

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A.MIRA Bejaia  
Faculté de technologie  
Département de Génie Electrique



*Mémoire de fin d'étude*

*En vue de l'obtention du Diplôme de Master*

*Spécialité électromécanique*

**Thème**

**Stockage Hybride de l'énergie électrique  
avec batteries et super condensateurs pour  
véhicule électrique/PAC**

**Présenté par :**

Mr. ZERARI ABDELGHANI

Mr. HAMMI HOUSSAME

**Encadré par:**

Mr.MEBARKI.N

**Année universitaire**

**2021/2022**

# Remerciements

*Ce mémoire été réalisé à Bejaia, A l'université A-Mira campus Targa Ouzemour, faculté de technologie département de génie électrique.*

*Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le Courage et la patience durant toutes ces années d'études, et que grâce à luice Travail a pu être réalisé.*

*Merci à nos parents d'avoir su nous écouter et nous motiver.*

*Merci à l'ensemble de nos amis(e), qui ont été là pendant les périodes de doute et de stress.*

*Nous tenons à représenter nos vifs remerciements à notre promoteur*

*Mr MEBARKI.N professeur à l'université de Bejaia pour avoir accepté de nous encadrer, et pour le thème qu'il nous a proposé et pour son aide précieuse, ses conseils et pour le temps qu'il nous a consacré tout au long de ce travail.*

*A toutes personnes ayant contribués de près ou de loin à l'accomplissement de ce modeste travail.*

*Merci à vous qui allez lire ce mémoire*



---

# ***Table Des Matières***

---



## Table des matières

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

### Chapitre I : état de l'art du véhicule a traction électrique

|  |    |
|--|----|
| I.1 Introduction .....   | 3  |
| I.2 Historique .....   | 3  |
| I.3 Définition d'un véhicule électrique (VE).....                      | 4  |
| I.4 Chaîne de traction des véhicules électriques .....                 | 5  |
| I.5 Evaluation des moteurs de traction des véhicules électriques ..... | 6  |
| I.5.1 Entraînement par moteur à courant continu .....                  | 8  |
| I.5.2 Entraînement par moteur à induction .....                        | 8  |
| I.5.3 Entraînement par moteur à réluctance variable .....              | 9  |
| I.5.4 Entraînement par moteur synchrone à aimant permanent.....        | 10 |
| I. 6 Conclusion .....  | 10 |

### Chapitre II : Système de stockage hybride pour véhicules électriques

|  |    |
|--|----|
| II.1 Introduction .....  | 11 |
| II.2 Pile à combustible.....                                       | 11 |
| II.2.1 La pile à combustible : Historique et applications .....    | 11 |
| II.2.2 La pile à combustible à membrane polymère (type PEM) .....  | 13 |
| II.2.3 Caractéristique électrique de la pile à combustible : ..... | 16 |
| II.2.4 Avantages et inconvénients de la PAC .....                  | 17 |
| II.3 Les différents types de stockage.....                         | 18 |
| II.3.1 Stockage à long terme.....                                  | 18 |
| II.3.1.1 Les Batteries .....                                       | 18 |
| II.3.1.2 Caractérisation des accumulateurs électriques .....       | 19 |
| II.3.1.3 Différent type d'accumulateurs .....                      | 20 |
| II.3.2 Stockage à court terme .....                                | 21 |

|   |    |
|---|----|
| II.3.2.1 Les super condensateurs.....                                       | 21 |
| II.4 Comparaison entre les batteries et le super condensateur.....          | 23 |
| II.5 Evolution des systèmes de stockage dans les véhicules électriques..... | 24 |
| II.5.1 Problématiques liées aux batteries.....                              | 24 |
| II.6 Architectures d'association batterie / supercondensateurs.....         | 26 |
| II.7 Conclusion.....  | 28 |

## **Chapitre III : Modélisation du système étudié**

|   |    |
|---|----|
| III.1 Introduction.....   | 29 |
| III.2 Modélisation de la pile à combustible.....                            | 29 |
| III.2.1 Caractéristique électrique de la pile à combustible.....            | 29 |
| III.2.2 Présentation de schéma bloc de la pile à combustible.....           | 33 |
| III.3 Modélisation des dispositifs de stockage.....                         | 34 |
| III.3.1 Batterie.....   | 34 |
| III.3.2 Super condensateur.....   | 36 |
| III.4 Hacheur parallèle réversible en courant.....                          | 37 |
| III.5 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent.....          | 38 |
| III.6 Stratégie de commande du la machine synchrone à aimant permanent..... | 41 |
| III.7 Modélisation de l'onduleur triphasé.....                              | 44 |
| III.8 Dimensionnement.....  | 45 |
| III.8.1 Démarche globale de dimensionnement.....                            | 45 |
| III.8.2 Dimensionnement de la pile à combustible.....                       | 46 |
| III.8.3 Dimensionnement des super condensateurs.....                        | 47 |
| III.8.4 Dimensionnement de la batterie.....                                 | 47 |
| III.9 la stratégie de la gestion d'énergie avec l'organigramme :.....       | 48 |
| III.10 Conclusion.....  | 49 |

## **Chapitre IV : Résultat de simulation**

|  |    |
|--|----|
| IV.1 Introduction.....   | 50 |
| IV.2 Simulation générale appliqué au système global de véhicule électrique ..... | 50 |
| IV.3.1 Résultats de simulation .....   | 51 |
| IV.3.2 Mode freinage.....  | 56 |
| IV.4 Combinisent des résultats .....   | 58 |
| IV.5 Etat de charge des super-condensateurs .....                                | 59 |
| IV.6 état de charge des batteries .....  | 59 |
| IV.7 Conclusion .....  | 60 |
| Conclusion général.....  | 61 |

## Liste de figures

|   |    |
|---|----|
| Fig. I.1 Eléments constituant un véhicule électrique .....                              | 5  |
| Fig. I. 2 Couple/Puissance-Vitesse requises pour VE .....                               | 7  |
| Fig. II.1 Expérience de sir W. Grove en 1839 .....                                      | 12 |
| Fig. II.2 : Schéma de principe d'une cellule de pile de type PEMFC.....                 | 14 |
| Fig. II.3 : Schéma d'une cellule de PEMFC.....  | 15 |
| Fig.II.4 Fonctionnement d'une batterie.....   | 19 |
| Fig. II.5 Structure d'un super condensateur. ....                                       | 22 |
| Fig. II.6 Schéma représentatif d'un super condensateur .....                            | 22 |
| Fig. II.7 état déchargé. ....   | 23 |
| Fig. II.8 état en charge .....  | 23 |
| Figure II.9 Diagramme de Ragone .....   | 25 |
| Figure II.10 Architecture en parallèle sans convertisseur .....                         | 26 |
| Figure II.11 Architecture en parallèle avec convertisseur côté supercondensateurs ..... | 27 |
| Figure II.9 Architecture en parallèle avec deux convertisseurs .....                    | 27 |
| Fig. III.1 schéma équivalent d'une PEMFC .....  | 29 |
| Fig.III.2 schéma bloc de la pile à combustible .....                                    | 33 |
| Fig.III.3 Courbe de polarisation d'une cellule de pile à combustible PEMFC .....        | 33 |
| Fig.III.4 schéma équivalent de la batterie CIEMAT .....                                 | 34 |
| Fig.III.5 Schéma électrique équivalent d'un super condensateur. ....                    | 36 |
| Fig.III.6 Hacheur parallèle réversible en courant .....                                 | 38 |
| Fig.III.7 Schéma bloc de la régulation de $I_d$ .....                                   | 42 |
| Fig.III.8 Schéma bloc de la régulation de $I_q$ .....                                   | 42 |
| Fig. III.9 Schéma d'un onduleur de tension .....  | 44 |
| Fig.III.10 Schéma équivalent d'un stack de super condensateurs .....                    | 47 |

|   |    |
|---|----|
| Fig. III.11 : L'organigramme de gestion d'énergie.....                                  | 48 |
| Fig. IV.1 Schéma globale de simulation .....  | 50 |
| Fig. IV.2 Vitesse de référence en km/h .....  | 51 |
| Fig. IV.3 Vitesse du moteur électrique en km/h .....                                    | 52 |
| Fig. IV.4 Profil de la puissance demandé .....  | 52 |
| Fig. IV.5 Puissance délivre par la pile à combustible .....                             | 53 |
| Fig. IV.6 Puissance du super-condensateur .....   | 54 |
| Fig. IV.7 Puissance délivrée par la batterie .....                                      | 54 |
| Fig. IV.8 Profile des puissances durant le mode de traction .....                       | 55 |
| Fig. IV.9 Profil des puissances de super condensateurs durant le mode de freinage ..... | 56 |
| Fig. IV.10 Profil des puissances durant le mode de freinage .....                       | 57 |
| Fig. IV.11 profile de toutes les puissances .....                                       | 58 |
| Fig. IV.12 : Etat de charge des super-condensateurs .....                               | 59 |
| Fig. IV.13 : état de charge des batteries .....   | 59 |

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tab. II.1 Caractéristiques des différents types de PAC.....             | 12 |
| Tab.II.2 Caractéristiques techniques des principaux accumulateurs ..... | 20 |
| Tab.II.3 Les différents types de super condensateurs .....              | 21 |
| Tab.II.4 comparaison entre le super-condensateur et la batterie .....   | 23 |
| Tab.III.1 Caractéristiques de la batterie utilisée .....                | 48 |

# Nomenclature

**VE** : Véhicule Electrique

**PAC** : pile à combustible.

**PEMFC** : Les piles à membranes polymère échangeuse de protons.

**T** : Température opératoire absolue de la pile (K).

$P_{H_2}^*$  : Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm).

$P_{O_2}^*$  : Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm).

$V_{ohm}$  : La surtension ohmique

$V_{conc}$  : La surtension de concentration

$V_{act}$  : La surtension d'activation

**PEM** : Proton Exchange membrane

$V_{cel}$  : La tension d'une cellule à P à C

**E** : Tension à vide de la pile à combustible

$\Delta V_{act}$  : chute de tension due aux pertes d'activation [V].

$\Delta V_{con}$  : Chute de tension due aux pertes de concentration [V].

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

$V_{batt}$  : La tension nominale du pack de batterie

$E_{batt}$  : énergie journalière à stocker dans le pack [Wh/j].

$I_{batt}$  : Courant de la batterie

**f.e.m** : force électromotrice

$C_{batt}$  : La capacité nominale des batteries

**SC** : Supercondensateurs.

**PAC** : pile à combustible.

**SOC** : State of charge (en français EDC : Etat de charge).

**SSE** : Système de stockage Electrique/Energie

**Npacs** : le nombre des cellules de stack montées en série.

**Npacp** : le nombre de cellules de stack mises en parallèle.

$E_{cell}$  : la tension de cellules de la pile.

$U_{dc}$ : la tension de bus.

**NSCP** : Le nombre de supercondensateur monté en parallèle.

**NSCS** : Le nombre de batterie montée en série.

**Csc** : Capacité totale du module de supercondensateurs.

**Rsc** : Résistance série totale du module de supercondensateurs.

**Rélem** : résistance élémentaire.

**Célem** : Capacité élémentaire.

**Velem** : tension élémentaire.

**Iélem** : Courant élémentaire.

**Ns** : nombre de cellules connectées en série.

**Np** : nombre de cellules connectées en parallèle.

$C_b$ :capacité nominale du pack [Ah]

**Aut** : nombre de jours d'autonomie.

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

$D_b$ : profondeur de décharge du pack [%].

**Nbap** : Le nombre de batterie montée en parallèle.

**Nbas** : Le nombre de batterie montée en série.



---

# **Introduction Générale**

---



## **Introduction générale**

Plus d'un milliard de véhicules circulent et les constructeurs produisent plus de 80 millions de voitures neuves chaque année. La plupart de ces voitures sont propulsées par un moteur à combustion interne (ICE) à énergie conventionnelle, polluant l'atmosphère par des particules de dioxyde de carbone, nuisant à la santé humaine et à l'environnement selon les statistiques d'environnement pour l'année 2011, le secteur de transport a dégagé 24% du total d'émission des gaz à effet de serre.

D'autre coté la crise énergétique qui s'agie de L'épuisement proche des sources d'énergie fossiles ainsi, la réduction de la consommation et de la dépendance aux énergies fossiles s'avèrent nécessaires. Le secteur des transports routiers est un des plus consommateur d'énergie et pollueur en termes d'émissions de gaz à effets de serre. Cette prise de conscience collective a entraîné des réglementations toujours plus strictes sur les émissions polluantes et la consommation des véhicules, qui sont ainsi devenues deux critères primordiaux pour la conception de nouveaux véhicules dit les véhicules tout électriques. Ces derniers ont été présentés comme une solution prometteuse, grâce à leur indépendance vis-à-vis du pétrole. Mais leur faible autonomie ne leur permet pas aujourd'hui de remplacer définitivement les véhicules conventionnels ; d'où le développement d'un autre concept : les véhicules électriques avec stockage hybrides. Il est donc primordial que la communauté des chercheurs entreprenne des recherches axées sur des sources d'énergie propres, durables et vertes et beaucoup plus sur la manière de stockage de cette énergie, Dans ce contexte, les constructeurs automobiles devraient contribuer à cette stratégie, tout en investissant dans la recherche et le développement de nouveaux prototypes de véhicules à traction électrique ou à énergie électrique complète [46]. Depuis juin 2015, les ventes de véhicules électriques ont augmenté de 49% [47].

L'utilisation intensive de voitures électriques dans le monde a joué un rôle très important dans l'augmentation de la pureté de l'air dans les zones surpeuplées, en limitant les émets de la pollution de l'air et en atténuant le réchauffement climatique de la planète [48]. Pour parvenir à une mobilité plus propre et plus verte dans les villes très urbanisées du monde, l'utilisation des véhicules électriques doit être considérée comme l'une des solutions [49]. Permet de bénéficier de l'apport de chacune en les sollicitant suivant leurs caractéristiques et le profil de mission à satisfaire. [50] notre véhicule électrique est un système équipé d'une propulsion intégralement électrique et composé de :

- une Source d'énergie principale

- une Source auxiliaire d'énergie et de stockage assurant le manque d'énergie de la source principale dans le cas des fortes demandes de puissance, le stockage hybride assuré par ce dispositif en cas de freinage.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de stockage de l'énergie électrique pour un véhicule électrique composé de :

- Source principale représentée par un pack de piles à combustible
- batteries 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;
- machine synchrone à aimant permanent.

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

- 1) Un premier chapitre présentera l'état de l'art du véhicule à traction électrique.
- 2) Un deuxième chapitre détaillera le système de stockage hybride et la gestion de la source hybride d'alimentation à bord du véhicule électrique.
- 3) Un troisième chapitre précisera le dimensionnement et la modélisation des composants de système étudié.
- 4) Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats de simulation du système globale obtenus sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Finalement, ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale.



---

# Chapitre I

*Etat d'art du véhicule à  
traction électrique*

---



## **I.1 Introduction**

Le véhicule électrique (VE) est considéré comme la catégorie ultime des véhicules ; De plus, les véhicules conventionnels émettent des gaz à effet de serre, ce qui rend Plus difficile le respect des réglementations environnementales strictes [1]. En tant que élément majeur de l'économie mondiale, l'industrie des transports joue un rôle important dans la vie quotidienne ce qui a des effets non seulement sur l'environnement mondial, mais aussi sur les émissions mondiales des gaz à effet de serre. Les loisirs et le mode de vie actuelle ont favorisé beaucoup plus l'émission des gaz toxique.

Ce pendent la courbe de réchauffement climatique ne cesse pas d'augmenté, donc le monde actuelle a tendance à ce penché vers des solutions plus écologique [2], comme l'électrification des véhicules, ainsi la réduction de la consommation et de la dépendance aux énergies fossiles s'avèrent nécessaires. L'électrification du groupe motopropulseur est une étape clé pour la réduction de ces émissions de gaz à effet de serre [3], ce type de véhicule est en totalité électrique et utilise des batteries rechargeables pour propulser un moteur électrique donc pas d'émission locale de gaz toxique dans l'air d'où l'appellation de véhicules électriques rechargeables « VER » ou aussi véhicules verts. [4]

Dans Ce chapitre nous allons présenter un état de l'art du véhicule à traction électrique ; on va aborder par un historique sur l'évolution et le développement de véhicule électrique, puis on va entamer les principaux éléments constituant la chaîne de traction

## **I.2 Historique**

Dès 1830, le premier prototype de véhicule électrique connu est conçu par Robert Anderson à partir d'une calèche. En 1834, l'Américain Thomas Davenport conçoit le. Tout premier modèle de véhicule électrique, qui est plutôt une locomotive. Ce véhicule et construit avec une batterie pour alimenter un moteur électrique ; qui a réussi à faire un court trajet sur rail. C'est en 1852 qu'un premier modèle de voiture électrique est commercialisé. Mais à cette époque, les voitures n'étaient pas munies de batteries rechargeables, puisque la recharge n'existait pas encore. [5]

En 1859 marque l'invention de la batterie rechargeable au plomb acide par Gaston Planté, elle sera ensuite améliorée par les travaux de Camille Faure. [5], en 1869 Gramme construit le premier moteur électrique à courant continu ayant une puissance de plus d'un cheval. Douze ans plus tard, en 1881, le français Gustave a construit un véhicule électrique équipé d'un moteur à courant continu alimenté par des Batteries au plomb-acide. A ce stade la

de l'évolution de véhicule électrique l'ensemble du véhicule et de son conducteur pesant environ 160 kg donc il été très léger [6].

