

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

BERREKBIA Mahfoud

Thème:

Gestion d'énergie dans une véhicule électrique

hybride

Soutenu publiquement

Le : /07/2019

Devant le jury :

Mr REZOUG Med Redha

MCB

Président

UKM Ouargla

Mr BENAOUADJ Mahdi

MCB

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

Mr IDER Zahir

MAA

Examineur

UKM Ouargla

Année Universitaire 2018/2019

Remerciements

Avant tout, je remercie « ALLAH » qui m'a donné la force, le courage et la patience durant toutes ces années d'études, pour pouvoir achever cet humble travail.

Je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur soutien inconditionnel au cours de ces longues années d'études.

Merci à l'ensemble de nos amis, qui ont été là pendant les périodes de doute et de stress, surtout D.BILAL et G.ABDEL MOUMEN.

*Je remercie particulièrement mon encadreur **Dr M.BENAOUADJ**, pour ses précieuses directives.*

Je tiens également à remercier les membres de jury pour je avoir fait l'honneur d'évaluer mon travail.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

*Je remercie aussi tous les enseignants et les responsables du Département d'**GENIE ELECTRIQUE** de l'université d'OUARGLA leur aide et leurs encouragements.*

- .PAC : pile à combustible.
- .PEMFC : Les piles à membranes polymère échangeuse de protons.
- .DMFC : Les piles au méthanol direct.
- .PAFC : Les piles à acide phosphorique.
- .AFC : Les piles alcalines.
- .SOFC : Les piles à oxydes solides.
- .MCFC : Les piles à carbonates fondus.
- .G_f : l'énergie libre de Gibbs.
- . η_{fc} : Le rendement.
- . ΔG_f : variation de l'énergie libre de Gibbs [kJ.mol⁻¹].
- . SSE : systèmes de stockage de l'énergie électrique.
- .q_{el} : charge de nature électronique.
- .q_{ion} : charge de nature ionique.
- .EE : Énergie Électrique.
- . CV : Convertisseur.
- .RS : Réservoir d'essence.
- .MT : Moteur Thermique.
- .GE : Générateur.
- . ME : Moteur Électrique.
- . BV : Boite de Vitesse.
- . EM : Embrayage.
- .TP : Train Planétaire.
- .N_{pac_s} : le nombre des cellules de stack montées en série.
- .N_{pac_p} : le nombre de cellules de stack mises en parallèle.
- .U_{dc} : la tension de bus.
- .E_{cell} : la tension de cellules de la pile.
- .U_{pac} : la tension de stack de la pile.
- .C_b : capacité nominale du pack [Ah].

- . E_b : énergie journalière à stocker dans le pack [Wh/j].
- . A_{ut} : nombre de jours d'autonomie.
- . V_{bn} : tension nominale du pack [V].
- . D_b : profondeur de décharge du pack [%].
- . N_{bap} : Le nombre de batterie montée en parallèle.
- . N_{bas} : Le nombre de batterie montée en série.
- . N_{SCP} : Le nombre de supercondensateur monté en parallèle.
- . N_{SCS} : Le nombre de batterie montée en série.
- . E_{max_transf} : L'énergie de transfère maximale.
- . R_{elem} : résistance élémentaire.
- . C_{elem} : Capacité élémentaire.
- . V_{elem} : tension élémentaire.
- . I_{elem} : Courant élémentaire.
- . E_{max} : L'énergie maximale.
- . E_{min} : L'énergie minimale.
- . ΔV_{act} : chute de tension due aux pertes d'activation [V].
- . A : pente de la droite de Tafel qui est de l'ordre de 0.06V.
- . 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_{in} : courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte [mA.cm⁻²].

- . ΔV_{Conc} : Chute de tension due aux pertes de concentration [V].
- . ΔV_{Ohm} : Chute de tension due aux pertes ohmiques [V].
- . R_m : Résistance totale de la pile à combustible [k Ω .cm²].

- . v_{batt} : tension de la batterie lithium-ion [V].
- . E_{batt} : sa tension à vide [V].
- . I_{batt} : son courant [A].
- . R_{batt} : sa résistance [Ω].
- . EDC_{ba} : L'état de charge du stack des batteries.
- . C_{sc} : Capacité totale du module de supercondensateurs.
- . R_{sc} : Résistance série totale du module de supercondensateurs.

- . Q_{sc} : Quantité de charge stockée dans le module de supercondensateurs.
- . EDC_{sc} : état de charge du stack de supercondensateurs [%].
- . E_{sc} : énergie contenue dans le stack [J].
- . E_{scmax} : énergie maximale contenue dans le stack [J].

- . SSE : un système de stockage d'énergie.
- . $SYSPAC$: Système de la pile à combustible.
- . BA : Batteries.
- . SC : Supercondensateurs.
- . ME : Moteur électrique.
- . VEH : véhicule électrique hybride.

Résumé

La gestion d'énergie d'un système électrique hybride consiste à contrôler les flux énergétiques des différentes sources constituant le système. Elle permet de satisfaire les demandes en puissance de la charge et augmenter la durée de vie du système tout en respectant différentes contraintes de fonctionnement comme la puissance limitée des sources, les états de charge des éléments de stockage... etc.

Pour une application « Véhicule Électrique », nous présentons dans ce travail la gestion d'énergie d'un système hybride autonome composé de piles à combustibles utilisés comme source principale, de batteries lithium-ion et de super condensateurs considérés en tant que sources auxiliaires.

Mots clés : Système hybride autonome, Gestion d'énergie, Pile à combustible, Batterie, Super condensateur, État de charge.

Abstract

The power management of a hybrid electrical system consists of controlling the energy flows from different sources constituting the system. It makes it possible to satisfy the power demands of the load and to increase the life time of the system while respecting various operating constraints such as the power limit of the sources, the states of charge of the storage elements, etc. For an "Electric Vehicle" application, we present in this work the power management of an autonomous hybrid system consisting of fuel cells used as the main source, lithium-ion batteries and supercapacitors considered as auxiliary sources.

Keywords: Autonomous Hybrid System, power Management, Fuel Cell, Battery, Supercapacitor, State of charge

ملخص:

تسيير الطاقة لنظام كهربائي هجين يتمثل في التحكم في تدفقات الطاقة من المصادر المختلفة المكونة للنظام. حيث يمكننا من تلبية متطلبات المحملة للطاقة وزيادة مدة حياة النظام مع مراعاة قيود التشغيل المختلفة مثل الحد الأقصى لطاقة المصادر، وحالات شحن عناصر التخزين، إلخ المستخدمة بالنسبة لتطبيق "السيارة الكهربائية"، نقدم في هذا العمل تسيير الطاقة لنظام هجين مستقل يتكون من خلايا الوقود الهيدروجينية كمصدر رئيسي، وبطاريات الليثيوم أيون والمكثفات الفائقة التي تعتبر مصادر مساعدة.

الكلمات المفتاحية: نظام هجين مستقل، تسيير الطاقة، خلية الوقود، البطارية، المكثفة الفائقة، حالة الشحن.

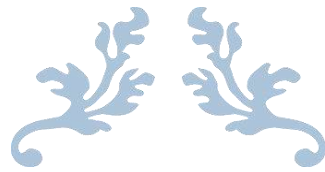


Table Des Matières



Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Production de l'Énergie Électrique par une Pile à Combustible et Stockage d'Énergie	
1.1. Introduction.....	5
1.2. Production de l'énergie électrique par une pile à combustible.....	5
1.2.1. Aperçu historique.....	5
1.2.2. Principe de fonctionnement.....	6
1.2.3. Types de piles à combustible.....	8
1.2.4. La pile à combustible de type PEM.....	9
1.2.4.1. La tension à vide	11
1.2.4.2. Le rendement	12
1.3. Le stockage d'énergie	13
1.3.1. Plan de Ragone.....	13
1.3.2. Les batteries.....	13
1.3.2.1. Liaisons des batteries.....	15
a) Connexion en série.....	15
b) Connexion parallèle.....	15
1.3.3. La batterie au lithium-ion.....	16
1.3.3.1. Principe de fonctionnement.....	17
1.3.3.2. Éléments technologiques.....	18
a) Électrode positive.....	18
b) Électrode négative.....	18
c) Séparateur.....	19
d) Électrolyte.....	19
1.3.3.3. Synthèse des caractéristiques.....	20
1.3.4. Les supercondensateurs.....	21
1.3.4.1. Principe de fonctionnement.....	22
a) État déchargé	22
b) En charge	23
c) État chargé.....	23

d) État en décharge.....	24
1.3.4.2. Différentes familles.....	24
1.3.4.3. Systèmes d'équilibrage.....	25
a) Système d'équilibrage avec résistances.....	25
b) Système d'équilibrage avec diodes zéner.....	26
1.3.4.4. Applications potentielles.....	26
1.3.4.5. Principales gammes.....	27
1.4. Conclusion.....	28

Chapitre 2 : Les Véhicules Électriques

2.1. Introduction.....	30
2.2. Les véhicules électriques comme solution ultime du problème de CO ₂	30
2.3. Historique de développement.....	31
2.4. Principales configurations des véhicules électriques.....	36
2.4.1. Les véhicules tout électriques.....	36
2.4.2. Les véhicules hybrides.....	37
2.4.2.1. Principales architectures de véhicules hybrides.....	37
a) Architecture hybride série.....	37
b) Architecture hybride parallèle.....	39
c) Architecture hybride mixte (Série/Parallèle).....	39
d) Véhicules hybrides à pile à combustible.....	41
2.4.2.2. Principaux modes de fonctionnement des véhicules hybrides.....	42
a) Le mode thermique pur.....	42
b) Le mode électrique pur.....	43
c) Le mode hybride	43
2.5. Les véhicules électriques et la source d'énergie embarquée.....	44
2.5.1. Source d'énergie irréversible.....	45
2.5.2. Source d'énergie réversible.....	45
2.5.2.1. Le stockage mécanique sous forme d'énergie cinétique dans un volant d'inertie.....	45
2.5.2.2. Le stockage pneumatique.....	46
2.5.2.3. Le stockage électrochimique.....	46

a) Les batteries d'accumulateurs.....	46
b) Les supercondensateurs	47
2.6. Conclusion.....	48
Chapitre 3 : Modélisation d'un Véhicule Électrique à Pile à Combustible	
3.1. Introduction.....	50
3.2. Présentation du véhicule électrique considéré.....	50
3.3. Dimensionnement des sources d'énergie.....	50
3.3.1. Dimensionnement des piles.....	52
3.3.2. Dimensionnement des batteries lithium-ion.....	53
3.3.3. Dimensionnement des supercondensateurs.....	54
3.3.4. Dimensionnement des convertisseurs embarqués.....	56
3.3.4.1. Convertisseur DC-DC lié aux piles.....	56
3.3.4.2. Convertisseur DC-DC lié aux batteries.....	57
3.3.4.3. Convertisseur DC-DC lié aux supercondensateurs.....	58
3.4. Modélisation des sources d'énergie.....	58
3.4.1. Pertes d'activation.....	59
3.4.2. Pertes de concentration.....	59
3.4.3. Pertes ohmiques.....	60
3.4.4. Expression de la tension aux bornes du stack en fonction du courant débité.....	60
3.4.5. Caractéristique électrique d'une pile à combustible.....	60
3.5. Modélisation d'une batterie lithium-ion.....	61
3.6. Modélisation d'un supercondensateur.....	64
3.7. Modélisation du fonctionnement des convertisseurs embarqués.....	67
3.8. Conclusion.....	68

Chapitre 4 : Gestion d'Énergie à Bord du Véhicule

4.1. Introduction.....	70
4.2. Architecture du système hybride à bord.....	70
4.3. Principe de la gestion d'énergie.....	71
4.4. Résultats de simulation et discussion.....	73
4.5. Conclusion.....	79
Conclusion générale.....	81
Références Bibliographiques	

Chapitre 1 : Production de l'Énergie Électrique par une Pile à Combustible et Stockage d'Énergie

Figure 1.1 : Électrolyse de l'eau.....	5
Figure 1.2 : Structure de base d'une cellule pile à combustible.....	6
Figure 1.3 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.....	7
Figure 1.4 : Schéma d'une cellule élémentaire de pile à combustible PEMFC.....	10
Figure 1.5 : Exemple de stack chez ZSW (23 cellules).....	10
Figure 1.6 : Structure d'un empilement de cellule PEMFC.....	11
Figure 1.7 : Plan de Ragone.....	13
Figure 1.8 : Une cellule typique d'une batterie électrochimique.....	14
Figure 1.9 : Liaison en série des batteries.....	15
Figure 1.10 : Liaison en série et en parallèle des batteries.....	16
Figure 1.11 : Batterie au lithium-ion de la Corporation GS YUASA.....	16
Figure 1.12 : Principe de fonctionnement des accumulateurs au lithium.....	18
Figure 1.13 : Vue éclatée d'un élément MP 176065 de la société Saft.....	19
Figure 1.14 : Différence entre un supercondensateur et un condensateur classique.....	21
Figure 1.15 : État déchargé d'un supercondensateur.....	22
Figure 1.16 : État en charge d'un supercondensateur.....	23
Figure 1.17 : État chargé maxima.....	23
Figure 1.18 : État d'un supercondensateur en décharge.....	24
Figure 1.19 : Système d'équilibrage résistif.....	25
Figure 1.20 : Système d'équilibrage avec diodes zéner.....	27

Figure 1.21 : Élément Maxwell PC2500.....	28
Figure 1.22 : Élément Epcos BCAP0010 B49300-F1276-S.....	28
Chapitre 2 : Les Véhicules Électriques	
Figure 2.1 : Dodge EV.....	30
Figure 2.2 : Premier véhicule électrique à batterie rechargeable.....	32
Figure 2.3 : Premier vrai véhicule électrique en 1891.....	32
Figure 2.4 : La jamais contente.....	32
Figure 2.5 : Wood phaeton 1902.....	33
Figure 2.6 : Véhicule d'Anderson Electric Car Company.....	33
Figure 2.7 : Toyota Prius XW10.....	34
Figure 2.8 : Fin de l'EV1.....	35
Figure 2.9 : Préambule du documentaire "Who Killed the Electric Car ?".....	35
Figure 2.10 : La Pininfarina Blue Car.....	35
Figure 2.11 : Chaîne de traction tout électrique	36
Figure 2.12 : Véhicule hybride série.....	38
Figure 2.13 : Architecture hybride série.....	38
Figure 2.14 : Architecture hybride parallèle.....	39
Figure 2.15 : Véhicule hybride parallèle.....	39
Figure 2.16 : Architecture hybride mixte (Série/Parallèle).....	40
Figure 2.17 : Architecture véhicule hybride à pile à combustible.....	41
Figure 2.18 : Volant d'inertie utilisé dans les bus de Bâle.....	46
Figure 2.19 : Réservoir d'air comprimé la Tata MiniCat.....	46

Figure 2.20 : Tata MiniCat, véhicule à air de comprimé.....	46
Figure 2.21 : Pack de batteries embarqué dans le Roadster de Tesla Motors.....	47
Figure 2.22 : Système MITRAC utilisant les supercondensateurs pour le stockage de l'énergie.....	48

Chapitre 3 : Modélisation d'un Véhicule Électrique à Pile à Combustible

Figure 3.1 : Schéma de puissance du groupe motopropulseur.....	52
Figure 3.2 : Modèle équivalent d'un stack de supercondensateurs.....	54
Figure 3.3 : Montage Boost du convertisseur DC-DC connecté au stack de piles à combustible PEM.....	56
Figure 3.4 : Montage Buck/ Boost du convertisseur DC-DC lié au stack de batteries lithium-ion.....	57
Figure 3.5 : Montage Buck/ Boost du convertisseur DC-DC associé au stack de supercondensateurs.....	58
Figure 3.6 : Caractéristique densité de courant-tension d'une pile PEM.....	60
Figure 3.7 : Caractéristique $V_{fc} = f(i_{fc})$ du stack de piles à combustible.....	61
Figure 3.8 : Modèle d'une batterie lithium-ion.....	61
Figure 3.9 : (a) Courant constant de charge/décharge de 8.9 A. (b) : Réponses en tension et en état de charge du stack de batteries.....	63
Figure 3.10 : Modèle d'un élément supercondensateur.....	64
Figure 3.11 : Circuit équivalent du module de supercondensateurs.....	64
Figure 3.12 : (a) : Courant constant de charge/décharge de 320 A. (b) : Réponses en tension et en état de charge du stack de supercondensateurs.....	66

Chapitre 4 : Gestion d'énergie à bord du véhicule

Figure 4.1 : Architecture du système hybride à bord.....	71
Figure 4.2 : Profil de consommation.....	73
Figure 4.3 : Courbes des puissances.....	74
Figure 4.4 : Courants de référence.....	75
Figure 4.5 : Courants des piles.....	75
Figure 4.6 : Courants des batteries.....	76
Figure 4.7 : Courants des supercondensateurs.....	76
Figure 4.8 : Tension des piles.....	77
Figure 4.9 : Tension des batteries.....	77
Figure 4.10 : Etat de charge des batteries.....	78
Figure 4.11 : Tension des supercondensateurs.....	78
Figure 4.12 : État de charge des supercondensateurs.....	79

Chapitre 1 : Production de l'Énergie Électrique par une Pile à Combustible et Stockage d'Énergie

Tableau 1.1 : Différents types de piles à combustible.....9

Tableau 1.2 : Différents types et caractéristiques des batteries.....14

Tableau 1.3 : Principales données techniques des accumulateurs au lithium-ion.....20

Tableau 1.4 : Différentes familles de supercondensateurs.....24

Tableau 1.5 : Caractéristiques des éléments Epcos et Maxwell.....27

Chapitre 02 : Les Véhicules Électriques

Tableau 2.1 : Comparaison des trois architectures des véhicules hybrides.....40

Tableau 2.2 : Comparaison entre les différentes architectures des véhicules hybrides.....41

Tableau 2.3 : Mode de fonctionnement de véhicule thermique pur.....42

Tableau 2.4 : Mode de fonctionnement de véhicule électrique pur.....43

Tableau 2.5 : mode de fonctionnement de véhicule hybride.....44

Chapitre 3 : Modélisation d'un Véhicule Électrique à Pile à Combustible

Tableau 3.1 : Caractéristiques du Berlingo hybride.....51

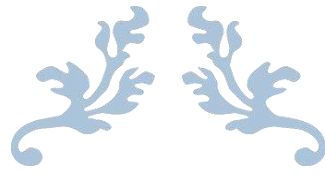
Tableau 3.2 : Caractéristiques du système PAC.....53

Tableau 3.3 : Caractéristiques d'une batterie élémentaire.....54

Tableau 3.4 : Caractéristiques d'une cellule supercondensateur.....55

Chapitre 4 : Gestion d'énergie à bord du véhicule

Tableau 4.1 : principe de la gestion d'énergie.....72



Introduction Générale



L'activité industrielle des pays en voie de développement ainsi que l'accroissement de la population mondiale ont entraîné une explosion des besoins en énergie. L'exploitation surabondante des ressources fossiles pour satisfaire ces besoins est le responsable majeur des rejets des gaz polluants qui sont l'origine des perturbations climatiques et du réchauffement de la planète [1] pour cela, les experts pensent à l'exploitation des énergies renouvelables.

Au niveau de la consommation d'énergie et la pollution environnementale, le secteur des transports routiers est l'un des plus polluants en termes d'émission de gaz à effet de serre. Pour cela, les scientifiques et experts proposent une solution prometteuse à ce problème qui est la conception et le développement des véhicules électriques hybrides [2].

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

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

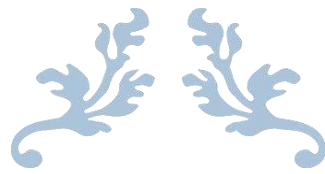
Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la gestion de l'énergie d'un véhicule composé de :

- Source principale représentée par un pack de piles à combustible de type PEM;
- batteries au lithium-ion et super condensateurs qui sont employés comme sources complémentaires et d'appoints;
- Convertisseurs statiques d'interface entre les sources d'énergie et un bus continu de tension constante;
- Moteur électrique de traction.

Afin d'arriver aux objectifs soulignés, ce mémoire sera organisée en quatre chapitres :

- 1) Un premier chapitre détaillera les principes de fonctionnements d'une pile à combustible, ainsi que quelques éléments de stockage comme les batteries et super condensateurs.
- 2) Un deuxième chapitre présentera les véhicules électriques, leurs principales configurations et différentes sources de stockage à bord.
- 3) Un troisième chapitre précisera le dimensionnement et la modélisation des composants de la source hybride d'alimentation.
- 4) Un quatrième chapitre détaillera la gestion d'énergie de la source hybride d'alimentation à bord du véhicule électrique.

Enfin, ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale



*Chapitre 1 : Production de
l'Énergie Électrique par une
Pile à Combustible et
Stockage d'Énergie*



1.1. Introduction

Dans la première partie de ce chapitre, nous détaillons le principe de fonctionnement des piles à combustible (dont celles de la filière Proton Exchange Membrane les plus optées), différentes caractéristiques tels que la tension à vide, le rendement... etc.

Pour la deuxième partie, elle sera consacrée à la sélection des éléments de stockage candidates pour être associés aux piles à combustible.

1.2. Production de l'énergie électrique par une pile à combustible

1.2.1. Aperçu historique

En 1802, Sir Humphry Davy découvre le principe de l'électrochimie en construisant une cellule en carbone fonctionnant à haute température avec de l'acide nitrique comme électrolyte [4]. en 1839 l'avocat britannique William Grove, souvent appelé « père de la pile à combustible », a inventé la première pile à combustible « cellule hydrogène-oxygène ». Il réalise la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau en utilisant dans son expérience un tube en U avec deux électrodes de platine poreux (voir figure 1.1) et de l'acide sulfurique comme électrolyte [5].

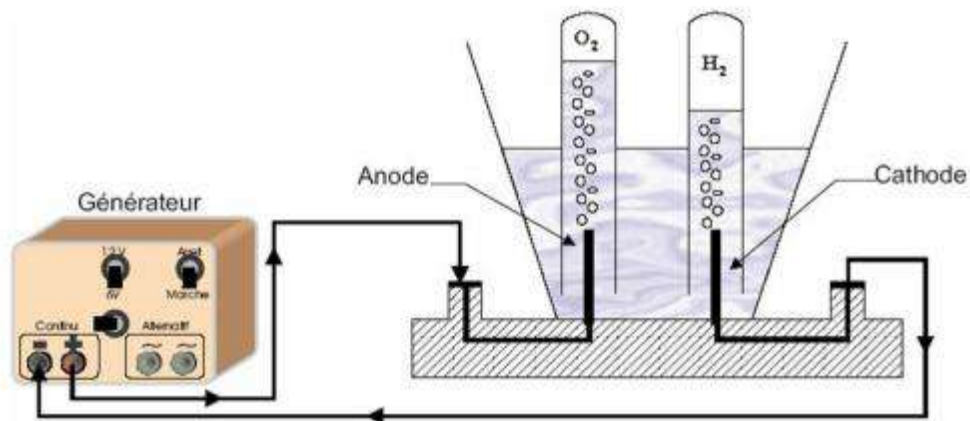


Figure 1.1 : Électrolyse de l'eau

Après cette année, le développement de la pile à combustible a connu les travaux de L. Mond et C. Langer en 1889 [6], de W.W. Jacques en 1896 [7], d'E. Baur et J. Tobler en 1933 [8], de F.T. Bacon en 1969 [9], et ceux de J. M. Grimwood, B. C. Hacker et P. J. Vorzimmer en 1969 [10].

