à l'utilisateur : série, parallèle et avec un ou deux convertisseurs. Le ou les convertisseurs peuvent être des onduleurs qui sont généralement utilisés dans des applications de fortes

tensions du bus continu. Pour l'hybridation d'une source (batterie/super condensateur) dans le cas d'un véhicule hybride, une architecture à double étage d'onduleur a été étudiée par [33].

II.5. Moteurs synchrones à aimants permanents

II.5.1. Présentation de la machine synchrone a aiment permanent

La machine synchrone à aimants permanents est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor. Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source. Le rotor est une partie mobile qui est monté sur l'axe de rotation. Voici la structure de MSAP montrée dans la figure suivante (Figure II.7).



Figure II. 7. Structure de moteur synchrone à aimants permanents [34].

II.5.2. Constitution de la machine synchrone à aimants permanents

II.5.2.1. Structure de stator

Le stator est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui constituent trois bobinages indépendants. Elles sont destinées à créer un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par un système de tensions ou de courants triphasés. Les topologies rencontrées dans les bobinages des machines tournantes à courants alternatifs sont nombreuses [35].

On distingue deux grandes catégories de bobinage. Les bobinages dits réguliers ou les bobinages à pas diamétral, les bobinages à pas raccourcis, les bobinages répartis et les bobinages non réguliers, comme les bobinages à trous ou à nombre fractionnaire d'encoches

par pôle et par phase. La figure II.8. Présente un exemple de bobinage statorique régulier à une seule voie par phase et deux paires de pôles. Les machines à basse tension sont habituellement bobinées en utilisant du fil cylindrique émaillé non rangé. Chaque conducteur, servant à constituer les spires, est le plus souvent formé de plusieurs fils, ou brins, en parallèle. Les conducteurs ainsi réalisés ne sont pas isolés entre eux. Comme on ne peut pas se fier suffisamment à l'isolation apportée par l'émail, qui peut avoir été altérée par les opérations d'enroulement des spires et d'insertion des bobines dans les encoches, ou présenter intrinsèquement des faiblesses localisées, on doit isoler les bobines par rapport à la masse, c'est-à-dire l'empilage de tôles magnétiques, de même que l'on doit isoler entre elles les bobines appartenant à des phases différentes [35].

L'isolation des bobines par rapport à la masse est réalisée en plaçant dans les encoches, avant toute opération d'insertion du bobinage, une feuille de matériau isolant en forme de U qui épouse tout le périmètre utile de l'encoche. De plus amples détails sur les topologies et les technologies de bobinages sont largement développées dans la figure (II.8).

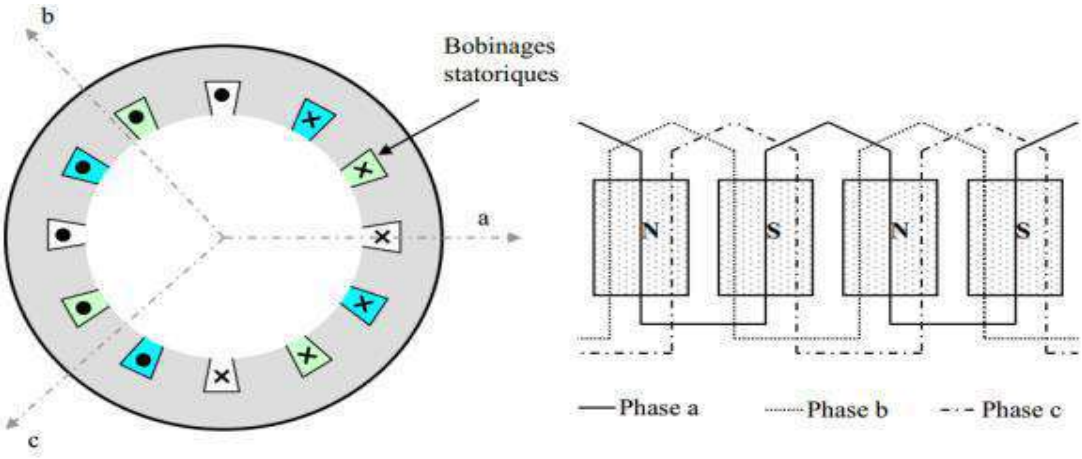


Figure II. 8. Schéma de bobinages statoriques

II.5.2.2. Structure du rotor

Il est Représenté la partie mobile de la MSAP, formée d'un assemblage de tôles et d'aimants créant le flux d'inducteur, il est généralement de deux types :

a) Rotor possédant des pièces polaires servent à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement, soit perpendiculairement à

l'entrefer ou de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.

b) Rotor sans pièces polaires donc à entrefer constant, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer.

Il existe plusieurs types de la machine synchrone à aimants permanents qui dépendent du placement des aimants permanents sur le rotor de la machine. En effet, la disposition des aimants a une influence directe sur la saillance de la machine (rapport entre les inductances de l'axe direct $\boldsymbol{Lsd}$ et de l'axe en quadrature $\boldsymbol{Lsq}$).

Les principales structures des rotors utilisées dans les MSAP sont les suivantes :

• Aimants montés en surface (machine à pôles lisses) Dans ce type de machine, les aimants sont collés directement à la surface du rotor. La perméabilité des aimants étant proche de celle de l'air, l'entrefer de la machine peut être considérée comme constante. Ainsi, la machine est à pôles lisses (absence de saillance $\boldsymbol{Lsd = Lsq}$). Cette structure est souvent utilisée pour sa simplicité de fabrication et de commande mais aussi en raison de son rapport poids-puissance avantageux, ce qui rend cette solution très adaptée aux applications embarquées. Cependant, les aimants placés en surface sont susceptibles de se décoller à haute vitesse car ils sont soumis directement aux forces centrifuges. Une solution pour remédier à ce problème est de consolider le collage des aimants avec un tube de matériau amagnétique [26].

• Aimants insérés (machine à pôles saillants) Cette structure est analogue à celle des aimants montés en surface. Cependant, les ouvertures entre les aimants sont remplies de fer pour créer une saillance ($\boldsymbol{Lsq > Lsd}$). Cette machine à pôles saillants présente également un bon rapport poids puissance et le collage des aimants ne nécessite plus d'être consolidé [26].

• Aimants enterrés (machine à pôles saillants) Dans ce type de machine, les aimants permanents sont directement enterrés dans le rotor. Cette structure présente un rapport de saillance plus élevée que celle à aimants insérés ($\boldsymbol{Lsq > Lsd}$). Le risque de décollement des aimants est nul cependant, le rapport poids puissance est réduit [26].

• Aimants à concentration de flux (machine à pôles saillants) Cette structure utilise une distribution tangentielle de l'aimantation (au lieu d'une distribution radiale dans les structures précédentes), ce qui implique une forte concentration du flux magnétique dans le rotor. Cela permet d'augmenter sensiblement l'induction dans l'entrefer. Cette topologie utilise

principalement des aimants de type « ferrite » pour éviter la saturation magnétique de l'acier et s'applique donc pour des applications où le volume n'est pas une contrainte [26].

Il existe beaucoup d'autres types de MSAP, notamment des machines à saillance inversée avec $Lsd > Lsq$ utilisées pour des applications particulières. Dans la suite de ce mémoire, les machines synchrones à Aimants Permanents utilisées seront toujours des machines à pôles lisses avec des aimants montés en surface car elles présentent les meilleures caractéristiques pour des applications embarquées à faible encombrement [26].

II.5.3. Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents

Le stator alimenté par un système de tensions triphasé crée un champ tournant dans l'entrefer. Ce champ magnétique tourne à la vitesse de p f tours par secondes avec f fréquence d'alimentation des bobinages statoriques, et p le nombre de paires de pôles. Le rotor composé de p aimants permanents va alors s'aligner avec le champ tournant. Le rotor tourne ainsi à la même vitesse que le champ tournant. [35] La vitesse de rotation du rotor est donc :

$$\Omega = \frac{P}{\omega} [r_a d / s] \quad \text{(II.4)}$$

II.5.4. Les avantages et les inconvénients de la machine synchrone à aimants permanents

II.5.4.1. Les avantages

La machine synchrone à Aimants Permanents présente plusieurs avantages par rapport à l'autre type de machine : à courant continue synchrone a excitation électrique et asynchrone. Parmi ces avantages on peut citer [35] :

- Meilleures caractéristiques thermiques la localisation de pertes joules et pertes fer au stator simplifie le refroidissement de la machine.
- Puissance massique et volumique important.
- Un rendement et facteur de puissance élevé.
- K2Aucun courant d'excitation (30% de perte ou moins)
- Une capacité à fonctionner à haute, voire très haute vitesse.

II.5.4.2. Les inconvénients

- Dans le moteur synchrone à aimants permanents le commutateur du moteur à courant continu est remplacé par un commutateur électronique, ce qui a pour effet de rendre le contrôle de ce moteur plus complexe et couteux que celui d'un moteur à courant continue [35].

- La présence de pulsations de couple. Selon la méthode de commutation utilisée, le moteur synchrone est plus ou moins sujet à ce phénomène. La commutation sinusoïdale d'un contrôleur complexe et de capteur de courant sophistiqué (couteux). La commutation trapézoïdale, permet d'utiliser un contrôle et des capteurs de courant plus simple et moins couteux (exemple : capteur à effet hall) mais implique la présence de fort couple [35].