Deux ans plus tard, un véhicule semblable à celui-ci a été construit par deux professeurs Britanniques, ces premières réalisations n'attirent pas beaucoup l'attention du public car la technologie n'était pas assez mature pour rivaliser avec les voitures à chevaux, des vitesses de 15 km / h et une autonomie de 16 km ne passionnaient pas les clients potentiels [7], grâce à ces hommes, les voitures électriques prendront leur réel essor, car la voiture électrique deviendra viable alors qu'elle peut être rechargée. [5]

Après plusieurs recherches et développement dans ce contexte le Belge Camille Jenatzy à réussi construire le premier véhicule automobile à avoir franchi le cap des 100km/h en 1899, [19], ce véhicule a été utilisé jusque dans les années trente avec l'entreprise « **Edison Electric** ». Cette Période à partir de laquelle le véhicule à moteur thermique le Supplante en raison de Son autonomie. Donc la production de véhicule électrique fut abandonnée à cause du succès de la Ford T qui fut fabriquée en série de 1908 à 1927 avec la réalisation et la vente de plus de 16 millions d'exemplaires. [8], Depuis 1980, le nombre de véhicules thermiques polluants, augmentent de façon importante. Donc des solutions de substitution sont envisagées pour les grandes villes, les constructeurs de véhicules, de batteries, de moteurs électriques, groupent actuellement leurs efforts de recherche, pour répondre au cahier des charges dressés par les différents services de l'environnement des états de la communauté européenne. La solution électrique répond doublement aux exigences de la circulation urbaine, par son absence de pollution gazeuse et de nuisance sonore. [9]

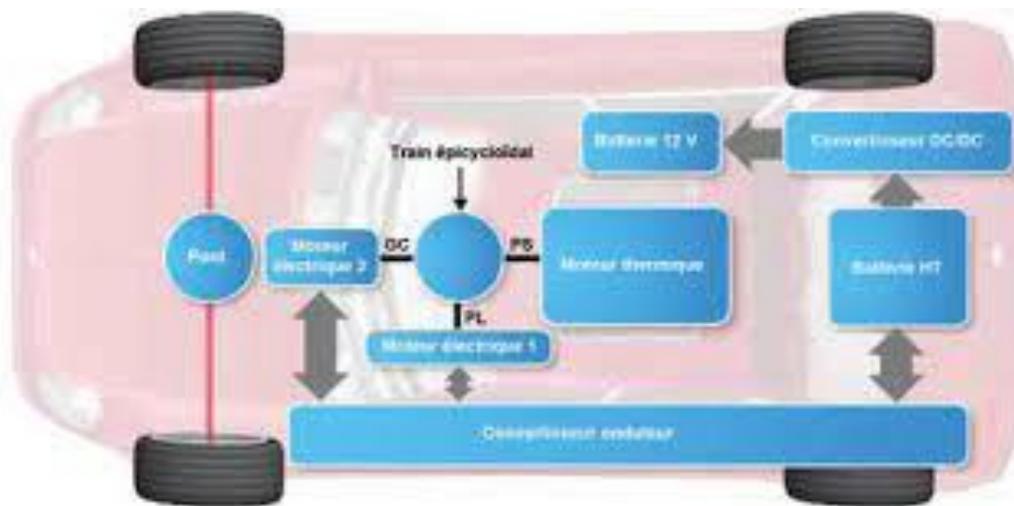
### **I.3 Définition d'un véhicule électrique (VE)**

Un véhicule électrique est un moyen de déplacement dont la propulsion est garantie par un Ou plusieurs moteurs électriques. Le (VE) est propre, silencieux et efficace, il devient ainsi une composante essentielle de la mobilité du futur. Les constructeurs automobiles proposent de bonnes solutions pour l'électrification des motorisations des voitures, initialement purement mécaniques, ajoutant ainsi de plus en plus d'électronique et de systèmes logiciels. Autrement dit, la force motrice transmise aux roues par un moteur électrique selon la solution de transmission Retenue. [10]

#### I.4 Chaîne de traction des véhicules électriques

L'élément central des véhicules électriques qui les distingue des véhicules classiques est la chaîne de traction électrique elle est l'ensemble des éléments depuis la source d'énergie jusqu'à la transmission mécanique, qui assurent une puissance électromécanique capable de mouvoir le véhicule. Elle se compose généralement d'un chargeur embarqué, d'une ou de plusieurs sources, de convertisseur d'électronique de puissance et d'accumulateurs pour le stockage d'énergie électrique [12], un moteur pour convertir l'énergie électrique Embarquée en énergie mécanique et un convertisseur électrique (onduleur) qui permet de transformer le courant continu délivré par les accumulateurs en courant alternatif afin d'alimenter le moteur.

Ces convertisseurs font appel à des structures d'électronique de puissance complexes, Utilisées en particulier dans le contrôle de la variation de vitesse des moteurs. La version de base d'une transmission électrique comprend la batterie, un onduleur (électronique de puissance) et le moteur électrique. La batterie fournit un courant continu Qui est transmis à l'onduleur. L'onduleur transforme le courant continu en courant alternatif Et le transmet au moteur électrique. Ensuite, le moteur électrique transforme l'énergie électrique en énergie mécanique (c'est à dire en un couple avec une vitesse de rotation spécifique). [10]



**Fig.I.1** Eléments constituant un véhicule électrique

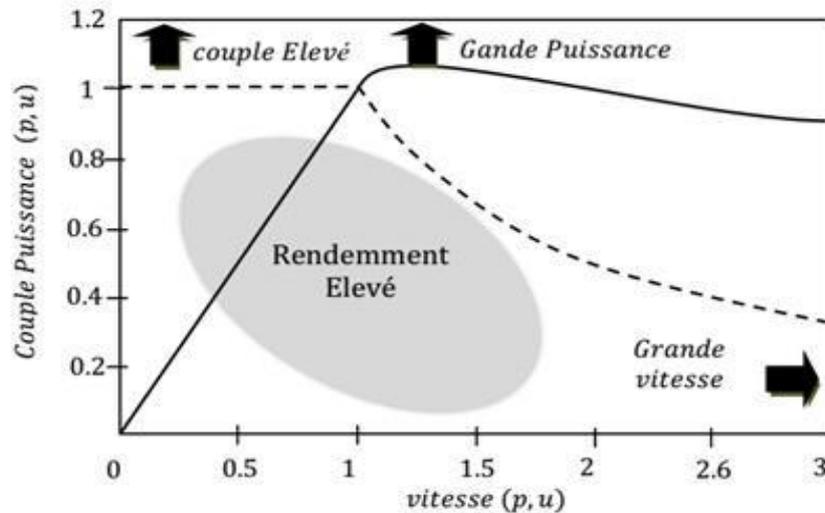
Plusieurs solutions sont aujourd'hui utilisées pour fournir de l'énergie électrique, La principale source d'un véhicule 100% électrique reste la batterie, même si elle peut être Renforcée par des prolongateurs d'autonomie [12], on va expliquer chaque partie de la Chaîne de traction séparément. Les éléments constituant un véhicule électrique sont présentés à La figure 1.nous intéresserons premièrement à la partie mécanique ; La transmission Mécanique

permet de transmettre la puissance mécanique aux roues. Elle se compose Principalement d'un réducteur afin de réduire la vitesse et d'augmenter le couple transmis aux roues. En effet, un moteur électrique tourne relativement rapidement (plus rapidement que la vitesse de rotation d'une roue) et produit un couple limité. En réduisant la vitesse à l'aide de ce réducteur, on adapte la vitesse du moteur à la vitesse souhaitée. Certaines transmissions mécaniques peuvent se composer d'une boîte de vitesses, mais cette solution est très rare dans la motorisation électrique et on préfère moduler la vitesse directement en agissant sur la tension d'alimentation du moteur électrique via un convertisseur statique.

Ce convertisseur statique est un des éléments fondamentaux du véhicule électrique. C'est l'interface entre la partie sources d'énergie et la partie mécanique. Il est chargé de convertir l'énergie en sortie de la partie sources afin de l'adapter à celle consommée par le moteur et surtout de délivrer la puissance électrique adaptée à la consigne du conducteur, c'est donc Le convertisseur statique qui, piloté par le contrôleur, va permettre de faire accélérer ou ralentir le moteur, dans le cas général, ces convertisseurs se limitent à la gamme des onduleurs de puissance, en raison d'une forte utilisation des moteurs alternatifs comme moyen de traction électrique. Les contraintes et le cahier des charges d'un constructeur automobile seront limités aussi au niveau de la capacité des calculateurs embarqués, incluant la gestion d'énergie, le contrôle commande du moteur, le traitement de l'information provenant de différents capteurs...etc. Une partie du logiciel embarqué met en œuvre de telles lois, le reste s'attachant à gérer les différents modes de fonctionnement, la sécurité d'ensemble, ainsi qu'à assurer l'aide au diagnostic. [12]

### **I.5 Evaluation des moteurs de traction des véhicules électriques**

Les moteurs électriques sont généralement constitués d'un composant mobile (le rotor) et fixe (le stator). Ils génèrent des mouvements grâce à l'interaction d'un champ magnétique et de conducteurs qui transportent du courant, en utilisant la force dite de Lorentz [11]



**Fig.I.2 Couple/Puissance-Vitesse requises pour VE**

Dans les véhicules électriques, le moteur électrique est l'unité de propulsion, tandis que dans les véhicules électriques, le moteur électrique et le moteur à combustion interne réunis en série ou en parallèle fournissent la puissance de propulsion, dans un véhicule électrique ou un véhicule hybride, le moteur de traction électrique convertit l'énergie électrique de l'unité de stockage d'énergies en énergie mécanique entraînant les roues du véhicule, les principaux avantages d'un moteur électrique par rapport à un moteur à combustion interne sont que le moteur fournit un couple complet à bas régime et que la puissance nominale instantanée peut être deux ou trois fois supérieure à la puissance nominale du moteur thermique [7].

Les performances globales d'un véhicule électrique dépendent du type de moteur d'entraînement employé, dans le cas d'un véhicule électrique, dès que le conducteur relâche l'accélérateur, les roues motrices renvoient progressivement l'énergie cinétique du véhicule au moteur électrique, qui devient alors une génératrice et recharge les batteries de manière spécifique, le choix du moteur électrique de propulsion et de sa transmission de puissance est déterminé au départ par les caractéristiques de fonctionnement suivantes [16].

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

Ces quelques caractéristiques typiques requises pour les machines utilisées dans les Systèmes de propulsion électrique, sont bien illustrées sur la figure 2 exhibant l'évolution du couple/puissance-vitesse, jusqu'à présent, quatre types de motorisation ont été appliqués Aux

VE. Il s'agit des entraînements à moteur à courant continu (MCC), des entraînements à moteur à induction (MI), des entraînements à moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) et des entraînements à moteur à réluctance variable (MRV).

### **I.5.1 Entraînement par moteur à courant continu**

Parmi les moteurs classiques utilisés dans les VE, le MCC à excitation s'éparée, représente la solution la plus économique grâce à son convertisseur de type hacheur de puissance agissant sur l'induit, l'inducteur est également alimenté par un hacheur de faible puissance. Il s'agit de la technologie utilisée par de nombreux constructeurs automobiles pour commercialiser les véhicules électriques de première génération, mais le MCC présente un certain nombre d'inconvénients bien connus, les attributs positifs des machines à courant continu sont les suivants :

- Facilité de contrôle due à la linéarité ;
- Capacité de contrôle indépendant du couple et du flux;
- Technologie de fabrication établie.

**Les inconvénients des machines à courant continu sont les suivants :**

- Usure des brosses nécessitant un entretien élevé ;
- Vitesse maximale faible ;
- Faible rapport poids / puissance.

Le MCC à excitation séparée utilisé dans un véhicule électrique possède deux convertisseurs DC / DC distincts alimentant les enroulements d'induit et d'inducteur à partir de la même source d'énergie. Les convertisseurs DC / DC traitent la tension d'alimentation fixe de la source d'énergie pour délivrer un courant continu variable aux enroulements d'induit et d'inducteur. La puissance du convertisseur alimentant les enroulements d'induit est beaucoup plus grande que celle du convertisseur alimentant l'enroulement Inducteurs [6]. Les entrées de commande des circuits du convertisseur correspondent au couple c'est la vitesse souhaités du moteur, les sorties de commande des convertisseurs sont les tensions appliquées aux circuits d'induit et d'inducteur du moteur à courant continu.

### **I.5.2 Entraînement par moteur à induction**

Les moteurs à induction se caractérisent par la simplicité de construction, la fiabilité, la robustesse, la maintenance réduite, le coût réduit et peuvent fonctionner dans des environnements hostiles. L'absence de friction des balais permet aux moteurs de relever la limite de vitesse maximale, et la vitesse nominale plus élevée permet à ces moteurs de développer un rendement élève. Les variations de vitesse des moteurs à induction sont Obtenues

en modifiant la fréquence de la tension. Le contrôle d'orientation de champ (Field Orientation control) d'un moteur à induction (MI) peut découpler le contrôle du couple du Contrôle de champ. Cela permet au moteur de se comporter de la même manière qu'un MCC à excitation séparée. Ce moteur ne souffre pas toutefois des mêmes limitations de vitesse que dans le MCC. Le fonctionnement dans la plage de vitesse élevée au-delà de la vitesse de base est obtenu par affaiblissement du flux une fois que le moteur a atteint sa capacité nominale. Un moteur MI correctement conçu, par exemple un moteur de broche, avec une commande de champ orienté peut atteindre une plage d'affaiblissement du champ de 3 à 5 fois la vitesse de base [18]. Cependant, les contrôleurs des moteurs à induction coûtent plus cher que ceux de MCC, de plus, la présence d'un couple de claquage limite son fonctionnement prolongé à puissance constante, à la vitesse critique, le couple de claquage est atteint, généralement, pour un MI conventionnel, la vitesse critique est environ deux fois supérieure à la vitesse synchrone, toute tentative d'utilisation du moteur au courant maximal au-delà de cette vitesse entraînera le blocage du moteur, bien que le FOC puisse prolonger le fonctionnement à puissance constante, il en résulte une augmentation du couple de claquage, ce qui entraîne un surdimensionnement du moteur. En outre, l'efficacité à une plage de vitesses élevée peut souffrir du fait que l'efficacité des MI est intrinsèquement inférieure à celle des moteurs synchrones à aimant permanent (MSAP) et des moteurs à réluctance variable (MRV) en raison de l'absence d'enroulement de Rotor et les pertes de rotor en cuivre [17].

### **I.5.3 Entraînement par moteur à réluctance variable**

Les entraînements à moteur à réluctance variable suscitent un vif intérêt et sont reconnus pour leur potentiel pour les applications des véhicules électriques, ces entraînements à base de ce moteur présentent des avantages indéniables, tels qu'une construction simple et robuste, un fonctionnement tolérant aux pannes, un contrôle simple et des caractéristiques de couple-vitesse exceptionnelles, les entraînements à moteur à réluctance variable peuvent fonctionner de manière inhérente avec une plage de puissance constante extrêmement large. Les caractéristiques couple-vitesse des entraînements à moteur à réluctance variable correspondent très bien aux caractéristiques de charge du véhicule électrique, le variateur du MRV outre une capacité de fonctionnement à haute vitesse avec une large plage de puissance constante. Le moteur a un couple de démarrage élevé et un rapport couple-inertie élevé. La structure du rotor est extrêmement simple, sans aucun enroulement, aimant, commutateur ou balai. La tolérance de panne du moteur est également extrêmement bonne. En raison de sa construction simple et de sa faible inertie du rotor, le MRV présente une accélération très rapide et une vitesse de

fonctionnement extrêmement élevée. En raison de son fonctionnement étendu, le MRV est particulièrement adapté au fonctionnement sans engrenage dans la propulsion des véhicules électriques [18]. De plus, l'absence de sources magnétiques (c'est-à-dire des enroulements ou des aimants permanents) sur le rotor rend le MRV relativement facile à refroidir et insensible Aux températures élevées. Ce dernier est d'un intérêt primordial dans les applications Automobiles, qui exigent un fonctionnement dans des conditions ambiantes difficiles. Une Plage étendue de 2 à 3 fois la vitesse de base est généralement possible avec un contrôle Approprié [18]. Les inconvénients des entraînements MRV sont qu'ils doivent subir des ondulations de couple et des bruits acoustiques. Cependant, ce ne sont pas des problèmes Potentiels qui interdisent son utilisation pour l'application de véhicules électriques.

#### **I.5.4 Entraînement par moteur synchrone à aimant permanent**

Le moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) peut être considéré comme un croisement entre un MI et un MCC sans balai, ils ont des structures de rotor similaires aux moteurs MCC qui contiennent des aimants permanents, les avantages de MSAP sont bien connus, le plus gros avantage est le faible volume des MSAP, contrairement aux autres types de moteurs, cela les rend parfaitement adaptés aux applications de moteurs à roues [18]. Les commandes des moteurs MSAP présentent les inconvénients en ce que l'aimant est coûteux et que la résistance mécanique de l'aimant rend difficile l'établissement d'un couple élevé dans le moteur, les moteurs CC sans balai à aimant permanent ne disposent pas de balai pour limiter la vitesse, mais des questions subsistent quant à l'intensité de fixation de l'aimant, car elle limite la vitesse maximale si les moteurs sont du type à rotor intérieur. De plus, ce moteur souffre d'une assez limite capacité d'affaiblissement du champ.

Ceci est dû à la présence du champ magnétique permanent qui ne peut être affaibli que par La production d'un composant de champ stator qui oppose le champ magnétique du rotor [18], n'néanmoins, un fonctionnement prolongé a puissance constante est possible grâce à la progression de l'angle de commutation.

### **I. 6 Conclusion**

Le principal objectif de ce premier chapitre est de présenter l'historique des véhicules électriques, ainsi les principaux moteurs utilisé dans la traction électrique.

Les sources d'énergie étant choisies, elles seront modéliser et dimensionner dans les chapitres suivant pour qu'elles puissent satisfaire les demandes de puissance du véhicule.



---

# Chapitre II

Systeme de stockage hybride  
pour véhicules électriques

---



## **II.1 Introduction**

L'objectif de ce chapitre est de présenter le contexte de l'hybridation de stockage d'énergie Électrique (batteries et supercondensateurs) en premier lieu, on va abordée avec les définitions de c'est deux moyen de stockage d'une manière générale est ensuite mis en relief. Puis, l'évolution des systèmes de stockage dans ceux-ci est présentée. Les différentes technologies de batteries lithium-ion existantes et les problèmes liés à leur exploitation sont abordés, des alternatives permettant d'atténuer ces problématiques sont ensuite batteries/ supercondensateur.