Malgré toutes ces années de travail, le début de la véritable évolution de la pile à combustible a commencé en 1990. Une nouvelle agence gouvernementale des États-Unis d'Amérique appelée : " the National Aeronautics and Space Administration (NASA) " a cherché comment produire de l'énergie pour les voyages dans l'espace. La NASA a déjà annulé les batteries parce qu'elles étaient trop lourdes et très coûteuses pour l'énergie solaire et nucléaire à cause de ces risques. Elle cherchait alors une source alternative et la pile à combustible est apparue comme une solution possible. Ainsi, la NASA attribua un certain nombre de contrats de recherches qui aboutissent au développement de la première membrane échangeuse de protons ou « membrane d'électrolyte polymère » [11]. Cette filière de pile à combustible était de petite taille et utilisait de l'oxygène et l'hydrogène purs. En plus de l'intérêt de la NASA, la crise d'énergie de 1973 a relancé le développement de ce système de production. Depuis cette date, la recherche sur les piles à combustible continua et a connu des succès dans une grande variété d'applications [12].

1.2.2. Principe de fonctionnement

Une pile à combustible est un dispositif qui permet de faire une conversion directement de l'énergie chimique à l'énergie électrique produite sans aucun processus thermique ou mécanique externe [1]. Cette réaction électrochimique produit de l'énergie électrique de l'eau et de la chaleur [12].

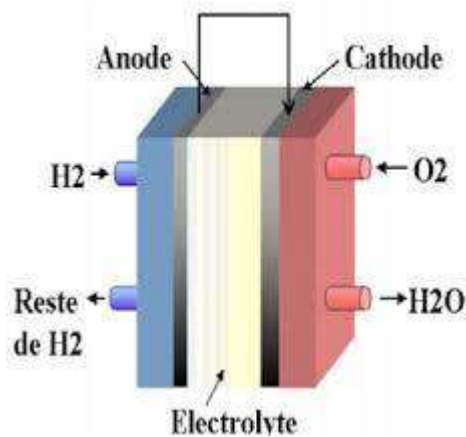


Figure 1.2 : Structure de base d'une cellule "pile à combustible"

La figure 1.3 montre le principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

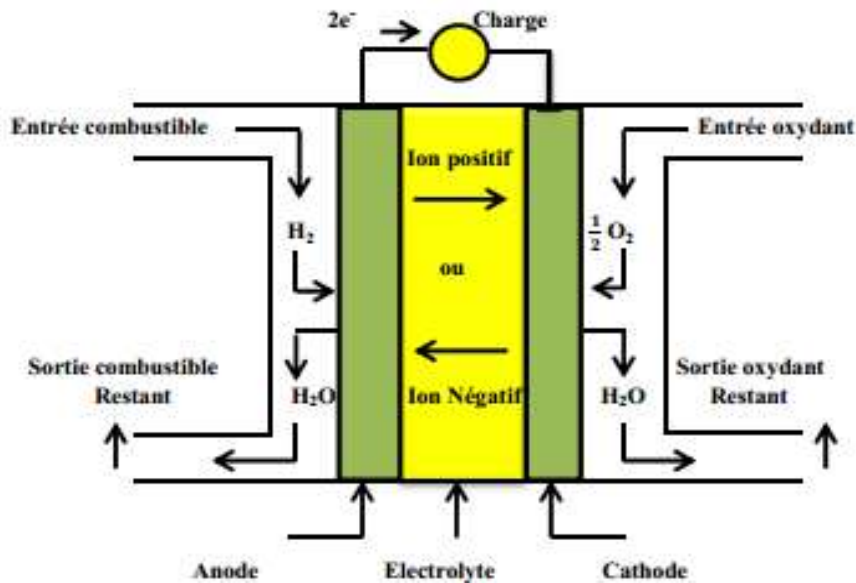
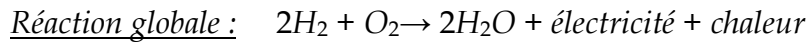
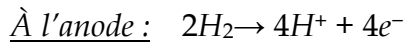


Figure 1.3 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible [13]

Une pile à combustible peut fonctionner en utilisant une variété de combustibles et d'oxydants dont l'hydrogène est le carburant par excellence considérant qu'il possède une plus haute réactivité électrochimique en comparaison avec les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou alcools. Pour l'oxydant, l'oxygène a été reconnu comme le plus efficace à cause de sa haute réactivité et son abondance dans l'air [12]. En général, une pile à combustible possède les caractéristiques suivantes :

- ✓ Elles sont essentiellement constituées de deux plaques (plaques bipolaires) permettant notamment l'amenée des gaz, la collecte du courant et assurant la tenue mécanique, et de deux électrodes (anode et cathode) isolées par un électrolyte [1]. Sur l'anode, on déclenche une réaction d'oxydation électrochimique d'un composé hydrogéné (le combustible). Cette réaction génère des électrons et met en jeu union [1]. Sur la cathode, on déclenche une réaction de réduction électrochimique en présence d'oxygène (le comburant) et des électrons venus de l'anode via la charge extérieure qui met en jeu le même ion qu'à l'anode. Le comburant est totalement l'oxygène de l'air [1]. Les réactions électrochimiques nécessitent un catalyseur sur chaque électrode de plus, elles produisent de la chaleur et de l'eau [1].
- ✓ Entre ces deux électrodes, un électrolyte permet le transfert de l'ion mis en jeu tout en étant un isolant électrique vis-à-vis des électrons générés à l'anode [14]. Il trouve deux types d'électrolyte qui peuvent être solides ou liquides.

Selon que l'électrolyte soit acide ou alcalin, deux équations de principe sont rencontrées. Pour un électrolyte acide, on a :



1.2.3. Types de piles à combustible

Les différents types de la pile à combustible (**PAC**) sont classés selon la nature de leur électrolyte et leur température de fonctionnement. Nous pouvons distinguer six types de pile [15] :

- Les piles à membranes polymère échangeuse de protons (**PEMFC**).
- Les piles au méthanol direct (**DMFC**).
- Les piles à acide phosphorique (**PAFC**).
- Les piles alcalines (**AFC**).
- Les piles à oxydes solides (**SOFC**).
- Les piles à carbonates fondus (**MCFC**).

Le tableau 1.1 récapitule les différents types de piles classiques classées par type, température de fonctionnement, gamme de puissance, rendement électrique, applications possibles et type d'électrolyte.

Tableau 1.1 : Différents types de piles à combustible [12] [15]

Type de la PAC	Électrolyte	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, Équipements portables
DMFC	Membrane en polymère solide	Méthanol	70 à 90°C	1W à plusieurs kW	30 - 45%	Transport, Équipements portables
PEM	Membrane en polymère solide	Hydrogène	70 à 100°C	1W à 10MW	30 - 45%	Spatial, Transport, Stationnaire, Équipements portables
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

1.2.4. La pile à combustible de type PEM

La pile à combustible PEM en principe de fonctionnement est réalisée par une réaction d'oxydoréduction électrochimique. En fait, l'hydrogène et l'oxygène interagissent pour générer de l'électricité, de l'eau et de la chaleur [12].

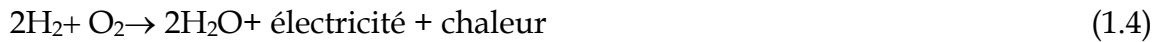
Une cellule élémentaire de la pile à combustible de type PEM est totalement composée de plaques de graphites bipolaires, conductrices de l'électricité, d'électrodes appelées « l'anode et la cathode » qui jouent le rôle de conducteurs électroniques et sont séparées par un polymère électrolyte solide (membrane) représentant le conducteur protonique. L'assemblage membrane électrode forme le cœur électrochimique du système. Sur l'anode, l'hydrogène est dissocié en présence catalytique suivant la réaction [16] :



Les ions d'hydrogène traversent le polymère électrolyte vers la cathode où ils sont combinés avec l'oxygène et les électrons de la cellule adjacente pour former de l'eau selon la réaction :



Alors, la réaction globale obtenue est :



Le type de l'électrolyte polymère de la PEM, est un conducteur ionique sous la forme d'une membrane généralement en Nafion [16].

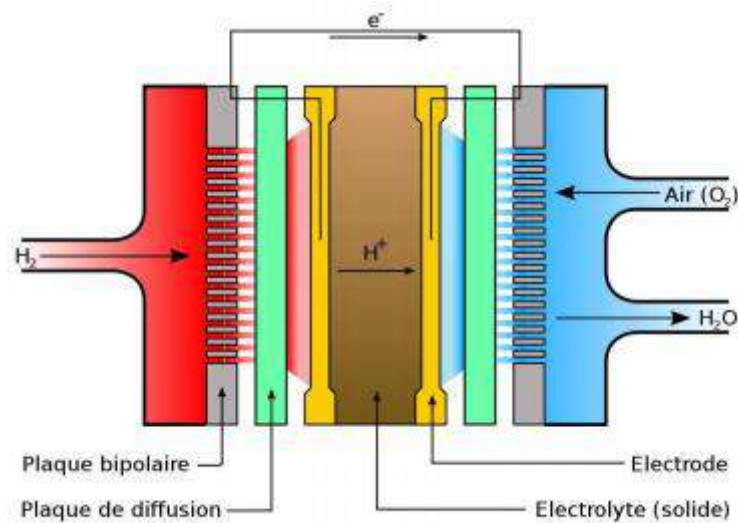


Figure 1.4 : Schéma d'une cellule élémentaire de pile à combustible PEMFC [17]

Dans une cellule élémentaire, la tension nominale est de l'ordre de 0,7V [12]. Pour accéder aux niveaux de tension demandés pour des applications, nous assemblons un groupe de cellules en série pour former ce qu'on appelle un "Stack" qui définit l'empilement des cellules élémentaires.



Figure 1.5 : Exemple de Stack chez ZSW (23 cellules) [12]

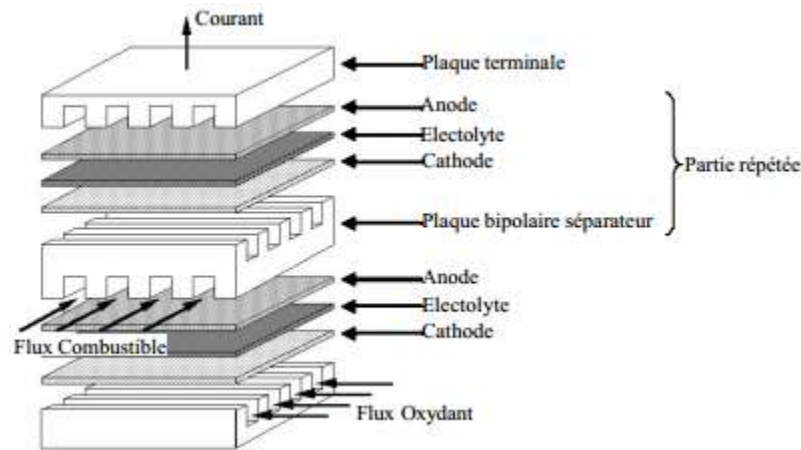


Figure 1.6 : Structure d'un empilement de cellule PEMFC [15]

1.2.4.1. La tension à vide

La réactivité électrochimique qui se passe à l'intérieur de la pile à combustible PEM fait convertir directement l'énergie chimique en énergie électrique. L'énergie chimique libérée par la pile à combustible peut être calculée par la variation de l'énergie libre de Gibbs (ΔG_f), qui représente la différence entre l'énergie libre de Gibbs des produits (G_f) et l'énergie libre de Gibbs (G_f) des réactifs [12]. L'énergie libre de Gibbs est utilisée pour calculer l'énergie disponible pour accomplir le travail extérieur le travail interne [11] [12].

$$\Delta G_f = G_f \text{ des produits} - G_f \text{ des réactifs} = (G_f)_{H_2O} - (G_f)_{H_2} - \frac{1}{2} (G_f)_{O_2} \quad (1.5)$$

La variation de l'énergie libre de Gibbs dépend de la température et de la pression de l'hydrogène et d'oxygène selon la formule suivante :

$$\Delta G_f = \Delta G_f^0 - RT \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (1.6)$$

Avec :

ΔG_f : variation de l'énergie libre de Gibbs [kJ.mol⁻¹]

ΔG_f^0 : variation de l'énergie libre de Gibbs à la pression standard (1 bar) qui dépend de la température T exprimée en Kelvin [11]. À : 1 bar et 25 °C, $\Delta G_f^0 = - 237.2 \text{ kJ.mol}^{-1}$ [12]

R : constante universelle des gaz. R = 8,31451 J.kg⁻¹.K⁻¹ [11].

T : température exprimée en Kelvin

P_{H_2} : pression d'hydrogène [bar]

P_{O_2} : pression d'oxygène [bar]

P_{H_2O} : pression de la vapeur d'eau [bar]

Si toute l'énergie libre de Gibbs serait convertie en énergie électrique, donc il n'y aura pas de pertes dans la PEMFC. Pour chaque mole d'hydrogène, deux électrons passent par le circuit électrique externe et le travail électrique effectué s'exprime par :

$$\Delta G_f = -2FE \quad (1.7)$$

Où F est la constante de Faraday (96 485 coulombs) qui représente la charge électrique d'une mole d'électrons, et E est la tension à vide (ou de circuit ouvert) de la PEMFC.

La tension de circuit ouvert d'une cellule de pile à combustible PEM peut donc être écrite comme :

$$E = \frac{-\Delta G_f}{2F} = \frac{-\Delta G_f^\circ}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (1.8)$$

En pratique, le fonctionnement des PEMFC s'accompagne de pertes; une partie de l'énergie chimique est convertie en chaleur. Le terme $\frac{-\Delta G_f^\circ}{2F}$ varie en fonction du point de fonctionnement. Il est égal à 1,229 V à l'état standard (25 °C et 1 bar) [11].

1.2.4.2. Le rendement

Le rendement de conversion η_{fc} de l'énergie chimique en énergie électrique est défini comme étant la quantité d'énergie électrique produite (Eutile) relative à la variation ΔH_f de l'enthalpie total (positive si l'énergie est récupérée, négative si elle est libérée) de la réaction (1.4) [12].

$$\eta_{fc} = \frac{E_{utile}}{\Delta H_f} \quad (1.9)$$

Dans le cas d'une cellule pile à combustible PEM, la variation de l'énergie libre de Gibbs est disponible comme une énergie électrique utile. Le rendement est alors exprimé par :

$$\eta_{fc} = \frac{\Delta G_f}{\Delta H_f} \quad (1.10)$$

1.3. Le stockage d'énergie

Pour satisfaire les demandes en puissance des charges entraînées, il faut remédier au problème de fluctuation de puissance et séparer la caractéristique du stockage en deux: (puissance, énergie). Dans ce cas, l'hybridation paraît très intéressante car elle permet de bénéficier des caractéristiques de chaque source d'énergie.

1.3.1. Plan de Ragone

Les différents systèmes de stockage de l'énergie électrique (SSE) peuvent être représentés dans un même plan appelé « *plan de Ragone* ». Ce plan représente l'énergie massique en fonction de la puissance massique.

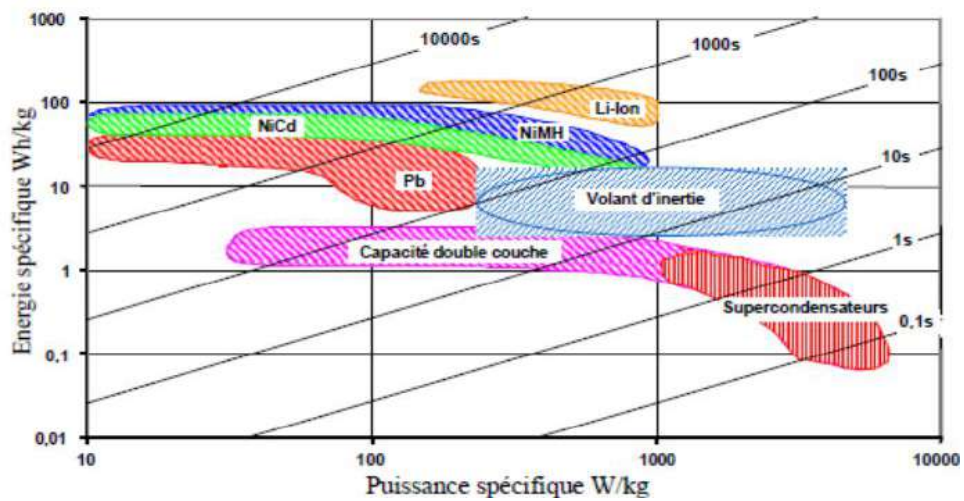


Figure 1.7 : Plan de Ragone [12]

1.3.2. Les batteries

Les batteries (ou accumulateurs) sont constitués d'un couple électrochimique composé de deux électrodes séparées par un électrolyte et aux interfaces desquelles interviennent des réactions d'oxydation ou de réduction qui cèdent ou absorbent des électrons. Les ions ainsi générés circulent dans l'électrolyte. Pour avoir 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. Il faut en outre une parfaite réversibilité des processus électrochimiques et des matériaux à faible masse ou volume molaire [15].

Les réactions chimiques sont sensibles à la température, ainsi certains types d'accumulateurs sont inefficaces à basse température ($<0^{\circ}\text{C}$), d'autres requièrent des températures élevées (300°C). La puissance (rapidité à délivrer l'énergie) est limitée par le

plus lent des nombreux processus de conduction. Pour accroître la puissance, il faut augmenter les surfaces d'électrodes, augmenter leur porosité... Pratiquement, il existe toujours un compromis énergie/puissance [15].

Le tableau 1.2 résume quelques caractéristiques des batteries courantes.

Tableau 1.2 : Différents types et caractéristiques des batteries [18]

Type	Énergie Massique	Tension d'un élément	Durée de vie	Temps de charge	Auto-décharge par mois
Plomb	30-50 Wh/kg	2 V	200-300	8-16 h	5 %
Ni-Cd	48-80 Wh/kg	1,25 V	1 500	1 h	20 %
Ni-Mh	60-120 Wh/kg	1,25 V	300-500	2-4 h	30 %
Li-ion	110-160 Wh/kg	3,7 V	500-1 000	2-4 h	10 %
Li-Po	100-130 Wh/kg	3,7 V	300-500	2-4 h	10 %

Toute batterie est composée d'un groupe de cellules comme montrée dans la figure 1.8, donc le multiple de la tension de ces cellules représente la tension de la batterie, par exemple: sur une batterie au nickel cadmium de 6V possède 5 cellules de 1.2V.

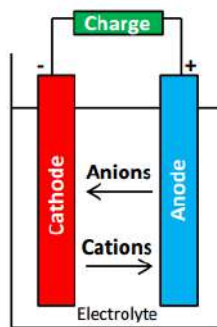


Figure 1.8 : Une cellule typique d'une batterie électrochimique [19]

1.3.2.1. Liaisons des batteries

Pour obtenir la tension et le courant ou capacité requise qui sont appropriées pour une application demandée, on peut généralement connecter les cellules de la batterie soit en série ou parallèle par exemple: une batterie de 12V peut être réalisée en connectant en série dix cellules nickel cadmium de 1.2V ou six cellules plomb (au lead-acid) de 2.0V.

a) Connexion en série

La connexion des batteries en série « plus » à « moins » (positif d'une cellule à négatif de la cellule suivante) nous permet d'obtenir une tension qui atteint une valeur appropriée pour l'application demandée et le courant qui traverse les cellules est le même [19].

Si les batteries sont connectées « plus » à « moins » (positif d'une cellule à négatif de la cellule suivante), de sorte que leur tension atteint une valeur appropriée pour l'application demandée, elles sont dites « connectées en série ». On note que le même courant va traverser toutes les cellules.

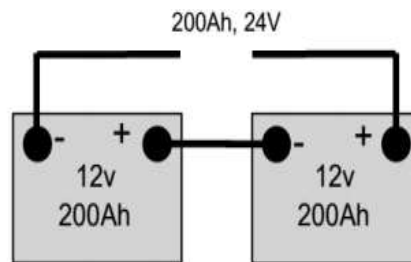


Figure 1.9 : Liaison en série des batteries [19]

b) Connexion parallèle

Si deux ou plusieurs batteries sont connectées « plus » à « plus » et « moins » à « moins » (positif d'une cellule à la borne positive de l'autre et de même pour les pôles négatifs) alors elles sont dites "connectées en parallèle". Deux piles reliées en parallèle produiraient la même tension que d'une seule cellule, mais elles sont capables de délivrer deux fois le courant. Elles auraient aussi deux fois la capacité de stockage d'une seule cellule à la même tension [19].

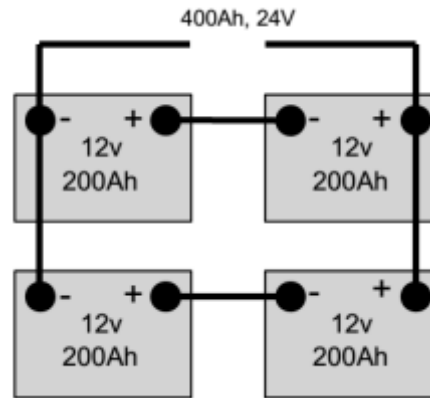


Figure 1.10 : Liaison en série et en parallèle des batteries [19]

- ❖ **Remarque :** en considérant que le courant fourni est constant, la quantité d'énergie peut être calculée par sa capacité Q généralement exprimée en Ah. On quantifie aussi l'énergie emmagasinée en Wh [19].

1.3.3. La batterie au lithium ion

les accumulateurs ont été commercialisés en 1991 par Sony pour des appareils mobiles. Les accumulateurs au lithium ont vu le jour seulement en 2005 dans l'industrie automobile [16]. 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. Le lithium est en effet le plus léger des métaux et possède un potentiel électrochimique élevé. Il est en fait le métal le plus attractif pour constituer l'électrode négative d'un accumulateur [12].



Figure 1.11 : Batterie au lithium-ion de la Corporation GS YUASA [12]

1.3.3.1. Principe de fonctionnement

Les accumulateurs au lithium se divisent en deux grandes familles :

- 1) Les accumulateurs au « Lithium-Carbone » ou « Lithium-Ion ».
- 2) Les accumulateurs au « Lithium-Métal ».

Leur principe de fonctionnement est identique et diffère selon l'utilisation d'une électrode négative à base de carbone graphite ou de lithium métallique. En cours de son utilisation et pendant la phase de décharge de l'accumulateur, le lithium relâché par l'électrode négative sous forme d'ions Li^+ migre à travers l'électrolyte conducteur ionique et vient s'insérer dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive (composé d'insertion du lithium de type oxyde métallique). Le passage de chaque ion Li^+ dans le circuit interne de l'accumulateur est exactement compensé par le passage d'un électron dans le circuit externe générant ainsi un courant électrique. La figure 1.12.a montre le fonctionnement d'un accumulateur au Lithium Métal où l'électrode métallique (anode) libère un ion Li^+ qui vient s'insérer dans l'électrode positive (cathode). Dans le cas de l'accumulateur au lithium ion (figure 1.12.b), les ions Li^+ font un « va-et-vient » entre les deux matériaux d'insertion contenus dans les électrodes positive et négative à chaque phase de charge ou décharge de l'accumulateur.

Pendant la période de charge, les ions Li^+ viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphite. Lors de la période de décharge, la structure en carbone graphite de l'anode libère des ions Li^+ qui viennent se replacer dans la structure de la cathode [12].