- La présence d'aimants permanents majore le prix de moteur synchrone, notamment dans le cas de l'utilisation d'Aimants du type terre rare, ces aimants présentent de très grand qualité (champ coercitif, tenue en chaleur, etc.) par rapport aux Aimants<> mais ont un prix aussi beaucoup plus élevé [35].

- Le contrôle basé sur une commutation électronique augmente la complexité et donc le prix du contrôleur et de variateur. A cela s'ajoute le coût des capteurs supplémentaires nécessaires à la boucle du courant [35].

- Risque de désaimantation (irréversible) : limite de température maximale, défluxage impossible dans les machines à courant continu, possible dans les machines synchrones par contrôle de l'angle d'autopilotage [35].

- Pertes par courant de Foucault dans les aimants.

II.5.5. Les Domaines d'application de MSAP

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance, allant de centaines de Watts (servomoteurs) à plusieurs méga Watts (systèmes de propulsion des navires), dans des applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation l'entraînement à vitesse variable, et la traction. C'est ainsi que le moteur synchrone peut être très utile dans de nombreuses applications, comme [35] :

- Les équipements domestiques (machine à laver le linge) ;
- Les automobiles ;

- Les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements ;
- Les applications robotiques ;
- La production d'électricité ;
- La propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins,
- Les machines-outils ;
- Les applications de l'énergie de l'éolienne.

II.6. Conclusion

Dans le premier chapitre, on a présenté les différentes architectures des véhicules : VTE et VEH. Ainsi on a signalé sur la présence de véhicule électrique hybride à pile à combustible (FCVEH) et signaler que ce type de véhicule appartient aux véhicules électriques hybrides d'architecture série dont le groupe moteur de combustion-générateur est remplacé par une PAC.

Ce deuxième chapitre a introduit la définition de FCVEH et citer un bref historique sur ce dernier. Ensuite, les différentes parties qui caractérises la chaine de traction d'un FCVEH, à savoir la PAC (type PEM) et son système pour fonctionner correctement, les sources secondaires d'énergie soit accumulateur ou le supercondensateur, le moteur électrique, le véhicule, afin de pouvoir évaluer son performance et son comportement en intégrant toutes ces sources,

C'est pour cela, on peut dire que le deuxième chapitre a été consacré à une étude théorique sur le véhicule électrique hybride à pile à combustible et une analyse de leurs caractéristiques, et son comportement.

Le chapitre suivant est totalement consacré à la modélisation et l'étude de comportement d'un FCVEH à l'aide des équations mathématiques.

Chapitre III

Modélisation d'un véhicule électrique hybride à P.A C

Chapitre III : Modélisation d'un véhicule électrique hybride à P.A C

III .1. Introduction

Ce chapitre est consacré pour faire une modélisation mathématique de composantes de puissances de chaine de traction afin de répondre aux demandes de puissances dans un véhicule électrique hybride à pile à combustible.

Donc nous allons décrit le comportement de source d'énergie qu'est la pile à combustible et les deux éléments de stockage l'énergie sont le pack de la batterie et le pack du supercondensateur aussi les différents convertisseurs tels que le convertisseur ***boost*** qui est lié au P. à C.et les deux convertisseurs ***boost/Buck*** qui sont liés au le pack de batterie et le pack de supercondensateur qui ont un rôle très important pour la propulsion [7].

III .2. Modélisation du stack de pile à combustible (PEMFC)

Nous mentionnons dans le chapitre précédent que la pile à combustible fonctionne avec ses auxiliaires sous forme d'un system regroupe le tous les éléments. Ces éléments provoquent des pertes lors de leurs fonctionnements. Alors nous allons faire un modèle pour modéliser le stack du PAC.

Pour définir un bon modèle mathématique, il est impératif de prendre en considération le maximum des hypothèses tels que [36] :

- La pile utilise des gaz purs.
- Les gaz sont idéaux et les lois sur les gaz idéaux sont applicables et valables.
- La température dans la pile est constante et régulée.
- Les équations de Nernst sont valables.
- Le H_2Oproduit est globalement liquide.
- Tous les gaz d'échappement dus à la réaction sont évacués.

III .2.1. Caractéristiques statiques d'une cellule de la P.A C.

Actuellement, il existe plusieurs modèles qui modélise le system P. à C. donc nous choisissons un model statique décrive la courbe de polarisation de la pile à combustible. Cette courbe montre les quatre termes : la tension théorique à vide *E*, la surtension d'activation $\boldsymbol{V_{act}}$ (ou chute d'activation : région 1), la surtension ohmique $\boldsymbol{V_{ohm}}$ (ou chute ohmique : région 2) et la surtension de concentration $\boldsymbol{V_{conc}}$ (ou chute de concentration : région 3) [7].

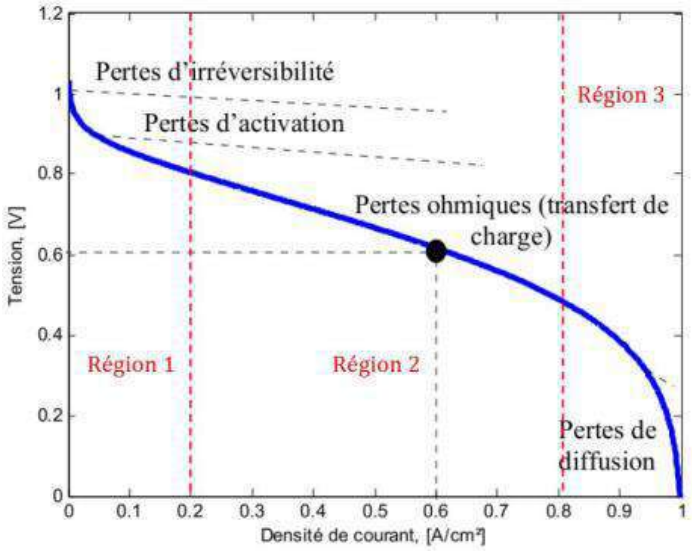


Figure III. 1. Caractéristique statique d'une cellule de P. à C [7].

On note que [22] :

a) Les pertes d'activation, cause de la polarisation d'activation,
b) Pertes ohmiques, origine de la polarisation ohmique,
c) Pertes de concentration, source de la polarisation de concentration.

On définit que l'équation de la tension de pack

$$V_{pack} = E - V_{act} - V_{ohm}V_{conc} \quad \text{(III.1)}$$

III .2.1.1. Les pertes d'activation

Les pertes d'activations sont dues essentiellement au cinétique des réactions électrochimiques sur la cathode et l'anode [37], Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode. Il s'ensuit que les pertes d'activation sont essentiellement dues aux réactions cathodiques [38]. La relation entre les pertes d'activation et la densité de courant est donnée par l'équation de « Tafel » :

$$\Delta V_{act} = A \ln\left(\frac{i_{cell}+i_n}{i_0}\right) \quad \text{(III.2)}$$

Avec :

ΔV_{act} : Chute de tension à cause de pertes d'activation en volt [V].

A : Pente de la droite de « Tafel » qui est de l'ordre de 0.06V [14].

i_{cell} : Courant délivré par la cellule PEM [mA.cm-2].

i_0 : Courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode électrolyte [mA.cm-2].

i_n : Courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte [mA.cm-2].

III .2.1.2. Les pertes de concentration

La cause principale pour les pertes de concentration est due à l'incapacité de system de garantit la concentration initiale des matières réactants ($\boldsymbol{O_2}$,$\boldsymbol{H_2}$) à l'électrode. Ce déficit entraîne une diminution de potentiel. Donc on obtient une dégradation de potentiel. De nombreux facteurs peuvent contribuer à la polarisation de concentration : la dissolution des réactants ou des produits dans l'électrolyte, la faible diffusion du gaz à travers les électrodes poreuses, la diffusion des réactifs ou des produits du site de la réaction vers l'électrolyte ou l'inverse [38].

On définit l'équation de ce type de pertes :

$$\Delta V_{cons} = -B.\ln\left(1 - \frac{i_{cell}+i_n}{i_L}\right) \quad \text{(III.3)}$$

Avec :

ΔV_{cons} : Chute de tension due aux pertes de concentration en volt [V].

B : Constante de transport ou de transfert de masse (la pente de droit de Tefal).

i_L : Un courant limite en Ampère [A].

III .2.1.3. Pertes ohmiques

Les pertes ohmiques sont dues au passage des protons à travers la résistance de la membrane, et à la circulation des électrons dans la résistance interne des électrodes. La chute de tension ΔV_{ohm} résultante dépend linéairement du courant débité.

On peut défini cette chute de tension par équation suivante :

$$\Delta V_{ohm} = R_m \cdot (i_{cell} + i_n) \quad \text{(III.4)}$$

Avec :

ΔV_{ohm} : Chute de tension due aux pertes ohmiques [V].

R_m : Résistance totale de la pile à combustible [kΩ.cm2].

III .2.1.4. Expression de la tension aux bornes du stack en fonction de courant débité

On définit l'expression de la tension d'une cellule de PEM par sommer l'ensemble des chutes de tension causés par les pertes mentionnes ci-dessus [14].