Le développement des systèmes de stockage porte aujourd'hui principalement sur l'intégration de nouvelles sources d'énergie de stockage et sur le concept d'hybridation des Sources L'état de l'existant en ce qui concerne la gestion énergétique des systèmes de Stockage multi-sources sera présenté, la mise en œuvre des techniques avancées de contrôle et de gestion de ce type de système de stockage peut permettre d'optimiser les performances (durée de vie et coût) de l'ensemble. Enfin, les points clés sur lesquels nous apporterons notre contribution seront mis en exergue Les démarches scientifiques et les objectifs à atteindre seront finalement décrits.

## **II.2 Pile à combustible**

L'ensemble des technologies d'hydrogène, de la production à l'utilisation en passant par Les technologies de stockage, de transport et de distribution de ce vecteur énergétique de futur, est appelé à jouer un rôle essentiel dans l'émergence d'une filière hydrogène majeure Essentiellement utilise en tant que gaz dans des procédés de chimie industrielle, l'hydrogène est aujourd'hui envisage comme vecteur énergétique de grande échelle ; on parle <<d'hydrogène énergie>>.Du cote de l'utilisation finale, il pourra être associé aux piles à combustible.[14]

### **II.2.1 La pile à combustible : Historique et applications**

La possibilité de produire de l'électricité à partir de la réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène, appelée principe de l'électrolyse inverse, fut énoncée pour la première fois en 1802 par Sir Henry David. Partant de ce procédé, Sir William Grove expérimente en 1839 la première pile à combustible avec des électrodes en platine dans un milieu acide sulfurique dilué.

La pile à combustible a connu son émergence grâce à la NASA qui cherchait un moyen de produire de l'électricité à bord de ses engins spatiaux : des PAC furent utilisées avec succès par la capsule Gemini en 1964. L'intérêt pour l'utilisation de cette technologie dans le domaine des

transports remonte à 1973, date de la première crise pétrolière. En 1993 un bus à PAC est réalisé par l'entreprise Ballard en partenariat avec le constructeur automobile Daimler Benz.[15]

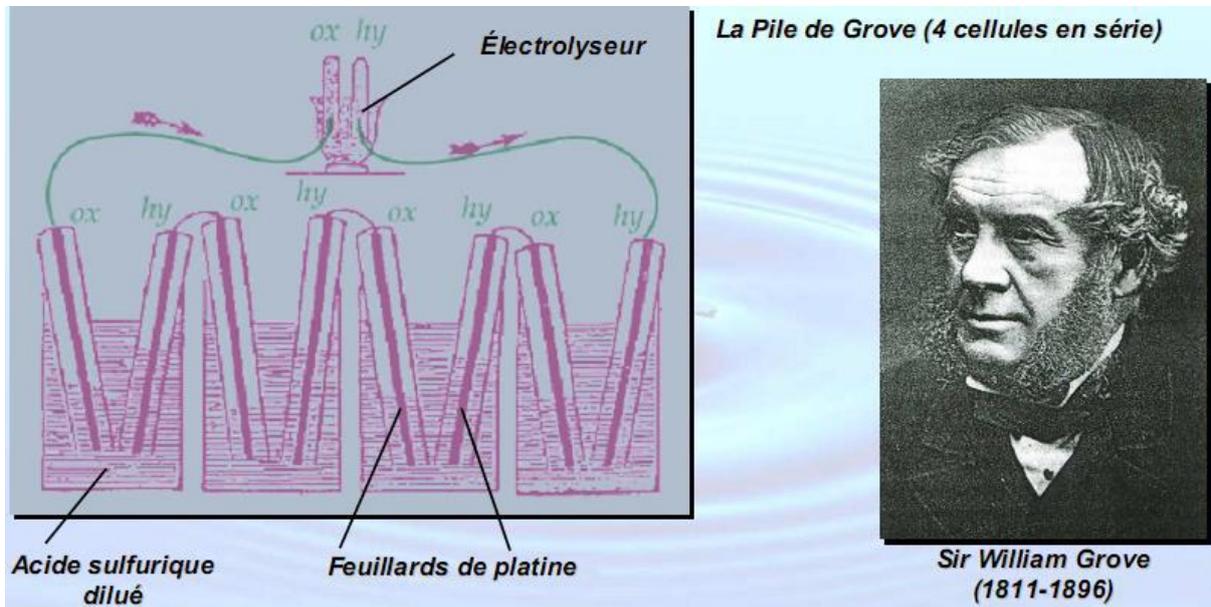


Fig. II.1 : Expérience de sir W. Grove en 1839.

Les piles à combustibles sont répertoriées en fonction de leurs températures de fonctionnement, de leurs électrolytes et de leurs plages de puissance. [16] Les principales technologies de pile à combustible ainsi que leurs caractéristiques sont données dans le tableau suivant :

| Type                            | AFC                   | PEMFC  | PAFC  | MCFC  | SOFC  | DMFC                                  |
|---------------------------------|-----------------------|--|---|---|---|---------------------------------------|
| Electrolyte                     | Solution alcaline KOH | membrane échangeuse de protons (MEP)                           | Acide phosphorique H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | Mélange de Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> dans une matrice LiAlO <sub>2</sub> | Oxyde de zircon ZrO <sub>2</sub> et yttrium Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (céramique) | MEP ou H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |
| catalyseur                      | Platine               | Platine  | Platine   | Nickel et oxyde de nickel   | Cemet nickel zircon   | platine                               |
| Charge mobile                   | OH <sup>-</sup>       | H <sup>+</sup>   | H <sup>+</sup>                                    | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>   | O <sup>2-</sup>   | H <sup>+</sup>                        |
| Température fonctionnement (°C) | 60-200                | 40-90  | 180-210   | 630-650   | 900-1000  | 70-100                                |
| Combustible                     | H <sub>2</sub>        | H <sub>2</sub> produit à partir d'hydrocarbures ou du méthanol | H <sub>2</sub> produit à partir d'hydrocarbures   | H <sub>2</sub> produit à partir d'hydrocarbures CO <sub>2</sub>   | H <sub>2</sub> et CO produit à partir d'hydrocarbures                                 | méthanol                              |
| Oxydants                        | O <sub>2</sub>        | O <sub>2</sub> /air  | O <sub>2</sub> /air                               | O <sub>2</sub> /air   | O <sub>2</sub> /air   | O <sub>2</sub> /air                   |
| Rendement %                     | 60 – 70               | 35-40  | 40  | 60  | 50-70   | 20-45                                 |
| Applications                    | NASA                  | Véhicules  | Install. Stationnaires (cogénération)             | Install. Stationnaires (cogénération)   | Install. Stationnaires (cogénération)   | véhicules                             |

Tab. II.1 : Caractéristiques des différents types de PAC

Parmi ces différents types de piles à combustible couramment développées, c'est la filière dite «à membrane échangeuse de protons » qui a été retenue par presque tous les acteurs de programmes automobiles dans le monde. [17]Généralement appelée PEMFC (pour Proton Exchange Membrane Fuel Cell), elle intéresse également les industriels pour des applications Stationnaires (jusqu'au mégawatt), portables (jusqu'à 100 W) et transport (jusqu'à quelques centaines de kW). Est la technologie généralement retenue pour l'usage automobile. Pour Plusieurs raisons expliquent ce choix : [18]

#### ❖ Densité de puissance

La propulsion d'un véhicule requiert une puissance de quelques kilowatts à une centaine de kilowatts. En outre, le groupe motopropulseur doit avoir une masse et un encombrement acceptable. La PAC de type PEM répond le mieux à ces contraintes.

#### ❖ Température de fonctionnement

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

#### ❖ Structure solide

La pile à combustible PEM est composée d'éléments solides (spécialement la membrane en Polymère). Cette structure solide garantit une certaine résistance mécanique vis à vis des contraintes liées à l'environnement automobile.

### II.2.2 La pile à combustible à membrane polymère (type PEM)

#### a) Principe de fonctionnement :

La pile à combustible de type PEM convertit l'énergie chimique (l'hydrogène et oxygène) en énergie électrique. Cette réaction électrochimique est une électrolyse de l'eau inverse. L'énergie électrique est produite par une réaction d'oxydoréduction entre l'oxygène (oxydant) et l'hydrogène (réducteur). L'oxydation a lieu à l'anode et la réduction à la cathode. Ces deux Réactions sont isolées par une membrane qui joue le rôle d'électrolyte. [14] La cathode est alimentée en oxygène gazeux (ou plus généralement en air) et l'anode est alimentée en hydrogène gazeux. Les équations chimiques d'oxydoréductions sont les suivantes :

- Oxydation à l'anode :



- Réduction à la cathode:



- En combinant (1.1) et (1.2), la réaction globale est :



L'électricité est produite par les 2 électrons libérés par la molécule d'hydrogène. Les protons d'hydrogène  $H^+$  traversent la membrane séparant l'anode de la cathode et se recombinaient à la cathode avec les électrons et les atomes d'oxygène. Idéalement, les seuls Produits secondaires de la réaction sont de l'eau et de la chaleur, faisant de la pile un tri générateur.

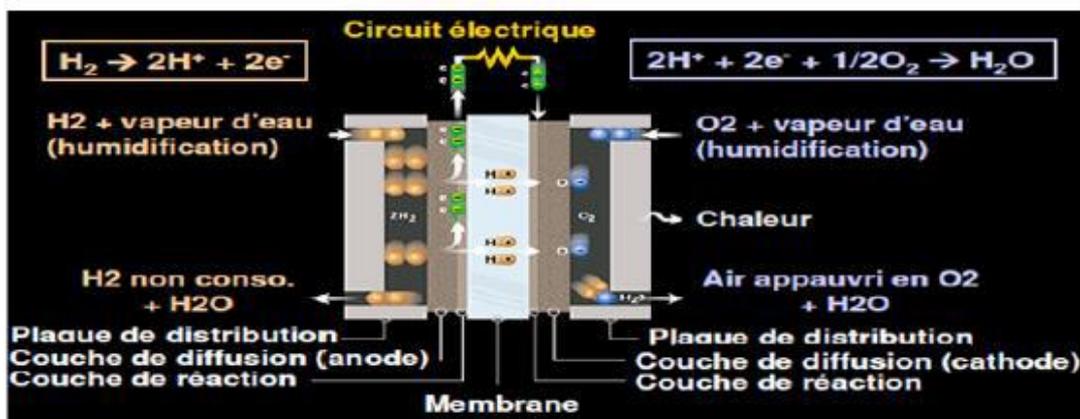
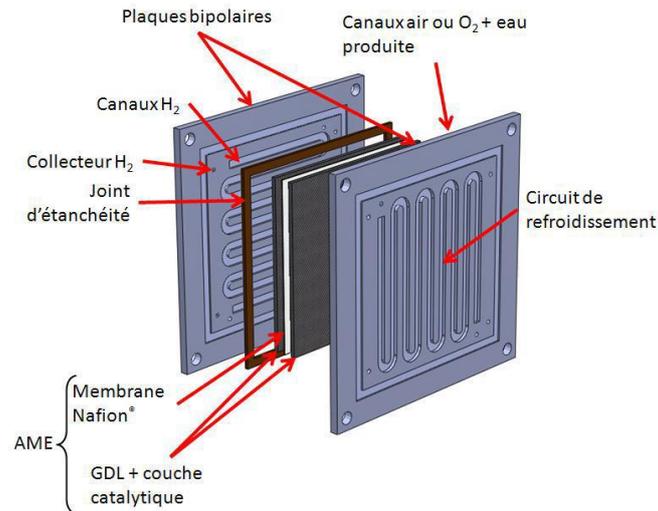


Fig. II.2 : Schéma de principe d'une cellule de pile de type PEMFC. [19]

## b) La cellule

Les Piles à Combustible à Membrane Échangeuse de Protons (PEMFC pour Proton Exchange Membrane Fuel Cell) sont un type particulier de PAC dotée d'une membrane électrolyte solide acide en polymère (souvent du Nafion, polymère perfluoré sulfoné) permettant le transfert de protons de l'anode vers la cathode.[22]La cellule d'une PEMFC est constituée, de deux plaques bipolaires entourant un Assemblage Membrane Électrode (AME ou MEA pour Membrane Electrode Assembly).



**Fig. II.3 : Schéma d'une cellule de PEMFC.**

### c) Les plaques bipolaires

Les plaques bipolaires remplissent 2 rôles. D'une part elles distribuent les gaz de manière uniforme à l'assemblage EME par le biais de fins canaux. D'autre part, elles permettent la circulation d'un fluide de refroidissement pour refroidir la cellule élémentaire. [20] Les plaques bipolaires doivent être conductrices et résister à un environnement corrosif (par exemple, le graphite ou l'acier inoxydable sont utilisés).

### d) Membranes polymères ioniques :

Les membranes conductrices protoniques constituent le cœur des piles à combustible de type PEMFC. Leur importance est évidente, puisque ce sont leurs propriétés de conduction qui vont conditionner la recombinaison électrochimique de l'hydrogène avec l'oxygène, et donc ses performances. Les chutes ohmiques limitent le fonctionnement à hautes densités de courant et sont principalement associées aux membranes (la résistance de la membrane étant liée au rapport épaisseur sur conductivité protonique). De plus, ces dernières doivent présenter de bonnes propriétés de résistance mécanique et chimique dans les conditions de fonctionnement, ne pas être perméables aux gaz et maintenir une teneur en eau élevée à haute température car cela conditionne les propriétés de conduction. Cette membrane est ensuite associée à deux électrodes une sur chaque face pour permettre l'alimentation en gaz et favoriser la réaction chimique.

### e) Electrodes

Les électrodes ont une triple fonction :

- Supporter le catalyseur finement divisé et permettre son contact avec les gaz.
- Permettre aux espèces protoniques de se déplacer depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène est réduit grâce à la présence de polymère ionique.
- Evacuer les électrons des sites catalytiques anodiques et redistribuer ces électrons sur les sites catalytiques cathodiques. L'épaisseur des électrodes d'une PEMFC est de 10 à 30  $\mu\text{m}$ . Elles se caractérisent par la présence de 3 constituants fondamentaux formant une zone de contact triple entre les réactifs gazeux, les ions et les électrons. Le platine, compatible avec l'électrolyte acide et permettant d'obtenir des densités de courant importantes est le catalyseur de chaque demi-réaction. La teneur en platine varie entre 0,01 et 1  $\text{mg}/\text{cm}^2$  d'électrode. Les particules de platine de 2 à 4  $\text{nm}$  de diamètre, sont déposées sur un support carboné finement divisé assurant l'évacuation des électrons à l'anode et leur redistribution à la cathode. L'ensemble est imprégné du matériau utilisé comme électrolyte pour assurer la continuité ionique depuis les sites catalytiques anodiques vers les sites cathodiques. Les développements actuels concernant les électrodes ont pour objectifs principaux :

- la diminution de la quantité de platine nécessaire au bon fonctionnement de l'électrode (Actuellement 0,2  $\text{g}/\text{cm}^2$ ),
- la réduction de leur sensibilité à l'empoisonnement au monoxyde de carbone (CO),
- l'élaboration de nouveaux matériaux catalytiques moins onéreux.

### II.2.3 Caractéristique électrique de la pile à combustible :

La tension à vide de la cellule est en fonction du potentiel électrochimique de la réaction d'oxydoréduction. Idéalement, ce potentiel électrochimique est de 1.23 v (potentiel standard) pour des conditions standard de température et de pression (1atm, 25°C).en pratique, la tension à vide se situe légèrement en dessous de 1v. La courbe de polarisation est la caractéristique électrique d'une pile à combustible .elle représente la tension de la cellule en fonction de la densité de courant et dépend de la température de fonctionnement, de la pression des réactifs et du taux d'humidité de la membrane .La densité de courant ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ) est défini par :

$$I_{PAC} = \frac{i_{pac}}{a_{cell}}$$

Avec  $I_{PAC}$  le courant de la pile à combustible et  $A_{cell}$  la surface active d'une membrane.

## II.2.4 Avantages et inconvénients de la PAC [21]

### ❖ **Avantage**

#### ➤ **Rendement**

Le haut rendement énergétique même à charge partielle. Le rendement électrique dépend du type de pile. Il varie entre 40 % et 70 % sans tenir compte du système global avec les auxiliaires (pompes, échangeur, reformeur, humidificateur et convertisseur) qui font baisser ces valeurs. Dans les applications de transport, le rendement d'une pile PEM est compris entre 38 % (reformage du méthanol) et 50 % (hydrogène pur). Cependant, dans les applications stationnaires, le rendement énergétique global est bien plus élevé car l'énergie non convertie sous forme électrique peut être récupérée sous forme de chaleur. On peut atteindre des rendements globaux de 85 % à 90 %.

#### ➤ **Silencieuses**

Les faibles émissions sonores car lors de leur fonctionnement,

#### ➤ **Pollution**

Les faibles émissions gazeuses (selon le carburant utilisé et son origine). Les piles fonctionnant à l'hydrogène pur ne produisent rien tandis que celles utilisant du méthanol ou de l'éthanol produisent de faibles quantités de CO<sub>2</sub>, de CH<sub>4</sub> et de CO.

#### ➤ **Modularité**

Les piles sont constituées de cellules élémentaire mises en parallèle ou en série pour obtenir la puissance voulue. Il est donc possible en adapte le nombre de cellules ainsi que la surface de chacune d'obtenir toutes les puissances possibles entre 1 KW et plusieurs MW.

#### ➤ **Température de fonctionnement**

Les diverses températures de fonctionnement. Les PAC possèdent une large plage de températures de fonctionnement selon leurs types. Ceci permet de couvrir plusieurs domaines d'application. Par exemple, les piles de faible température sont utilisées pour les applications mobiles ou portables qui n'ont pas besoin de la chaleur produite. En revanche, les piles à haute température sont plus adéquates aux applications domestiques où la chaleur dégagée est utilisée pour l'eau chaude et le chauffage. Elles conviennent aussi aux applications industrielles où la chaleur produite est exploitée pour un couplage avec une turbine.

➤ **L'absence de parties rotatives**

Il n'y a aucune partie rotative dans une pile à combustible et aucun mouvement donc, pas d'usure mécanique pour le cœur de la pile.