❖ **Remarque :** A l'intention des électriciens, électroniciens et électrotechniciens de métier, on notera que la dénomination des électrodes n'est, en électrochimie, aucunement rattachée à leur polarité, et qu'en conséquence une anode (respectivement cathode) n'est pas nécessairement une électrode positive (respectivement négative). Par définition, l'anode est le siège d'une réaction d'oxydation, et la cathode le siège d'une réaction de réduction. Leur nature change donc au rythme des cycles de charge et décharge [20].

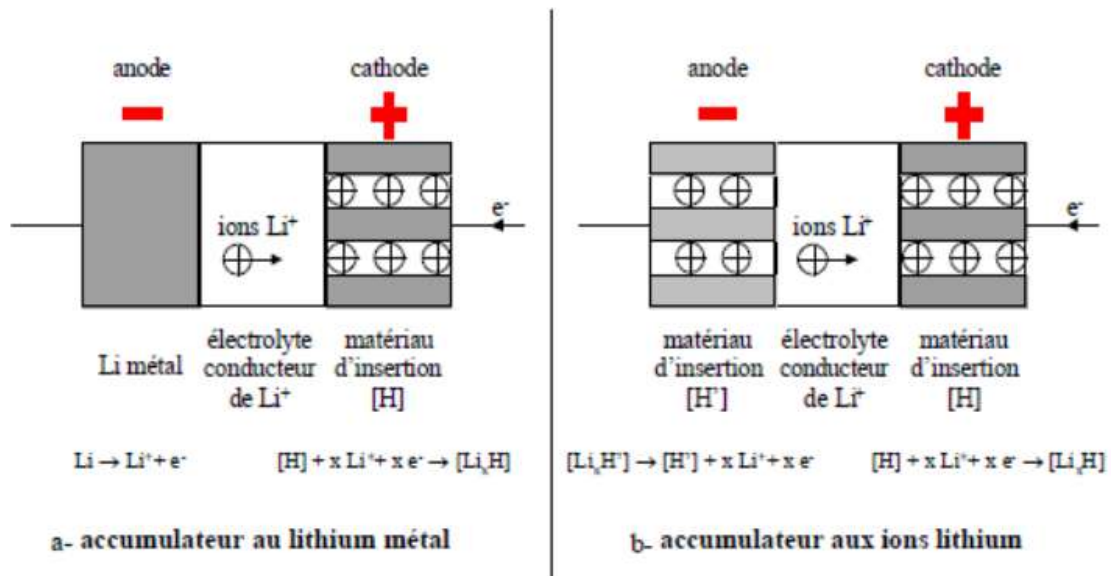


Figure 1.12 : Principe de fonctionnement des accumulateurs au lithium [12]

1.3.3.2. Éléments technologiques

La batterie au lithium ion est généralement composée de :

a) Électrode positive

Dans le cas des générateurs secondaires, un "bon candidat" au titre de matériau d'électrode positive doit rester structurellement inchangé et ne pas se lier à son environnement. C'est pourquoi les matériaux les plus courants sont les oxydes de métaux de transition lithiés, plus particulièrement $LiCoO_2$, $LiNiO_2$ et $LiMn_2O_4$. Les deux premiers se caractérisent par une structure en couches, munie d'espaces interstitiels à deux dimensions, tandis que celle du $LiMn_2O_4$ est de type spinel, munie d'espaces tridimensionnels. L'insertion du lithium s'y opère à un potentiel compris entre 3,5V et 4V par rapport au lithium.

b) Électrode négative

Réalisée en composés carbonés : graphite, carbones hydrogénés, carbones durs, oxydes mixtes de vanadium amorphes, oxydes mixtes à base d'étain ou d'oxydes mixtes à base de titane, elle sert comme matériau d'insertion et n'est pas modifiée lors de la réaction.

c) Séparateur

Comme les propriétés de séparateur de l'accumulateur au plomb, constitué d'un polymère membrane microporeuse.

d) Électrolyte

Dans le cas des accumulateurs lithium ion, l'électrolyte est constitué d'un mélange de solvants carbonés cycliques et/ou linéaires, tels que le propylène carbonate, dans lequel est dissous un sel de lithium [20], par exemple une solution de LiPF_6 (lithium hexa fluoro phosphate) dans un mélange de solvants organiques. Il se trouve soit sous forme liquide ou solide (polymère sec, polymère gélifié ou composé organique vitreux). Sa nature fixe la tension maximale d'utilisation de l'accumulateur. Pour un polymère sec, la tension maximale ne peut excéder 3.5V, alors qu'elle peut atteindre 4.8V pour un liquide ou un gel. De plus, le transport des ions ne modifiant pas l'électrolyte, la résistance interne est pratiquement indépendante de l'état de charge et ne varie notablement qu'avec la température [12].

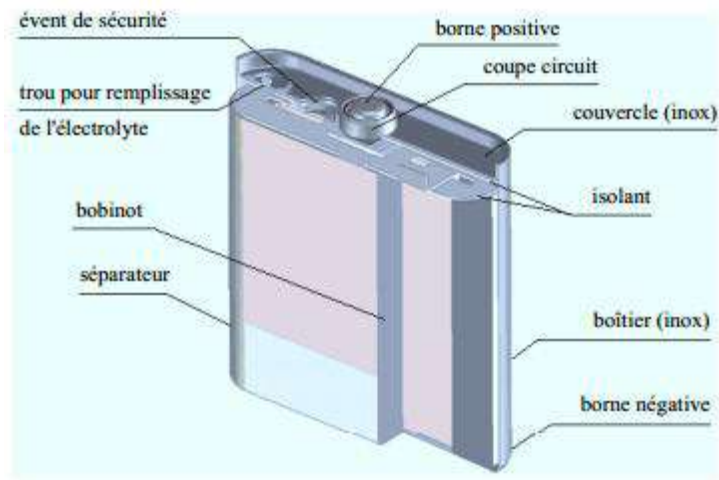


Figure 1.13 : Vue éclatée d'un élément MP 176065 de la société Saft [20]

1.3.3.3. Synthèse et caractéristiques

Un accumulateur quelle que soit la technologie utilisée est défini par trois grandeurs qui sont :

a) La densité d'énergie massique (ou volumique) en Wattheure par kilogramme, Wh/kg (ou en Watt-heure par litre, Wh/l), correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (ou de volume) de l'accumulateur.

b) La densité de puissance massique en Watt par kilogramme [W/kg], représente la puissance (énergie électrique fournie par unité de temps) que peut délivrer l'unité de masse de l'accumulateur.

c) Le nombre de cycles « charge/décharge » caractérisant la durée de vie de l'accumulateur.

Le tableau 1.3 récapitule les performances techniques des accumulateurs aux lithium-ion de tension 4 Volts.

Tableau 1.3 : Principales données techniques des accumulateurs au lithium ion [12]

Température de fonctionnement	0 à 50 °C
Énergie	80 à 120 Wh/kg 150 à 250 Wh/dm ³
Nombre de cycles profonds	200 à 1000
Puissance massique	50 à 200 W/kg
Rendement charge/décharge	-Énergétique : de 85 à 100 % -Faradique : de 90 à 100 %
Autodécharge	10 % par mois
Impact environnemental	▪Sels de lithium et oxydes recyclés ▪Solvants polymère et carbone inerte ▪Utilisation du cobalt → très toxique
Sécurité	▪Problème de stabilité mécanique ▪Échauffement et risques d'explosion en surcharge ▪Stockage longue durée : 30 à 50 % de l'état de charge

1.3.4. Super condensateurs

Le principe de la double couche électrochimique a été découvert par le physicien Helmholtz dans les années 1850. Il a remarqué que l'application d'une différence de potentiel sur des électrodes mises en contact avec un électrolyte provoque un regroupement des ions de cet électrolyte à la surface de cette interface. Pour des raisons technologiques, il a fallu attendre 100 ans pour que les condensateurs à double couches électriques voient le jour, soit vers la fin des années 1950 dans l'idée de renouveler les systèmes de stockage d'énergie.

Les industriels et les scientifiques par les progrès qu'ils apportent aux matériaux des électrodes et de l'électrolyte depuis ces 30 dernières années, ont permis de créer le super condensateur s'imposant aujourd'hui de plus en plus dans les systèmes de forte puissance[15].

Un super condensateur se présente sous la même forme qu'un condensateur électrochimique classique à la seule différence qu'il ne possède pas de couche diélectrique dans sa partie électrolytique liquide (voir figure 1.14). L'isolement entre les deux électrodes se fait par l'intermédiaire du solvant contenu dans l'électrolyte. En effet, les super condensateurs n'exploitent pas la polarisation diélectrique pour le stockage de l'énergie mais la double couche électrique apparaît à l'interface électrode électrolyte [12].

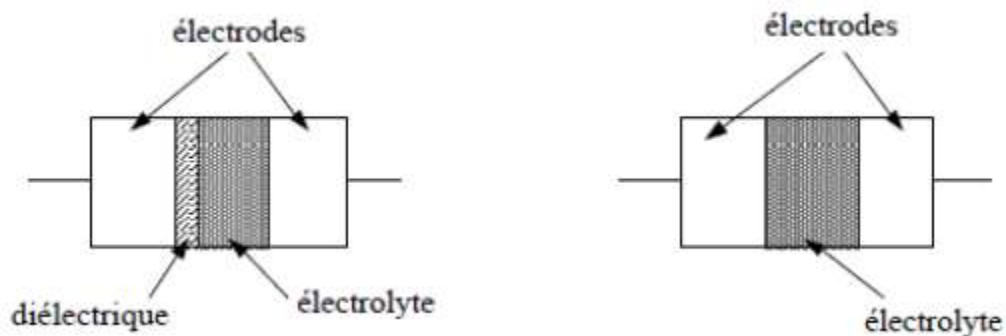


Figure 1.14 : Différence entre un super condensateur et un condensateur classique [12]

1.3.4.1. Principe de fonctionnement

Le principe général de fonctionnement des super condensateurs repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface d'un électrolyte et d'une électrode polarisable de grande surface spécifique. L'application d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif complet entraîne le stockage électrostatique de charges aux deux interfaces électrode / électrolyte. Le principe de fonctionnement peut être décomposé en fonction de quatre états différents du composant [15] :

- État déchargé;
- État en charge;
- État chargé;
- État en décharge.

a) État déchargé

A l'état déchargé et sans aucune alimentation, une accumulation de charge se crée spontanément à l'interface électrode/électrolyte aussi bien du côté de l'électrode (q_{el}) que du côté de l'électrolyte (q_{ion}).

q_{el} et q_{ion} ; sont respectivement les charges de nature électronique et ionique par unité de surface. La condition d'électro neutralité impose $q_{el} = - q_{ion}$. Un potentiel, dit potentiel d'abandon apparaît alors à chaque interface. Le signe et l'amplitude de ce potentiel est spécifique à chaque couple électrode/électrolyte. Cette accumulation de charges correspond à la double couche électrochimique (son épaisseur est de quelques nanomètres).

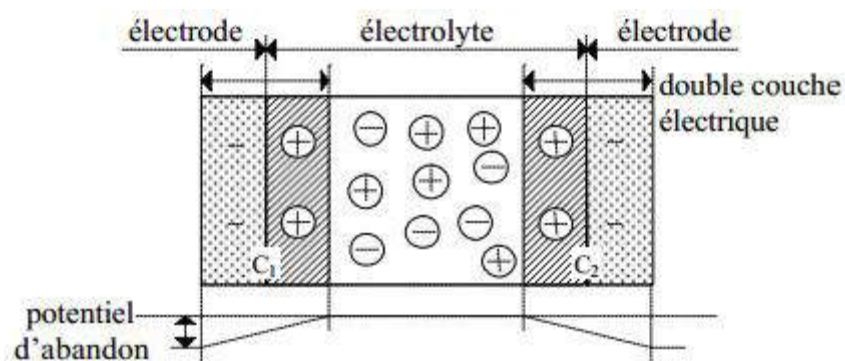


Figure 1.15 : État déchargé d'un super condensateur [12] [15]

b) En charge

Lors de l'application d'une différence de potentiel aux bornes du super condensateur, la distribution des charges aux deux interfaces va être modifiée. L'une d'entre elles passant par son potentiel de charge nulle tandis que l'autre voit augmenter l'accumulation de charges. Il y a donc une augmentation du potentiel.

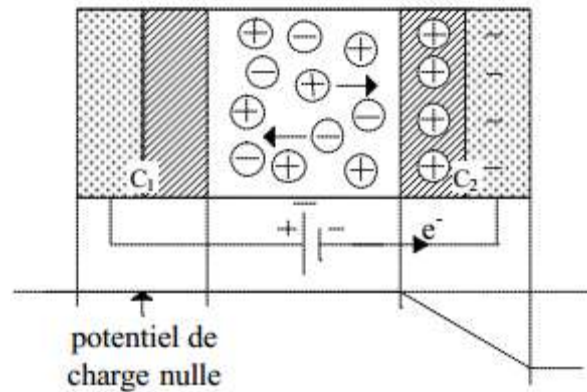


Figure 1.16 : État en charge d'un super condensateur [12] [15]

c) État chargé

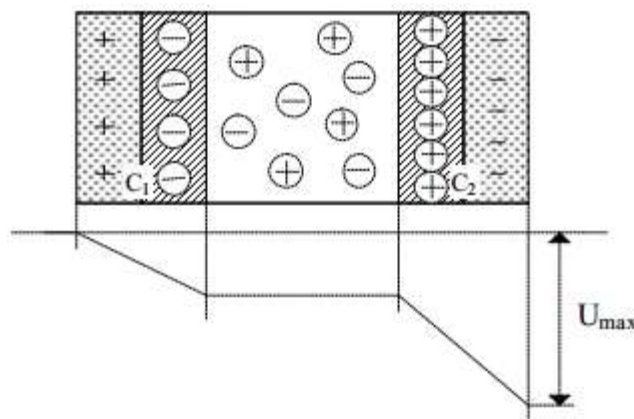


Figure 1.17 : État chargé maximal [12] [15]

Si la charge est poursuivie jusqu'à la valeur maximale U_{max} du potentiel applicable, les deux doubles couches électrochimiques se comportent comme deux condensateurs et voient donc leurs charges augmentées selon une loi du type $Q = CU$. A l'état chargé, la capacité totale du dispositif résulte des capacités (C_1 et C_2) des deux interfaces en série et est donc donnée par :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (1.11)$$

d) État en décharge

Lors de la décharge, les ions et les électrons suivent le chemin inverse et un courant électrique est utilisable dans le circuit extérieur. Nous remarquons par cette propriété que le super condensateur développe dans sa structure interne deux capacités et non, une comme le condensateur classique (qui se situe à l'anode). Pour utiliser au maximum la couche double électrique, les matériaux utilisés pour les électrodes doivent avoir de grandes facultés à conduire les charges électroniques et donc possèdent des surfaces spécifiques élevées supérieures à 1000 m²/g, telles que le carbone activé.

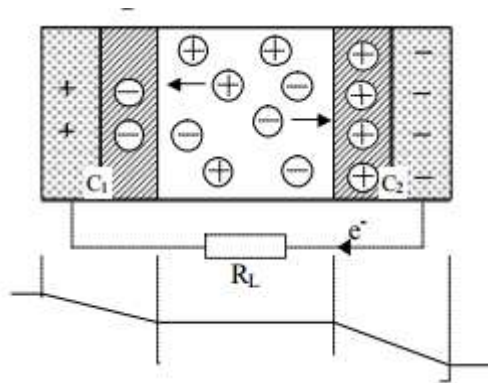


Figure 1.18 : État d'un super condensateur en décharge [12] [15]

1.3.4.2. Différentes familles

En fonction des matériaux d'électrodes et leurs électrolytes, les supercondensateurs sont classés en deux familles.

Tableau 1.4 : Différentes familles des super condensateurs [12] [15]

Electrode	Charbon actif		Matériau Métallique	Polymère conducteur
	Acide sulfurique	Organique		
Electrolyte	Acide sulfurique	Organique	Acide sulfurique	Organique
Moyen de stockage de l'énergie	Condensateur de double couche		Double couche + processus faradiques réversibles	
Energie massique [Wh/kg]	0.2 à 1.1	2 à 4.2	2.7 à 5.5	11
Puissance massique [kW/kg]	1 à 10	0.1 à 2	10 à 100	100
Capacité massique [F/g]	120 à 180	60 à 100	≈ 600	200 à 400
Tension [V]	0.8 à 1.2	2 à 3	0.8 à 1.2	2.5
Cyclabilité	> 100000	> 100000	> 100000	10000 à 100000

1.3.4.3. Systèmes d'équilibrage

La tension maximale en charge d'un élément de super condensateur est limitée pour des raisons technologiques à une tension de 2.5V. De ce fait, l'utilisation des super condensateurs dans des applications de forte puissance ne peut se faire quand associant plusieurs éléments en série pour pouvoir atteindre des tensions importantes.

Cette association en série ne peut se faire simplement car la valeur de chaque élément varie. De ce fait, les tensions en fin de charge seront différentes entre chaque élément. Pour pallier ce problème, il faut mettre en place un système d'équilibrage des tensions. Nous pourrions ainsi exploiter pleinement les capacités de stockage des éléments. De plus, ce système permet d'éviter les surtensions aux bornes des éléments. Il existe différents types de circuit d'équilibrages, des systèmes passifs constitués de résistances ou de diodes zéner, ou des systèmes actifs réalisés avec des convertisseurs statiques (exemple circuit Buck/Boost) [15].

a) Système d'équilibrage avec résistances

La structure de ce système est très simple puisque elle consiste à connecter une résistance en parallèle de chaque élément du super condensateur.

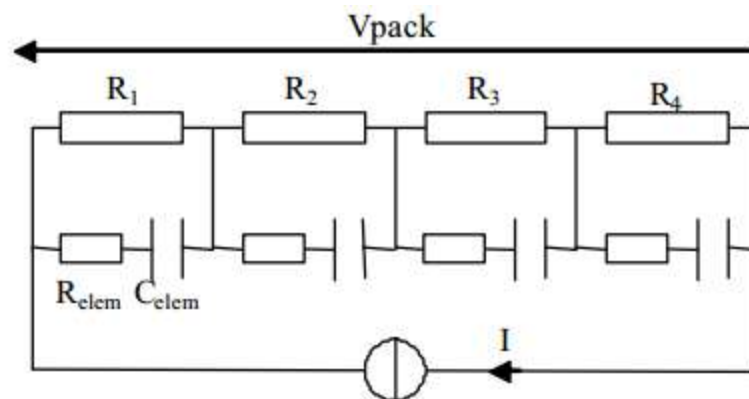


Figure 1.19 : Système d'équilibrage résistif [15]

La valeur de la résistance est déterminée par plusieurs critères. Le critère principal est de limiter la valeur maximale de la tension aux bornes de l'élément. Cette structure a trois inconvénients :

- ✓ Limitation de la dynamique du pack du super condensateur.
- ✓ Rendement très faible (10%) lié à la dissipation d'énergie dans les résistances.
- ✓ L'équilibrage est calculé pour une valeur de courant donnée.

b) Système d'équilibrage avec diodes zéner

Les diodes zéner sont mises en parallèle sur les éléments :

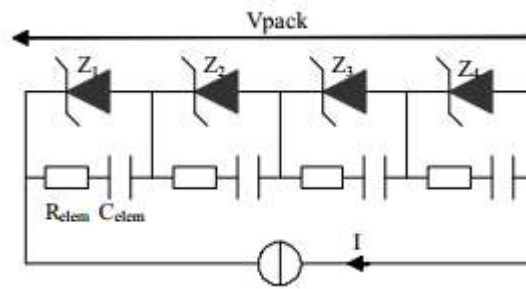


Figure 1.20 : Système d'équilibrage avec diodes zéner [15]

La tension maximale acceptée par les éléments de super condensateur détermine la tension zéner des diodes. Une difficulté de ce système d'équilibrage est de trouver la diode zéner qui convient pour une application donnée (I_{nom} , V_{max}). Cette solution offre cependant un meilleur rendement (90%) et une meilleure dynamique que le système résistif.

Le principal inconvénient de cette solution est l'utilisation des diodes zéner qui dissipent de l'énergie quand la tension aux bornes de l'élément a atteint sa valeur maximale. Cette dissipation peut être très importante si beaucoup d'éléments atteignent leur tension limite. Pour pallier ces problèmes, il faut utiliser des structures basées sur l'utilisation de convertisseurs statiques permettant de limiter les pertes par dissipation dans le système d'équilibrage.

1.3.4.4. Applications potentielles

Dans les applications qui se précisent actuellement, les super condensateurs sont utilisés en remplacement et surtout en complément des piles à combustible et accumulateurs électrochimiques afin d'assurer la fonction puissance qui leur fait défaut. On trouvera ces composants dans les systèmes nécessitant une importante puissance sollicitée en un temps record.

- Les principaux secteurs concernés par les super condensateurs sont [12]:
L'informatique et la télécommunication pour les petits composants à faible énergie spécifique.
- Les alimentations de secours et l'automobile concernant les composants à haute énergie et haute puissance spécifiques.

- Secteurs d'activités : médical (défibrillateur), industriel (robotique) et militaire (canon électromagnétique).

1.3.4.5. Principales gammes

Un certain nombre d'entreprises ont investi dans la production industrielle des super condensateurs. Citons en premier lieu les deux précurseurs japonais NEC et Panasonic, dont l'activité "super condensateurs" a plus de trente années.

Pour les dispositifs de puissance, il s'agit de la société Epcos avec sa gamme Ultracap, et de la société Maxwell avec sa gamme Boostcap Ultracapacitor [12]. Les deux sociétés utilisent la technologie d'électrodes à base de charbon actif pulvérulent que celle à base de tissu de charbon actif, technologie qui conduit à des dispositifs respectivement cylindriques et prismatiques.

Le tableau 1.5 résume les caractéristiques élémentaires des deux principales gammes des super condensateurs.

Tableau 1.5 : Caractéristiques des éléments Epcos et Maxwell [12]

Constructeur (forme)	Epcos (prisme)	Epcos (cylindre)	Maxwell (prisme)	Maxwell (cylindre)
Tension [V]	2.3	2.5	2.5	2.5
Capacité [F]	100 - 3600	200 - 5000	100 - 2700	450 - 2600
Résistance série [mΩ]	0.8 - 19	0.26 - 3	1 - 13	0.7 - 2.4
Courant nominal [A]	20 - 400	50 - 500	25 - 625	180 - 600
Energie spécifique [Wh.kg ⁻¹]	1.5 - 4.1	3.2 - 5.1	2.2 - 3.2	2.1 - 4.3
Puissance spécifique [kW.kg ⁻¹]	0.7 - 3	4.6 - 9.8	2.2 - 3.2	3.4 - 4.3



Figure 1.21 : Élément Maxwell PC2500



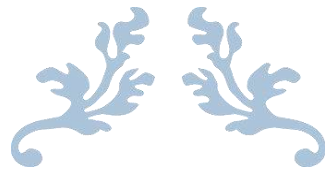
Figure 1.22 : Élément Epcos BCAP0010
B49300-F1276-S

1.4. Conclusion

La réduction de la pollution environnementale est l'objectif principal des innovations dans les dispositifs de production de l'énergie électrique. En raison de leur efficacité et fiabilité, les piles à combustible sont considérées comme l'une des technologies les plus prometteuses [12].

Cependant, dans les architectures utilisant cette technologie, la présence des éléments de stockage offre la possibilité de récupérer l'énergie produite par les piles à combustible augmentant, ainsi, la durée de vie des composants.

En raison de la réversibilité permettant de récupérer l'énergie produite par les piles à combustible, des batteries aux lithium ion et des super condensateurs sont choisis après sélection pour être associés aux piles à combustible PEM, formant, ainsi, la source hybride retenue pour la suite de ce travail.