Alors on obtient :

$$V_{cell} = E - R_m(i_{cell} + i_n) - A\ln\left(\frac{i_{cell}+i_n}{i_0}\right) + B.\ln\left(1 - \frac{i_{cell}+i_n}{i_L}\right) \quad \text{(III.5)}$$

III .3. Modélisation du pack de batterie Ion-Lithium

Nous avons choisi une batterie de type lithium-ion puisqu'elle est la plus utilisée dans le domaine d'automobile actuellement à causes de sa bonne performance par rapport les autres types. Il existe plusieurs schémas qui représentent la modélisation de la batterie li-ion. Alors la figure ci-dessous représente l'une parmi ces modélisations de cette composante de stockage dans la chaine de traction de FCVEH (voir Figure. III .1). Nous utilisons cette modélisation pour présenter la synthèse de lois de commande du system aussi pour faire une simulation d'un élément de batterie [39].

Cet élément se compose de plusieurs éléments à savoir [40] :

- D'une résistance série r_s , représentative des chutes de tension de nature purement ohmique dans l'électrode et l'électrolyte,
- D'une capacité $\boldsymbol{C_{DL}}$ dite de couche double, représentative de la couche double électrique apparaissant à l'interface électrode-électrolyte,
- D'une source de tension $\boldsymbol{E_{th}}$ représentative de la tension d'équilibre d'électrode, laquelle dépend du couple électrochimique mis en jeu et de la concentration en réactifs à l'équilibre,
- D'une impédance faradique $\boldsymbol{Z_F}$, représentative des phénomènes de transfert à l'interface électrode-électrolyte et des phénomènes de transport de matière dans l'électrolyte,

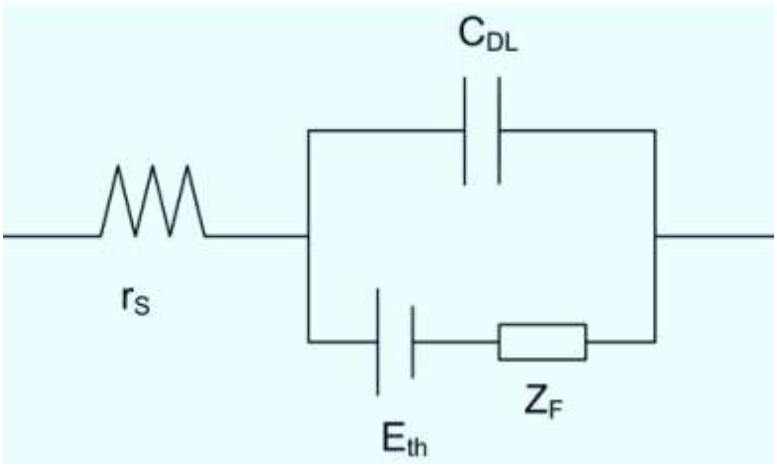


Figure III. 2. Schéma équivalent d'un système électrochimique électrode – électrolyte [40].

Pour simplifier les calculs nous présentons un model simplifié :

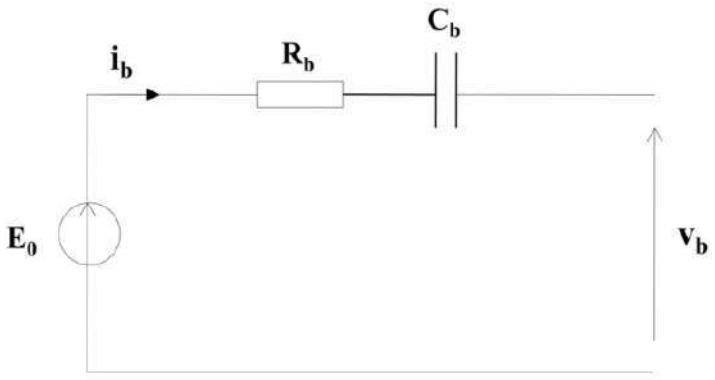


Figure III. 3. Modèle R-C série d'une batterie lithium-ion [22].

D'après la loi des mailles nous concluons que l'expression qui montre la tension aux bornes d'une batterie (en régime de décharge) est [22] :

$$V_B = E_0 - R_b i_b \; - \frac{1}{C_b} \int i_b \; dt \qquad \text{(III.6)}$$

Avec :

V_B : La tension de la batterie en volt [V].

E_0: La tension à vide de batterie en volt [V].

R_B : La résistance de batterie en ohm [Ω].

i_b : Le courant de batterie en ampère [A].

C_b: La capacité de batterie en farad [F].

Pour un stack composé de $\boldsymbol{N_{bas}}$ batteries en série, et $\boldsymbol{N_{bap}}$ en parallèle, on peut écrire :

$$E_{ba0} = N_{bas} E_0 \quad \text{(III.7)}$$

$$R_{ba} = \frac{N_{bas}}{N_{bap}} R_b \quad \text{(III.8)}$$

$$C_{ba} = \frac{N_{bap}}{N_{bas}} C_b \quad \text{(III.9)}$$

$$V_{ba} = E_{ba0} - R_{ba} i_b - \frac{1}{C_{ba}} \int i_b \, dt \quad \text{(III.10)}$$

L'état de charge de stack EDC_{ba}est défini par le rapport entre la capacité nominale de stack C_{ban} et la quantité de charge Q_{mba}manquante par rapport à C_{ban}.

$$EDC_{ba} = \left(1 - \frac{Q_{mba}}{C_{ban}}\right) \times 100\% \quad \text{(III.11)}$$

Pour faire une analyse des réponses en tensions et en état de charge du stack, on va faire une opération de charge et de décharge si on applique un courant constant de 18.2 A.

III.4. Modélisation du pack de Supercondensateurs

Le model équivalent est constitué d'un simple condensateur monté en série avec une résistance (voir la figure III.4).

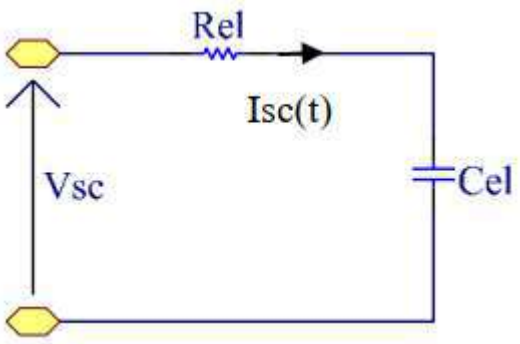


Figure III. 4. Circuit Equivalent d'un seul élément Super Condensateur [41].

D'après l'équation de maille on définit la tension aux bornes d'un élément super condensateur :

$$V_{sc} = V_{Cel} - R_{el} \cdot I_{sc} \quad \text{(III.12)}$$

Il faut noter que le courant I_{sc} est positif pendant l'état de décharge et négative dans l'état de charge.

Les puissances misses en jeu dans ce circuit sont :

$$P_{sc} = V_{sc}.I_{sc} \quad \text{(III.13)}$$

$P_{sc} > 0$: Etat de décharge ou Traction.

$P_{sc} < 0$: Etat de charge ou Freinage.

C'est clair que la capacité de condensateur est fixe (grandeur constante), la quantité de charge stocké sur l'armateur est donné par la relation suivantes.

$$Q(t) = C_{sc}.V_C(t) \quad \text{(III.14)}$$

D'après cette relation on peut déduire la relation des grandeurs comme courant, puissance et énergie successivement :

$$I_{SC} = -\frac{dQ(t)}{d(t)} = -\frac{d}{d(t)}\left(C_{el} \cdot V_C(t)\right) = -C_{el} \cdot \frac{dV_c(t)}{d(t)} \quad \text{(III.15)}$$

$$P_c(t) = V_c(t) \cdot I_{sc}(t) = C_{el} \cdot V_c(t)\frac{dV_c(t)}{dt} \quad \text{(III.16)}$$

$$E_{1-2} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} P_c(t)\, dt = \int_{V_{cmin}}^{V_{cmax}} C_{el} \cdot V_c(t) dV_C(t) = \frac{1}{2}\, C_{el}V_c^2 \quad \text{(III.17)}$$

$$E = \frac{1}{2}C_{el}V_c^2 \quad \text{(III.18)}$$

Le rapport K représente la profondeur de décharge pour un élément

$$K = \frac{V_{cmin}}{V_{cmax}} \quad \text{(III.19)}$$

D'après les deux équations précédentes, de E et K, L'énergie maximale utilisable est définit par

$$E_{util} = \frac{1}{2}\, C_{el}V_c^2 = \frac{1}{2}C_{el}V_c^2 = \frac{1}{2}C_{el}(V_{cmax} - K \cdot V_{cmax})^2 = \frac{1}{2}C_{el}V_{cmax}^2(1 - K^2)$$

$$E_{util} = (1 - K^2)E_{cmax} \quad \text{(III.20)}$$

Avec :

$$E_{util} = \frac{1}{2}C_{el} \cdot V_{cmax}^2 \quad \text{(III.21)}$$

En règle générale, $K = \frac{1}{2}$ alors la puissance utilisable est :

$$E_{util} = \frac{3}{4} E_{Max} \quad \text{(III.22)}$$

Le pack d'un supercondensateur est constitué d'un ensemble monté en série et en parallèle de éléments de C_{el} et R_{el} tel que globalement il sera équivalent à une seule cellule R_{sc} et C_{sc} (voir la figure III.4) [37].