❖ **Inconvénients**

En effet, parmi les problèmes principaux faisant obstacle au développement des piles à combustibles.

➤ **Le coût**

Le coût qui est très élevé à cause de l'utilisation des métaux nobles comme le platine au niveau des électrodes et à cause du prix de fabrication de la membrane et des plaques bipolaires.

➤ **Durée de vie**

La plupart des piles sont encore des prototypes, on a donc peu de renseignements sur la durée de vie des piles. Les contraintes diffèrent selon l'application :

-Automobile : quelque millier d'heures

-Stationnaire : au moins 40 000 heures (environ 4.6 ans).

➤ **Gestion thermique**

Le module pile à combustible doit encore être intégré au reste du système. Dans le cas des applications automobiles, il faut évacuer la chaleur générée par la pile (pour éventuellement l'utiliser pour le reformage). Cela impose donc un système de refroidissement.

## II.3 Les différents types de stockage

### II.3.1 Stockage à long terme

#### II.3.1.1 Les Batteries

Une batterie est un accumulateur électrochimique qui fonctionne grâce aux réactions électrochimiques aux électrodes. Ces dernières assurent la conversion de l'énergie électrique en un processus chimique réversible. L'accumulateur électrochimique a la caractéristique intéressante de fournir une tension à ses bornes peu dépendante de sa charge. Cette tension est de l'ordre de quelques volts pour un élément. Comme en pratique des tensions plus élevées, notamment 12V, 24V voire même 48 V et plus, il suffit, pour augmenter la tension, de raccorder des éléments du même type en série au sein d'une batterie d'accumulateurs. Son principe de

fonctionnement est basé sur la conversion et la transformation de l'énergie chimique en énergie électrique par une réaction électrochimique. Elle est constituée d'une ou de plusieurs cellules montées en série, contenant chacune une électrode positive, une électrode négative, un séparateur et un électrolyte. (Fig. II.4).

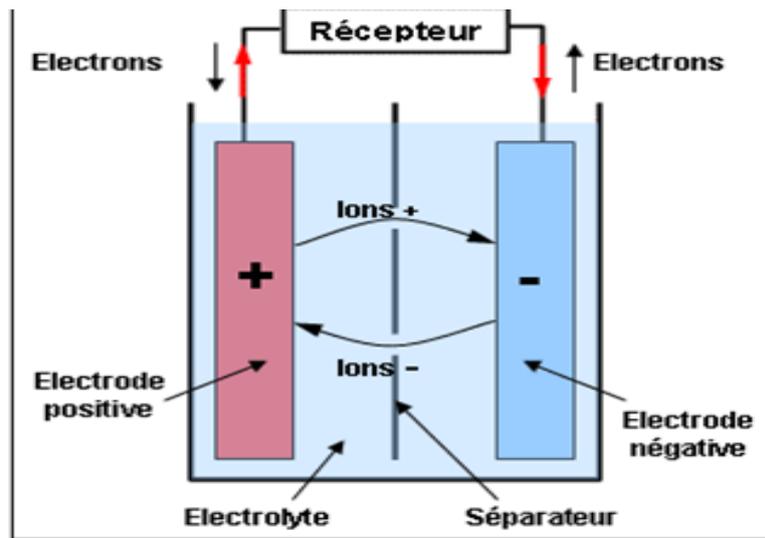


Fig.II.4 Fonctionnement d'une batterie. [20]

### II.3.1.2 Caractérisation des accumulateurs électriques

Un accumulateur électrique est un dispositif destiné à stocker l'énergie électrique afin de pouvoir l'utiliser ultérieurement. Nous citons ci-dessous ses grandeurs caractéristiques :

- La tension aux bornes est la tension fournie au cours de la décharge. Elle dépend de l'enthalpie libre de la réaction totale, de la cinétique des réactions à chaque électrode et de la résistance de l'électrolyte.
- La capacité de charge électrique, souvent appelée capacité de l'accumulateur est la charge électrique que peut fournir l'accumulateur complètement chargé pendant un cycle complet de décharge.
- L'énergie stockée dans la batterie est égale à sa charge électrique multipliée par la tension moyenne sous laquelle cette charge est délivrée.
- La densité d'énergie, exprimé en Wh/kg, est une des caractéristiques importantes d'un accumulateur, elle correspond à la quantité d'énergie qu'il peut restituer par rapport à sa masse.

- La densité de puissance est la puissance que fournit la pile par unité de masse. La puissance fournie dépend du régime de décharge. [20]

**II.3.1.3 Différent type d’accumulateurs**

Le tableau suivant représente les différents types d’accumulateurs et leurs caractéristiques [21]

| Caractéristique                    | Type d’accumulateur  |                                     |                                       |                                |
|------------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
|                                    | Plomb-acide  | Nickel-cadmium                      | Lithium-ion                           | Lithium-polymère               |
| Densité d’énergie massique (Wh/kg) | 30-50  | 45-80                               | 150-190                               | 150-190                        |
| densité d’énergie (Wh/l)           | 75-120   | 80-150                              | 220-330                               | 220-330                        |
| Puissance en pente (Wh/kg)         | Jusqu’à 700  | ■                                   | Jusqu’à 1500                          | Jusqu’à 250                    |
| Température de fonctionnement (c)  | De -20 à 60  | De -40 à 60                         | De -20 à 60                           | De 0 à 60                      |
| tension nominal d’un élément (v)   | 2  | 1.2                                 | 3.6                                   | 3.7                            |
| Auto décharge par mois(%)          | 5  | 20                                  | 10                                    | 10                             |
| Nombre de cycle (charge/décharge)  | De 400 à 600 (pour les étanche)<br>1200(pour les tubulaires) | 2000                                | De 500 à 1000                         | De 200 à 300                   |
| Domaine d’application              | Stationnaire (secours, télécom.)                             | Transport (démarrage traction)      | Portable (téléphone ordinateur...)    | ■                              |
| Avantages                          | Faible coût  | Fiabilité performantes à froid      | Excellente énergie et puissance       | Très mince                     |
| Inconvénients                      | Faible énergie, mort subite                                  | Relativement basse énergie toxicité | Sécurité des gros éléments et le coût | Performance à froid et le coût |
| Coût (euro/h)                      | De 200 à 250(pour les étanches)<br>200(pour les tubulaires)  | 600                                 | 2000                                  | De 1500 à 2000                 |

**Tab.II.2 Caractéristiques techniques des principaux accumulateurs**

## II.3.2 Stockage à court terme

### II.3.2.1 Les super condensateurs

#### a) Généralités sur les super condensateurs [20]

Un super-condensateur appelé aussi super-capacité ou condensateur à double couche, stocke l'énergie de manière électrostatique en polarisant une solution électrolytique.

L'histoire de ce composant débute avec la découverte du phénomène capacitif par Hermann Von Helmholtz en 1853. Les premiers super-condensateurs étaient commercialisés par NEC dans les années 70, sous la dénomination de super-capacitor. [23]

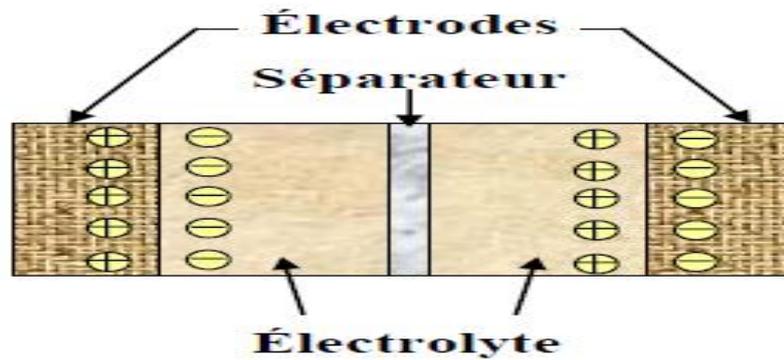
Avec les super-condensateurs, il est possible d'obtenir des capacités surfaciques élevées et donc d'obtenir des valeurs très élevées de capacité. Ceci fait des super-condensateurs des éléments potentiels de stockage d'appoint, ces dernières peuvent atteindre des tensions et des courants de sortie élevés en fonction de leurs structures série-parallèle de plusieurs cellules et en fonction de leurs matériaux. Le (Tab II.3) donne une classification des super-condensateurs, ils se différencient par leurs matériaux d'électrodes et leurs électrolytes.

| Electrode                      | Charbon actif                 |           | Matériau métallique                              | Polymère conducteur |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------|--|---------------------|
| 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      |

**Tab.II.3 Les différents types de super condensateurs [23]**

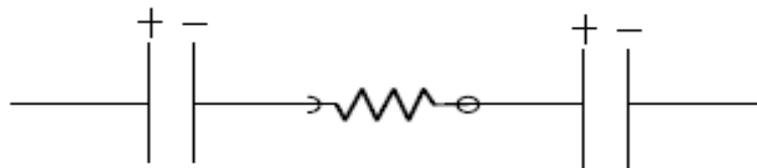
#### b) Structure et fonctionnement des super condensateurs [24]

La structure élémentaire d'un super condensateur est constituée par des collecteurs de courant en aluminium, des électrodes généralement en charbon actif imprégné dans un zéro électrolyte organique ou aqueux. Un séparateur est intercalé entre les deux électrodes pour les isoler (Fig. II.5). L'assemblage de l'ensemble est réalisé comme pour les condensateurs classiques.



**Fig.II.5** Structure d'un super condensateur.

Un super condensateur peut être schématisés par deux capacités représentatives des Charges stockées connectées par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte (**Fig. II.3.**).[25]



**Fig.II.6** Schéma représentatif d'un super condensateur.

### c) Principe de fonctionnement des super condensateurs [26]

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 des 4 états différents du composant (déchargé, en charge, chargé, en décharge) :

#### ➤ Etat 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 ( $q_{ion}$ ).  $Q_{elet}$   $q_{ion}$  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 de chaque couple électrode/électrolyte. Cette accumulation de

charges correspond à la double couche électrochimique (son épaisseur est de quelques nanomètres). (Fig. II.7)

➤ **Etat 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. (Fig. II.8)

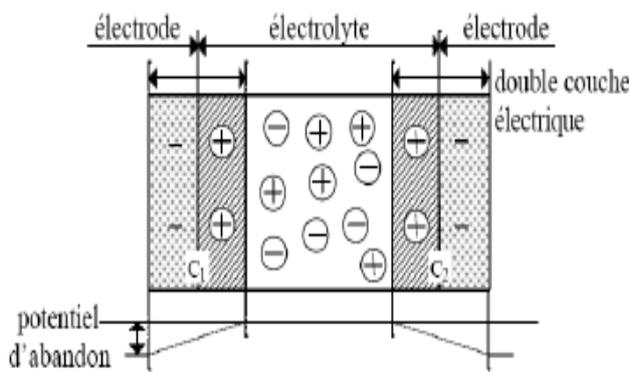


Fig.II.7 état déchargé.

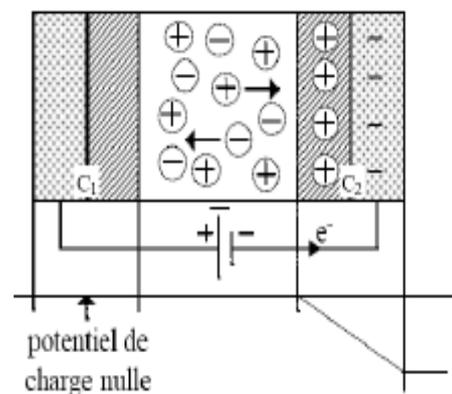


Fig.II.8 état en charge.

**II.4 Comparaison entre les batteries et le super condensateur**

Les batteries et les super-condensateurs ont des caractéristiques électriques Extrêmement différentes.

|                               | <b>Super-condensateur</b> | <b>Batterie</b>    |
|-------------------------------|---------------------------|--------------------|
| Temps de charge t             | 1s<t<30s                  | 1 heure<t<5 heures |
| Temps de décharge             | 1s<t<30s                  | 0.3 heure<3 heures |
| Rendement charge/décharge     | entre 85% et 98%          | entre 70% et 85%   |
| Densité de puissance (W/kg)   | 10 <sup>4</sup>           | <10 <sup>3</sup>   |
| Densité d'énergie (Wh/kg)     | entre 1 et 10             | entre 10 et 100    |
| Durée de vie nombre de cycles | 10 <sup>6</sup>           | 10 <sup>3</sup>    |

Tab.II.4 comparaison entre le super-condensateur et la batterie

D'après les données du tableau ci-dessus, il est clair que le super-condensateur est un élément potentiel pour le stockage de l'énergie embarquée comme source pour la demande de fortes puissances pendant quelques secondes. Le super-condensateur a déjà pris place dans la voiture pour la récupération d'énergie et pas seulement dans les véhicules électriques. En effet, les super-condensateurs sont particulièrement efficaces pour répondre à ce besoin. Capable de se charger et se décharger très rapidement, le super-condensateur se présente comme une batterie ultra-rapide et fiable. [20]

## II.5 Evolution des systèmes de stockage dans les véhicules électriques

Le développement des véhicules électriques dépend directement de celui des systèmes de stockage embarqués. Le vrai challenge s'articule autour de l'équilibre entre coût et performance de ces systèmes. L'usage des véhicules électriques est de plus en plus pertinent compte tenu de leurs évolutions économique et technologique.

### II.5.1 Problématiques liées aux batteries

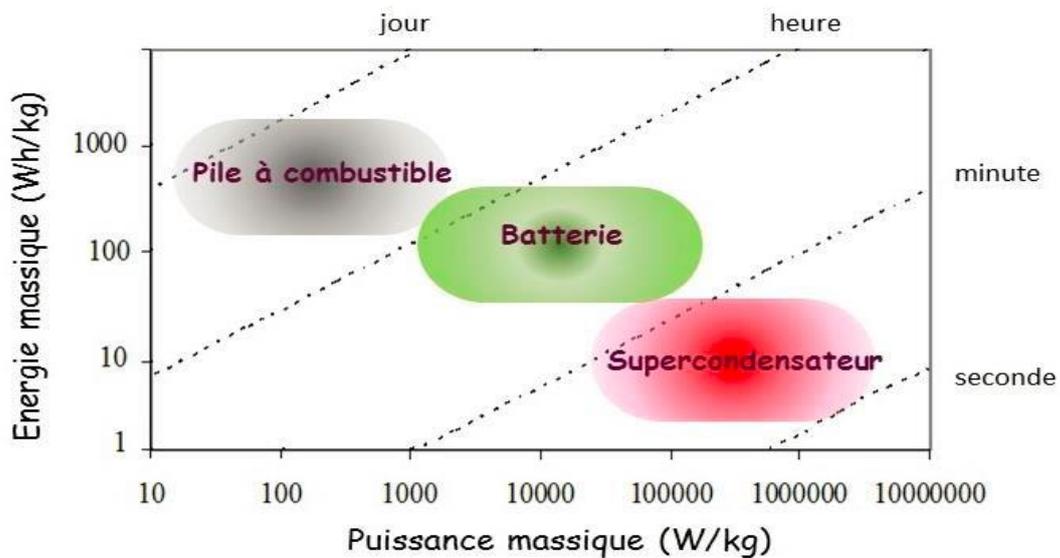
Le large déploiement des véhicules électriques est lié essentiellement à l'intégration d'un système de stockage performant. Les principales limites actuelles des batteries s'articulent autour de son coût de possession, de sa durée de recharge, de sa sûreté de fonctionnement et de son comportement à température froide.

#### A) Coût

Le coût élevé des batteries reste un obstacle majeur face à l'utilisation des véhicules électriques tant qu'il est concurrencé par le coût des carburants des véhicules thermiques. Le seuil de rentabilité, exprimé en nombre de kilomètres parcourus, peut nous permettre de connaître à partir de quel kilométrage un véhicule électrique peut compenser le coût d'exploitation d'un véhicule thermique [27].

#### B) Autonomie

L'autonomie d'un dispositif de stockage de l'énergie électrique est essentiellement liée à sa puissance admissible (en W) et à son énergie disponible (en Wh). Le diagramme de *Ragone* est souvent utilisé pour comparer les particularités des différents éléments de stockage de l'énergie. Comme nous l'observons sur la **Figure II.9**, les piles à combustible ont une faible puissance massique mais « une énergie massique » assez importante. Les supercondensateurs possèdent une puissance massique importante mais une énergie massique plutôt faible. Les batteries se placent entre ces deux composants [28].



**Fig.II.9 Diagramme de Ragone**

### C) Durée de recharge

La durée de recharge des batteries est liée principalement à leur énergie spécifique. Ce temps de recharge dépend du mode de recharge qui se caractérise entre autres par l'intensité du courant appliqué. En fait, plus le courant est faible plus la durée de recharge est longue. Cependant, des recharges rapides peuvent affecter leur durée de vie. De plus, elles peuvent aussi perturber le réseau électrique dans le cas de recharges simultanées d'un très grand nombre de véhicules [29]. Nous pouvons distinguer trois modes de recharge des batteries pour les véhicules électriques.

- Mode de recharge sur prise domestique
- Mode de recharge sur borne de recharge

### D) Comportement à température froide

A basse température, la tension de la batterie chute rapidement et sa résistance interne augmente. Ainsi, des exemples de dysfonctionnement ont été notés pour des valeurs négatives de température, par exemple dans les batteries lithium-ion de téléphones [30]. Par ailleurs, l'exploitation des batteries à basses températures peut les dégrader. Un dépôt de lithium « lithium plating » peut se former et des dendrites peuvent provoquer des courts-circuits internes pouvant endommager la cellule. Le fonctionnement de la batterie à basse température peut donc causer des problèmes de sécurité [31].