*Chapitre 2 : Les Véhicules
Électriques*



2.1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous présentons les véhicules électriques, leurs principales configurations et différentes sources de stockage à bord. Nous démontrons aussi l'intérêt de l'utilisation des super condensateurs en présence de fortes sollicitations.

2.2. Les véhicules électriques comme solution ultime du problème de CO₂

Le développement des véhicules à moteur à combustion interne est qualifié parmi les meilleures réalisations de la technologie moderne. L'industrie automobile et les autres industries associées constituent l'épine dorsale de l'activité économique mondiale. Cependant, la forte utilisation de ces automobiles est d'un impact non négligeable sur l'environnement et la vie humaine en général. La pollution, le réchauffement de la planète et l'épuisement des ressources fossiles deviennent des préoccupations mondiales pour les années à venir. Dans les dernières décennies, les activités de recherche et de développement dans le secteur du transport se sont intensifiées dans le but de remplacer dans le futur proche, les véhicules conventionnels par des véhicules plus efficaces et « propres ». Les véhicules électriques, hybrides électriques et hybrides à pile à combustible sont au cœur de cette recherche [16].



Figure 2.1 : Dodge EV [18]

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

En effet, les véhicules tout électriques sont:

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

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

2.3. Historique de développement

Le premier véhicule électrique a fait son apparition aux alentours de 1830. Son inventeur était Robert Anderson (un homme d'affaires écossais). Il s'agissait plutôt d'une carriole électrique. Vers 1835, l'américain Thomas Davenport construisit une petite locomotive électrique. Vers 1838, l'écossais Robert Davidson arriva avec un modèle similaire qui peut rouler jusqu'à une vitesse de 6 km/h. Ces deux inventeurs n'utilisaient pas de batterie rechargeable.

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



Figure 2.2 : Premier véhicule électrique à batterie rechargeable



Figure 2.3 : Premier vrai véhicule électrique en 1891

Depuis leur apparition en 1873 au Royaume-Uni, soit plus de dix ans avant l'apparition en 1885 du premier véhicule à essence par les Allemands Daimler et Benz, l'histoire des VE n'a cessé de se présenter comme une suite de hauts et de bas. Jusqu'à il y a quelques années de cela, ils n'ont suscité un intérêt sporadique qu'à la faveur de l'importance prise par des problèmes liés à l'énergie ou à l'environnement comme par exemple les crises pétrolières des années 1974 et 1979. Chaque fois, les VE n'ont su se faire accepter par le marché en raison des réserves inspirées par leur coût et par leurs performances. Pourtant, pour mémoire, le premier véhicule automobile a franchi la barre des 100 km/h était un VE : la "Jamais contente" (baptisée ainsi en l'honneur de sa femme) du Belge Camille Jenatzy atteint ainsi 105 km/h en 1899. Depuis, les VE n'ont pratiquement connu que des utilisations spéciales dans des conditions bien circonscrites [21].



Figure 2.4 : La jamais contente

Dès 1900, le véhicule électrique connaît ses beaux jours. Plus du tiers des véhicules en circulation étaient électriques, le reste étant des autos à essence et à vapeur. En 1902, "La Phaeton de Wood" pouvait rouler 29 kilomètres à une vitesse de 22.5 km/h et coûtait 2000 dollars. En 1912, la production des véhicules électriques était à son apogée mais l'introduction de "La Ford Model T à essence" en 1908 commençait à se faire sentir. "L'Anderson Electric Car Company" présenta son modèle en 1918 à Détroit.



Figure 2.5: Wood phaeton 1902 [18]



Figure 2.6: Véhicule d'Anderson Electric Car Company [18]

En 1920, quelques facteurs menèrent à réduire la production du véhicule électrique. On peut citer leur vitesse trop basse, leur faible autonomie, la recharge d'énergie électrique, la disponibilité du pétrole, leur manque de puissance [22] et leur prix deux fois plus élevé que les Ford à essence.

En 1966, le congrès américain recommanda la construction de véhicules électriques pour réduire la pollution de l'air [23]. L'opinion publique américaine était largement favorable et avec l'augmentation du prix de l'essence en 1973 (premier choc pétrolier : embargo de l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole envers les Etats-Unis) le moment était bien là. Pourtant rien ne décolla vraiment.

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

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

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



Figure 2.7: Toyota Prius XW10

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

En 2002, GM et Daimler Chrysler poursuivaient le "California Air Resources Board (CARB)" pour faire annuler la loi "Zero Emission Vehicle (ZEV)" de 1990 [23]. Le président américain *George Bush* était d'accord avec cette annulation.

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



Figure 2.8 : Fin de l'EV1

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

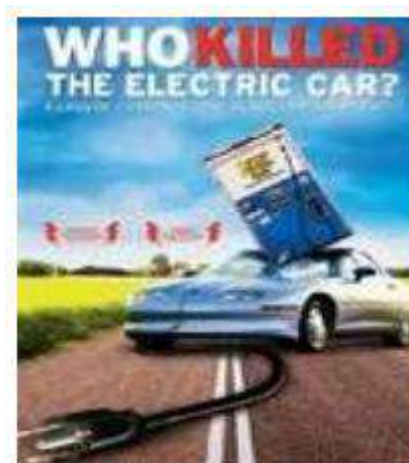


Figure 2.9 : Préambule du documentaire "Who Killed the Electric Car ?"

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

Figure 2.10 : La Pininfarina Blue Car



2.4. Principales configurations des véhicules électriques

Nous avons généralement deux types de voitures électriques : les voitures hybrides et les voitures tout électriques. La différence entre les deux voitures dépend de l'utilisation d'une gamme de sources d'énergie différentes ou d'une source d'énergie électrochimique (Batteries).

2.4.1. Les véhicules tout électriques

Avec une présence importante au début de l'histoire de l'automobile, le véhicule tout électriques est réapparu ces derniers temps comme une solution potentielle au remplacement du véhicule conventionnel même s'il n'est pas encore en mesure de s'imposer sur le marché des véhicules particuliers et reste sans conteste une bonne solution à la condition de disposer d'une source d'énergie embarquée performante [24].

Deux éléments essentiels dans les véhicules tout électriques, un moteur électrique qui assure la propulsion du véhicule et une batterie qui joue le rôle d'une source d'énergie primaire [1]. On note ici que ces véhicules autonomes utilisent la seule énergie électrique des batteries (source principale). Cette énergie est utilisée pour alimenter un ou plusieurs moteurs électriques de traction. La figure ci dessous présente les différents composants de chaîne de traction.

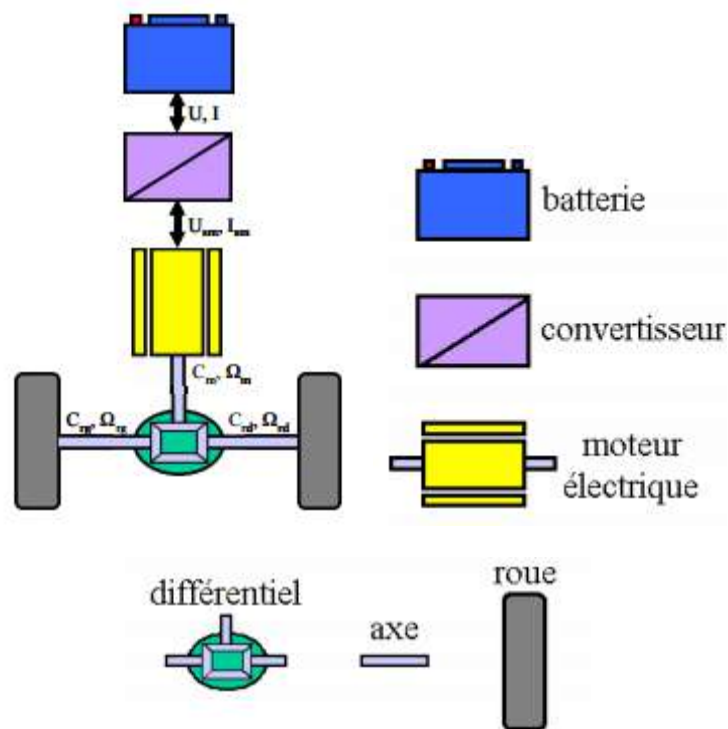


Figure 2.11 : Chaîne de traction tout électriques [24]

2.4.2. Les véhicules hybrides

Pour pallier au problème d'autonomie, d'autres solutions ont été investiguées. Ainsi, les constructeurs se sont orientés vers les véhicules électriques hybrides (VH). Ils représentent un compromis entre le véhicule conventionnel à moteur thermique et le véhicule tout électriques (VTE). Leur but principal est de diminuer la pollution des véhicules conventionnels ou inversement d'augmenter l'autonomie du VTE. Ils peuvent être vus comme une solution intermédiaire en attendant que les problèmes d'autonomie et d'infrastructure des VE soient résolus [24].

Un véhicule électrique hybride (VEH) combine un moteur à combustion interne (MCI) et une machine électrique dans son système de propulsion. Dans la littérature, il existe principalement trois classes : VEH série, parallèle et série/parallèle [1].

2.4.2.1. Principales architectures de véhicules hybrides

Selon la manière d'agencer les différents organes de propulsion du véhicule hybride, on définit différentes architectures du véhicule. On distingue trois grandes architectures : l'architecture série, l'architecture parallèle et l'architecture dite série parallèle ce qui différencie les trois architectures dont la façon de considérer la nature du point de jonction entre les différentes chaînes de traction, appelées "nœud". Dans l'architecture "série", le nœud est électrique, dans l'architecture parallèle, il est mécanique [25].

a) Architecture hybride série

Le système hybride série est équipé d'une source auxiliaire d'énergie permettant d'effectuer les opérations de démarrage du véhicule. Une propulsion électrique est assurée par un ou plusieurs moteurs électriques. La source principale d'énergie assure l'alimentation de la motorisation électrique. Quand on a besoin d'énergie supplémentaire pour les reprises lors des dépassements ou dans les côtes par exemple, c'est la source auxiliaire d'énergie qui fournit ce supplément d'énergie. La source principale peut être un moteur thermique diesel ou à essence mais, d'autres solutions sont envisagées comme la pile à combustible. La source auxiliaire d'énergie peut être des super condensateurs ou des batteries et peuvent être les deux [1].

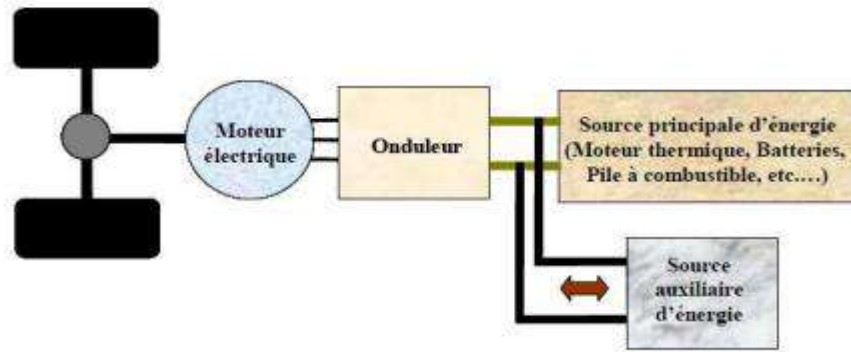


Figure 2.12 : Véhicule hybride série [18]

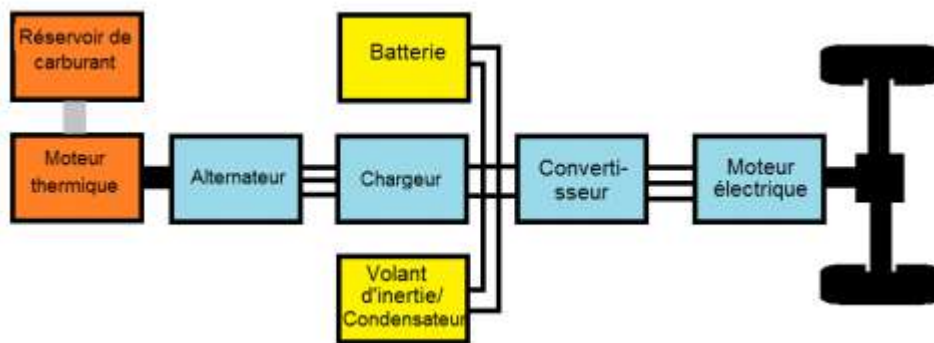


Figure 2.13: Architecture hybride série [1]

Les avantages du véhicule hybride série sont :

- Contrôle optimal du moteur à combustion.
- Le moteur à combustion et le moteur de traction électrique peuvent être positionnés dans le véhicule qui permet de nouvelles dispositions de véhicules.
- Le moteur à combustion n'a pas besoin d'être dimensionné pour la puissance maximale.
- Puissance comparable du véhicule thermique.
- Batterie largement sous dimensionnée.
- Simplicité de la gestion d'énergie.

Les inconvénients du véhicule hybride série sont :

- Plusieurs étapes de conversions énergétiques entraînent plus de pertes.
- Le système d'entraînement électrique doit être dimensionné pour une puissance maximale.
- L'importance du système de motorisation,
- Masse et coûts élevés.

b) Architecture hybride parallèle

C'est le moteur thermique qui sert à déplacer le véhicule (transmission mécanique, embrayage, boîte de vitesse). On lui adjoint un moteur électrique qui utilise l'énergie des batteries électrochimiques rechargeables. Grâce à son couple élevé disponible immédiatement, le moteur électrique aide le moteur thermique dans les phases où il est peu efficace (démarrages, reprises). Lors des phases de freinage ou de décélération, le moteur électrique se transforme en générateur, récupère une partie de l'énergie cinétique et recharge la batterie. L'architecture générale de la technologie hybride parallèle est schématisée par la figure (2.14) [1].

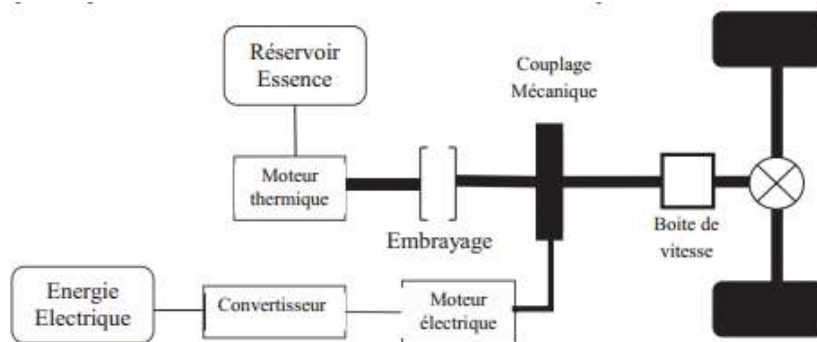


Figure 2.14: Architecture hybride parallèle [25]

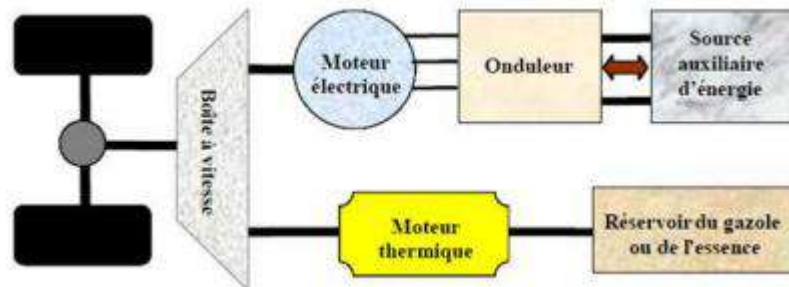


Figure 2.15 : Véhicule hybride parallèle [18]

C) Architecture hybride mixte (Série/Parallèle)

La catégorie des architectures mixte correspond aux hybrides série/parallèle. Cette architecture intègre une génératrice, moteur électrique et un moteur thermique. Grâce à une gestion efficace des puissances demandées d'un côté fournies de l'autre, il est possible de contrôler en régime le moteur thermique et de partager son couple entre les demandes du véhicule et la recharge de la batterie. La figure (2.16) schématise le fonctionnement d'un hybride mixte.

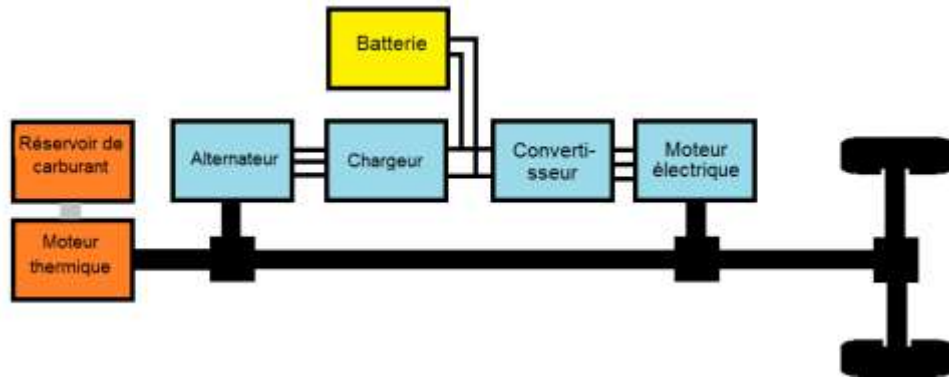


Figure 2.16: Architecture hybride mixte (Série/Parallèle) [1]

Le tableau 2.1 résume les principales architectures de véhicules électriques hybrides.

Tableau 2.1 : Comparaison des trois architectures des véhicules hybrides [25]

Architecture	Schéma	Avantages	Inconvénients
Série		<ul style="list-style-type: none"> - Moins polluante - Relative facilité de commande 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible rendement global - ME de taille importante - Coût élevé
Parallèle	<p>Avantages</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mode tout électrique - Bon rendement global - Récupération au freinage - MT débrayé 	<ul style="list-style-type: none"> Rupture du couple lors des changements de rapports.
Série-Parallèle		<ul style="list-style-type: none"> Combine les avantages des HS et HP 	<ul style="list-style-type: none"> - Complexité de commande - Coût élevé

Avec :

EE = Énergie Électrique ; CV = Convertisseur ; RS = Réservoir d'essence ;

MT = Moteur Thermique ; GE = Générateur ; ME = Moteur Électrique ;

BV = Boîte de Vitesse ; EM = Embrayage ; TP = Train Planétaire

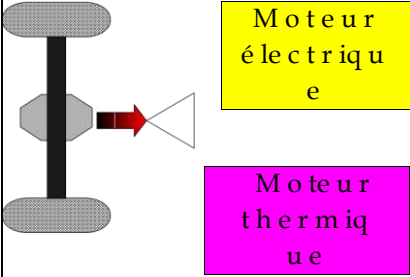
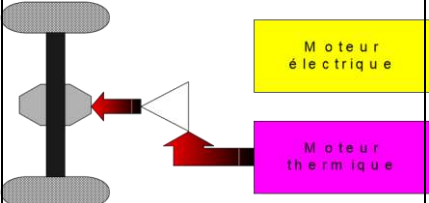
2.4.2.2. Principaux modes de fonctionnement des véhicules hybrides

Les véhicules hybrides disposant de plusieurs sources d'énergie assurent leur propulsion; on distingue trois principaux modes de fonctionnement possibles. D'une façon générale, on peut les résumer de la manière suivante :

a) Le mode thermique pur

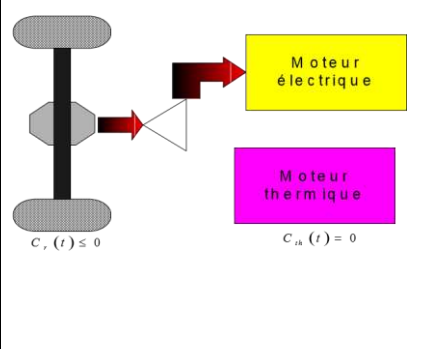
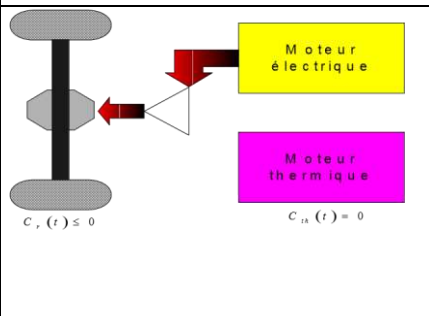
Ce mode correspond à une propulsion intégralement assurée par le moteur thermique. Les performances en termes de consommation et de pollution sont alors similaires à celles d'un véhicule conventionnel [18] [25] [26].

Tableau 2.3 : Mode de fonctionnement de véhicule thermique pur

Mode thermique pur	Freinage du véhicule		<p><u>Freinage en mode thermique pur :</u></p> <p>Le moteur thermique n'étant pas réversible, l'intégralité de l'énergie cinétique du véhicule est dissipée sous forme de chaleur dans les freins.</p>
	Traction du véhicule		<p><u>Traction en mode thermique pur :</u></p> <p>Le moteur thermique fournit l'intégralité de l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule.</p>

b) Le mode électrique pur

Tableau 2.4 : Mode de fonctionnement de véhicule électrique pur

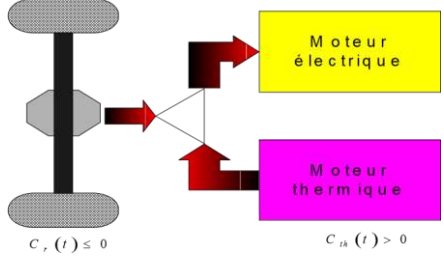
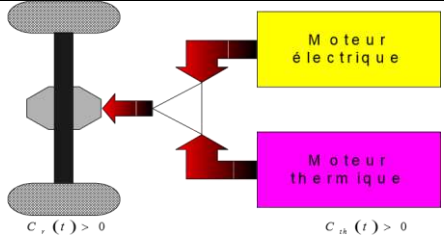
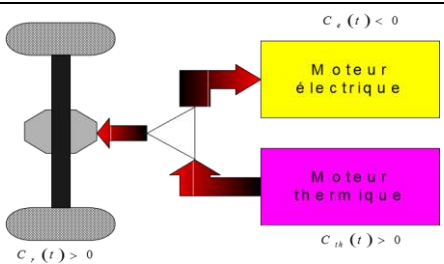
Mode électrique pur	Freinage du véhicule		<p><u>Freinage récupératif en mode électrique pur :</u> L'énergie cinétique du véhicule est récupérée par le moteur électrique pour recharger les batteries</p>
	Traction du véhicule		<p><u>Traction en mode électrique pur :</u> Le moteur électrique fournit l'intégralité de l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule.</p>

Correspondant à une propulsion intégralement assurée par le moteur électrique, le véhicule est alors dit ZEV (Zéro Émission Véhicule) et les performances en termes de dynamique et d'agrément de conduite sont similaires à celles d'un véhicule électrique. Ce mode conduit à plus ou moins long terme à la décharge des batteries [18] [25] [26].

c) Le mode hybride

Il correspond à une propulsion assurée par les deux moteurs simultanément. Plusieurs cas de figures sont envisageables. En traction, l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule peut être délivrée soit par les deux moteurs, soit par le moteur thermique seul.