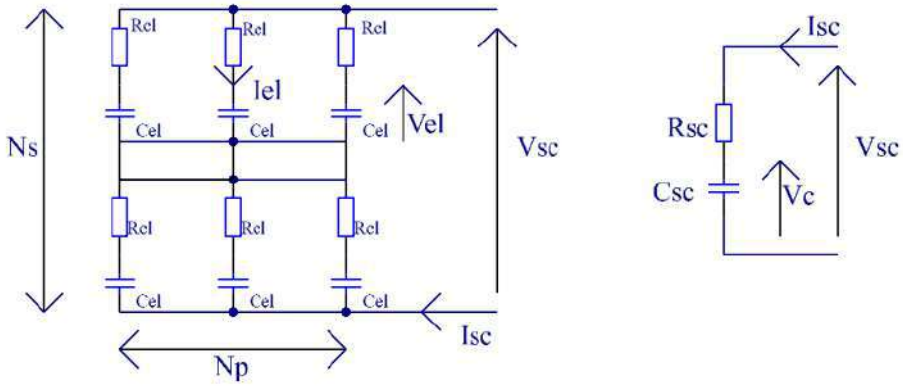


Figure III. 5. Schéma équivalent d'un pack supercondensateur [37].

A l'aide de figure au-dessus, on définit les équations suivantes :

$$\begin{cases} C_{sc} = C_{el} \cdot \frac{N_p}{N_s} \\ R_{sc} = R_{el} \cdot \frac{N_s}{N_p} \end{cases} \quad \text{(III.23)}$$

Et :

$$\begin{cases} V_c = N_c \cdot V_{el} \\ I_{sc} = N_p \cdot I_{el} \end{cases} \quad \text{(III.24)}$$

Alors l'énergie de pack de supercondensateur est définie par :

$$E_{pack} = \frac{1}{2} C_{sc} \cdot V_c^2 = N_p \cdot N_s \left(\frac{1}{2} C_{el} \cdot V_{cel}^2 \right) \quad \text{(III.25)}$$

Aussi la puissance d'un pack est donnée par :

$$P_{pack} = V_c \cdot I_c - R_{sc} \cdot I_{sc}^2 \quad \text{(III.26)}$$

$$P_{pack} = N_p \cdot N_c \cdot (V_{el} \cdot I_{el} - R_{el} \cdot I_{el}^2) \quad \text{(III.27)}$$

La quantité d'énergie présente dans le pack du super condensateur est caractérisé par l'état de charge qu'elle appelé SOC (Stage Of Charge), si cet état prend la valeur 1 ça vaut dire la charge est complète et s'il prend la valeur 0 se signifie que la charge est minimale [41].

$$SOC = \frac{1}{1-K^2}\left(\frac{E_{pack}}{E_{max}} - K^2\right) = \frac{1}{1-K^2}\left(\frac{V_c^2}{V_{cMax}^2} - K^2\right) \quad \text{(III.28)}$$

$$SOC = \frac{4}{3}\left(\frac{E_{pack}}{E_{Max}} - \frac{1}{4}\right) \quad \text{(III.29)}$$

III.5. Modélisation de convertisseur statique

Dans la chaine de traction d'un véhicule hybride à pile à combustible, il faut mettre des convertisseurs statiques DC-DC non isolé entre le bus continu et les sources d'énergie dans ce véhicule. Alors pour le pack de pile à combustible, on utilise un convertisseur statique ***boost*** (unidirectionnel) son rôle est d'élever la tension de sortie de pack car il est très inferieur par rapport au tension de bus continu, pour les deux éléments de stockage (la batterie et le supercondensateur) on doit utiliser deux convertisseurs statiques DC-DC non isolés*(* ***Buck/Boost)*** pour chaque élément et sont de type réversible en courant puisqu'ils sont peut-être soit charger ou décharger , on peut dire que ce type de convertisseur est bidirectionnel [22].

Pour la modélisation es convertisseur il faut d'abord passe par une analyse des différentes séquences de fonctionnement en prend une considération parfaite au l'état des interrupteurs [14]. Soient u1, u2, u3, u4 et u5 les signaux de commandes des transistors S1, S2, S3, S4 et S5.

Pour faire les équations de trois convertisseurs il faut mentionner les quatre modes de fonctionnement.

- ***Mode 1***

Les trois convertisseurs associés au les trois sources d'énergie fonctionnent au mode ***Boost***, on définit leurs comportements par le system d'équation suivant :

$$\begin{cases} \frac{di_{fc}}{dt} = \frac{1}{L_{fc}}\left(v_{fc} - (1-u_1)v_{dc}\right) \\ \frac{di_{ba}}{dt} = \frac{1}{L_{ba}}(v_{ba} - (1-u_2)v_{dc}) \\ \frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{L_{sc}}(v_{sc} - (1-u_4)v_{dc}) \end{cases} \quad \text{(III.30)}$$

- ***Mode 2***

Si le convertisseur lié au pack de la batterie reste fonctionné au mode *boost* et le convertisseur liée au pack de supercondensateur fonctionne au mode *Buck* (le stack reçoit de l'énergie qui provient du bus continu), le comportement des trois convertisseurs peut être représenté par le système d'équation suivante :

$$\begin{cases} \frac{di_{fc}}{dt} = \frac{1}{L_{fc}}\left(v_{fc} - (1-u_1)v_{dc}\right) \\ \frac{di_{ba}}{dt} = \frac{1}{L_{ba}}(v_{ba} - (1-u_2)v_{dc}) \\ \frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{L_{sc}}(v_{sc} - u_5 v_{dc}) \end{cases} \quad \text{(III.31)}$$

- ***Mode3***

Dans ce ça, le convertisseur lié au pack de batterie est au mode *Buck* (le stack reçoit de l'énergie qui provient des piles à combustible) et le convertisseur lié au pack du supercondensateur soit au mode boost, on obtient le system des équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_{fc}}{dt} = \frac{1}{L_{fc}}\left(v_{fc} - (1-u_1)v_{dc}\right) \\ \frac{di_{ba}}{dt} = \frac{1}{L_{ba}}(v_{ba} - u_3 v_{dc}) \\ \frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{L_{sc}}(v_{sc} - (1-u_4)v_{dc}) \end{cases} \quad \text{(III.32)}$$

- ***Mode 4***

Lorsque les deux éléments de stockage l'énergie sont fonctionné au mode *Buck*, le comportement des trois convertisseurs peut être représenté par le système d'équations sous-dessous :

$$\begin{cases} \frac{di_{fc}}{dt} = \frac{1}{L_{fc}}\left(v_{fc} - (1-u_1)v_{dc}\right) \\ \frac{di_{ba}}{dt} = \frac{1}{L_{ba}}(v_{ba} - u_3 v_{dc}) \\ \frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{L_{sc}}(v_{sc} - u_5 v_{dc}) \end{cases} \quad \text{(III.33)}$$

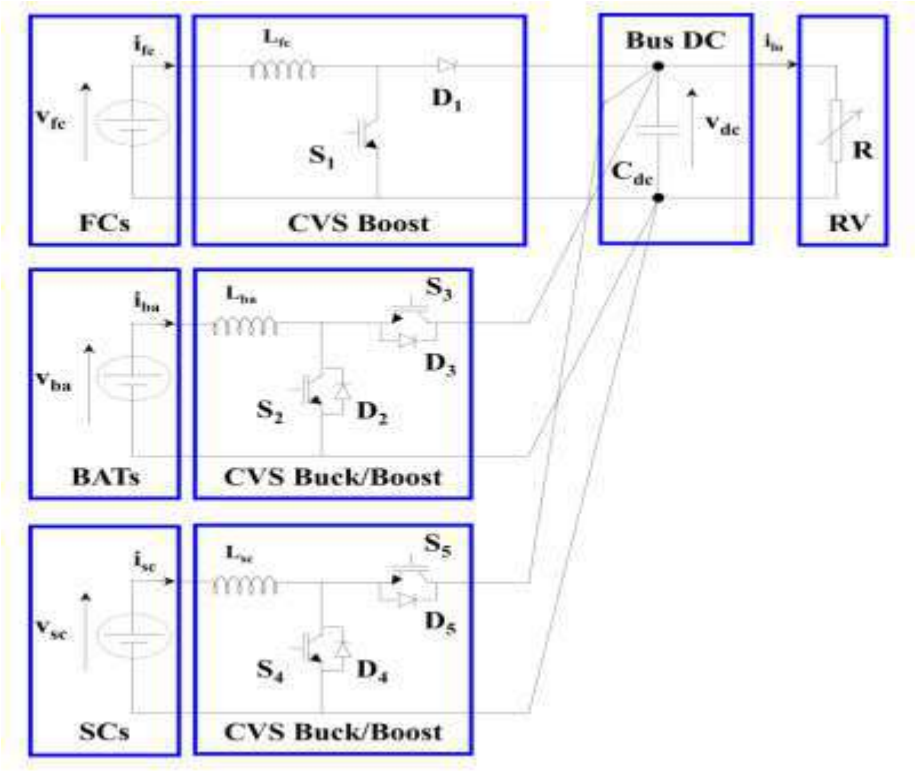


Figure III. 6. Le schéma électrique du système hybride à piles à combustible [22].

III.6. Modélisation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents

III.6. 1. Présentation de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents se composent d'un stator comportant un bobinage qui est alimenté en triphasé et produit un champ magnétique tournant à la fréquence d'alimentation et d'un rotor où le champ magnétique est produit par des aimants permanents. Alimentée à fréquence constante, leurs vitesses sont synchrones avec le champ tournant et ne dépendent que de la fréquence de l'alimentation et du nombre de pôles de la machine. Ce type de machine possède un bon rendement puisque les pertes Joule sont localisées au stator. En outre, la compacité du rotor conduit à un bon rapport couple/inertie, autorisant des accélérations élevées [10].