## II.6 Architectures d'association batterie / supercondensateurs

Différentes architectures d'association ont été envisagées dans la littérature. Le choix entre ces architectures se base sur un compromis entre complexité, coût de conception, et performance [32]. Généralement, une architecture à moindre coût est intéressante pour les industriels, néanmoins certaines architectures plus flexibles et plus complexes offrent des performances plus importantes. Pour toutes les architectures que nous allons présenter, on remarque la présence d'un convertisseur DC/AC permettant d'adapter la tension du bus continu à la machine électrique à courant alternatif du véhicule. D'après la littérature [33], l'architecture d'association en parallèle offre plus d'avantages par rapport à la liaison en série en termes de rendement et de fiabilité du système global. Dans ce contexte, nous allons focaliser notre étude sur cette topologie parallèle, pour laquelle les deux sources d'énergie (batterie et supercondensateurs) sont connectées simultanément au bus continu ce qui permet d'avoir plus de tolérance en cas de défauts. Plusieurs configurations en parallèle existent. Pour l'architecture en parallèle sans convertisseur (**Figure II.10**), on associe les supercondensateurs avec la batterie directement au bus continu. La simplicité de cette configuration permet d'avoir un coût de conception faible, par contre elle offre des performances assez limitées compte tenu du manque de flexibilité. En fait, la tension du bus continu est stabilisée par la batterie vu l'absence de convertisseur d'adaptation de tension, ce qui empêche le contrôle direct des courants dans les systèmes de stockage en cas de forte demande de puissance ou de court-circuit de la charge par exemple [33].

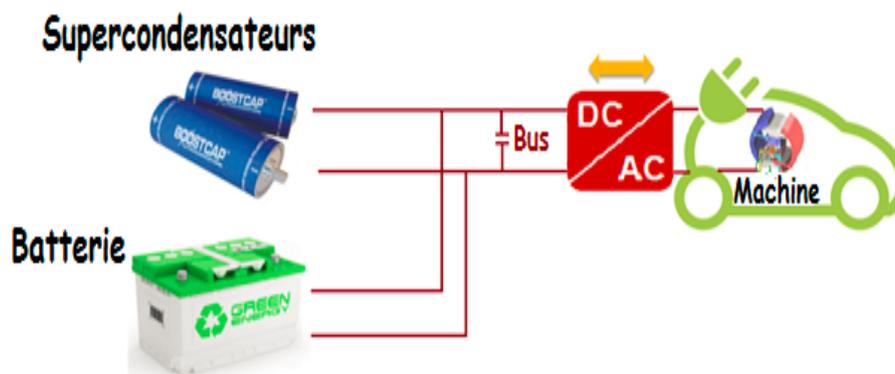
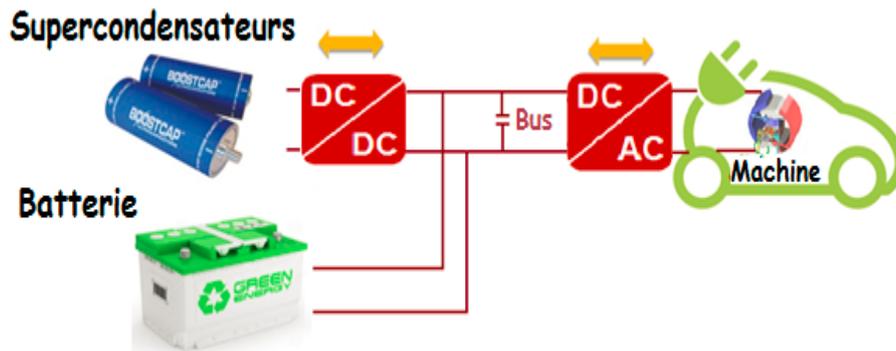


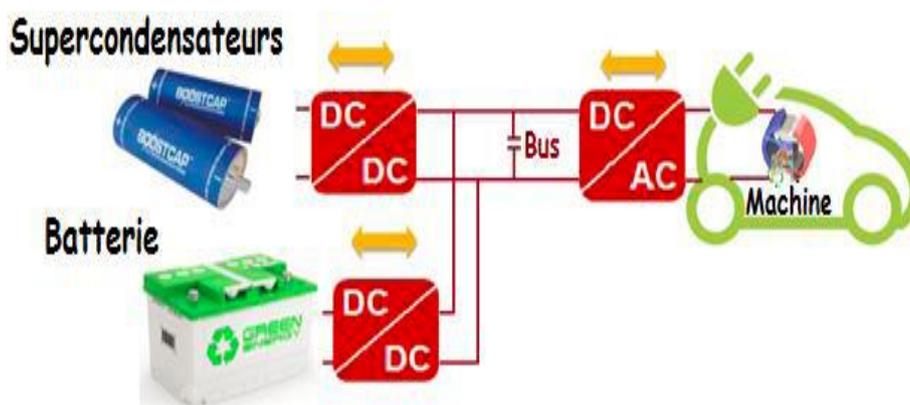
Fig.II.10 Architecture en parallèle sans convertisseur

Sur la **Figure II.11**, l'association en parallèle des supercondensateurs avec la batterie est effectuée par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC. Le rôle de celui-ci est de contrôler le flux de puissance du côté des supercondensateurs ce qui permet plus de flexibilité donc plus de performance. Néanmoins, le coût de conception est assez élevé par rapport à l'architecture sans convertisseur et la simplicité d'implémentation est moindre [34].



**Fig.II.11** Architecture en parallèle avec convertisseur côté supercondensateurs

L'architecture avec deux convertisseurs présentée sur la **Figure II.12** contient deux convertisseurs DC/DC liés à chaque source. Cette configuration offre au système global le maximum de degrés de liberté au niveau du contrôle des flux de puissance. La flexibilité de cette architecture peut conduire à des performances importantes mais elle est complexe au niveau implémentation et son coût de conception est élevé [35].



**Fig.II.12** Architecture en parallèle avec deux convertisseurs

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisés tout d'abord sur l'Evolution des systèmes de stockage dans les véhicules électriques. Nous avons explicité les définitions et le principe de fonctionnement des batteries et supercondensateur. Ensuite, nous avons décrit l'intérêt de l'hybridation entre les batteries et super condensateurs.

Les supercondensateurs représentent une source de puissance capable de fournir des pics de puissance au moment opportun. Etant donné la complémentarité entre batterie et supercondensateurs, cette hybridation apporte des solutions réalistes à la problématique de limitation de performances des systèmes de stockage dans les véhicules électriques. Une étude a été menée sur l'architecturales de l'association de deux sources de stockage (batterie et supercondensateurs) est effectuée. Diverses techniques de gestion d'énergie ont été évaluées et comparées ce qui a permis de choisir la meilleure utilisable dans notre cas.



---

# Chapitre III

## Modélisation du système étudié

---



### III.1 Introduction

A travers ce chapitre, nous présenterons en premier temps la modélisation des éléments formant la chaîne de traction, à savoir : la source principale d'alimentation ; qui comprend la pile à combustible et les éléments de stockage (batterie et super condensateur), La modélisation et la simulation ont été effectuées sous le logiciel MATLAB/Simulink. Ensuite on va enchaîner par le dimensionnement de la pile à combustible et les éléments de stockage (batterie et super condensateur).

### III.2 Modélisation de la pile à combustible

Les modèles mathématiques offrent un outil notable et indispensable pour approuver la conception et la performance des piles à combustible. Deux approches principales de modélisation se présentent dans la littérature. La première approche inclut les modèles structuraux, qui visent à simuler le transfert de chaleur, le transport de masse et les phénomènes électrochimiques produits dans les piles à combustible. La deuxième, cherche à prédire le comportement de la pile en fonction de ses conditions de fonctionnement, et de celles de la charge. La modélisation en statique est basée sur l'expression de la tension en fonction du courant débité partant de la tension idéale issue de l'équation de Nernst où apparaissent les conditions de fonctionnement en température, pression et composition du gaz.

#### III.2.1 Caractéristique électrique de la pile à combustible

Le potentiel thermodynamique théorique de la pile à combustible PEMFC  $H_2/O_2$  à  $25^\circ C$  et à 1atm est de l'ordre de 1,23 V, mais le potentiel réel ( $E_{PAC}$ ) de la cellule décroît par rapport au potentiel thermodynamique d'équilibre quand le courant débite, cette déviation à la valeur du potentiel de Nernst, est due aux pertes irréversibles appelées polarisations  $V$  (surtensions), par conséquent, l'expression de la tension d'une cellule s'exprime comme suit :

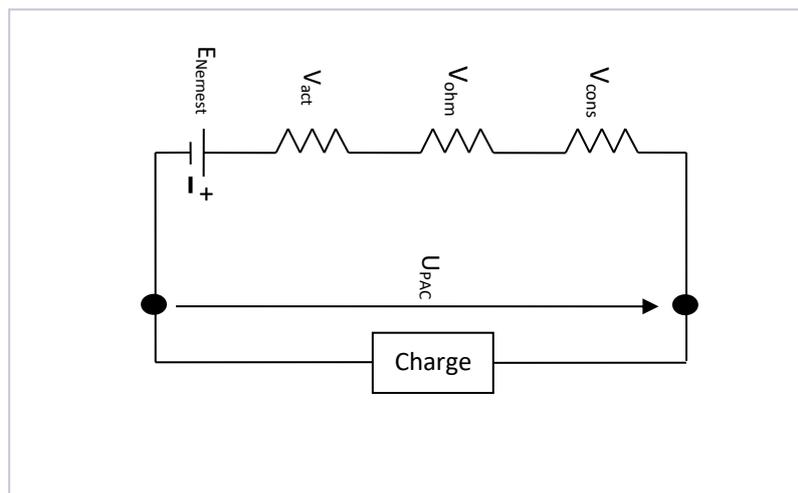


Fig.III.4 schéma équivalent d'une PEMFC

$$U_{pac} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (III. 1)$$

$V_{act}$ : Polarisation d'activation.

$V_{ohm}$ : Polarisation ohmique.

$V_{conc}$ : Polarisation de concentration.

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} \times (T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \times [\ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}^*)] \quad (III. 2)$$

$T$ : Température opératoire absolue de la pile (K).

$P_{H_2}^*$ : Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm).

$P_{O_2}^*$ : Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm).

### a) Polarisation d'activation

Les pertes d'activations sont dues au démarrage des réactions chimiques, ils sont essentiellement dus aux réactions cathodiques.

La relation entre les pertes d'activations et la densité de courant est exprimée dans l'équation suivante :

$$V_{act} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \times T + \varepsilon_3 \times T \times \ln(C_{O_2}^*) + \varepsilon_4 \times T \times \ln(I_{PAC}) \quad (III. 3)$$

$I_{PAC}$ : courant de fonctionnement de la pile (A)

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ : sont des coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de la pile à combustible PEMFC,

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{\left(5.08 \times 10^6 \times e^{-\left(\frac{498}{T}\right)}\right)} \quad (III. 4)$$

$C_{O_2}^*$ : représente les concentrations de l'oxygène ( $\text{mol/cm}^3$ ) dissout dans un film d'eau à l'interface de la membrane gaz/liquide sur la surface catalytique de la cathode, elle est exprimée en fonction de sa pression par la loi de Henry.

Etant donné qu'on utilise de l'oxygène pur, donc :

$$P_{O_2}^* = P_{cath} \times (1 - \chi_{H_2O}^{Sat}) \quad (III. 5)$$

$P_{cath}$  : La pression de l'oxygène à la cathode

$\chi_{H_2O}^{Sat}$  : La fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié et supposée  $\approx$  à 50 %, on obtient alors :

$$P_{O_2}^* = P_{cath} \times \left(\frac{1}{2}\right) \quad (III. 6)$$

A l'anode, on utilise de l'hydrogène pur, qui ne contient pas du monoxyde de carbone.

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \chi_{H_2O}^{Sat}\right) \quad (III. 7)$$

$P_{anode}$  : Est la pression de l'hydrogène à l'anode,

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times \left(\frac{3}{4}\right) \quad (III. 8)$$

### b) Polarisation ohmique

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 :

$$V_{ohm} = I_{PAC} \times (R_M + R_C) \quad (III. 9)$$

$R_C$ : Est la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons,  $R_M$ : est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons, elle est calculée à partir de la relation suivante :

$$R_M = \frac{l \times r_M}{A} \quad (III. 10)$$

Où  $l$  est l'épaisseur de la membrane ( $\mu m$ ),  $r_M$  est la résistance spécifique de la membrane, obtenue par la relation suivante :

$$r_M = \frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303}\right)^2 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)^{2.5}\right]}{\left[\delta_{H_2O}/SO_3^- - 0.634 - 3 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)\right] \times \exp\left[4.18 \times \left(\frac{T - 303}{T}\right)\right]} \quad (III. 11)$$

Le terme  $\frac{181.6}{(\delta_{H_2O}/SO_3^- - 0.0634)}$  représente la résistance spécifique de la membrane ( $\Omega.cm$ ) à  $I_{PAC}=0$  et à une température de 30 °C ( $T = 303$  K). Le terme exponentiel au dénominateur est le facteur de correction de la température si cette dernière n'est pas à 30 °C.

$\delta_{H_2O}/SO_3^-$  Est la teneur en eau dans la membrane, admettant une valeur minimale et maximale respectivement de 0 et de 22. Est A la surface active de la pile (cm)<sup>2</sup>.

En remplaçant les relations, l'expression de la polarisation ohmique devient :

$$V_{ohm} = \frac{I_{PAC}}{A} \left[ \frac{1816 \times \left[ 1 + 0.03 \times \left( \frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0.062 \times \left( \frac{T}{303} \right)^2 \times \left( \frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[ \delta_{H_2O}/SO_3^- - 3 \times \left( \frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \times \exp \left[ 4.18 \times \left( \frac{T-303}{T} \right) \right]} \times l + A \times R_c \right] \quad (III. 12)$$

### c) Polarisation de concentration

Les chutes de tension par concentration résultent d'un manque de réactifs. Lorsque la densité de courant devient élevée la diffusion des gaz dans les électrodes n'est plus assez rapide pour entretenir la réaction. Ces pertes sont données par la relation suivante :

$$V_{conc} = -B \left( 1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (III. 13)$$

Où B est une constante empirique qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement, J est la densité de courant du fonctionnement permanente (A/cm<sup>2</sup>),  $J_{max}$  est la densité de Courant maximale.

Par conséquent, la tension ( $E_s$ ) de (n) piles unitaires reliées en série formant un assemblage :

$$E_s = n \times E_{pac}$$

On remplace les expressions des pertes dans l'équation (II.1), et on obtient le potentiel réel global de la pile à combustible PEMFC, par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} U_{PAC} = & 0.2817 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.3081 \times T \left[ \ln \left( \frac{3}{4} P_{anode} \right) + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1}{2} P_{cath} \right) \right] \\ & + \left[ 2.86 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-4} \ln(A) + 4.3 \times 10^{-5} \ln \left( \frac{0.75 P_{anode}}{1.091 \times 10^6 \times \exp \left( \frac{77}{T} \right)} \right) \right] T + 7.6 \\ & \times 10^{-5} \ln \left( \frac{0.5 P_{cath}}{5.08 \times 10^6 \times \exp \left( -\frac{498}{T} \right)} \right) - 1.93 \times 10^{-4} T \times \ln(I_{PAC}) \\ & - I_{PAC} \left[ \frac{1.816 \left[ 1 + 0.03(I_{PAC}) + 0.062 \left( \frac{T}{303} \right)^2 \left( \frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{A \left[ \delta_{H_2O}/SO_3^- - 0.0634 - 3 \left( \frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \exp \left[ 4.18 \left( \frac{T-303}{T} \right) \right]} l + R_c \right] \\ & + B \left( 1 + \frac{J}{J_{max}} \right) \end{aligned} \quad (III. 14)$$

III.2.2 Présentation de schéma bloc de la pile à combustible

La figure suivant représente le schéma bloc générale de la pile à combustible réaliser sur sous Matlab/simulink.