Tableau 2.5 : mode de fonctionnement de véhicule hybride

<p>Freinage du véhicule</p>	 <p>$c_v(t) \leq 0$</p> <p>Moteur électrique</p> <p>Moteur thermique</p> <p>$c_{th}(t) > 0$</p>	<p><u>Freinage récupératif en mode hybride :</u></p> <p>L'énergie cinétique du véhicule et l'énergie produite par le moteur thermique sont récupérées par le moteur électrique afin de recharger les batteries.</p>
<p>Traction du véhicule</p>	 <p>$c_v(t) > 0$</p> <p>Moteur électrique</p> <p>Moteur thermique</p> <p>$c_{th}(t) > 0$</p>	<p><u>Traction du véhicule en mode hybride :</u></p> <p>Les deux moteurs participent à la propulsion du véhicule.</p>
<p>Traction du véhicule</p>	 <p>$c_v(t) > 0$</p> <p>Moteur électrique</p> <p>Moteur thermique</p> <p>$c_{th}(t) > 0$</p>	<p><u>Traction du véhicule en mode hybride :</u></p> <p>Le moteur thermique fournit l'intégralité de l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule ainsi qu'un supplément qui est récupéré par le moteur électrique afin de recharger les batteries.</p>

Le moteur électrique est alors utilisé pour recharger les batteries enroulant. En freinage, le moteur électrique récupère une partie de l'énergie cinétique du véhicule ainsi qu'un supplément délivré par le moteur thermique [18] [25] [26].

2.5. Les véhicules électriques et la source d'énergie embarquée

Dans le cadre du transport automobile, les différentes sources d'énergie sont souvent caractérisées par leur puissance massique exprimée en kW/kg et leur énergie massique exprimée en Wh/kg. Ainsi le plan de Ragone permet de différencier aisément les différentes technologies de stockage de l'énergie.

2.5.1. Source d'énergie irréversible

Il s'agit en particulier du réservoir de carburant qu'on trouve habituellement dans les véhicules conventionnels. Bien que les carburants les plus utilisés dans les véhicules jusqu'ici soient l'essence et le gazole, on trouve d'autres sources alternatives déjà utilisées ou en cours de développement dans l'objectif de réduire les émissions de polluants par exemple: le gaz de pétrole liquéfié, l'hydrogène utilisé dans un moteur à combustion ou dans une pile à combustible, les biocarburants (éthanol, méthanol, butanol, huiles végétales... etc.).

2.5.2. Source d'énergie réversible

La réversibilité de la source d'énergie secondaire est un élément clé du gain en consommation des véhicules électriques car elle permet notamment de récupérer l'énergie cinétique du véhicule lors des phases de freinage (alors qu'elle est généralement dissipée sous forme de chaleur dans un véhicule conventionnel). Plusieurs technologies sont envisageables.

2.5.2.1. Le stockage mécanique sous forme d'énergie cinétique dans un volant d'inertie

Les principales caractéristiques de ce type de stockeur d'énergie sont :

- ✓ Charge et décharge rapides ; la puissance de charge et de décharge est directement liée à la puissance du moteur électrique associé.
- ✓ Écologique : le système ne comporte pas de produits chimiques qui doivent être recyclés.
- ✓ Durée de vie élevée ; elle peut atteindre 100 000 cycles.
- ✓ Faibles coûts de maintenance : pas de dégradation de la quantité d'énergie pouvant être stockée en fonction du nombre de cycles accomplis.
- ✓ Haut rendement énergétique : le rendement de ce type de stockeur est supérieur à 89%.

Les inconvénients de ce type d'accumulateur d'énergie sont :

- ✓ Risques pour les passagers : la masse en rotation peut être projetée en cas d'accident.
- ✓ Effets gyroscopiques : ils sont dus à la masse en rotation dans le véhicule.
- ✓ Vitesse de rotation élevée : elle est nécessaire pour garantir une densité en énergie suffisante et impose de fortes contraintes sur les paliers.

- ✓ Moteur électrique de taille importante : la densité en puissance est directement liée à la puissance du moteur électrique associé [27].



Figure 2.18 : Volant d'inertie utilisé dans les bus de Bâle [27]

2.5.2.2. Le stockage pneumatique

Ce type de stockage utilise de l'air comprimé dans un réservoir haute pression. Le problème de ce type de stockage outre les contraintes en matière de sécurité est le faible rendement des compresseurs et moteurs pneumatiques (entre 30 et 50%). La capacité de stockage est limitée par le volume du réservoir et sa pression maximale.



Figure 2.19 : Réservoir d'air comprimé la Tata MiniCat [12] [27]



Figure 2.20 : Tata MiniCat, véhicule à air de comprimé [12] [27]

2.5.2.3. Le stockage électrochimique

a) Les batteries d'accumulateurs

Le Stockage électrochimique dans les batteries est Le stockage réversible le plus répandu dans les véhicules électriques aujourd'hui. A cet effet, plusieurs technologies ont été testées, mais les plus utilisées sont :

- La technologie Nickel Métal-Hydrure (Ni-Mh) présente une énergie massique estimée à deux fois celle obtenue avec la technologie plomb. La durée de vie de cette batterie est compatible avec leur utilisation dans le domaine automobile. La technologie Ni-Mh est celle qui domine le marché des véhicules électriques aujourd'hui grâce au succès de la Toyota Prius qui l'a adoptée pour ses trois générations.
- La technologie Lithium Ion (Li-ion) possède de meilleures performances en termes de puissance et d'énergie massique. Elle présente une faible autodécharge et a un impact environnemental plus faible grâce au rendement de recyclage de ses composants. Malgré ses bonnes performances, cette technologie souffre de son coût élevé estimé à environ 1000 \$/kWh et nécessite une surveillance importante de son état (état de charge, température... etc.).
- La technologie « Plomb acide » est la technologie la plus commune. Elle se caractérise par sa robustesse et sa présence à faible coût lié à la production en masse néanmoins, elle possède une puissance et une énergie spécifiques médiocres dues à son poids élevé. Par ailleurs, la présence du plomb constitue un handicap majeur de cette technologie du point de vue environnemental.

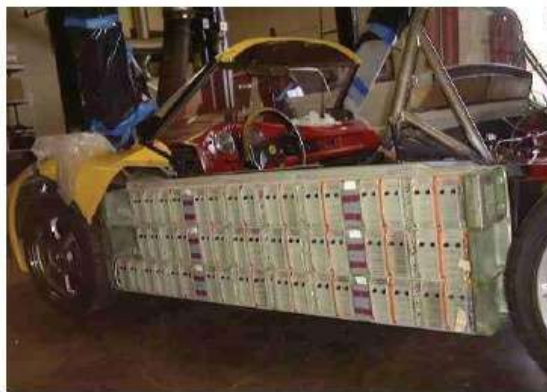


Figure 2.21 : Pack de batteries embarqués dans le Roadster de Tesla Motors [27]

b) Les super condensateurs

Les super condensateurs est un moyen de stockage. Ce sont des stockeurs d'énergie électrique par polarisation d'une solution électrolytique. Leur durée de vie est

notablement supérieure à celle des batteries. Les super condensateurs ont une puissance massique beaucoup plus élevée que celle des batteries [18].

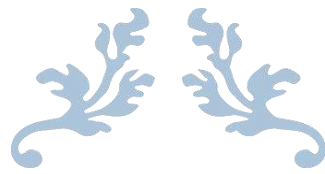
Un usage typique des super condensateurs est alors la récupération d'énergie lors de freinages importants et l'assistance en puissance lors de fortes accélérations. Néanmoins, leur densité énergétique est beaucoup plus faible rendant quasiment impossible leur utilisation pour une propulsion en mode tout électrique dans une utilisation hybride.



Figure 2.22 : Système MITRAC utilisant les super condensateurs pour le stockage de l'énergie [27] [18]

2.6. Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons découvert que l'essor des véhicules électriques est lié directement à la source d'énergie électrique à bord. Nous confirmons alors, le choix des batteries aux lithium ion et des super condensateurs pour former une source d'énergie capable de fournir des pics de puissance et ayant des durées de vie intéressantes.



*Chapitre 3 : Modélisation
d'un Véhicule Électrique à
Pile à Combustible*



3.1. Introduction

Afin de répondre aux demandes de puissance d'un véhicule tout électriques, ce chapitre sera divisé en deux parties : la première sera consacrée au dimensionnement de la source principale (pile à combustible), les éléments de stockage (super condensateurs et batteries), ainsi que les convertisseurs intermédiaires. Pour la deuxième partie, elle sera destinée à la modélisation du comportement des éléments du système hybride totalement autonome.

3.2. Présentation du véhicule électrique considéré

Des nombreuses applications automobiles sont actuellement basées sur l'utilisation des piles à combustible comme source principale d'énergie et les super condensateurs, batteries comme source auxiliaire de puissance. L'utilisation d'une source auxiliaire permet de réduire la pression sur la source d'alimentation principale ; à savoir la pile à combustible. Dans la suite de ce travail, les caractéristiques du véhicule électrique considéré sont supposées être similaires à celles du véhicule Berlingo hybride.

Le véhicule Berlingo hybride est composé en partie de :

- Une pile à combustible de type PEM constitué de deux blocs montés en parallèle. Chaque bloc comprend trois stacks connectés en série. Un stack a une puissance d'environ 11734.2 W et composé de 123 cellules.
- Un module de batteries constitué de trois blocs montés en parallèle. Chaque bloc contient 67 cellules de batteries montées en série. Une cellule possède une capacité 28 Ah et a une tension nominale d'ordre 3.6 V.
- Un module de super condensateurs constitué de trois blocs montés en parallèle. Chaque bloc contient 20 cellules de super condensateurs montées en série. Une cellule a une capacité 2600 F et possède une tension nominale d'ordre 2.5 V.
- Des convertisseurs intermédiaires : un convertisseur Boost connecté à la pile, et autre Buck/Boost lié aux super condensateurs et batteries.

3.3. Dimensionnement des sources d'énergie

L'objectif de cette partie est de présenter une méthode de dimensionnement des sources d'énergie (pile combustible, batteries, et super condensateurs) dans un véhicule électrique à pile à combustible. Le dimensionnement consiste à déterminer le nombre de


cellules de pile à combustible, batteries, ainsi que de super condensateurs. Pour cela, le cahier des charges considéré est celui du véhicule Berlingo.

Le système électrique du véhicule étudié contient (voir figure 3.1) :

- Un convertisseur Boost associé à la pile. Il est unidirectionnel et permet d'élever la tension de la pile à 400 V.
- Un convertisseur Buck/Boost, intercalé entre les sources d'énergies auxiliaires (batteries et super condensateurs) et le bus continu. Il fonctionne en : mode Buck dans le cas où l'énergie électrique est acheminée vers les sources d'énergies auxiliaires et en mode Boost lorsque les sources d'énergies auxiliaire fournissent de l'énergie électrique à la charge à travers le bus continu.
- Un onduleur connecté au bus continu.
- Une machine asynchrone qui permet d'entraîner les roues de véhicule.

Le tableau 3.1 récapitule les caractéristiques de la Berlingo hybride.

Tableau 3.1 : Caractéristiques du Berlingo hybride [28]

 <p>Le Berlingo Hybride a été développé par le LAMIH en partenariat avec PSA Peugeot-Citroën et avec le support financier du FEDER, de l'ADEME et de la région Nord Pas-de-Calais.</p>	Masse du véhicule seul avec ½ charge.	$M_{veh}^0 = 1400 \text{ kg}$
	Rayon des roues	$R_{roue} = 0,29 \text{ m}$
	Inertie d'une roue	$J_{roue} = 0,65 \text{ kg.m}^2$
	Coefficient de résistance aérodynamique	$C_x = 0,37$
	Surface frontale	$A_f = 2,59 \text{ m}^2$
	Coefficient de résistance au roulement	$C_r(V_{veh}) = C_r^0 + k_{C_r} \cdot V_{veh}^2$ $C_r^0 = 0,0136$, $k_{C_r} = 5,184 \times 10^{-7}$
	Puissance mécanique de la machine électrique	75 kW (figure 2-20)
	Inertie de l'arbre du moteur	$J_{mot} = 0,103 \text{ kg.m}^2$
	Rapport de réduction du réducteur	$r_{red} = 8$
	Rendement du réducteur	$\eta_{red} = 0,95$
	Convertisseurs de puissance moteur, système pile à combustible et batteries/supercondensateurs	rendement $\eta_{conv_const} = 95\%$ et P_{conv_const} égale à 1% de la puissance maximale de sortie.

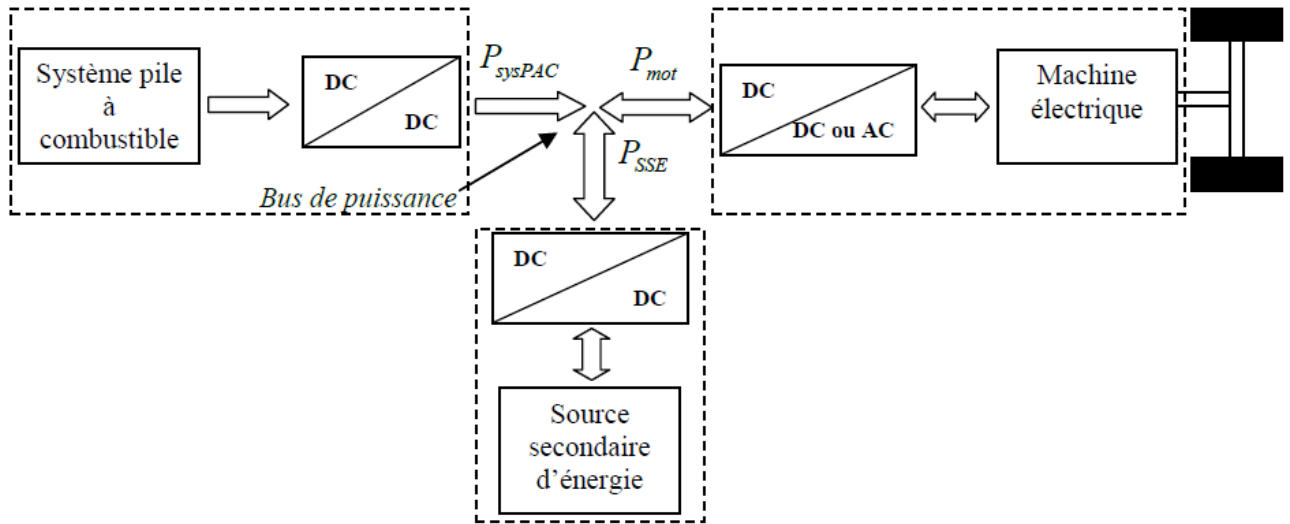


Figure 3.1 : Schéma de puissance du groupe motopropulseur [28]

3.3.1. Dimensionnement des piles

La source principale d'énergie à bord du véhicule hybride est représentée avec un stack de piles à combustible. Son dimensionnement consiste à déterminer le nombre des cellules PEM en série et en parallèle permettant de donner la puissance mécanique requise par la machine électrique.

Suivant le tableau (3.1), la puissance mécanique de la machine électrique est de 75 kW. Le stack de piles à combustible qui doit alimenter un bus capacitif de tension $U_{dc} = 400V$, est connecté au bus à travers un convertisseur statique de type Boost. Ce dernier a un rendement qui diminue quand le rapport de transformation augmente. Pour cela, le rapport cyclique doit être autour de 2 pour un fonctionnement optimal. Par la suite, il faut que la tension de la pile $U_{pac} = N_{pacs} * E_{cell}$ soit au minimum égale à $U_{dc} / 2$ [28]. Dans ce cas, pour une tension limite E_{cell} de 0.54V, le nombre des cellules montées en série (N_{pacs}) est donné par :

$$N_{pac_s} = \frac{U_{dc}}{2E_{cell}} = 370 \quad (3.1)$$

La cellule de pile à combustible utilisée dans le véhicule Berlingo a une puissance de 95.4W pour un stack de 35298W .Alors, le nombre de cellules mises en parallèle est :

$$N_{pac_p} = \frac{P_{pacmax}}{N_{pac_série} P_{pac_{cell}}} = 1.14 \approx 2 \quad (3.2)$$

Le tableau 3.2 récapitule les caractéristiques principales du système PAC.

Tableau 3.2 : Caractéristiques du système PAC

Densité de courant maximale	$i_{pac_{max}} = 1 \text{ A/cm}^2$
Surface active d'une membrane	$A_{cell} = 200 \text{ cm}^2$
Densité de puissance brute maximale	$P_{pac_{max}} = 544 \text{ mW/cm}^2$
Densité de puissance nette maximale	$P_{sysPAC_{max}} = 477 \text{ mW/cm}^2$
Masse du système PAC	$d_{sysPAC} = 3 \text{ Kg/Kw}$
Rendement maximal du système	50% à 23% de la puissance maximale

3.3.2. Dimensionnement des batteries lithium ion

Le dimensionnement du stack de batteries requiert une attention particulière afin d'augmenter sa durée de vie et par la même occasion assurer l'autonomie du système et diminuer son coût global.

La capacité nominale du pack de batteries est donnée par la relation [29].

$$C_b = \frac{E_b \times Aut}{V_{bn} \times D_b} \quad (3.3)$$

Avec :

C_b : capacité nominale du pack [Ah].

E_b : énergie journalière à stocker dans le pack [Wh/j].

Aut : nombre de jours d'autonomie.

V_{bn} : tension nominale du pack [V].

D_b : profondeur de décharge du pack [%].

Nous souhaitons obtenir une autonomie d'un jour avec une tension nominale de 240V, une profondeur de décharge de 90% et une énergie journalière à stocker de 17300Wh. Dans ce cas, le stack de batteries lithium ion devrait avoir une capacité nominale d'environ **80.09Ah**.

Pour déterminer le nombre de batteries constituant le stack, nous avons sélectionné une batterie élémentaire ayant les caractéristiques suivantes :

Tension nominale	3.6 V
Résistance interne	3.9 mΩ
Capacité nominale	28 Ah

Tableau 3.3 : Caractéristiques d'une batterie élémentaire [28]

Les équations (3.4) et (3.5) permettent de calculer les nombres N_{bas} et N_{bap} des batteries en série et en parallèle.

$$N_{bas} = \frac{V_{ba}}{V_{baccell}} = 67 \quad (3.4)$$

$$N_{bap} = \frac{C_{ba}}{C_{baccell}} = 3 \quad (3.5)$$

3.3.3. Dimensionnement des super condensateurs

Le dimensionnement d'un stack de super condensateurs consiste à déterminer les nombres N_{scs} et N_{scp} des éléments qu'il faut placer en série et/ou en parallèle en fonction de l'énergie maximale transférée et de la puissance maximale qui va être extraite du stack [12].

Le modèle équivalent d'un pack de super condensateurs est formé d'une capacité équivalente C_{sc} en série avec une résistance équivalente R_{sc} . [15]

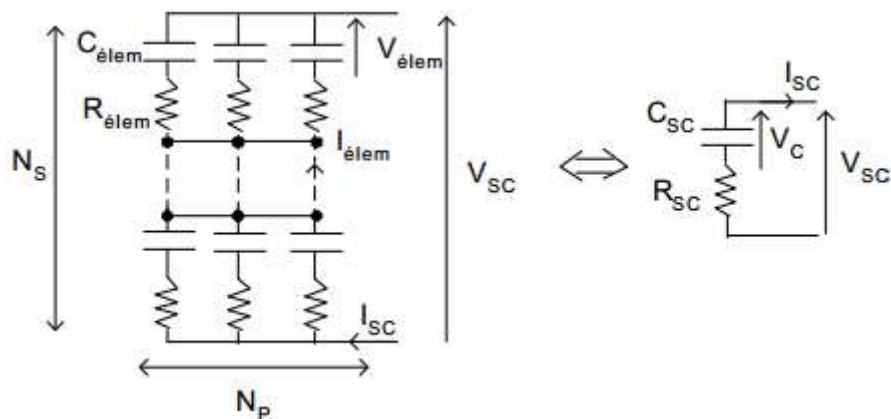


Figure 3.2 : schéma équivalent d'un stack de super condensateurs [15]

Les équations allant de (3.6) à (3.9) relient les grandeurs électriques du stack à celles du condensateur élémentaire ayant une capacité C_{elem} , une résistance R_{elem} , une tension V_{elem} , et un courant I_{elem} .

$$C_{sc} = \frac{N_p}{N_s} \times C_{\text{elem}} \quad (3.6)$$

$$R_{sc} = \frac{N_s}{N_p} \times R_{\text{elem}} \quad (3.7)$$

$$V_{sc} = N_s \times V_{\text{elem}} \quad (3.8)$$

$$i_{sc} = N_p \times I_{\text{elem}} \quad (3.9)$$

L'énergie maximale, $E_{\text{max_transf}}$, transférée par cet élément de stockage est définie comme la différence entre l'énergie maximale E_{max} et minimale E_{min} . Elle est liée à la tension à vide maximale V_{sc_max} et minimale V_{sc_min} du stack par la relation ci-dessous.

$$E_{\text{max_transfer}} = E_{\text{max}} - E_{\text{min}} = \frac{1}{2} C_{sc} (V_{sc_max}^2 - V_{sc_min}^2) \quad (3.10)$$

Le nombre N_{elem} de super condensateurs élémentaires nécessaires pour fournir la demande maximale d'énergie est donné par l'équation suivante :

$$N_{\text{elem}} = N_p \times N_s = \frac{E_{\text{max_transfer}}}{C_{\text{elem}} \times V_{\text{elem_max}}^2 (1 - K_p^2)} \quad (3.11)$$

K_p désigne la profondeur de décharge définie en tant que rapport entre la tension minimale et maximale d'un élément.

Pour garantir une marge de sécurité par rapport à la tension minimale du pack de super condensateur, le calcul du nombre d'éléments est réalisé avec une profondeur de décharge $K_p=55\%$ [15].

Pour déterminer le nombre de super condensateurs, nous avons sélectionné un super condensateur élémentaire ayant les caractéristiques suivantes :

Tableau 3.4 : Caractéristiques d'une cellule super condensateur [28]

Tension nominale	2.5 v
Résistance interne	0.5 mΩ
Capacité nominale	2600F

Pour une énergie maximale transférée de 300kJ et pour une profondeur de décharge de 0.55, le nombre de super condensateurs élémentaires, N_{elem} , est égale à 52 éléments.

D'autre part, la puissance du stack exprimée par l'équation (3.12), permet de calculer le courant élémentaire maximal correspondant à cette puissance.

$$P_{sc} = N_{\text{elem}}(V_{\text{elem}}I_{\text{elem}} - R_{\text{elem}}I_{\text{elem}}^2) \quad (3.12)$$

Ayant trouvé le courant élémentaire maximal, nous passerons à calculer le nombre d'éléments super condensateurs (N_s , N_p). Pour une tension V_{sc_max} de 50 V et un courant maximal que peut fournir ou absorber le stack de super condensateurs de 320A, les nombres N_s et N_p sont :

$$N_s = \frac{V_{sc_max}}{V_{\text{elem_max}}} = 20 \quad (3.13)$$

$$N_p = \frac{N_{\text{elem}}}{N_s} = 2.6 \approx 3 \quad (3.14)$$

3.3.4. Dimensionnement des convertisseurs embarqués

La détermination des éléments des convertisseurs DC-DC connectés aux stacks de batteries lithium ion, de super condensateurs et de piles à combustible consiste à calculer la valeur de la capacité de filtrage C_{dc} du bus continu et les valeurs des inductances de lissage L_{fc} , L_{ba} et L_{sc} .

3.3.4.1. Convertisseur DC-DC lié aux piles

Le convertisseur relié à la pile à combustible est un convertisseur « Boost » appelé aussi : « survolteur » [29].