Inversement, lorsque l'arbre du rotor est entrainé à une certaine vitesse, le moteur fonctionne en mode générateur et génère des tensions triphasées au stator à une fréquence proportionnelle à la vitesse d'entrainement. Nous avons choisi pour notre application deux MSAP en mode moteur et générateur. Les modèles mathématiques ne différent que par les signes positifs et négatifs des tensions. Par la suite, la modélisation mathématique en mode moteur sera présentée [10].

III.6. 2. Hypothèses de modélisation

Pour simplifier la modélisation de la machine synchrone a aimants permanents, nous adopterons les hypothèses simplificatrices suivantes [10]:

-L'entrefer est d'épaisseur uniforme, et d'encochage négligeable.

-La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.

-Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable.

-On admet que la FMM crée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.

- **Repère statorique**

Expression des tensions statoriques identifié par l'équation suivantes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt}[\emptyset_s]^T \quad \text{(III.34)}$$

On identifie expression des flux statorique par l'équation ci-dessous :

$$[\varphi] = [L_{ss}].[i_s] + \frac{d}{dt}\left[\emptyset_{sf}\right]^T \quad \text{(III.35)}$$

Avec

$[V_s] = [V_a\ V_b\ V_c]^T$: Vecteur tensions statoriques.

$[i_s] = [i_a\ i_b\ i_c]^T$: Vecteur courants statoriques.

$[\varphi_s] = [\varphi_a\ \varphi_b\ \varphi_c]^T$: Vecteur flux statorique.

$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$: Matrice Inductance du stator.

- **Repère rotorique**

$\left[\varphi_{sf}\right] = \left[\varphi_{af}\ \varphi_{bf}\ \varphi_{cf}\right]^T$: Vecteur flux créé par les aimants permanent.

Étant donné le grand nombre de variables et de coefficients dans les équations qui s'expriment les méthodes de comportements de le MSAP, il doit faire une transformation

mathématique au niveau de ces équations pour faciliter l'étude de MSAP. Parmi ces transformations, il y a un transformation nommé PARK que nous utiliserons dans notre modélisation [10].

III.6.3. Application de la transformation de Park

$$[T] = P(\theta) = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \text{(III.36)}$$

Nous le symbolisons la matrice de Park par $P(\theta)$, pour obtenir des a été choisi de façon à aboutir aux relations les plus simples entre les valeurs numériques associées aux systèmes on a choisi le coefficient 2/3. Si on travaille en grandeurs réduites, le coefficient ramène notamment à des relations simples [10].

Il y a aussi une Transformation inverse de Park

-Transformation inverse de Park

$$[T]^{-1} = [P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(III.37)}$$

On peut trouver d'autres documentation les coefficients 2/3 ou 1/ 2 pour rendre la transformation orthonormée.

III.6.4. Interprétation physique de la transformation de Park

La transformation de Park est la substitution aux enroulements a, b, c dont les conducteurs et les axes magnétiques sont immobile par rapport au stator, de deux enroulements d, q dont les axes magnétiques sont solidaires du rotor et tournent avec lui. Cependant les conducteurs constituants ces nouveaux enroulements doivent être considérés

comme immobiles. Les conducteur d, q sont analogue à l'induit d'une machine à courant continue (induit fixe, inducteur tournant). La figure suivante montre les axes de la machine dans le repère (a, b, c) et les axes de la machine dans le repère (d, q) après avoir effectué une transformation de PARK [10].

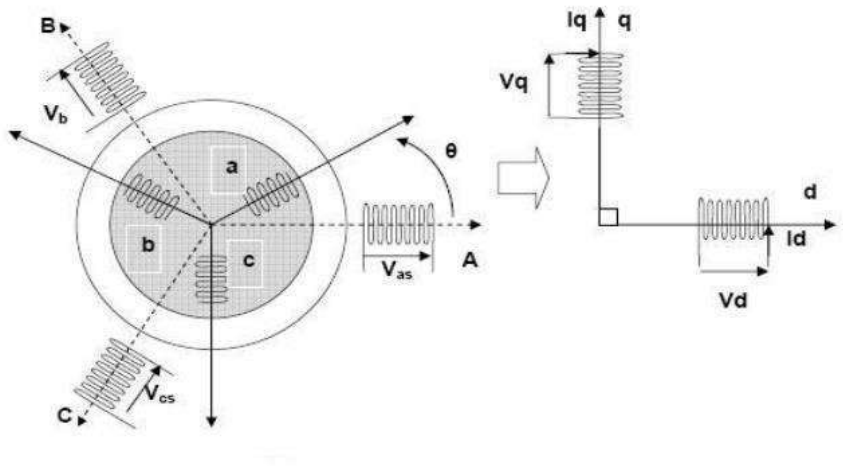


Figure III. 7 Représentation de la transformation de Park **[10].**

III.6.5. Equations de la MSAP dans les axes d-q [10]

- *Equations électriques*

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d - w_r \cdot \varphi_q + \frac{d}{dt}(\varphi_d) \\ V_q = R_s \cdot I_q + w_r \cdot \varphi_d + \frac{d}{dt}(\varphi_q) \end{cases} \quad \text{(III.38)}$$

- *Equations magnétiques*

$$\begin{cases} (\varphi_d) = L_d \cdot I_d + \varphi_f \\ (\varphi_q) = L_q \cdot I_q \end{cases} \quad \text{(III.39)}$$

En remplaçons (φ_d) et (φ_q) par leur expression on aura :

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d - w_r \cdot L_q \cdot I_q + L_d \cdot \frac{d}{dt}(I_d) \\ V_q = R_s \cdot I_q + w_r \cdot L_d \cdot I_d + L_d \cdot \frac{d}{dt}(I_q) + w_r \cdot \varphi_f \end{cases} \quad \text{(III.40)}$$

En appliquant la transformation de LAPLACE à l'équation précédente on trouve :

$$\begin{cases} V_d(S) = (R_s + SL_d) \cdot I_d(S) - w_r(S) \cdot L_q \cdot I_q(S) \\ V_q(S) = \left(R_s + SL_q\right) \cdot I_q(S) - w_r(S) \cdot L_d \cdot I_d(S) + w_r(S) \cdot \varphi_f \end{cases} \quad \text{(III.41)}$$

Avec

S : Operateur de LAPLACE.

On peut écrire l'équation sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + SL_d) - w_r \cdot L_q \\ w_r \cdot L_d\left(R_s + SL_q\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ w_r \cdot \varphi_f \end{bmatrix} \quad \text{(III.42)}$$

- *Expression du couple électromagnétique*

Le couple électromagnétique dans le référentielle de PARK s'écrit :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \left(\varphi_d \cdot I_q - \varphi_q \cdot I_d\right) \quad \text{(III.43)}$$

En remplaçant l'équation (III.36) dans (III.39) l'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p\left[\left(L_d - L_q\right) \cdot I_d \cdot I_q + \varphi_q \cdot I_q\right] \quad \text{(III.44)}$$

Avec :

$\varphi_q \cdot I_q$: Le couple électromagnétique d'une machine à pole lisse.

$\left(L_d - L_q\right) \cdot I_d \cdot I_q$: Couple supplémentaire du a la saillance du rotor.

- *Equation mécanique*

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dx} = C_{em} - C_r - f_r.\Omega \quad \text{(III.45)}$$

Avec :

J : Moment d'inertie de la partie tournante (kg.m2)

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant.

f_r : Coefficient de frottement visqueux (N.m.s /rad).

III.7. Le véhicule et son groupe motopropulseur

La chaine de traction est décomposée en 4 sous-modèles : la machine électrique, l'ensemble réducteur/transmission, les roues et le véhicule (voir la figure III.8).

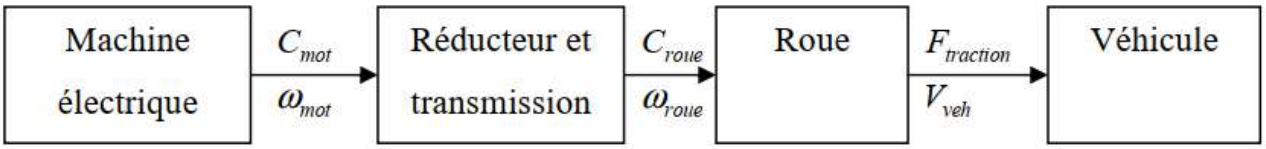


Figure III.8. Schéma de la chaine de traction [23].

Le modèle du véhicule est longitudinal (modèle 1D). Les mouvements latéraux et les mouvements de caisse (suspensions) ne sont pas considérés. De plus, seule la résultante de l'effort généré par les pneumatiques est prise en compte [23].