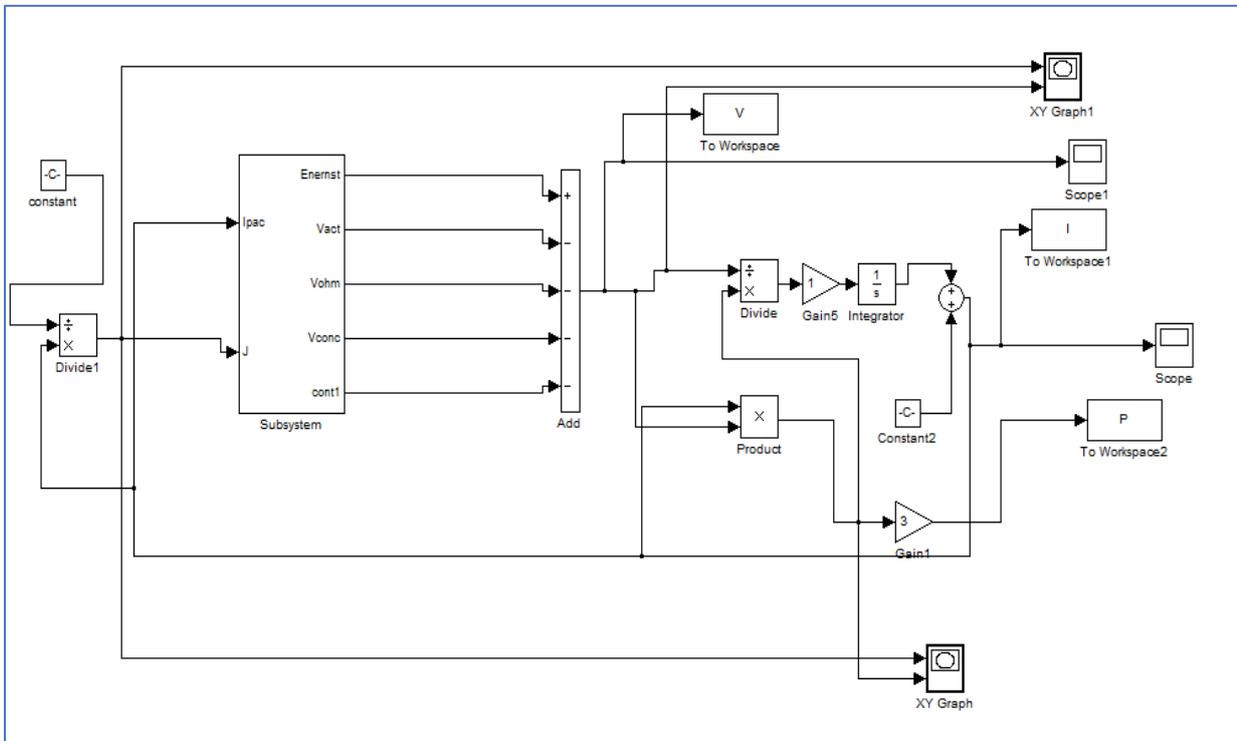


Fig.III.5 schéma bloc de la pile à combustible

Les deux graphes illustrés sur la Fig.III.6 représente les courbes de polarisation d’une cellule de pile à combustible PEMFC (tension en fonction de la densité de courant et puissance en fonction de la densité de courant)

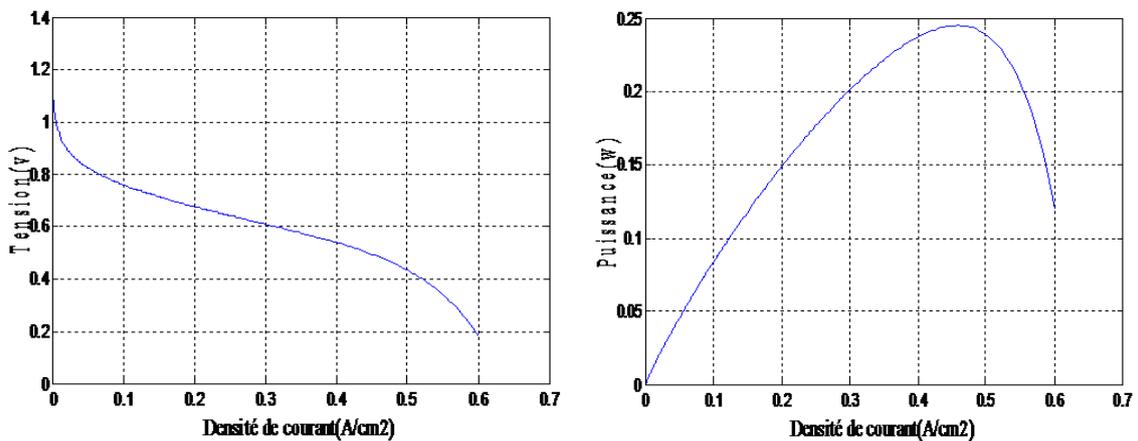


Fig.III.7 Courbe de polarisation d’une cellule de pile à combustible PEMFC

### III.3 Modélisation des dispositifs de stockage

#### III.3.1 Batterie

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. Notre choix s'est porté sur le modèle dit «CIEMAT» relativement complet, malgré quelques imperfections comme le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge à un cycle de décharge, ce modèle est basé sur le schéma suivant (Fig.III.4) où la batterie est décrite par seulement deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres. [36] [37]

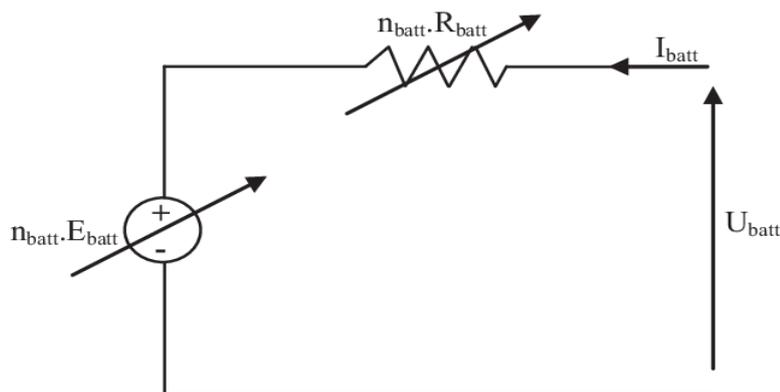


Fig.III.4 schéma équivalent de la batterie CIEMAT

Dans ce modèle, pour  $nb$  cellules en série, la tension aux bornes de la batterie est donnée ci-dessous:

$$U_{batt} = n_{batt} \cdot E_{batt} \pm n_{batt} \cdot R_{batt} \quad (\text{III. 15})$$

Où  $U_{batt}$  et  $I_{batt}$  sont la tension et le courant de la batterie,  $E_{batt}$  est la f.e.m. (force électromotrice) d'une cellule de la batterie et  $R_{batt}$  sa résistance interne.

##### a) Modélisation de la capacité

Le modèle de la capacité  $C_{bat}$  donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie en

Fonction du courant moyen de décharge  $I_{bat}$ ,  $oy$ . Cette capacité est donnée par :

$$C_{batt} = \frac{1.67C10}{1+0.67 \times \left(\frac{I_{batt,moy}}{I10}\right)^{0.9}} (1 + 0,005\Delta T) \quad (III. 16)$$

Avec :

**I10** : Courant nominal de la batterie (en A) donne par le constructeur

**C10** : Capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge a courant constant

Durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur et elle est telle que :

$$C10 = 10 \times I10 \quad (III. 17)$$

$\Delta T$ : L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante de 25°C. Il est supposé identique pour tous les éléments de la batterie.

L'état de charge de la batterie EDC est fonction de la capacité  $C_{batt}$  et de la quantité de charge manquante à la batterie Qm. L'évolution temporelle de cette dernière, dépend du mode de fonctionnement de la batterie, elle est définie par :

$$Qm = I_{batt} \times t \quad (III. 18)$$

Ou t est la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant  $I_{batt}$ . L'expression de l'état De charge de la batterie EDC est donnée par :

$$EDC = 1 - \frac{Qm}{C_{batt}} \quad (III. 19)$$

### a.1) Equations de la tension de décharge

En régime de décharge, la f.e.m. et la résistance interne sont déterminées par :

$$E_{batt\_déch} = 1.965 + 0.12 EDC \quad (III. 20)$$

$$R_{batt\_dech} = R_{batt} + \frac{1}{C10} \left( \frac{4}{1+|I_{bat}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} \right) \quad (III. 21)$$

D'où l'expression de la tension de batterie, pour ce régime de décharge :

$$V_{batt\_déch} = n_{batt} \cdot E_{batt\_déch} - n_{batt} \cdot R_{batt\_déch} |I_{batt}| \quad (III.22)$$

$$V_{batt\_déch} = n [1.965 + 0.12 EDC] - n \frac{|I_{batt}|}{C10} \left( \frac{4}{1+|I_{batt}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \quad (III.23)$$

### a.2) Equations de la tension de charge

En régime de charge et avant l'apparition du phénomène de "Gassing" (dégagement gazeux d'hydrogène et d'oxygène), la f.e.m. et la résistance interne sont déterminées par :

$$E_{batt\_char} = 2 + 0.16 EDC \quad (III.24)$$

$$R_{batt\_char} = R_b = \frac{1}{c_{10}} \left( \frac{6}{1+(I_{bat})^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (III.25)$$

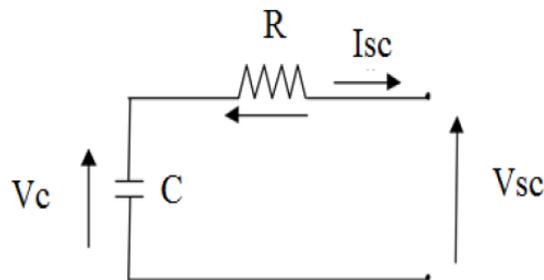
D'où l'expression de la tension de la batterie avant la surcharge

$$V_{b\_char} = n_{batt} \cdot E_{batt\_char} + n_{batt} \cdot R_{batt\_char} I_{bat}$$

$$V_{b\_char} = n [2 + 0.16EDC] + n \frac{I_{bat}}{I_{10}} \left( \frac{6}{1+(I_{bat})^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (III.26)$$

### III.3.2 Super condensateur

Le modèle des Super condensateurs se compose d'un condensateur idéal connecté en série avec une résistance (**Fig.5**). Les valeurs de la capacité du condensateur CSC et de la résistance RSC interne sont supposées constantes. La tension à vide  $V_C$  du Super Condensateur est l'image de son état de charge (SOC : state of charge). Des modèles avec plusieurs « branches RC » et des valeurs de capacité fonction de la tension du SC sont aussi proposés dans la littérature. [38] [39]



**Fig.III.5** Schéma électrique équivalent d'un super condensateur.

La tension aux bornes d'un super condensateur est donnée par :

$$V_{sc}(E_{sc}, I_{sc}) = E_{sc} - R_{sc} \cdot I_{sc} \quad (\text{III.27})$$

La puissance est définie par :

$$P_{sc} = V_{sc} \times I_{sc} \quad (\text{III.28})$$

La convention utilisée est :

$P_{sc} > 0$  en traction (décharge du super condensateur).

$P_{sc} < 0$  en freinage (charge du super condensateur).

Comme la batterie, le condensateur se comporte comme un intégrateur de courant. La tension à vide  $V_c$  est calculée de la manière suivante :

$$V_c = V_c(0) - \frac{1}{C} \int_0^t I_{sc}(u) du \quad (\text{III.29})$$

L'énergie contenue dans le **SC** ESC est en fonction de sa tension à vide  $V_c$ . De ce fait, l'énergie maximale  $E_{scmax}$  est obtenue pour la tension à vide maximale  $V_{cmax}$ .

$$E_{sc}(V_c) = \frac{1}{2} \times C \times V_c^2 \quad (\text{III.30})$$

Par définition, l'état de charge SOC correspond au rapport entre l'énergie contenue dans le Super condensateur et l'énergie maximale admissible :

$$SOC = \frac{E_{sc}(t)}{E_{scmax}} \quad (\text{III.31})$$

Pour satisfaire aux besoins en puissance et en énergie d'une application donnée, un assemblage de plusieurs super-condensateurs est utilisé. Lorsque  $N$  super-condensateurs sont connectés en série, la tension du pack USC et la capacité équivalente  $C_{sc}^{eq}$  sont données par :

$$USC(E_{sc}, I_{sc}) = V_{sc}(E_{sc}, I_{sc}) \cdot N \quad (\text{III.32})$$

$$C_{sc}^{eq} = \frac{C_{sc}}{N} \quad (\text{III.33})$$

#### III.4 Hacheur parallèle réversible en courant

Le convertisseur de puissance est nécessaire comme interface entre les sources secondaire d'énergie électrique et le bus continu. L'intérêt d'utiliser ce type d'interface est d'adapter les niveaux de tension des sources au bus continu. En outre, celui-ci contrôle l'énergie fournie ou absorbée par les sources en fonction de la stratégie de gestion d'énergie choisie. Le convertisseur doit être donc réversible en courant.

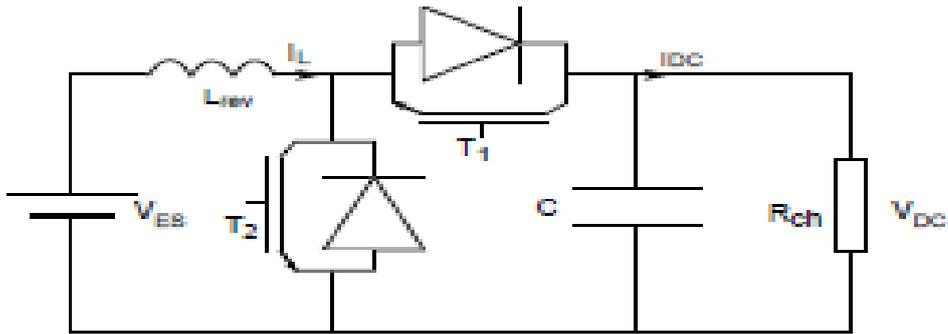


Fig.III.6 Hacheur parallèle réversible en courant

Le comportement du hacheur réversible en courant en régime permanent est décrit par les équations suivantes :

$$L_{rev} \frac{di_L}{dt} = V_{ES} - u_{rev} \cdot V_{DC} \quad (III.34)$$

$$C \frac{dV_{DC}}{dt} = i_L \cdot u_{rev} - \frac{V_{DC}}{r} - i_{DC} \quad (III.35)$$

Où :  $L_{rev}$  est l'inductance du hacheur réversible est,  $i_L$  et  $V_{ES}$  sont le courant et la tension de l'élément de stockage (la batterie).  $r$  une résistance connecte en parallèle au bus DC qui représente des divers pertes. Notons aussi que la commutation des transistors est complémentaire :  $u_{rev}$  est l'ordre de commande du transistor  $T_1$   $\overline{u_{rev}}$  celle du transistor  $T_2$ .

On obtient le modèle moyen en substituant  $u_{rev}$  avec  $\alpha_{rev}$ .

### III.5 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

La MSAP est régi par 3 types d'équations : équation magnétique (relation entre flux et courants) ; équation électrique (relation entre courants et tensions) et équation mécanique (conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique). Nous présentons ces équations d'abord dans le repère triphasé lié au stator et ensuite dans le repère diphasé de Park dans le but de simplifier leur formulation. [40]

#### a) Modélisation dans le repère triphasé

##### a.1) Equations Magnétiques

Le flux total produit au stator  $\Phi_s$  est la somme du flux propre créé au stator par les courants  $i$  traversant les enroulements statoriques et du flux produit par le rotor :

$[\Phi_{ss}] = [\Phi_{ss}] + [\Phi_{sf}]$ . Le flux propre produit dans les enroulements statoriques s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$[\Phi_{ss}] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Où  $[\Phi_{is}]$  est le flux totalisé induit dans l'enroulement statorique  $i$ ,  $L_{ii}$  est l'inductance propre de la phase statorique  $i$ , et  $M_{ij}$  est l'inductance mutuelle entre les phases statoriques  $i$  et  $j$ .

Dans les machines à pôles saillants, la matrice des inductances est fonction de l'angle électrique  $P\theta$  où  $p$  est le nombre de paires de pôles et est  $\theta$  la position mécanique du rotor. Ces inductances s'écrivent au sens de la théorie du premier harmonique :

$$\begin{cases} L_{aa} = L_0 + L_2 \cos(2p\theta) & M_{ab} = M_{ba} = M_0 + L_2 \cos\left(2p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{bb} = L_0 + L_2 \cos\left(2p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{bc} = M_{cb} = M_0 + L_2 \cos(2p\theta) \\ L_{cc} = L_0 + L_2 \cos\left(2p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{ac} = M_{ca} = M_0 + L_2 \cos\left(2p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

Dans le cas où la machine est sans saillance, nous remplaçons l'inductance  $L_2$  par zéro et, compte tenu que la somme des courants statorique est nulle à tout instant, nous aurons :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Où  $L = L_0 - M_0$  : l'inductance cyclique des enroulements statoriques. Si nous notons  $\Phi_f$  le flux maximal produit par le rotor dans un enroulement du stator, le flux créé au stator par le rotor s'écrira comme suit :

$$[\Phi_{sf}] = \begin{bmatrix} \Phi_{af} \\ \Phi_{bf} \\ \Phi_{cf} \end{bmatrix} = \Phi_f \begin{bmatrix} \cos(p\theta) \\ \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

### a.2) Équations électriques

Les enroulements des trois phases étant fixes, la rotation de l'aimant (inducteur) plonge les enroulements dans un champ d'induction variable et provoque l'apparition d'une tension induite de mouvement (fém.) aux bornes de chaque phase, à laquelle se superposent les tensions induites de transformation par les inductances des phases. La tension induite  $e_i$  dans la phase  $i$  est donnée par la variation du flux totalisé correspondant. Dans le cas où le moteur est sans saillance les tensions aux bornes des trois phases statoriques s'écrivent selon la loi d'Ohm :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a e_a = \Omega p \phi_f \sin(p\theta) \\ V_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b e_a = \Omega p \phi_f + \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c e_a = \Omega p \phi_f + \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{array} \right. \quad (\text{III.37})$$

Où  $v_i$ ,  $i_i$ , et  $e_i$  sont la tension, le courant et la f.é.m. dans la phase  $i$ .  $R$  et  $L$  sont la résistance et  $L$ 'inductance cyclique par phase,  $p$  est le nombre de paires de pôles.  $\Omega$  et  $\theta$  sont respectivement la vitesse et la position mécaniques.

### a.3) Equation Mécanique

La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique dans les machines synchrones est régie par la relation suivante déduite du théorème des moments :

$$C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f_v \Omega \quad (\text{III.38})$$

Où  $J$  est l'inertie du rotor, la vitesse mécanique de rotation du rotor,  $C_m$  le couple moteur fourni par le stator,  $C_r$  le couple résistant de la charge et  $f_v$  le coefficient de frottement visqueux.

L'expression de  $C_m$  est obtenue à partir d'un bilan énergétique faisant apparaître la puissance électromagnétique  $P_m = \sum_{i=a,b,c} e_i i_i$  transformée en puissance mécanique  $C_m$ . Ainsi :

$$C_m = \frac{1}{\Omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (\text{III.39})$$

Dans le cas où la machine est sans saillance l'expression du couple se simplifie et sera :

$$C_m = -p\phi_f \left[ i_a \sin(p\theta) + i_b \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (\text{III.40})$$

Le modèle des machines électriques dans un repère conventionnel ( $a, b, c$ ) s'écrit en fonction des paramètres qui sont variables dans le temps.

Cette circonstance compliquerait considérablement l'étude des régimes transitoires des machines ainsi que l'élaboration des lois de commande. Pour remédier à ce problème, nous opérons un changement de variables sur l'ensemble des grandeurs. Ce changement consiste à rapporter les équations électriques statorique et rotoriques à des axes perpendiculaires notés  $d$  et  $q$  (repère diphasé de Park). Ceci conduit à la simplification du modèle.

**b) Mise en équation de la machine synchrone à aimant permanent en diphasé**

La mise en équation des moteurs triphasés aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu la non linéarité des systèmes d'équations. On utilise alors une transformation mathématique qui permet de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants qui s'appelle transformation de Park.