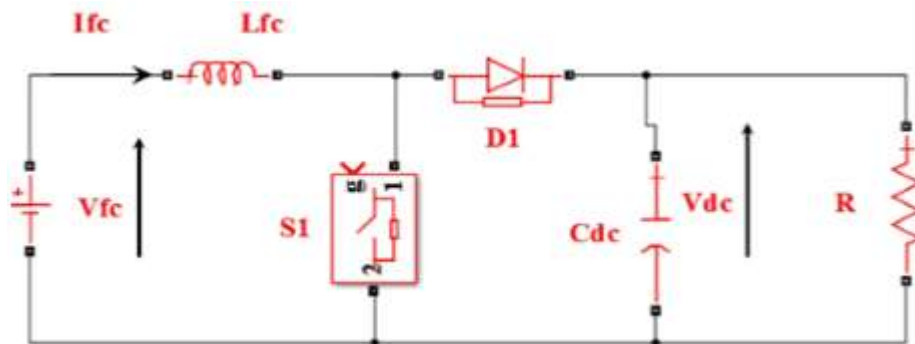


Figure 3.3 : Montage Boost du convertisseur DC-DC connecté au stack de piles à combustible PEM

Une étude faite par [15] a donné l'expression de l'inductance de lissage d'un convertisseur Boost. Elle est calculée par :

$$L_{FC} = \frac{V_{dc}}{4F \Delta I_{fc_max}} \quad (3.15)$$

Pour le condensateur de filtrage ayant une capacité C_{dc} (voir figure 3.3), il permet de limiter les ondulations de tension qui résultent du courant alternatif dans le condensateur de sortie [12]. La valeur minimale du condensateur est déterminée par la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{I_{sc_max}}{4F \Delta V_{dc}} \quad (3.16)$$

Dans ce cas, nous aurons pour : $V_{dc} = 400V$, $f = 10kHz$, $I_{fc_max}=200A$, $I_{sc_max} = 320A$, $\Delta I_{fc_max} = 2\% * I_{fc_max}$ et $\Delta V_{dc} = 5\% * V_{dc}$, les valeurs suivantes :

$$L_{fc} = 0.0025 \text{ H}$$

$$C_{dc} = 0.004 \text{ F}$$

3.3.4.2. Convertisseur DC-DC lié aux batteries

Le convertisseur connecté au module de batteries possède deux structures : il fonctionne en mode « Buck » dans le cas où l'énergie électrique est à acheminer et en mode « Boost » lorsqu'il fournit de l'énergie électrique au bus continu.

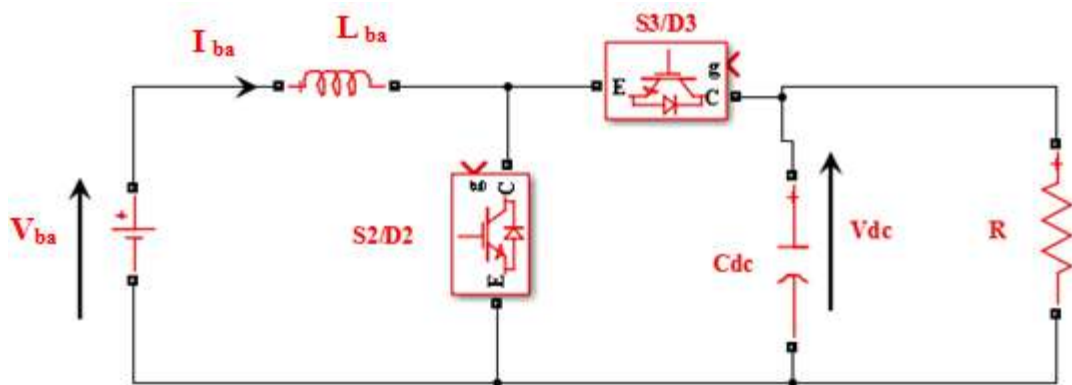


Figure 3.4 : Montage Buck/Boost du convertisseur DC-DC lié au stack de batteries lithium ion

Une étude faite par [15] a donné l'expression de l'inductance de lissage d'un convertisseur Buck/Boost. Elle est calculée par :

$$L_{ba} = \frac{V_{dc}}{4F \Delta I_{ba_max}} \quad (3.16)$$

Dans ce cas, nous obtenons pour : $V_{dc} = 400V$, $f = 10kHz$, $I_{ba_max} = 250A$, $\Delta I_{ba_max} = 2\% * I_{ba_max}$ et $\Delta V_{dc} = 5\% * V_{dc}$:

$$L_{ba} = 0.002 \text{ H}$$

3.3.4.3. Convertisseur DC-DC lié aux super condensateurs

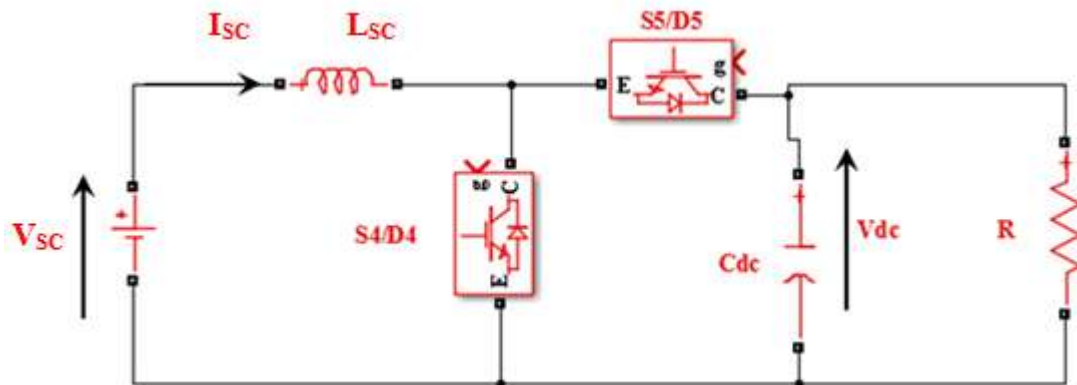


Figure 3.5 : Montage Buck/Boost du convertisseur DC-DC associé au stack de super condensateurs

Selon [15], la valeur de L_{sc} peut être déterminée pour un convertisseur Buck/Boost par :

$$L_{sc} = \frac{V_{dc}}{4F \Delta I_{sc_max}} \quad (3.17)$$

Dans ce cas, nous aurons pour : $V_{dc} = 400V$, $f = 10kHz$, $I_{sc_max} = 320A$, $\Delta I_{sc_max} = 2\% * I_{sc_max}$ et $\Delta V_{dc} = 5\% * V_{dc}$:

$$L_{sc} = 0.00156 \text{ H}$$

3.4. Modélisation des sources d'énergie

La tension d'une cellule à pile à combustible de type PEM chute en fonction du courant débité à cause des pertes. Ces pertes sont dues aux irréversibilités; elles se manifestent en trois types :

- 1) Pertes d'activation à cause de la polarisation d'activation;
- 2) Pertes ohmiques origine de la polarisation ohmique;
- 3) Pertes de concentration source de la polarisation de concentration.

$$V_{\text{cell}} = E - \Delta V_{\text{act}} - \Delta V_{\text{Conc}} - \Delta V_{\text{Ohm}} \quad (3.18)$$

3.4.1. Pertes d'activation

Les pertes d'activation sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. 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 [11]. La relation entre les pertes d'activation et la densité de courant est donnée par l'équation de Tafel :

$$\Delta V_{\text{act}} = A \ln \left(\frac{i_{\text{cell}} + i_n}{i_0} \right) \quad (3.19)$$

Avec :

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

A : pente de la droite de Tafel qui est de l'ordre de 0.06V. [12]

i_{cell} : courant délivré par la cellule PEM [$\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$].

i_0 : courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode électrolyte [$\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$].

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

3.4.2. Pertes de concentration

La consommation des gaz appauvrit les mélanges gazeux et diminue la pression partielle des gaz. Cette réduction de pression dépend du courant délivré et des caractéristiques des circuits de gaz.

Cette chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite i_L , pour lequel tout le combustible étant utilisé sa pression tomberait à zéro et d'une constante **B** appelée constante de transport ou de transfert de masse.

$$\Delta V_{\text{Conc}} = -B \cdot \ln \left(1 - \frac{i_{\text{cell}} + i_n}{i_L} \right) \quad (3.20)$$

ΔV_{Conc} : Chute de tension due aux pertes de concentration [V].

3.4.3. Pertes ohmiques

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qu'opposent les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. La chute de tension correspondante s'écrit :

$$\Delta V_{Ohm} = R_m \cdot (i_{cell} + i_n) \quad (3.21)$$

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

R_m : Résistance totale de la pile à combustible [$k\Omega \cdot cm^2$].

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

En regroupant toutes les chutes de tension causées par les différentes pertes, l'expression de tension d'une cellule PEM est exprimée par (3.22) [12].

$$V_{cell} = E - R_m \cdot (i_{cell} + i_n) - A \ln \left(\frac{i_{cell} + i_n}{i_0} \right) + B \cdot \ln \left(1 - \frac{i_{cell} + i_n}{i_L} \right) \quad (3.22)$$

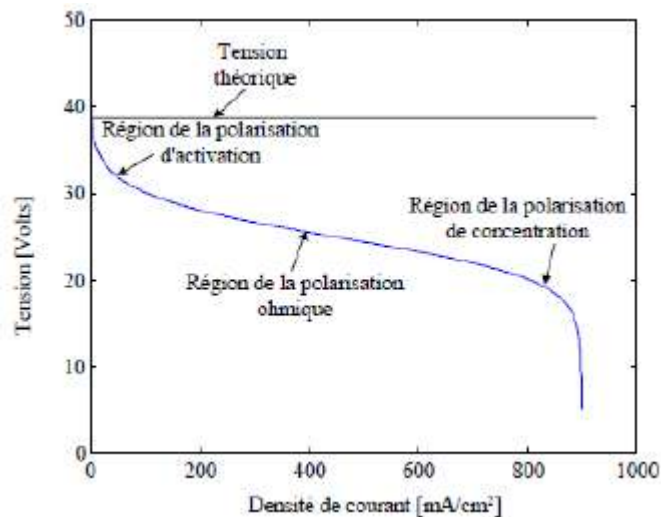


Figure 3.6 : Caractéristique densité de courant tension d'une pile PEM [30]

3.4.5. Caractéristique électrique d'une pile à combustible

Le tracé de la fonction $V_{fc} = f(i_{fc})$ est présenté sur la figure ci-dessous :

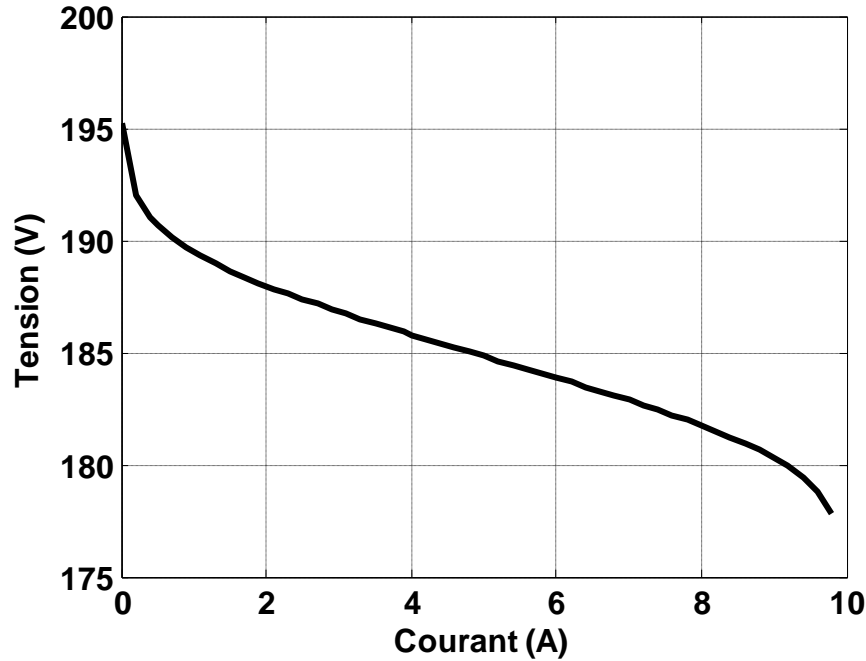


Figure 3.7 : Caractéristique $V_{fc} = f(i_{fc})$ du stack de piles à combustible

3.5. Modélisation d'une batterie lithium ion

Plusieurs modèles de batteries au lithium ion existent. Cependant, leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres (température, résistance interne...etc.). Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, ces batteries réagissent différemment. Donc, on ne trouve pas un modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. Dans ce travail, nous avons choisi un circuit R-C série au modèle d'une batterie lithium ion [12]. En régime de décharge, la tension aux bornes d'une cellule de batterie est donnée par l'équation:

$$V_b = E_0 - R_b i_b - \frac{1}{C_b} \int i_b dt \quad (3.23)$$

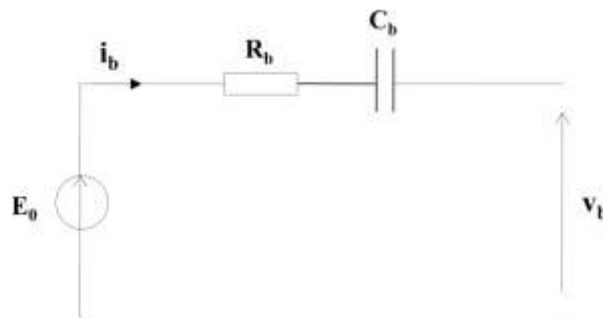


Figure 3.8 : Modèle d'une batterie lithium ion [12]

Avec :

v_{batt} : tension de la batterie lithium ion [V].

E_{batt} : sa tension à vide [V].

I_{batt} : son courant [A].

R_{batt} : sa résistance [Ω].

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

$$E_{ba0} = N_{bas} E_0 \quad (3.24)$$

$$R_{ba} = \frac{N_{bas}}{N_{bap}} R_b \quad (3.25)$$

$$C_{ba} = \frac{N_{bap}}{N_{bas}} C_b \quad (3.26)$$

$$V_{ba} = E_{ba0} - R_{ba} i_b - \frac{1}{C_{ba}} \int i_b dt \quad (3.27)$$

Nous définissons l'état de charge, EDC_{ba} , du stack comme étant le rapport entre sa capacité nominale C_{ban} et la quantité de charge Q_{bam} manquante par rapport à C_{ban} .

$$EDC_{ba} = \left(1 - \frac{Q_{bam}}{C_{ban}} \right) \times 100 \% \quad (3.28)$$

Afin d'analyser les réponses en tension et en état de charge du stack, nous avons effectué une décharge/charge à un courant constant de 8.9 A. Les résultats obtenus sont exprimés sur la figure (3.9).

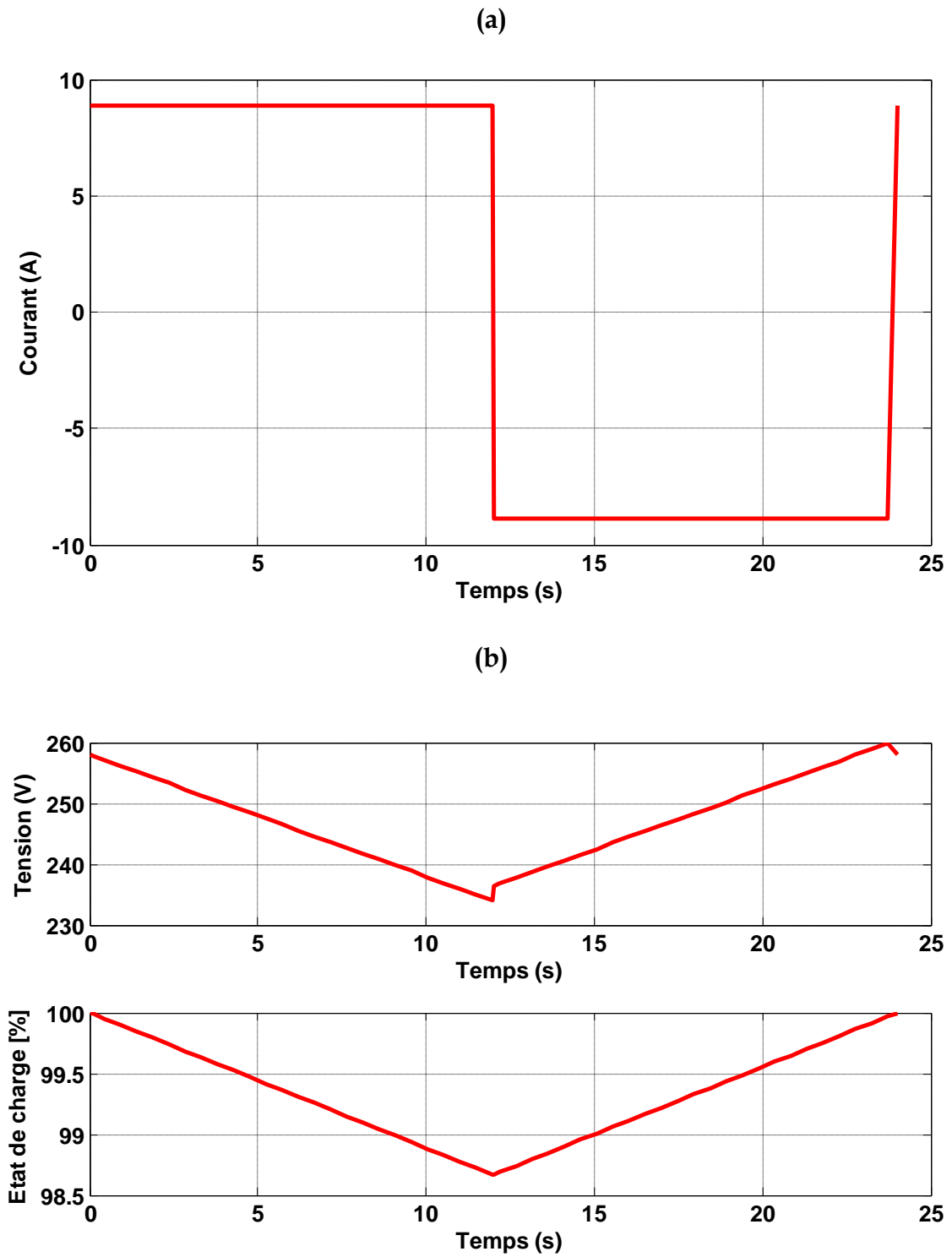


Figure 3.9 : (a) Courant constant de décharge/charge
(b) : Réponses en tension et en état de charge du stack de batteries

3.6. Modélisation d'un super condensateur

Le module de super condensateurs utilisé dans le véhicule Berlingo est constitué de trois blocs montés en parallèle. Chaque bloc contient 20 cellules de super condensateurs (la capacité d'une cellule est supposée constante dont la valeur est de 2600 F avec une tension de l'ordre de 2.5V). Le module de super condensateurs est représenté par un circuit électrique du type RC.

En supposant que le courant $i_{\text{élé}}^m$ d'un élément super condensateur est positif pendant la phase de décharge et est négatif pendant la phase de charge, la tension aux bornes d'un élément peut être écrite comme suit :

$$V_{\text{élé}}^m = V_{\text{célé}}^m - R_{\text{élé}}^m i_{\text{élé}}^m \quad (3.29)$$

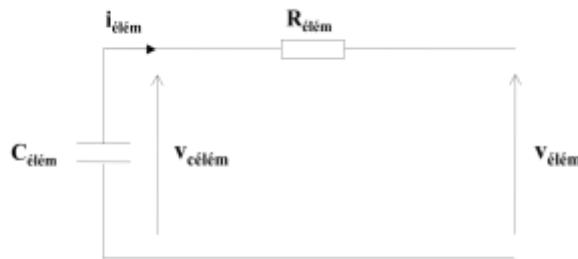


Figure 3.10 : Modèle d'un élément super condensateur

Un super condensateur qu'émet en série les condensateurs diminue leur capacité équivalente pour obtenir une capacité élevée à une tension demandée; un arrangement en série et en parallèle de plusieurs super condensateurs est envisagé formant un module complet ou un stack. La tension aux bornes d'un stack de super condensateurs est déterminée par la relation suivante :

$$V_{\text{sc}} = V_{\text{Csc}} - R_{\text{sc}} i_{\text{sc}} \quad (3.30)$$

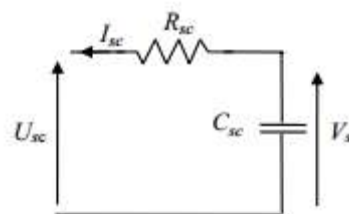


Figure 3.11 : Circuit équivalent du module de super condensateurs.

C_{sc} : Capacité totale du module de super condensateurs.

R_{sc} : Résistance série totale du module de super condensateurs.

Q_{sc} : Quantité de charge stockée dans le module de super condensateurs. Elle est donnée par :

$$Q_{sc} = C_{sc} V_s \quad (3.31)$$

Le courant du module est donnée par :

$$\frac{dQ_{sc}}{dt} = -I_{sc} \quad (3.32)$$

L'état de charge appelé EDC_{sc} , caractérise la quantité d'énergie présentée dans le pack de super condensateurs. Il vaut 100 % lorsque le pack est complètement chargé et 0 % lorsqu'il est chargé à sa valeur minimale.

$$EDC_{sc} = \frac{4}{3} \left(\frac{E_{sc}}{E_{max}} - \frac{1}{4} \right) \quad (3.33)$$

Avec :

EDC_{sc} : état de charge du stack [%]

E_{sc} : énergie contenue dans le stack [J]

E_{scmax} : énergie maximale contenue dans le stack [J]

Afin d'analyser les réponses en tension du stack, nous avons effectué une décharge/charge à un courant constant de 320 A. Les résultats obtenus sont exprimés sur la figure (3.12)

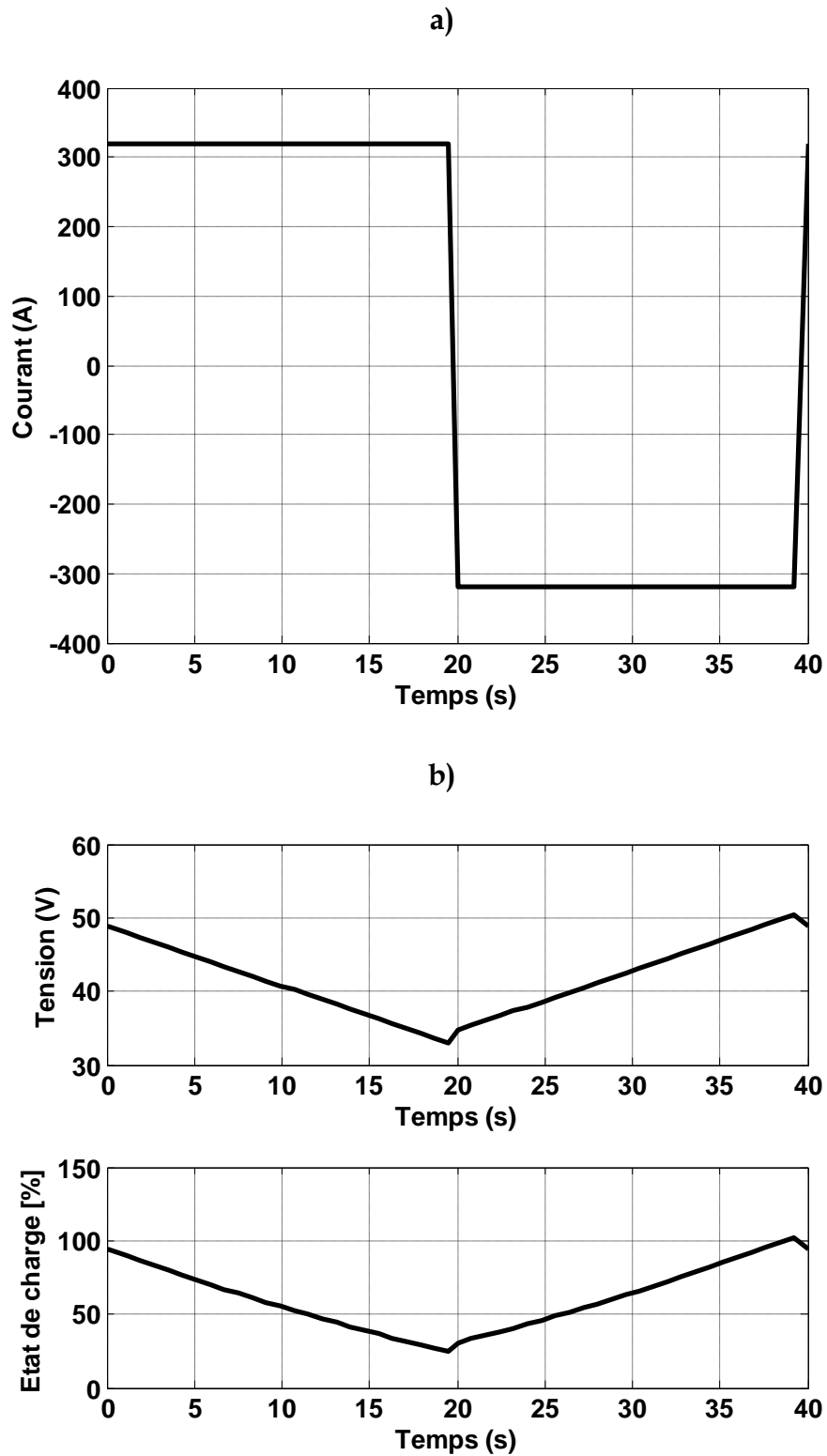


Figure 3.12 : (a) : Courant constant de décharge/charge
(b) : Réponses en tension et en état de charge du stack de super condensateurs

3.7. Modélisation du fonctionnement des convertisseurs embarqués

Les trois convertisseurs statiques sont représentés par la médiation entre le bus continu et les sources d'énergie (stack de batteries, pile à combustible et de super condensateurs).