II.7. 1.Le véhicule

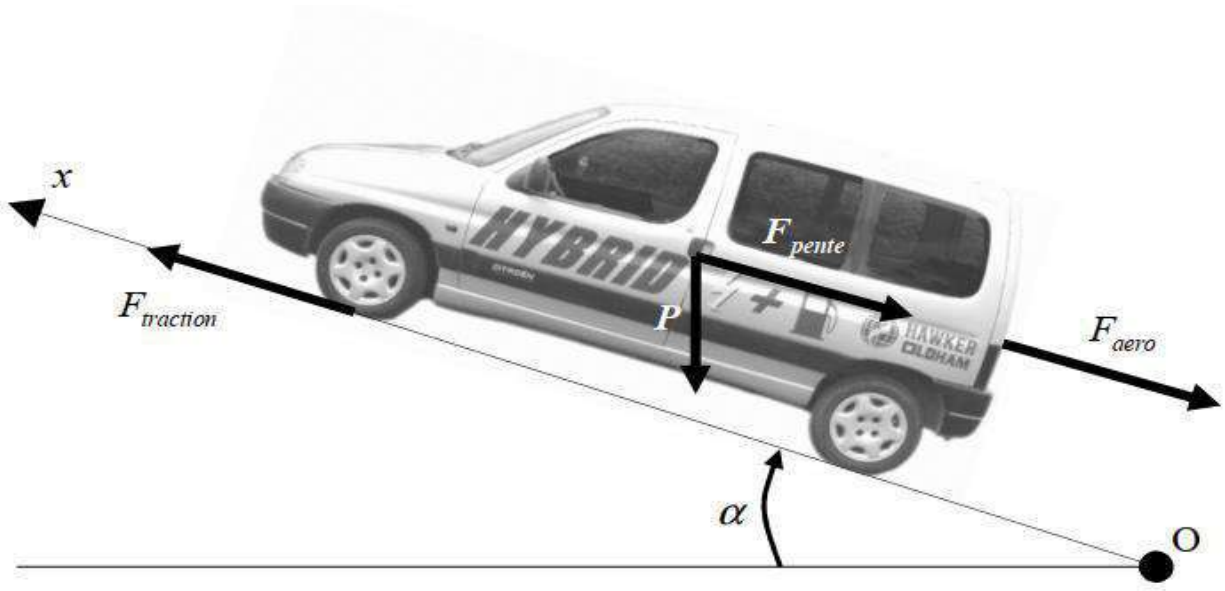


Figure III. 9. Bilan des forces s'exerçant sur le véhicule [23].

Le véhicule est considéré comme un solide ponctuel en déplacement soumis à 3 efforts selon l'axe longitudinal [Ox), voir la figure III.9:

1. L'effort de traction **F traction** résulte de l'action des roues motrices sur la chaussée ;
2. L'effort de résistance aérodynamique **F Aero** provient des frottements de l'air sur la caisse :

$$F_{aero}(t) = \frac{1}{2}\rho_{air} \cdot A_f \cdot C_x \cdot V_{veh}(t)^2 \quad \text{(III.46)}$$

Avec :

ρ_{air} La densité de l'air (kg/m3).

A_f La surface frontale (m²).

C_x Le coefficient de résistance aérodynamique (-).

3. La résistance de montée en cote $\boldsymbol{F_{ponte}}$ est :

$$F_{pente}(t) = M_{veh} \cdot g \cdot sin\big(\alpha(t)\big) \quad \text{(III.47)}$$

Avec α la pente (rad) et la masse totale $\boldsymbol{M_{veh}}$ du véhicule (kg)

Le principe fondamental de la dynamique lie les forces et les accélérations d'un solide :

$$M_{veh} \cdot V_{veh}(t) = F_{traction}(t) - F_{aero}(t) - F_{pente}(t) \quad \text{(III.48)}$$

La vitesse du véhicule s'obtient par intégration de précédente :

$$V_{veh}(t) = \frac{1}{M_{veh}} \int_t^t \Big(F_{traction}(u) - F_{aero}(u) - F_{pente}(u)\Big) \cdot du \quad \text{(III.49)}$$

La masse totale M_{veh} du véhicule dépend de sa masse à vide $\boldsymbol{M^0_{veh}}$, la masse du système pile à combustible $\boldsymbol{M_{sysPAC}}$, la masse de la source secondaire d'énergie $\boldsymbol{M_{SSE}}$ (batteries ou supercondensateurs) ainsi que la masse équivalente $\boldsymbol{M_{eq}}$ des éléments en rotation (roues et machine électrique) ramenée à la caisse :

$$M_{veh} = M^0_{veh} + M_{sysPAC} + M_{SSE} + M_{eq} \quad \text{(III.50)}$$

II.7. 2. Les roues mécaniques

Les roues sont des convertisseurs d'efforts mécaniques. Les couples délivrés par le groupe
motopropulseur (en rotation) sont « transformés » en forces appliquées à la caisse du véhicule (en translation) [23].

Il existe de nombreux modèles décrivant l'interaction pneu/chaussée de manière détaillée mais ils reposent généralement sur la modélisation du glissement du pneumatique sur la chaussée, phénomène trop rapide pour être pris en compte dans un modèle énergétique. Le modèle considéré est donc un modèle simplifié ne prenant en compte que la résultante des efforts générés par les 4 pneumatiques. Une unique roue virtuelle est donc suffisante pour représenter le comportement *moyen* des 4 roues [23].

Cette roue virtuelle permet de générer, à partir du couple $\boldsymbol{C_{roue}}$ délivré par le groupe motopropulseur, une force motrice $\boldsymbol{F_{mot}(t)}$:

$$F_{mot}(t) = \frac{C_{roue}(t)}{R_{roue}} \quad \text{(III.51)}$$

Avec

R_{roue} : Le rayon de la roue

L'interface entre le pneumatique et la chaussée est le siège de forces de frottement $\boldsymbol{F_{roul}(t)}$ s'opposant à l'avancée du véhicule :

$$F_{roul}(t) = M_{veh}.\, g \cdot C_r\big(V_{veh}(t)\big) \cdot \cos\big(\alpha(t)\big) \quad \text{(III.52)}$$

Avec

M_{veh} : La masse totale du véhicule [kg].

g : La constante de gravité [m/s²].

C_r : Le coefficient de frottement des pneumatiques.

α : La pente de la chaussée [rad].

Le coefficient de frottement $\boldsymbol{C_r}$ dépend de la vitesse du véhicule $\boldsymbol{V_{veh}}$. Pour des conditions d'usage (température, humidité…etc.) données et dans le cadre d'un modèle énergétique, une fonction quadratique est suffisante :

$$C_r(V_{veh}) = C_r^0 + K_{C_r} \cdot {V_{veh}}^2 \quad \text{(III.53)}$$

Avec

C_r^0 , K_{C_r} : Des coefficients pouvant être déterminés expérimentalement.

Finalement, la force $\boldsymbol{F_{traction}}$ appliquée à la caisse s'écrit :

$$F_{traction}(t) = F_{mot}(t) - F_{roul}(t) \quad \text{(III.54)}$$

Le glissement entre la chaussée et le pneumatique étant supposé négligeable, la relation liant la vitesse linéaire du véhicule $\boldsymbol{V_{veh}}$ à la vitesse de rotation de la roue $\boldsymbol{\omega_{roue}}$ est donnée par :

$$\omega_{roue}(t) = \frac{V_{veh}(t)}{R_{roue}} \quad \text{(III.55)}$$

Enfin, la masse équivalente $\boldsymbol{M_{eq}}$ des éléments en rotation (roues et arbre moteur) ramenée à la caisse est fonction de leurs inerties :

$$M_{eq} = \frac{1}{{R_{roue}}^2}(J_{GMP} + 4 \cdot J_{roue}) \quad \text{(III.56)}$$

Avec

J_{roue} : L'inertie d'une roue [kg.m²].

J_{GMP} : L'inertie du groupe-motopropulseur ramenée aux roues [kg.m²].

II.7. 3. Le réducteur et la transmission

Le réducteur permet l'adaptation des vitesses de rotation et des couples entre l'arbre de la machine électrique ($\boldsymbol{\omega_{mot}}$ **et** $\boldsymbol{C_{mot}}$) et les roues motrices ($\boldsymbol{\omega_{roue}}$ **et** $\boldsymbol{C_{roue}}$). La transmission est composée principalement du bloc différentiel chargé de répartir équitablement le couple de sortie du réducteur aux roues motrices. Un rapport de réduction globale $\boldsymbol{r_{red} > 1}$ est considéré

entre l'arbre de la machine électrique et la roue. Le rendement $\boldsymbol{\eta_{red}}$ de l'ensemble réducteur/transmission est supposé constant. Selon les hypothèses retenues, les relations entre les couples et les vitesses sont données par : [23]

$$C_{mot}(t) = \frac{C_{roue}(t)}{{\eta_{red}}^{sing(C_{roue}(t))} \cdot r_{red}} \quad \text{(III.57)}$$

$$\omega_{mot}(t) = \omega_{roue}(t) \cdot r_{red} \quad \text{(III.58)}$$

L'inertie groupe motopropulseur J_{GMP} correspond à l'inertie de l'arbre moteur $\boldsymbol{J_{mot}}$ ramenée à la roue :

$$J_{GMP} = \frac{J_{mot}}{{r_{red}}^2} \quad \text{(III.59)}$$

II.7. 3. Le réducteur et la transmission

Les dynamiques de la machine électrique et son électronique de puissance et de contrôle associée sont très rapides, généralement de quelques millisecondes à quelques centièmes de secondes. Dans le cadre d'une modélisation énergétique, ces dynamiques sont négligées et le modèle statique de la machine électrique repose principalement sur sa cartographie de rendement $\boldsymbol{\eta_{red}}$. La puissance requise par la machine électrique $\boldsymbol{J_{mot}}$ dépend de sa vitesse de rotation ω_{mot}et de son couple C_{mot} : [23]

$$P_{mot}(t) = \frac{\omega_{mot}(t) \cdot C_{mot}(t)}{\eta_{mot}(\omega_{mot}(t), C_{mot}(t))^{sing(C_{mot}(t))}} \quad \text{(III.60)}$$

La machine électrique est limitée en couple :

$$\boldsymbol{C_{mot_{min}}(\omega_{mot}) \leq C_{mot} \leq C_{mot_{max}}(\omega_{mot})}$$

Avec

$\boldsymbol{C_{mot_{min}}(\omega_{mot})}$: Le couple minimal en fonctionnement génératrice.