**b.1) Modélisation dans le repère diphasé (d,q )**

Le repère de Park est un repère tournant avec le rotor. Il est composé de deux axes perpendiculaires : axe direct « d » et axe en quadrature « q ». La transformation du repère (a,b,c) au repère de Park est possible grâce à une matrice de passage P(θ) où θ est l'angle entre les deux axes a et d :

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

| Equations Magnétiques       | Equations Electriques   | Equations Mécaniques                                 |
|-----------------------------|---|--|
| $\Phi_d = L_d I_d + \Phi_f$ | $V_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p\Omega L_q$                 | $C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f_v \Omega$      |
| $\Phi_q = L_q I_q$          | $V_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p\Omega L_d i_d + p\Omega_f$ | $C_m = \frac{3}{2} p i_q (\Phi_f - (L_d - L_q) i_d)$ |

Où  $L_d = L + 3/2 L_2$  ;  $L_q = L - 3/2 L_2$ . Ainsi, pour les moteurs sans saillance on a  $L_d = L_q = L$ .

**III.6 Stratégie de commande du la machine synchrone à aimant permanent**

**a) Commande Vectorielle**

Le principe de la commande vectorielle est identique à celui de la commande d'une machine à courant continu à excitation séparée. Il faut cependant se placer dans le repère de Park (d,q). La composante d'axe d du courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la

valeur du flux dans la machine. La composante d'axe q joue le rôle du courant d'induit et permet de contrôler le couple.

La stratégie consiste ainsi à imposer le courant  $i_q$  à une valeur correspondant au couple  $C_m$  souhaité tout en maintenant nul le courant  $i_d$  et ceci pour travailler à couple maximal. La régulation de la vitesse se fait en cascade en imposant la valeur souhaitée de la vitesse sur la voie q. Dans la suite on considèrera que  $L_d = L_q = L$ . [40]

**a.1) Contrôle du courant**

En faisant appel aux équations électriques du MSAP établies dans le repère de Park, on remarque que les équations de  $v_d$  et  $v_q$  sont couplées, on est donc amené à implanter un découplage qui consiste à l'introduction des termes de compensation  $e_d$  et  $e_q$ . On aura alors de nouvelles variables de commande  $v_d^*$  et  $v_q^*$  telles que chaque variable n'agisse que sur une seule des deux composantes du courant statorique ( $i_d$  ou  $i_q$ ). Dans ce cas, le système devient linéaire et simple à commander.

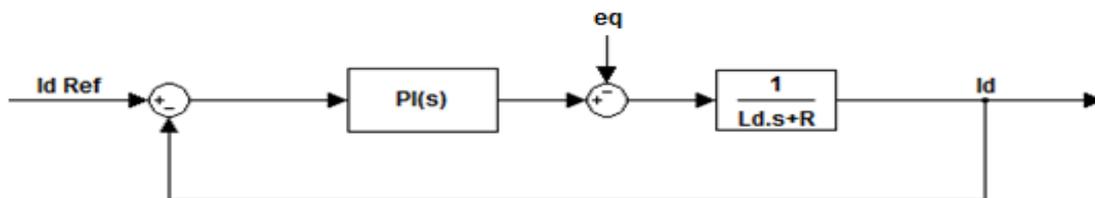
$$V_d^* = V_d + e_q = R_{i_d} + L_d \frac{di_d}{dt} \tag{III.40}$$

$$V_q^* = V_q + e_d = R_{i_q} + L_q \frac{di_q}{dt} \tag{III.41}$$

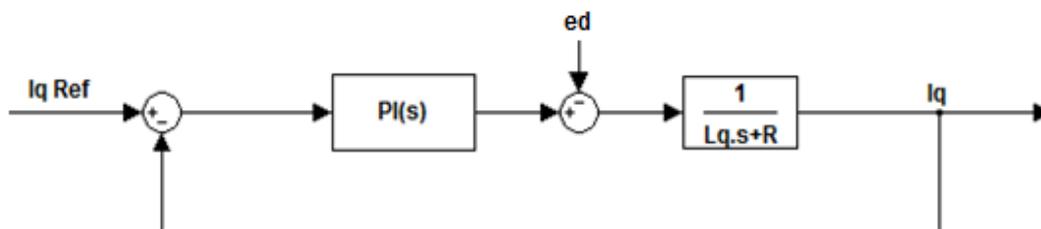
Puisque la dynamique du courant, selon les axes d et q, est un premier ordre, il est judicieux de choisir un correcteur de type proportionnel intégral de fonction de transfert :

$$G_{pi}(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \tag{III.42}$$

De plus, si  $L_d = L_q$  nous pouvons imposer les mêmes paramètres des régulateurs. Ainsi, les schémas bloc de la régulation des courants  $i_d$  et  $i_q$  seront les suivants :



**Fig.III.7 Schéma bloc de la régulation de Id**



**Fig.III.8 Schéma bloc de la régulation de Iq.**

Ainsi, la fonction de transfert en boucle fermée de courant s'écrit pour les deux voies

$$GBF_{i(p)} = \frac{\frac{K_p P+1}{K_i}}{\frac{L}{K_i} P^2 + \frac{R+K_p}{K_i} P+1} = \frac{\frac{K_p}{K_i} P+1}{\omega_{bp_i}^2 P^2 + \frac{2\varepsilon}{\omega_{bp_i}} P+1} \quad (III.43)$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique du 2<sup>nd</sup> ordre caractérisée par  $\xi$ ,  $\omega_{bp_i}$ . Les gains des régulateurs s'expriment en fonction de  $\xi$ ,  $\omega_{bp_v}$  et des paramètres électriques :

$$K_p = 2L\varepsilon\omega_{bp_i} - R \text{ et } K_i = L\omega_{bp_i}^2 \quad (III.44)$$

Par un placement judicieux des pôles de cette fonction de transfert nous pouvons obtenir la dynamique de courant souhaitée ( $\omega_{bp_i}$  pour déterminer la bande passante souhaitée et  $\xi$  pour le dépassement).

### a.2) Contrôle de la vitesse

Une fois la régulation de la boucle de courant validée, il est alors possible de mettre en place, en cascade, la boucle de vitesse souhaitée. La possibilité de mise en cascade se justifie par le fait que les constantes de temps électriques et mécaniques ont un rapport supérieur à 10 (cas de la majorité des moteurs électriques).

Le modèle mécanique s'écrit en faisant appel à l'équation mécanique :

$$C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f_v \Omega, \text{ avec } C_m = \frac{3}{2} P \Phi_f i_q = \frac{3}{2} K_e i_q \quad (III.44)$$

Ainsi, un correcteur de type PI suffit pour établir la boucle de vitesse avec la dynamique souhaitée.

En considérant le courant parfaitement régulé, la boucle de courant sera équivalente à un gain unitaire et la fonction de transfert de la boucle de vitesse s'écrit :

$$GBF_{v(p)} = \frac{\frac{K_p P+1}{K_i}}{\frac{J}{\frac{3}{2} K_e K_i} P^2 + \frac{f_v + K_p}{\frac{3}{2} K_e K_i} P+1} = \frac{\frac{K_p}{K_i} P+1}{\omega_{bp_v}^2 P^2 + \frac{2\varepsilon}{\omega_{bp_v}} P+1} \quad (III.45)$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique du 2<sup>nd</sup> ordre caractérisée par  $\xi$ ,  $\omega_{bp_v}$  et les gains du régulateur de vitesse s'écrivent en fonction de  $\xi$ ,  $\omega_{bp_v}$  et les paramètres mécaniques :

$$K_p = \frac{2}{3K_e} (2J\varepsilon\omega_{bp_v} - f_v) \text{ et } K_i = \frac{2}{3K_e} J\Omega\omega_{bp_v}^2 \quad (III.46)$$

On choisit une bande passante  $\omega_{bpv}$  pour la boucle de vitesse au moins 10 fois inférieure à celle de la boucle de courant pour que la mise en cascade soit toujours valide.

### III.7 Modélisation de l'onduleur triphasé

L'onduleur de nos jours très largement utilisé dans les systèmes d'entraînement industriels, en premier lieu, les progrès en matière de semi-conducteur ont permis la réalisation des convertisseurs statique de plus en plus performants .En second lieu, l'évolution des techniques numériques et de commandes ,On distingue plusieurs types d'onduleur :

- a) Selon la source :
  - Onduleur de tension.
  - Onduleur de courant.
- b) Selon le nombre de phase (monophasé, triphasé, etc...).

#### a) L'onduleur de tension

L'onduleur de tension assure la conversion de l'énergie continue vers l'alternatif (DC/AC). Cette application est très répandue dans le monde de la conversion d'énergie électrique d'aujourd'hui. L'onduleur peut être utilisé à fréquence fixe, par exemple alimenter un système alternatif à partir d'une batterie, ou à fréquence (MLI) variable pour la variation de vitesse des machines électriques.

L'onduleur de tension à MLI permet d'imposer à la machine des ondes de tension d'amplitudes et de fréquences variables.

L'onduleur de tension qui alimente la MSAP peut être idéalement représenté selon la (Fig.III.9), où  $K_i$  et  $K_i'$  ( $i=a, b, c$ ) sont des transistors IGBT,  $S_i$  et  $S_i'$  sont les commandes logiques qui leur sont associées telle que :

- si  $S_i = 1$ , l'interrupteur  $K_i$  est passant et  $K_i'$  est ouvert,
- si  $S_i' = 0$ , l'interrupteur  $K_i$  est ouvert et  $K_i'$  est passant.

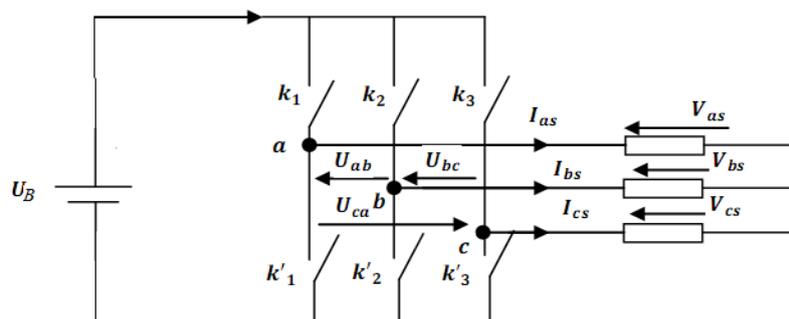


Fig. III.9 Schéma d'un onduleur de tension

L'onduleur est constitué de trois bras, chaque bras est constitué de deux transistors dont la commande est complémentaire. Les transistors sont shuntés par des diodes de récupération.

Chaque bras de l'onduleur peut être présenté par un interrupteur à deux positions comme l'indique la (fig.III.9). La machine synchrone à aimant permanent est connectée en étoile,  $V_{bus}$  est la tension continue alimentant l'onduleur de tension.

Les tensions de ligne délivrées par l'onduleur sont :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{as} - V_{bs} = U_B \cdot (S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{bs} - V_{cs} = U_B \cdot (S_b - S_c) \\ U_{ac} = V_{cs} - V_{as} = U_B \cdot (S_c - S_a) \end{cases} \quad (III.47)$$

Les tensions  $V_{as} V_{bs} V_{cs}$  forment un système de tension triphasée équilibrée alors :

On trouve

$$\begin{cases} V_{as} = \frac{V_{bus}}{3} \cdot (2S_a - S_b - S_c) \\ V_{bs} = \frac{V_{bus}}{3} \cdot (2S_b - S_a - S_c) \\ V_{cs} = \frac{V_{bus}}{3} \cdot (2S_c - S_b - S_b) \end{cases} \quad (III.48)$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_B \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

### **III.8 Dimensionnement**

#### **III.8.1 Démarche globale de dimensionnement**

Lors de la conception d'un véhicule, ses performances dynamiques doivent être spécifiées par un cahier des charges. Ses caractéristiques dynamiques permettent de calculer les contraintes extrêmes appliquées à la source, à savoir les extrêmes de puissance et l'énergie nécessaire pour son autonomie. L'objectif de cette démarche est de proposer un outil permettant de déterminer les dimensionnements admissibles vis-à-vis du cahier des charges. En plus cet outil permet d'évaluer l'influence des méthodes de gestion d'énergie sur le dimensionnement de la source hybride. Afin de répondre aux exigences du cahier des charges, nos algorithmes de dimensionnement respectent les trois critères imposés suivants :

- La source du véhicule doit être capable de fournir la totalité de la puissance nécessaire à la propulsion du véhicule.

- Le système de stockage d'énergie (SSE) du véhicule doit être capable de récupérer la quasi-totalité de la puissance de freinage.
- Enfin, la source doit embarquer l'énergie nécessaire pour assurer l'autonomie du véhicule Préconisée par le cahier des charges

### III.8.2 Dimensionnement de la pile à combustible

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.

Le stack de piles à combustible qui doit alimenter un bus capacitif de tension  $U_{dc} = 500V$ , 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  $U_{dc} / 2$ . Dans ce cas, pour une tension limite  $E_{cell}$  de  $0.54V$ , le nombre des cellules montées en série ( $N_{pacs}$ ) est donné par : On trouve alors le nombre de cellules :

$$N_{pacs} = \frac{U_{dc}}{2E_{cell}} = 463 \text{ cellule}$$

Pour déterminer la surface active de la PAC, on part sur la base d'une puissance égale à 120% de la puissance nominale, soit environ une centaine de kW

$$(1 + 0.2) \times P_{nom} = 21,6 \text{ kW}$$

Les 20% supplémentaires correspondent à la consommation des auxiliaires. Le courant vaut alors :

$$\frac{21600W}{250V} = 86,4A$$

Et on déduit la surface active :

$$86,4 = \frac{A}{0.65} \rightarrow A = 132.923 \text{ Cm}^2$$

### III.8.3 Dimensionnement des super condensateurs

Les super condensateurs constituent une source d'énergie auxiliaire qui intervient pendant les accélérations et lors du freinage du véhicule. On utilise un super condensateur de 16V d'une capacité de 58F. La puissance nominale et la puissance maximale des super condensateurs sont calculés comme suivant :

$$P_n = \frac{0.12 \times V^2}{ESR_{DC} \times mass} = \frac{0.12 \times 16^2}{0.22 \times 0.63} = 2.2 \text{kw}$$

$$P_{max} = \frac{V^2}{4 \times ESR_{DC} \times mass} = \frac{17^2}{0.22 \times 4 \times 0.63} = 5.2 \text{kw}$$

Le dimensionnement d'un stack de super condensateurs consiste à déterminer les nombres **N<sub>SCS</sub>** et **N<sub>SCP</sub>** 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. Le modèle équivalent d'un pack de super condensateurs est formé d'une capacité équivalente **C<sub>SC</sub>** en série avec une résistance équivalente **R<sub>SC</sub>**. [41] [42]

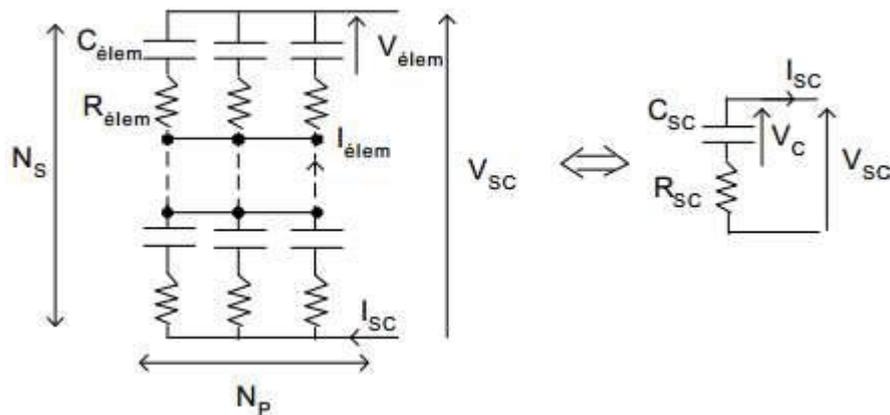


Fig.III.10 Schéma équivalent d'un stack de super condensateurs

### III.8.4 Dimensionnement de la batterie

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.

Caractéristiques des batteries

|                      |           |
|----------------------|-----------|
| Tension nominale     | 26V       |
| Capacité nominale    | 1200Ah    |
| Courant Max          | 100A      |
| Puissance spécifique | 1.3 kW/kg |

Tab.III.1 Caractéristiques de la batterie utilisée [42]

III.9 la stratégie de la gestion d'énergie avec l'organigramme :

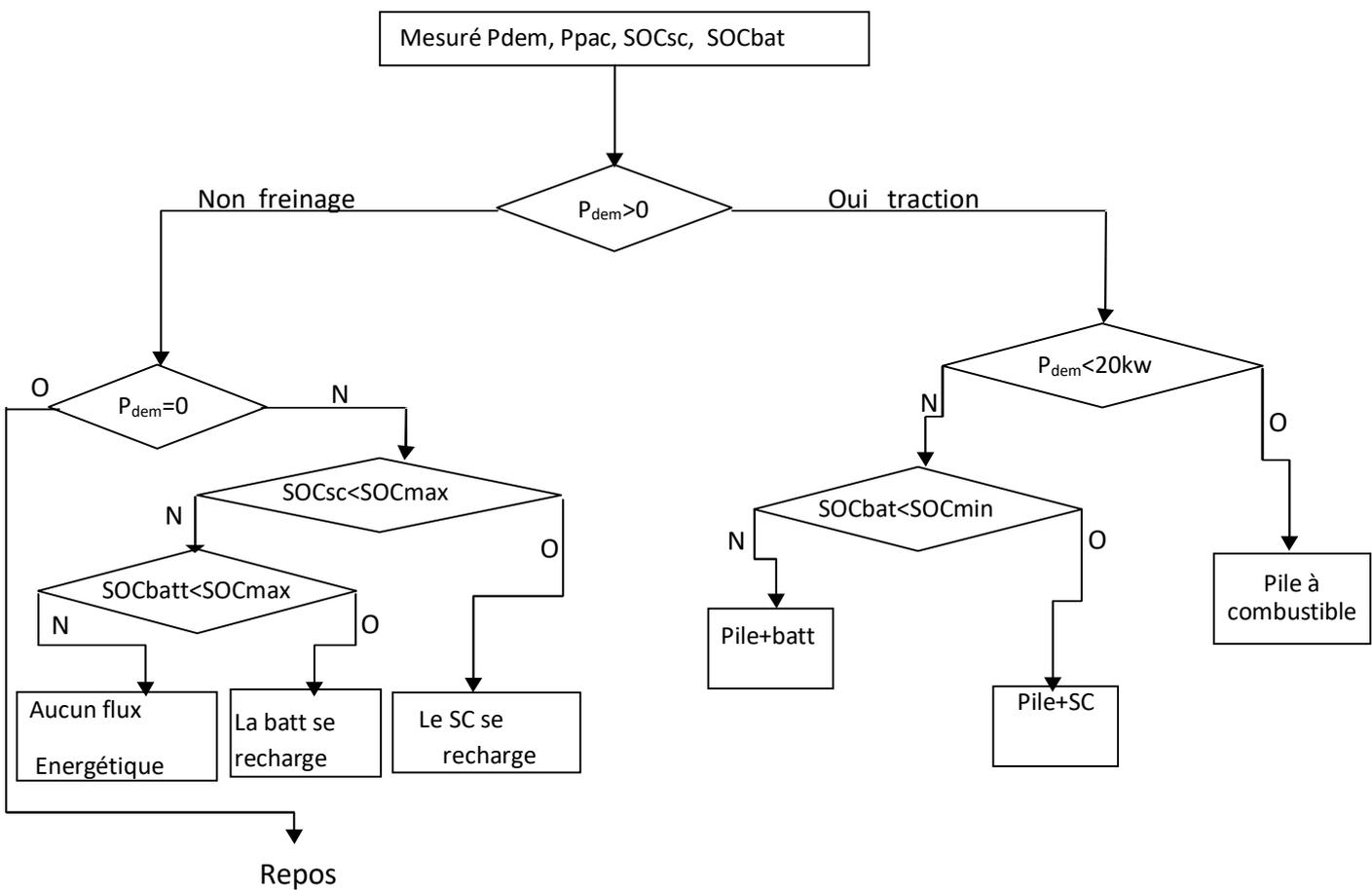


Fig. III.11 : L'organigramme de gestion d'énergie

**III.10 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons modélisé les différentes parties d'un système de traction électrique hybride, à savoir les sources d'énergie électrique notamment la PAC de type (PEMFC) avec un système d'appoint (batterie, super condensateur), les différents convertisseurs d'électronique de puissance ainsi que le moteur (MSAP). Nous avons présenté aussi la commande vectorielle et l'onduleur utilisés. Ainsi le dimensionné des différentes parties du système véhicule électrique. et vers la fin on a présenté l'organigramme de la gestion d'énergie

Les résultats de simulation et l'étude de tout le système seront présentés dans le prochain chapitre.