En utilisant le convertisseur boost pour le stack de la pile à combustible permettant d'élever la tension de stack de la PAC puisque la tension de bus continu est très supérieure à celle de PAC.

En utilisant deux convertisseurs statiques (buck/boost) bidirectionnelle de courant continu pour les deux éléments de stockage (un convertisseur pour chaque élément), les deux stacks des batteries et des super condensateurs peuvent être chargés ou déchargés.

La modélisation des convertisseurs passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement selon l'état des interrupteurs considérés parfaits [12]. Soient u_1, u_2, u_3, u_4 et u_5 les signaux de commandes des transistors S_1, S_2, S_3, S_4 et S_5 (voir figures 3.3, 3.4 et 3.5).

La mise en équation des trois convertisseurs statiques commandés en courant fait apparaître quatre types de fonctionnement.

❖ Type1:

Quand les trois convertisseurs fonctionnent en mode « Boost », leur comportement est décrit par le système d'équation suivante :

$$\begin{cases} \frac{di_{fc}}{dt} = \frac{1}{l_{fc}} (v_{fc} - (1 - u_1)v_{dc}) \\ \frac{di_{ba}}{dt} = \frac{1}{l_{ba}} (v_{ba} - (1 - u_2)v_{dc}) \\ \frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{l_{sc}} (v_{sc} - (1 - u_4)v_{sc}) \end{cases} \quad (3.34)$$

❖ Type2:

Dans le cas où le convertisseur lié au stack de batteries fonctionne en mode « Buck » (le stack reçoit de l'énergie qui provient des piles à combustible), le comportement des trois convertisseurs peut être représenté par le système d'équation suivante :

$$\begin{cases} \frac{di_{fc}}{dt} = \frac{1}{l_{fc}} (v_{fc} - (1 - u_1)v_{dc}) \\ \frac{di_{ba}}{dt} = \frac{1}{l_{ba}} (v_{ba} - u_3v_{dc}) \\ \frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{l_{sc}} (v_{sc} - (1 - u_4)v_{sc}) \end{cases} \quad (3.35)$$

❖ **Type3 :**

Si le convertisseur connecté au stack de super condensateurs fonctionne en mode « Buck » (le stack reçoit de l'énergie qui provient du bus continu), le système d'équation (3.33) décrit le comportement des trois convertisseurs.

$$\begin{cases} \frac{di_{fc}}{dt} = \frac{1}{l_{fc}} (v_{fc} - (1 - u_1)v_{dc}) \\ \frac{di_{ba}}{dt} = \frac{1}{l_{ba}} (v_{ba} - (1 - u_2)v_{dc}) \\ \frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{l_{sc}} (v_{sc} - u_5v_{sc}) \end{cases} \quad (3.36)$$

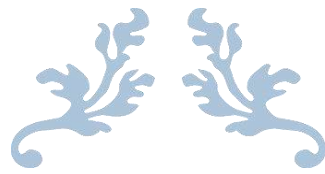
❖ **Type 4 :**

Lorsque les convertisseurs associés aux éléments de stockage fonctionnent en mode « Buck », le système d'équation (3.34) décrit le comportement des trois convertisseurs.

$$\begin{cases} \frac{di_{fc}}{dt} = \frac{1}{l_{fc}} (v_{fc} - (1 - u_1)v_{dc}) \\ \frac{di_{ba}}{dt} = \frac{1}{l_{ba}} (v_{ba} - u_3v_{dc}) \\ \frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{l_{sc}} (v_{sc} - u_5v_{sc}) \end{cases} \quad (3.37)$$

3.8. Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons dimensionné et modélisé les piles à combustible (batteries aux lithium ion, super condensateurs, et convertisseurs DC-DC) associés embarqués dans un véhicule électrique. Maintenant, nous passons au chapitre suivant dont l'objectif est la gestion des flux énergétiques.



Chapitre 4 : Gestion d'Énergie à Bord du Véhicule



4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons gérer les flux énergétiques entre une source hybride composée du trio : piles à combustibles, batteries et supercondensateurs, d'une part, une charge, d'autre part.

Pour cela, les modèles présentés précédemment seront utilisés et implantés sous « Matlab ». Différents résultats de simulation seront présentés et discutés.

4.2. Architecture du système hybride à bord

Pour faire une connexion d'un bus continu avec trois sources, il faut prendre en considération le coût, volume, masse totale, et efficacité du système.

La structure représentée sur la figure 4.1 permet :

- D'assurer la continuité de puissance quelque soit la demande de la charge.
- Donner une énergie très élevée durant des brèves périodes.

Cette architecture est composé de :

- ✓ Un bus continu de nature capacitive d'une tension égale à 400V.
- ✓ Une source principale d'énergie représentée par un stack de piles à combustible, reliée au bus continu à travers un convertisseur Boost. Cette source possède une tension V_{fc} et fournit une puissance P_{fc} .
- ✓ Deux sources auxiliaires d'énergie :
 - Des batteries lithium-ion considérées comme organe de stockage d'énergie, reliées au bus continu par un convertisseur Buck/Boost bidirectionnel en courant. Ils ont une tension V_{ba} et une puissance P_{ba} .
 - Une source de puissance représentée par un stack de supercondensateurs, possédant une tension V_{sc} , fournissant et absorbant une puissance P_{sc} . Les supercondensateurs sont connectés au bus continu à l'aide d'un convertisseur Buck/Boost bidirectionnel en courant.

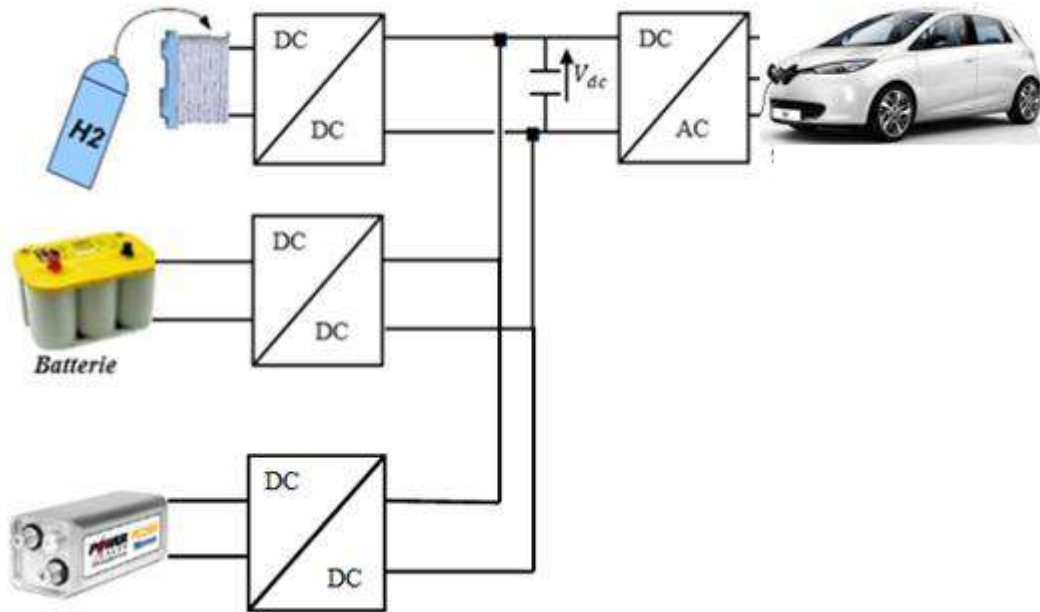


Figure 4.1 : Architecture du système hybride à bord

4.3. Principe de la gestion d'énergie

Le but principal de la gestion d'énergie est la satisfaction de la puissance demandée par la charge, donc trouver la meilleure distribution des puissances entre les sources d'énergie du système.

Le principe de la gestion d'énergie repose sur l'assurance de la continuité de la puissance requise par la charge tout en respectant différentes contraintes de fonctionnements tels que la puissance limite du PAC, états de charge des batteries et supercondensateurs. Pour ce la, nous avons suivit le principe indiqué dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.1 : principe de la gestion d'énergie

	Modes	Schéma des flux énergétiques	Description
Traction	Mode 1	<p>Le SYSPAC alimente seul le véhicule électrique</p>	Le SYSPAC alimente seul le véhicule électrique
	Mode 2	<p>Le SYSPAC et la batterie alimentent ensemble le véhicule électrique</p>	Le SYSPAC et la batterie alimentent ensemble le véhicule électrique
	Mode 3	<p>Les supercondensateurs alimentent seuls le véhicule électrique</p>	Les supercondensateurs alimentent seuls le véhicule électrique
Freinage	Mode 4	<p>Charger les batteries avec l'énergie récupérée au freinage</p>	Charger les batteries avec l'énergie récupérée au freinage
	Mode 5	<p>Les supercondensateurs récupèrent l'énergie issue du freinage</p>	Les supercondensateurs récupèrent l'énergie issue du freinage
Arrêt	Mode 6	<p>Aucun flux énergétique</p>	Aucun flux énergétique

SYSPAC : Système de la pile à combustible

BA : Batteries

SC : Supercondensateurs

SSE : Système de stockage d'énergie

ME : Moteur électrique

4.4. Résultats de simulation et discussion

Afin de vérifier le principe de gestion d'énergie proposée, nous avons :

- ✓ Proposé le profil de consommation indiqué dans la figure 4.2 tenant en compte trois phases : phase de démarrage, phase normale, et phase de récupération.
- ✓ Utilisé l'outil « Matlab/Simulink ».

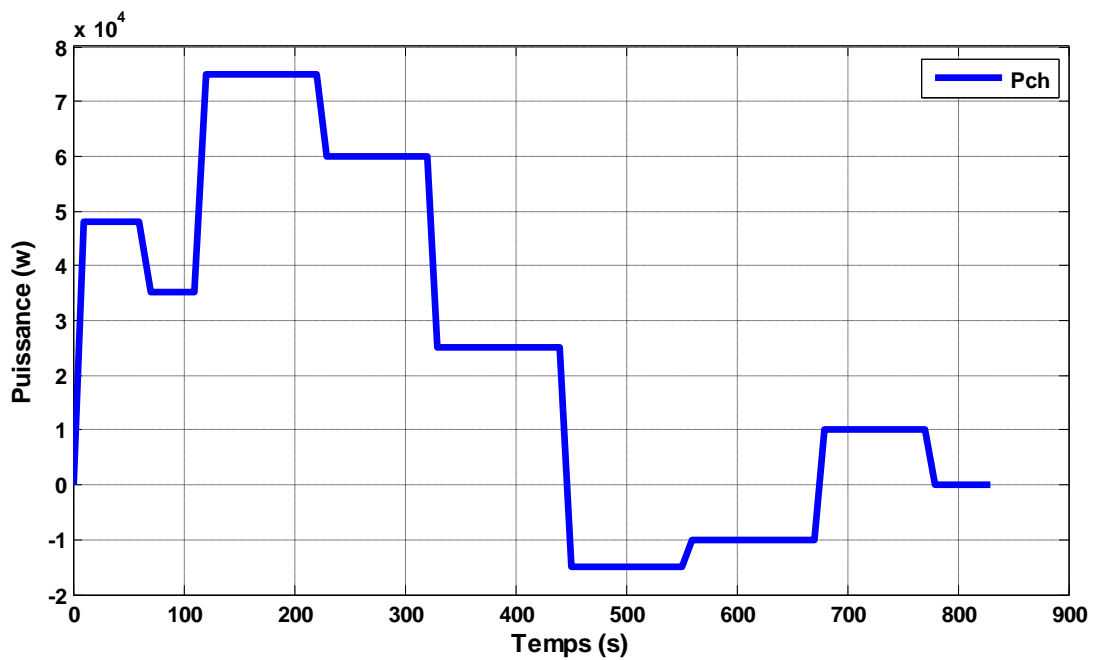


Figure 4.2 : Profil de consommation

La figure 4.3 montre l'allure de la puissance consommée par la charge et celle fournie par la source hybride.

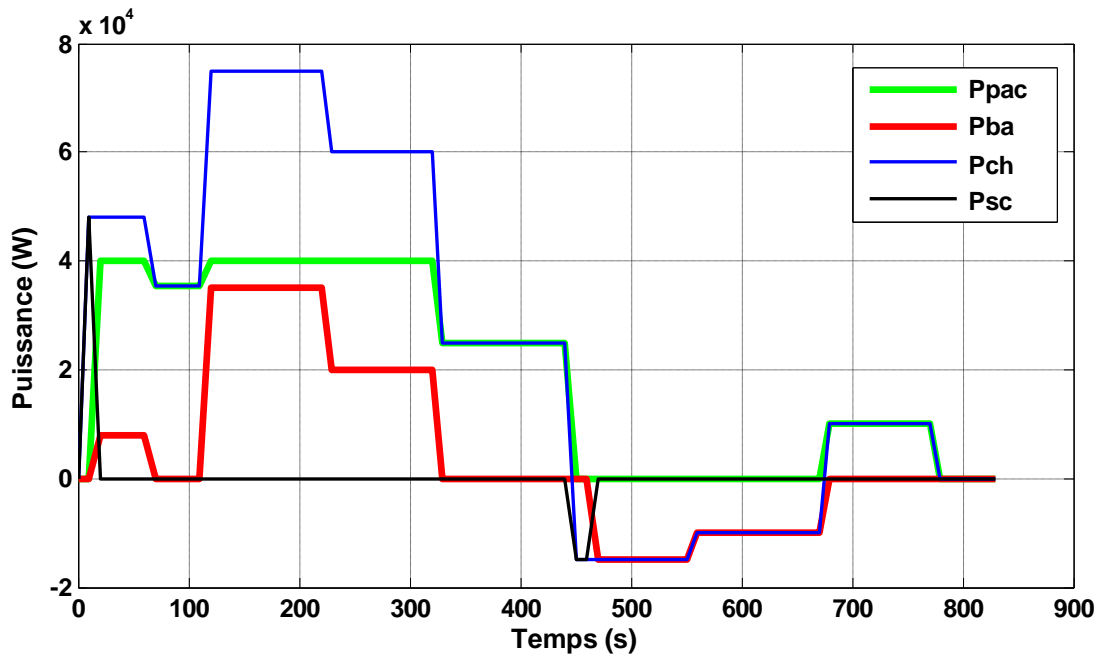


Figure 4.3 : Courbes des puissances

La figure 4.3 montre les flux des puissances dans le système hybride. En peut déduire que :

- La puissance des piles est limitée à sa valeur maximale de 40kW.
- Les supercondensateurs interviennent au démarrage du véhicule (entre 0 et 10s), et se rechargent à la récupération (P_{ch} négative).
- Les batteries fournissent la différence de puissance entre les piles et la charge, et se rechargent lorsque les supercondensateurs sont complètement chargés.

Les figures qui suivent donnent les allures des courants de référence que doit la source hybride suivre.

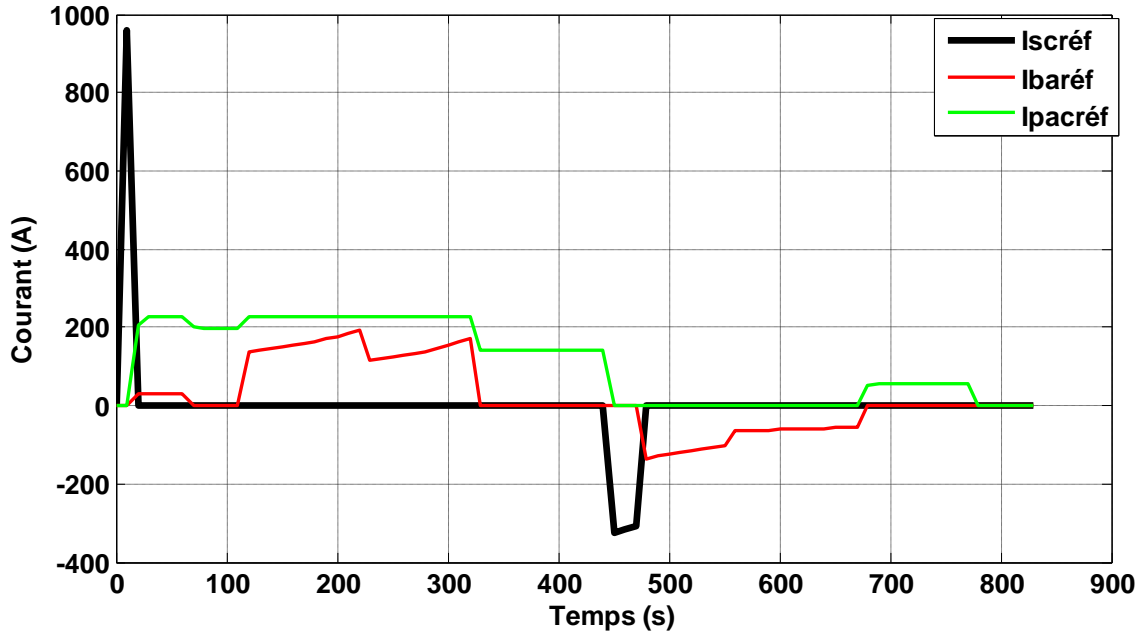


Figure 4.4 : Courants de référence

Comme la variation de la puissance consommée par la charge conduira à de la source hybride, les figures 4.5, 4.6, et 4.7 prouvent que le courant de chaque source suit sa référence fournit par la stratégie de gestion d'énergie.