$\boldsymbol{C_{mot_{max}}(\omega_{mot})}$: Le couple maximal en fonctionnement moteur.

III.8. Résultats de simulation pour un FCVEH

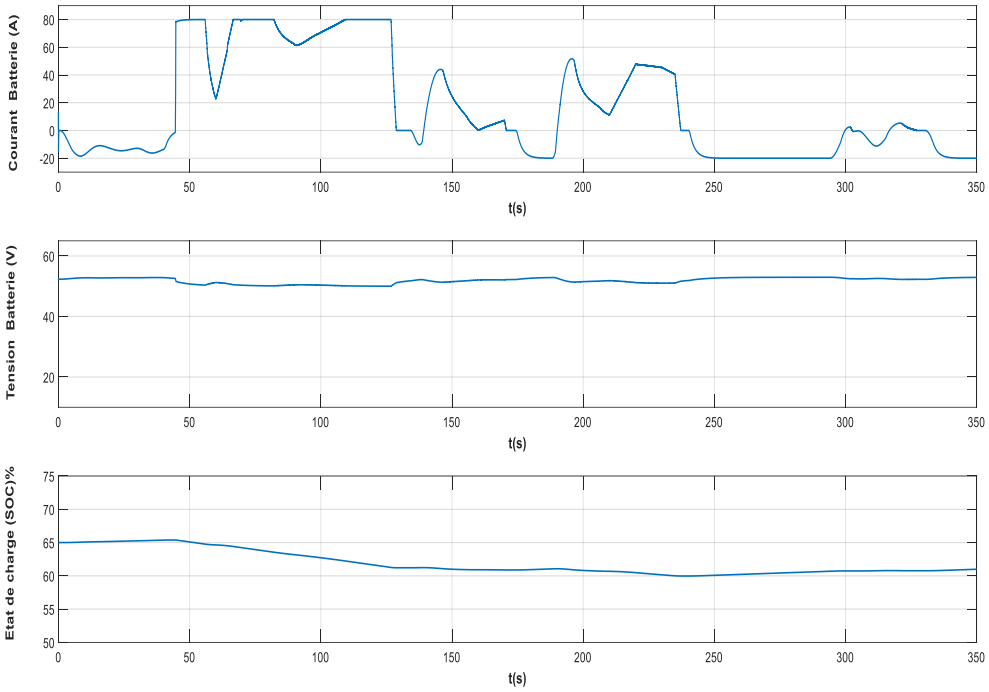


Figure III. 8. Evolution de tension (V), courant (A) et état de charge de batterie (%) en fonction de temps (s).

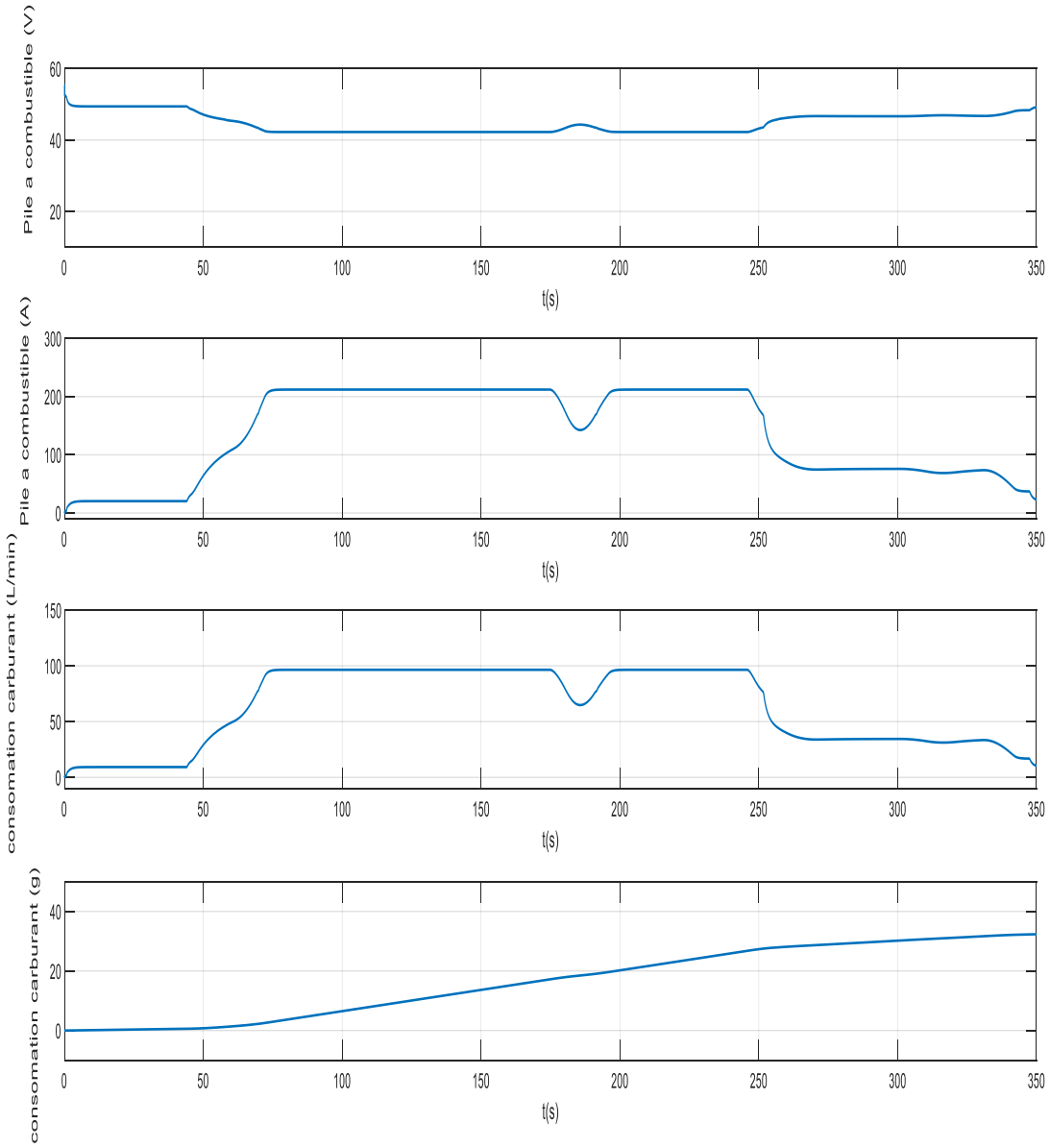


Figure III. 9. Evolution de tension(V), courant (A), consommation de carburant (L/min et g) dans une pile à combustible en fonction de temps (s).

III.9. Conclusion

A traves ce chapitre, nous montrons les caractéristiques électriques et les principes de fonctionnement de différents éléments d'électronique de puissance comme le pack de la pile à combustible, le pack de la batterie de lithium-ion et le pack de supercondensateur pour assurer la propulsion dans un FCVEH ainsi nous discutons sur la régulation de tension à l'aide d'un convertisseur ***boost*** et ***boost*/*Buck***

Aussi, nous donnons les circuits équivalents pour chaque élément pour faciliter l'étude mathématique et pour faire une simulation sous le logiciel MATLAB/Simulink afin de présenter les courbes de tension et courant…etc. de batterie et de pile à combustible en fonction de temps.

Conclusion générale

Conclusion générale

A l'issue de ce modeste travail, nous somme réalisés l'étude de gestion et commande de l'énergie pour la traction de véhicule électrique hybride intégrant une pile à combustible avec ses éléments de stockage. Le FCVEH s'appuyer sur une source d'énergie principale est la pile à combustible (P. à C) et le pack de batterie et le pack supercondensateur come source secondaire d'énergie.

Afin de bien s'acquitter de cette tâche, on a devisé le travail dans les étapes suivantes :

- On a commencé en bref, par l'historique du développement du véhicule électrique, la présentation de la chaine de traction de ce dernier et confirmer que le véhicule électrique avec ses configurations reste un but de recherche intéressant pour parer aux problèmes d'environnement qui menacent notre planète avec les émissions des gaz a effet de serre.
- On s'est intéressé aux sources d'énergie hybride pour FCVEH qui sont : le pack de pile à combustible, le pack de batterie, le pack de supercondensateur et bien sûr le moteur électrique, leurs principes de fonctionnement, les éléments de constitution et leurs avantages et inconvénients de chacun. Nous choisissons pour cette étude une batterie de type lithium-ion, la pile de type PEM et le moteur électrique de type MSAP. Alors nous avons essayé d'expliquer la configuration de la chaîne de traction pour ce nouveau type véhicule électrique.
- Nous avons attaqué sur la modélisation statique pour le FCVEH par clarifier modélisation énergétique des composants a permis d'étudier les stratégies de commande

  nécessaires pour gérer les flux énergétiques au sein du groupe motopropulseur. a parlé aussi sur la régulation de tension et de courant à l'aide des convertisseurs ***boost*** et ***boost/Buck*** . Ces convertisseurs ont permis d'assurer les transferts d'énergie entre le moteur électrique, le P. à C.et les éléments de stockages. Grâce aux circuits équivalents, nous avons pu étudier le comportement de chaque composant à l'aide d'équations mathématiques de manière simple et claire.
- Enfin, il sera également important d'examiner les évaluations de courant et tension pour la batterie et le la pile à combustible et quelques variations importantes de chaque composante mentionnée au-dessus à l'utilisation de logiciel MATLAB/Simulink pour la simulation d'un PEMFC.