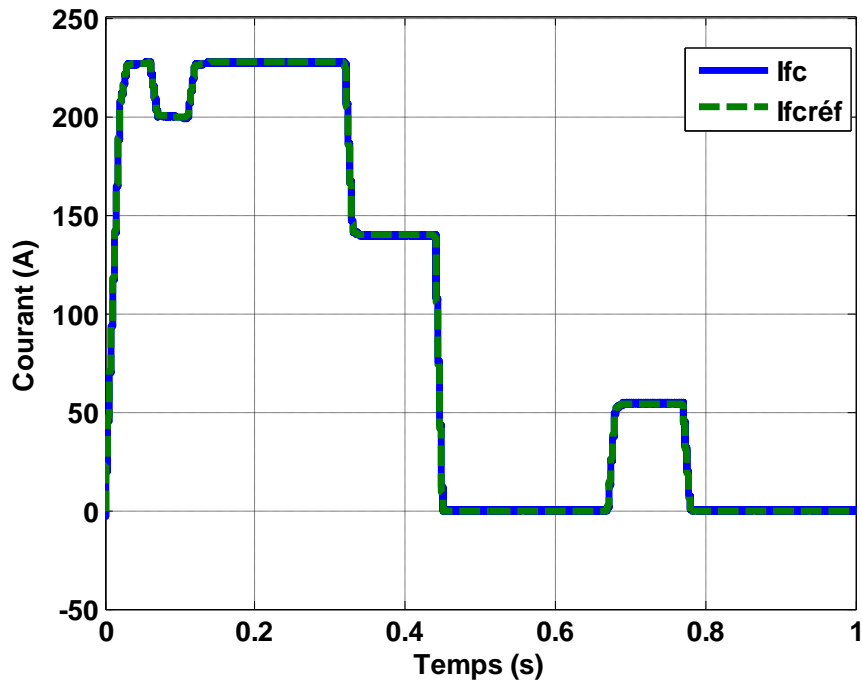


Figure 4.5 : Courants des piles

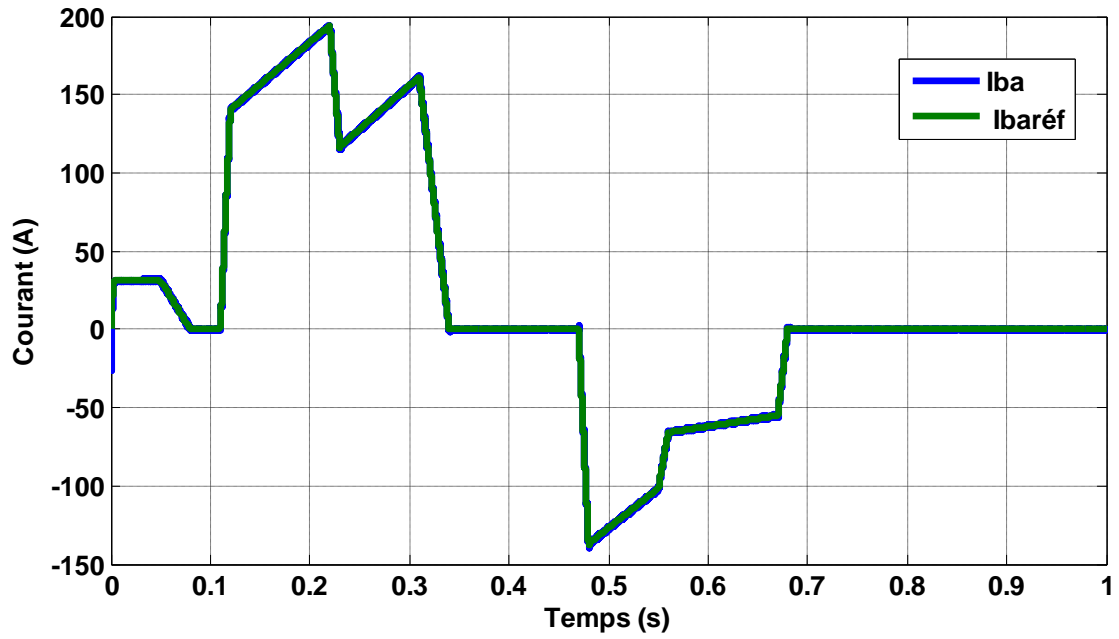


Figure 4.6 : Courants des batteries

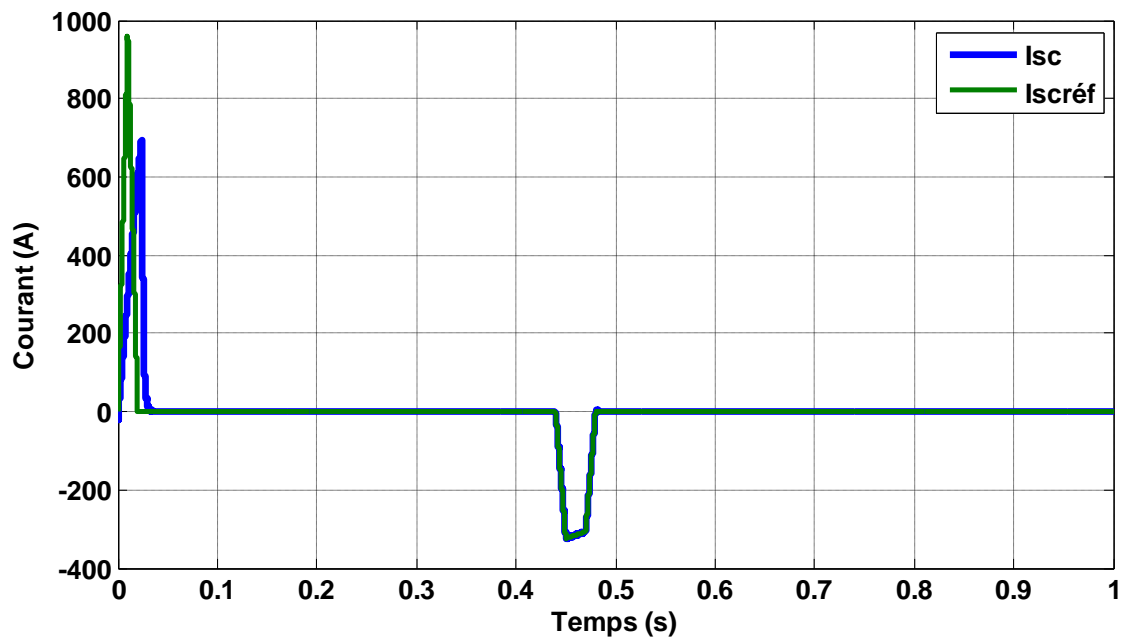


Figure 4.7 : Courants des supercondensateurs

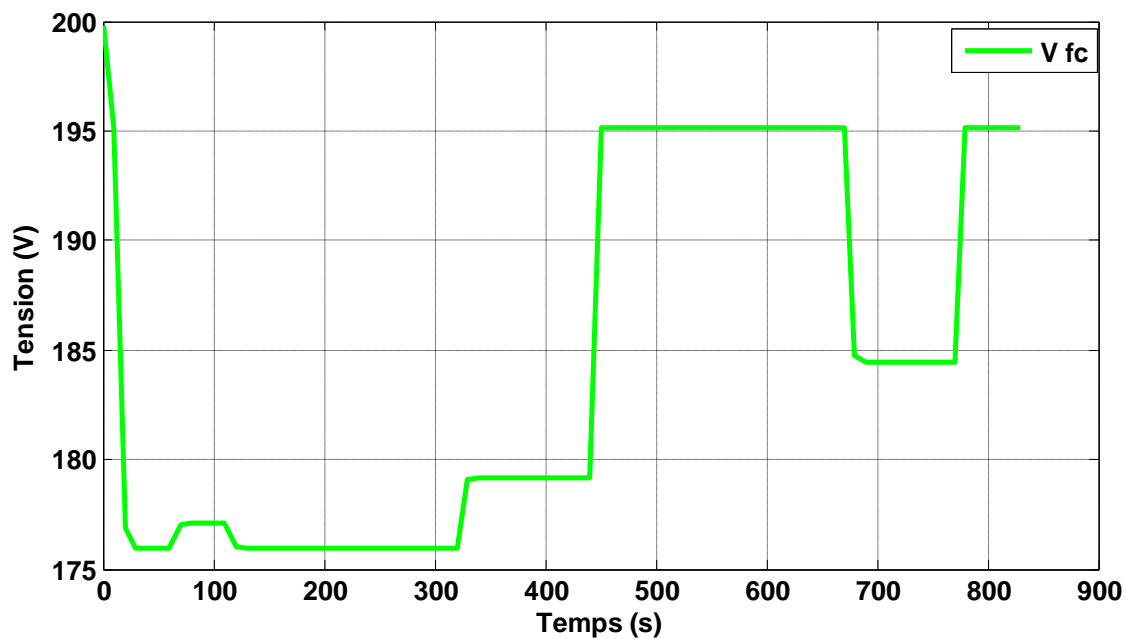


Figure 4.8 : Tension des piles

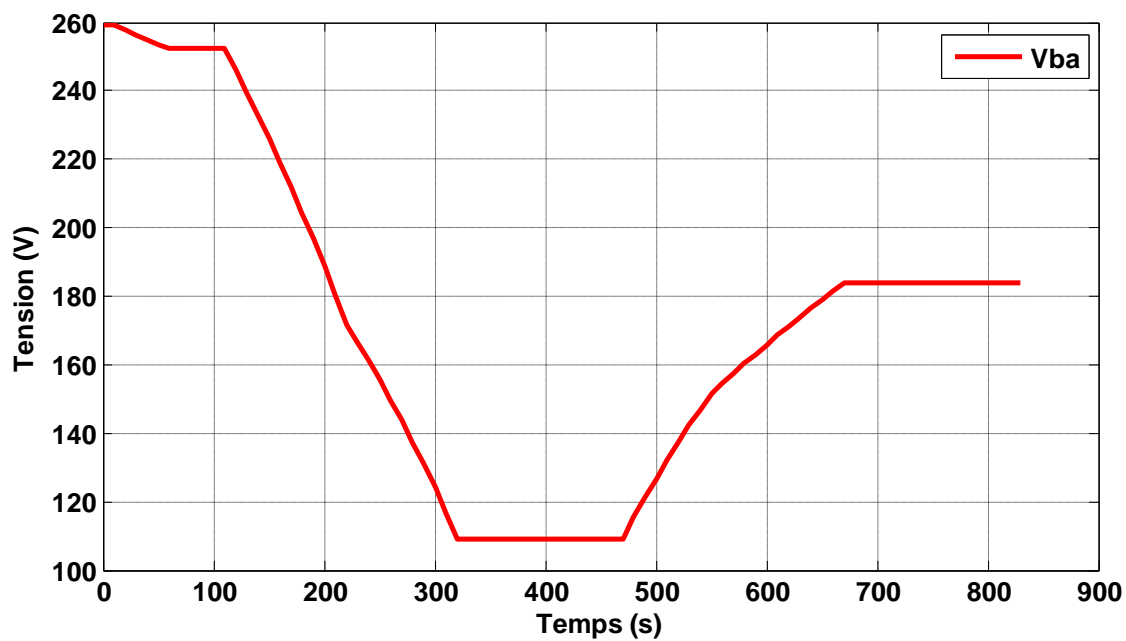


Figure 4.9 : Tension des batteries

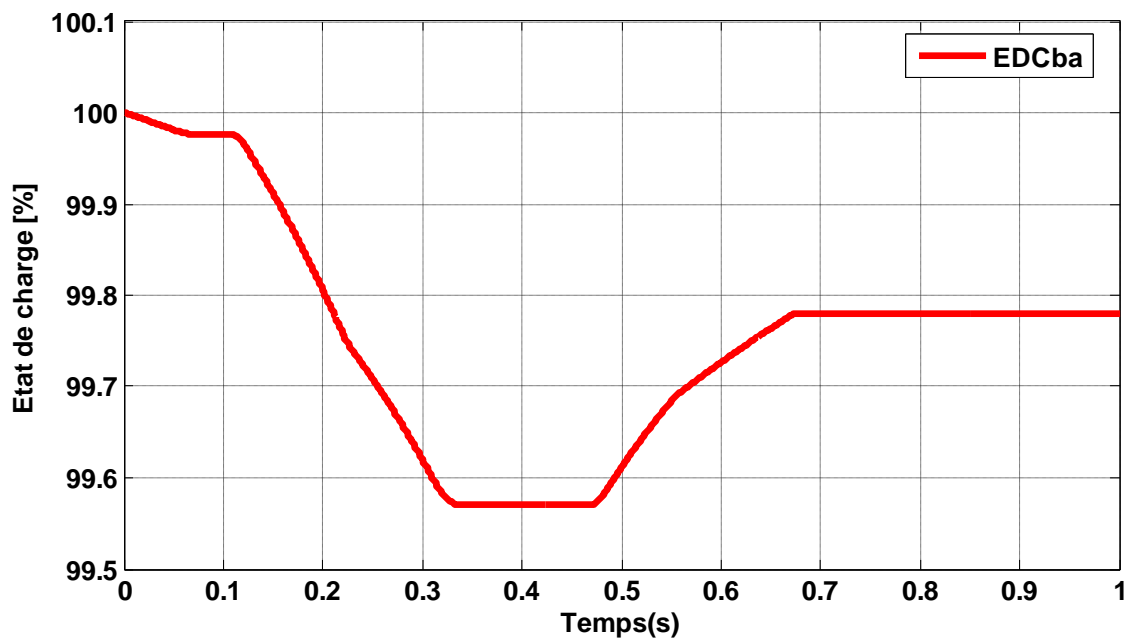


Figure 4.10 : État de charge des batteries

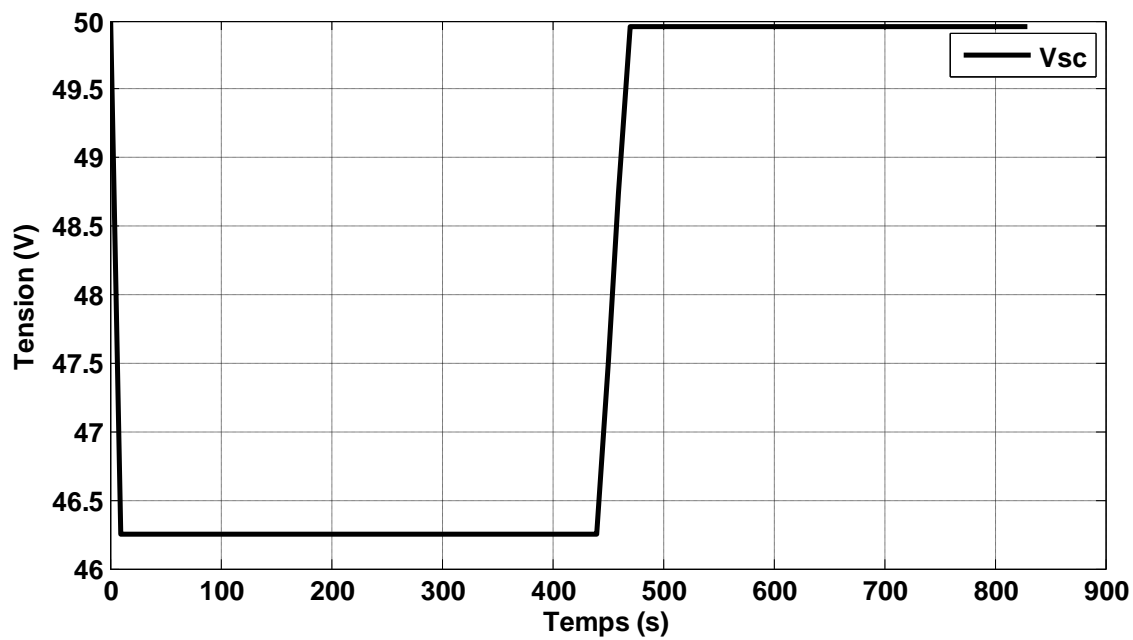


Figure 4.11 : Tension des supercondensateurs

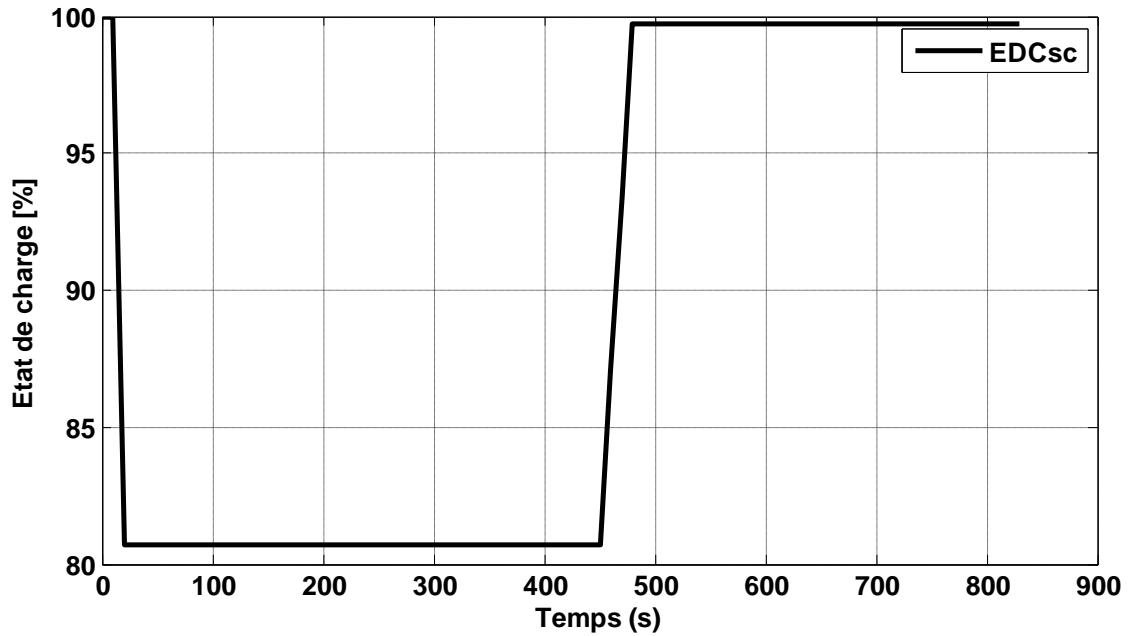


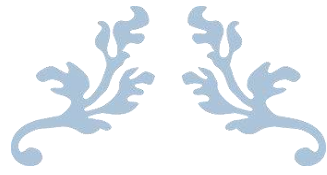
Figure 4.12 : État de charge des supercondensateurs

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la gestion d'énergie d'un système hybride autonome. Le système est constitué d'un pack de piles à combustible considéré comme source principale, des stacks de batteries lithium-ion, et de supercondensateurs utilisés en tant que sources auxiliaires, sans oublier la charge modélisée par un profil de consommation.

D'après les résultats obtenus, nous concluons que :

- 1) La source hybride permet de satisfaire les demandes en puissance de la charge,
- 2) Les états de charge finaux des batteries et supercondensateurs sont acceptables pour démarrer autres cycles de conduite. Ainsi, la durée de vie du système hybride autonome sera augmentée.



Conclusion Générale



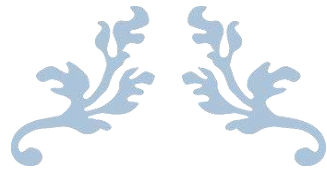
Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail était la gestion d'énergie d'une source hybride autonome composé de trois sources : l'une, principale composée d'un stack de piles à combustible de type PEM (Proton Exchange Membrane), les autres secondaires constituées de stack de batteries au lithium ion et de super condensateurs.

Les trois sources d'énergie sont connectées au bus continu de sortie du système par convertisseurs statiques DC-DC d'interface : l'un Boost relié aux piles à combustible, les autres Buck/Boost connectés aux stacks de batteries au lithium ion et de super condensateurs. Ces convertisseurs ont permis d'assurer les transferts d'énergie depuis les sources vers la charge (traction du véhicule) et de la charge vers les éléments de stockage (freinage du véhicule).

Les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité de l'algorithme proposé pour la gestion d'énergie et ont démontré la complémentarité entre les trois sources d'énergie à savoir : les piles à combustibles, batteries lithium ion et super condensateurs. En fait :

- La source hybride permet de satisfaire les demandes en puissance de la charge.
- Les états de charge finaux des batteries et super condensateurs sont acceptables pour démarrer autres cycles de conduite. Ainsi, la durée de vie du système hybride autonome sera augmentée.



Références bibliographiques



- [1] Messaoud MOHAMMEDI, "Gestion de l'énergie pour une chaîne multi-sources" Thèse de Doctorat de Université Mohamed Khider – Biskra, 10 Juillet 2016.
- [2] M.MADIHA mémoire de magister « gestion d'énergie d'un système d'entraînement électrique hybride basé sur un moteur synchrone à aimants permanents » univ Biskra 2014.
- [3] hattab maker, "optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et supercondensateurs.
- [4] S. Thomas and M. Zalbowitz, *Fuel Cells Green Power*. New Mexico : Los Alamos National Laboratory, 2000.
- [5] P. Stevens, F. Novel-Cattin, A. Hammou, C. Lamy, and M. Cassir, "Piles à combustible," *Techniques de l'Ingénieur*, no. D 3340, 2001.
- [6] L . Mond and C . Langer. In Proc. Royal Soc., London, Volume: 46, pp. 296-304, 1889.
- [7] M.L. Perry and T.F. Fuller, " A historical perspective of fuel cell technology in the 20th century", *Journal of The Electrochemical Society*, Volume: 149, Issue: 7, pp. 59-67, 2002.
- [8] E. Baur and J. Tobler, "Z. Elektrochem. Angew. Phys. Chem.", Volume: 39, pp. 169- 180, 1933.
- [9] F.T. Bacon, "Electrochimica Acta", Volume: 14, Issue: 7, pp. 569-585, 1969.
- [10] J. M. Grimwood, B. C. Hacker et P. J. Vorzimmer, "Project Gemini Technology and Operations: A Chronology", NASA SP-4002, 1969.
- [11] Phatiphat Thounthong, "Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs", Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 09 Décembre 2005.
- [12] BENAOUADJ Mahdi. "Gestion de l'énergie d'un système hybride autonome pour application « Smart Grid »". Thèse de Doctorat d'Université Mohamed Khider – Biskra, 04 / 06 / 2016

- [13] saadi ramzi. " convertisseurs bass tension (42v,540v) ; Application source hybride Utilisation Une Pile à combustible" Thèse de Doctorat de Université Mohamed Khider - Biskra, 11/03/2015.
- [14] Majid Zandi. *Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique*. PhD thesis, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2010
- [15] Jérôme Lachaize, "Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction", Thèse de Doctorat, de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 20 Septembre 2004.
- [16] Walid Hankache, "Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible", Thèse de Doctorat, de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 16 Décembre 2008.
- [17] Philipp Tritschler , " Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergie pour un système à pile à combustible embarquée dédié à l'application agricole", thèse de Doctorat, l'institut polytechnique de grenoble, 22 Octobre 2010
- [18] Mahdi Benaouadj, "Contrôle d'une source hybride batteries/supercondensateurs, rechargée par l'énergie photovoltaïque, pour traction électrique « véhicule hybride »", Mémoire de Magister, Université d'El-Oued, 15 Octobre 2012.
- [19] Matthieu Urbain, "Modélisation Electrique et Energétique des Accumulateurs LithiumIon. Estimation en Ligne du SOC et du SOH", Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 04 Juin 2009.
- [20] Ilyes tegani," 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 d'Université Mohamed Khider - Biskra,04 / 06 / 2016.
- [21] Fabrice Delfosse, "Détermination de l'état de charge des batteries d'un véhicule électrique", Mémoire de fin d'études de l'Université de Liège, 1998.

- [22] B.Multon, L.Hirsinger, "Problème de la motorisation d'un véhicule électrique", Journées électrotechniques du club EEA, 24-25 Mars 1994.
- [24] Benjamin Baudouin, "Histoire de la voiture électrique", 10 Juillet 2009, Site web : <http://www.benjaminbaudouin.com/histoire-de-la-voiture-electrique/>.
- [23] Victor Meşter, "Conception Optimale Systémique des Composants des Chaînes de Traction Electrique", Thèse de Doctorat de l'École Centrale de Lille, 22 Mai 2007.
- [25] Eland Loukakou Bounzeki Mbemba, "Modélisation, conception et expérimentation d'un véhicule hybride léger pour usages urbains", Thèse de Doctorat de Université de Franche-Comté, 2012. Français
- [26] Sébastien Delprat, "Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles", Thèse de Doctorat de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 04 Janvier 2002.
- [27] Blaise Destraz, "Assistance énergétique à base de supercondensateurs pour véhicules à propulsion électrique et hybride", Thèse de Doctorat de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 23 Mai 2008.
- [28] Jérôme Bernard, "Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande", thèse doctorat Automatique / Robotique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2007.Français. fftel-00271090f.
- [29] V.Boitier, C. Alonso, "Dimensionnement d'un Système Photovoltaïque", CETSIS'2005, Nancy, 25-27 Octobre 2005.
- [30] Amel Lachichi, "Modélisation et stabilité d'un régulateur hybride de courant - Application aux convertisseurs pour pile à combustible", Thèse de Doctorat de l'Université de Franche-Comté, 24 Novembre 2005.

Résumé

La gestion d'énergie d'un système électrique hybride consiste à contrôler les flux énergétiques des différentes sources constituant le système. Elle permet de satisfaire les demandes en puissance de la charge et augmenter la durée de vie du système tout en respectant différentes contraintes de fonctionnement comme la puissance limitée des sources, les états de charge des éléments de stockage... etc.

Pour une application « Véhicule Électrique », nous présentons dans ce travail la gestion d'énergie d'un système hybride autonome composé de piles à combustibles utilisés comme source principale, de batteries lithium-ion et de super condensateurs considérés en tant que sources auxiliaires.

Mots clés : Système hybride autonome, Gestion d'énergie, Pile à combustible, Batterie, Super condensateur, État de charge.

Abstract

The power management of a hybrid electrical system consists of controlling the energy flows from different sources constituting the system. It makes it possible to satisfy the power demands of the load and to increase the life time of the system while respecting various operating constraints such as the power limit of the sources, the states of charge of the storage elements, etc. For an "Electric Vehicle" application, we present in this work the power management of an autonomous hybrid system consisting of fuel cells used as the main source, lithium-ion batteries and supercapacitors considered as auxiliary sources.

Keywords: Autonomous Hybrid System, power Management, Fuel Cell, Battery, Supercapacitor, State of charge

ملخص:

تسيير الطاقة لنظام كهربائي هجين يتمثل في التحكم في تدفقات الطاقة من المصادر المختلفة المكونة للنظام. حيث يمكننا من تلبية متطلبات المحملة للطاقة وزيادة مدة حياة النظام مع مراعاة قيود التشغيل المختلفة مثل الحد الأقصى لطاقة المصادر، وحالات شحن عناصر التخزين، إلخ المستخدمة بالنسبة لتطبيق "السيارة الكهربائية"، نقدم في هذا العمل تسيير الطاقة لنظام هجين مستقل يتكون من خلايا الوقود الهيدروجينية كمصدر رئيسي، وبطاريات الليثيوم أيون والمكثفات الفائقة التي تعتبر مصادر مساعدة.

الكلمات المفتاحية: نظام هجين مستقل، تسيير الطاقة، خلية الوقود، البطارية، المكثفة الفائقة، حالة الشحن.