Conclusion générale

Pour le résumé de notre recherche, nous espérons Pour résumer nos recherches, nous espérons que ce type de véhicule sera développé et amélioré dans les futures versions dans le futur.

Références Bibliographie

Références Bibliographique

[1] BENDIABDELLAH, Zoulikha. Contribution à l'étude du réseau électrique intelligent : Application aux véhicules électriques. Thèse de Doctorat : Electrique : Tlemcen, Université Aboubakr Belkaïd.

[2] HOUACINE, Karima. Commande neuro-floue d'une machine asynchrone dans une chaine de propulsion d'un véhicule électrique. Thèse de Doctorat : Automatique : Tizi-Ouzou, Université Mouloud Mammeri : 2016.

[3] AID, Adel. ZEKRI, Fayssal. La commande directe du couple DTC d'un véhicule électrique à deux roues motrices. Mémoire de Master : Automatique Et Informatique industrielle : Tlemcen, Université Aboubakr Belkaïd :2020.

[4] KRAA, Okba. Control and Energy Management of an Electrical Vehicle. Thèse de Doctorat : Electrique : Biskra, Université Mohamed Khider : 2015.

[5] BENOUDJIT, Djamel. Contribution à l'optimisation et la commande d'un system de propulsion pour véhicule électrique. Thèse de Doctorat : Electrique, Batna, Université de Batna : 2010.

[6] BOUCHA, Abdellah. Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué. Mémoire de Master : Automatique : Oran, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf.

[7] BOUGUENNA, Ibrahim Farouk. Commande Robuste d'une Chaine de Traction d'un Véhicule Electrique Multi sources. Thèse de Doctorat : électrique : Sidi Bel Abbes, Université Djillali Liabes : 2020.

[8] AZIZI, Idris. Etude et simulation numérique d'un véhicule électrique. Mémoire de Magister : Electrotechnique : Sétif, Université Ferhat Abbas : 2011.

[9] MOKUKCU, Mert. Optimisation énergétique d'un véhicule hybride. Thèse de Doctorat : électrique : Paris, Université Paris-Saclay : 2018.

[10] MERFED, Djamal. HAMROU, Kamal. Etude et Stratégies de Commande d'un Véhicule Hybride Série. Mémoire de Master : Machines électriques : Tizi-Ouzou, Université Mouloud Mammeri : 2013.

[11] GUESSOURI, Noureddine. HAMMADI, Rachid. Étude comparative entre influence des déférent paramétrer physique et la performance du véhicule électrique modélisation et simulation. Mémoire de Master : Electrotechnique Industrielle : Mostaganem, Université Abdelhamid Ibn Badis : 2019.

[12] MESBAHI, Tedjani. Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multi-physique. Thèse de Doctorat : Electrique : Lille : Centrale Lille :2016.

[13] JIANG, Qi. Gestion énergétique de véhicules hybrides par commande optimale stochastique. Thèse de Doctorat : électrique, Paris, Université Paris-Saclay : 2017.

[14] BERREKBIA, Mahfoud. Gestion d'énergie dans une véhicule électrique hybride. 81 p. Mémoire de Master : Electrotechnique Industrielle : Ouargla, Université Kasdi Merbah : 2019.

[15] LHOMME, Walter. Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la présentation énergétique macroscopique. Thèse de Doctorat : Lille : Electrique, Université Des Sciences et Technologie de Lille : 2007.

[16] SYED, Sajjad. A. energetic macroscopic representation and multi-level energy management for heavy-duty hybrid vehicle using double planetary geartrain. Thèse de Doctorat : Lille, Université des sciences et Technologies Lille1 : 2012.

[17] NAAMI, Hemza. FERHAT, Said. Modélisation et commande d'un moteur à allumage commande pour véhicule hybride : application à la régulation du régime moteur. Mémoire de Master : Électromécanique : M'sila, Université Mohamed Boudiaf : 2008.

[18] HANKACHE, Walid. Gestion Optimise de l'énergie électrique d'un Groupe électrogène hybride à Pile à Combustible. Thèse de Doctorat : Systèmes Automatiques, Embarquées : Toulouse, Université de Toulouse, Toulouse :2008.

[19] AGHAEI HASHJIN, Saeid. Control of a Traction/Charging Structure for a Hybrid Electric Vehicle. Thèse de Doctorat : Electrique : Université de Lorrain : 2020.

[20] HANKACH, Walid. Gestion Optimisée de l'énergie électrique d'un Groupe Électrogène Hybride à Pile à Combustible. Thèse de Doctorat : Systèmes Automatiques, Embarquées : Toulouse, Institut National Polytechnique : 2008.

[21] EHSANI, Mehrdad. GAO, Yimin. E. GAY, Sebastien. EMADI, Ali. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory, and Design: Fundamentals, Theory, and Design. Florida: Muhammad H. Rashid, 2005. ISBN 0-8493-3154-4.

[22] BENAOUADJ Mahdi. Gestion de l'énergie d'un système hybride autonome pour application « Smart Grid ». Thèse de Doctorat : Electrique : Biskra, Université Mohamed Khider :2016.

[23] BERNARD, Jérôme. Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande. Thèse de Doctorat : Automatique et Informatique : Université Valenciennes et Hainaut-Cambrésis : 2007.

[24] VILCHEZ YNCA, Ernesto. Etude comparative d'algorithme de gestion de l'énergie pour un véhicule hybride à pile à hydrogène. Mémoire de Maitrise : Electrique : École de Technologie Supérieure : 2014.

[25] M, N. SID. M, BECHERIF. K, MAROUANI. H, ALLOUI. *Gestion de l'énergie d'un système hybride pile à combustible/batterie basée sur la commande optimale*. Mediterranean Journal of Modeling and Simulation. : 2015.

[26] SAADI, Aicha. Modélisation et commande du circuit d'air d'une pile à combustible PEMFC. Thèse de Doctorat : Electrique : Biskra, Université Mohamed Khider : 2014.

[27] LEKBIR, Khatib. Commande et gestion d'énergie d'une source hybride (PAC et SC). Mémoire de Master : Science de Technologie : Biskra, Université Mohamed Khider : 2019.

[28] LACHAIZE, Jérôme. 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 : Systèmes Automatiques : Toulouse, Institut national polytechnique : 2004.

[29] TEGANI, Ilyes. Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des supercondensateurs, des batteries, une éolienne et une source photovoltaïque. Thèse de Doctorat : Electrique : Biskra, Université Mohamed Khider-Biskra : 2016.

[30] BOUTABBA, Tarek. Contribution à la modélisation et à la commande d'un système de génération hybride Solaire Eolien. 150 p. Thèse de Doctorat : Commande électrique : Batna, Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd : 2018

[31] AZIZI, Idris. Contribution à l'amélioration des caractéristiques du fonctionnement d'un véhicule électrique. Thèse de Doctorat : Commande Electrique : Sétif, Université Ferhat Abbas : 2018.

[32] SAKER, Samah. Modélisation et Contrôle du système, Pile à Combustible, Convertisseurs et Supercondensateur. Thèse de Doctorat : Electricité Industrielle : Biskra, Université Mohamed Khider

[33] MAMADOU BAILO, Camara. Super condensateurs pour échange dynamique d'énergie à bord du véhicule électrique hybride : modélisation, étude des convertisseurs et commande. PhD thesis : Université de Franche-Comté : 2007.

[34] MULTON, B. Les machines synchrones autopilotées, notes de cours : Ecole normal supérieur de Cochan, Auteonne de Bretague : 2004.

[35] TAYABI, Mohamed. DEBDOUCHE, Mohamed. Modélisation et diagnostic de la machine synchrone à aimants permanents en présence de défaut de court-circuit entre spires. Mémoire fin d'étude Master, Université Akli Mohand Oulhadj : 2016.

[36] GOUDJIL, Mohamed Lamine. Optimisation et analyse paramétrique d'un system de pile à combustible. Mémoire de Master : Installation Energétique et Turbomachines : Blida, Université Saad Dahlab :2020.

[37] SAADI, Ramzi. Convertisseurs basse tension (42V,450V) : Application source hybride utilisant une pile à combustible. Thèse de Doctorat : Electrique : Biskra, Université Mohamed Khider :2015.

[38] ZITOUNI Hadda. Etude du système pile à combustible des véhicules. Mémoire de Magister : Construction Mécanique : Batna, Université Hadj Lakhdar : 2013.

[39] CHARROUF, Omar. Commande et Optimisation D'un Système de Dessalement Hybride : Solaire-Eolien. Thèse de Doctorat : Electrotechnique : Biskra, Université Mohamed Khider :2018.

[40] URBAIN, Matthieu. Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs Li-Ion. Estimation en ligne de la SOC et de la SOH. Thèse de Doctorat : Electrique : Lorraine, Institut National Polytechnique de Lorraine : 2009.

[41] MOUALEK, Riad. Conception et réalisation d'un émulateur à pile à combustible PEM : application au véhicule électrique à pile à combustible. Mémoire de Master : Machines Electriques : Tizi-Ouzou, Université Mouloud Mammeri : 2017.