---

# Chapitre IV

Résultat de simulation

---



### IV.1 Introduction

Pour mettre en évidence les performances résultant des lois de contrôle présentées dans le chapitre précédent, pour les différents éléments composants le système étudié nous allons tracer les résultats de simulation de la gestion d'énergie dans tout le système obtenus au cours de cette étude. Le système a été simulé sous l'environnement Matlab-Simulink, et les approches de commande ont été testées sous un cycle de conduite normalisé. Nous commencerons, d'abord, par la présentation des résultats illustrant les performances dynamiques imposées au véhicule, et il sera introduit dans le système global de simulation avec les commentaires de chaque résultat. Le but de ce chapitre est de valider la stratégie par simulation.

Elle va être appliquée à un profil de mission c'est à dire un cycle de vitesse afin d'illustrer les Différents modes de fonctionnement.

### IV.2 Simulation générale appliqué au système global de véhicule électrique

La (Fig. IV.1) présente le système globale étudié sous Matlab/simulink, il regroupe le système d'un véhicule électrique : Pile à combustible, batteries, super-condensateurs, moteur électrique et les différents convertisseurs d'électronique de puissance. En présentera dans ce qui suit les résultats de simulation du système globale.

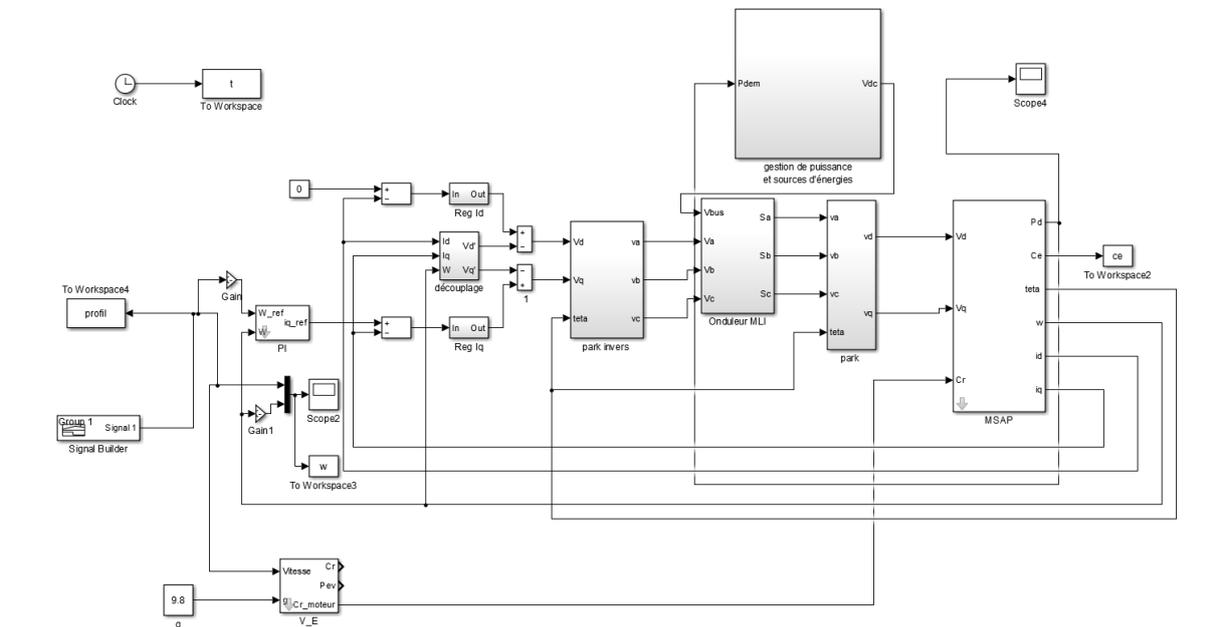
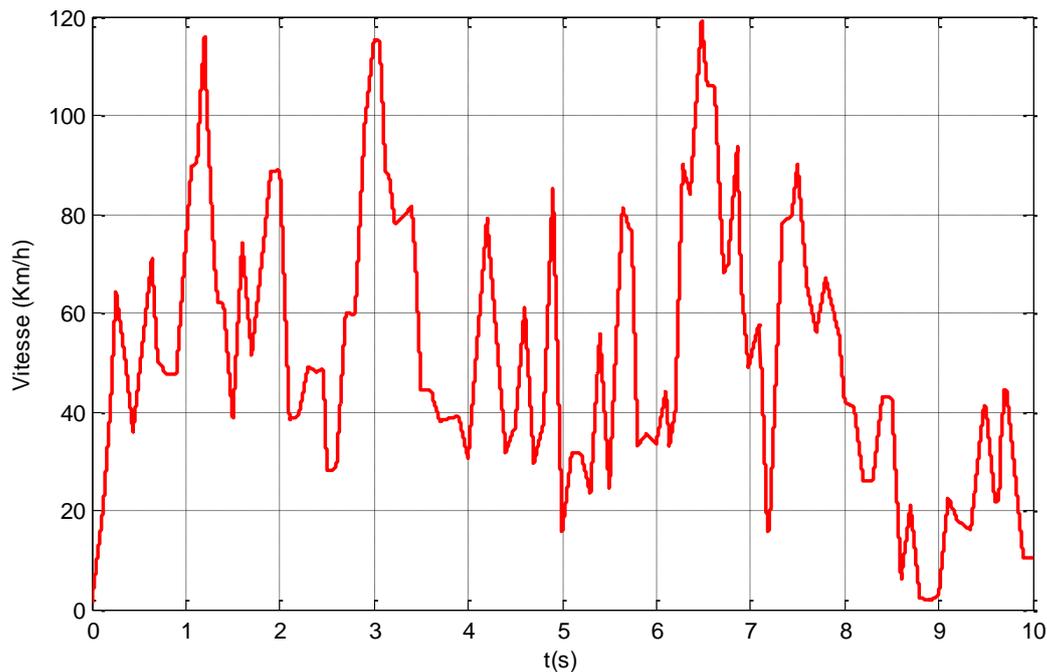


Fig.IV.1 Schéma globale de simulation

### IV.3.1 Résultats de simulation

Nous avons simulé Le modèle sur une période de 10 secondes pendant le fonctionnement à des vitesses différentes selon un profile, la stratégie de gestion d'énergie proposée a été simulée en utilisant le modèle dynamique du véhicule développé dans l'environnement MATLAB/Simulink, On appliquant un profil de vitesse sur le système global on récupère les Différentes allures qu'on a obtenues pour l'analyse

#### a) Vitesse de référence



**Fig.IV.2 Vitesse de référence en km/h**

La (**Fig. IV.2**) montre l'allure de la vitesse du véhicule en km/h, on a choisi un profil de vitesse qui va nous permettre de voir les différents modes de fonctionnement du véhicule à Savoir la traction, le freinage, et l'arrêt. Ce profile aussi va imposer l'allure du couple et de la vitesse du moteur car le modèle mécanique du véhicule est basé sur sa vitesse  $V$  et sur l'accélération  $g$ .

## b) Vitesse du moteur électrique

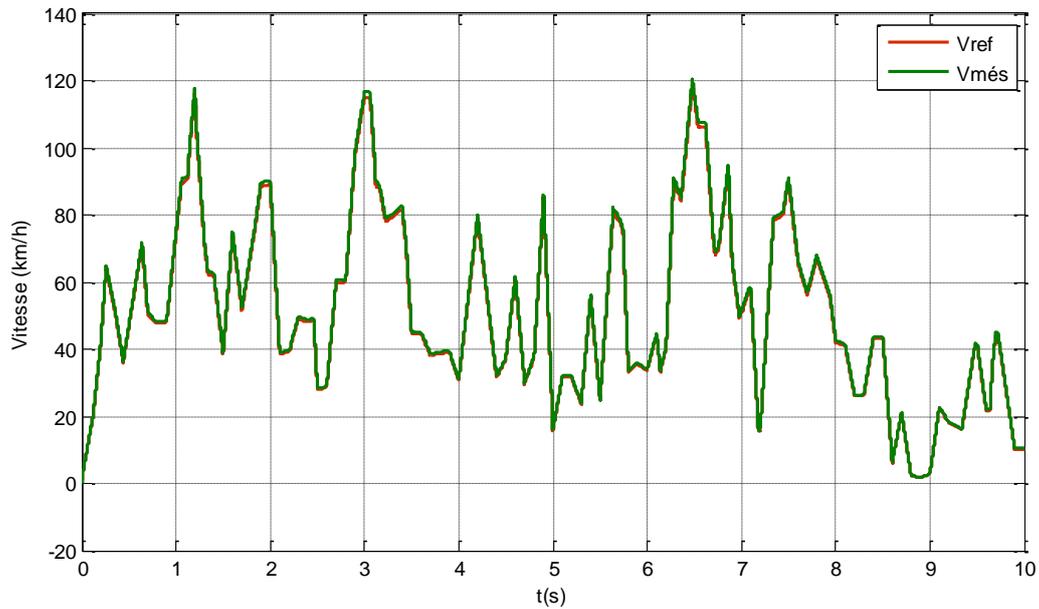


Fig.IV.3 Vitesse du moteur électrique en km/h

**Fig. IV.3** En comparant les deux allures on remarque que la vitesse du moteur suit parfaitement la vitesse de référence imposée par la commande vectorielle et elles ont le même profil que la vitesse de véhicule.

## c) Profil de la puissance demandé

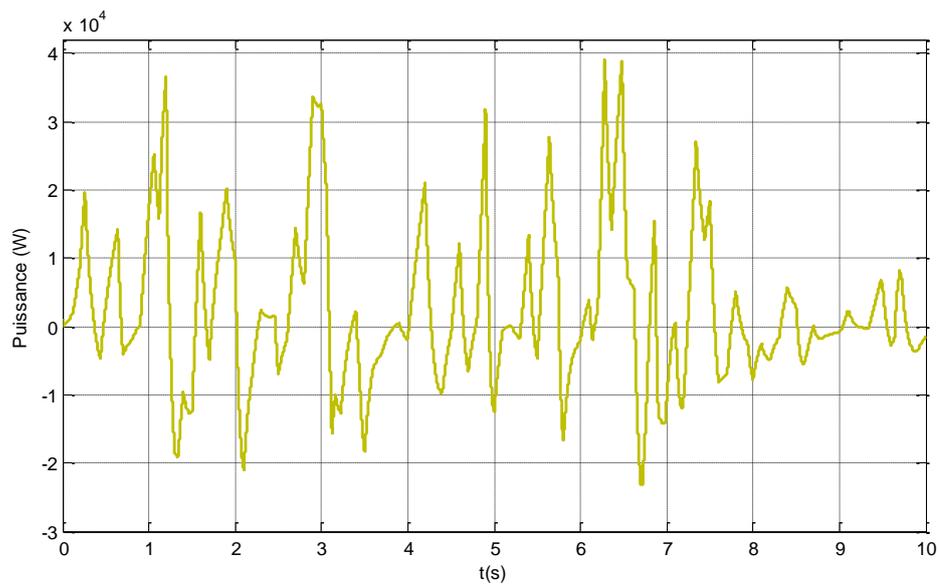
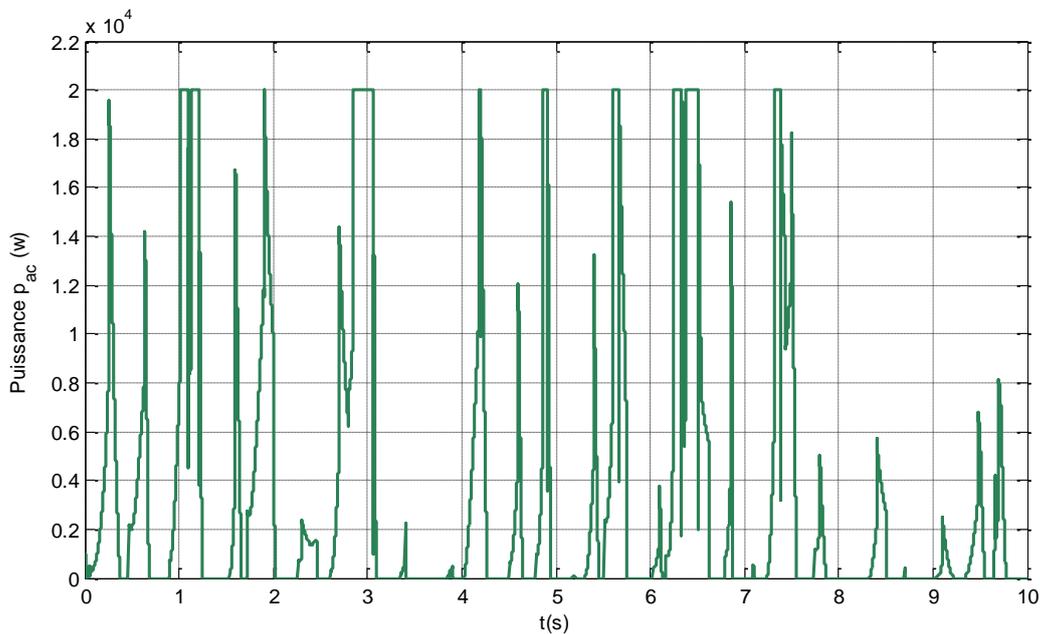


Fig.IV.4 Profil de la puissance demandé

Ce cycle de conduite est très utile pour tester les performances du véhicule électrique dans les différents phases (urbain, routier et autoroutier, etc. . .).

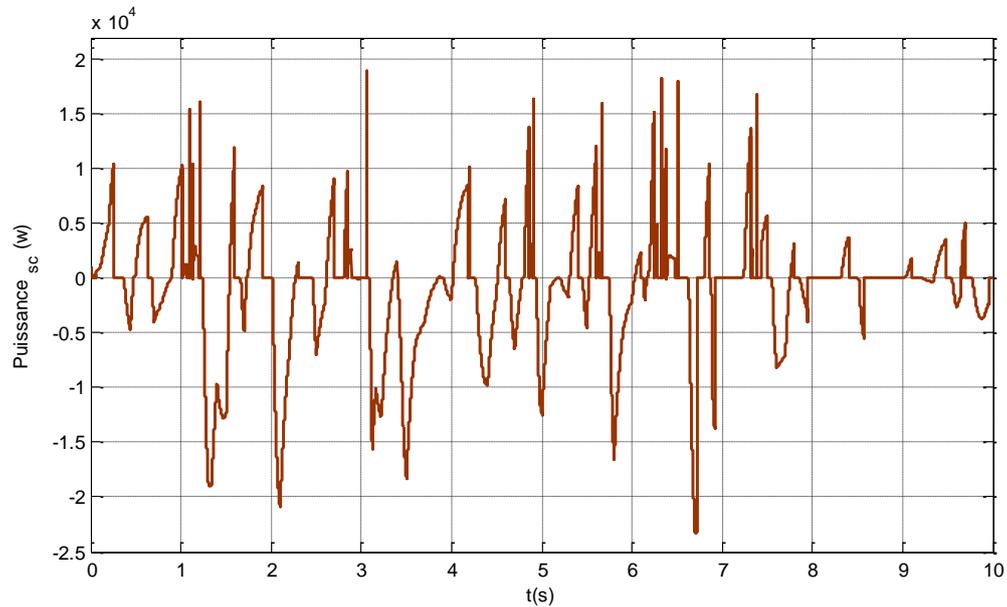
La **Fig. IV.4** montre l'allure de la puissance demandée par le véhicule par rapport au cycle de vitesse proposé qui comporte les trois de mode de fonctionnement à savoir, accélération Décélération et l'arrêt. Cette simulation permet de déterminer la puissance nécessaire à un véhicule pour rouler à une vitesse stabilisée. De plus, à partir de la donnée d'une accélération constante, il permet le calcul de la force nécessaire pour avoir cette accélération à une vitesse donnée.

#### d) Puissance délivre par la pile à combustible

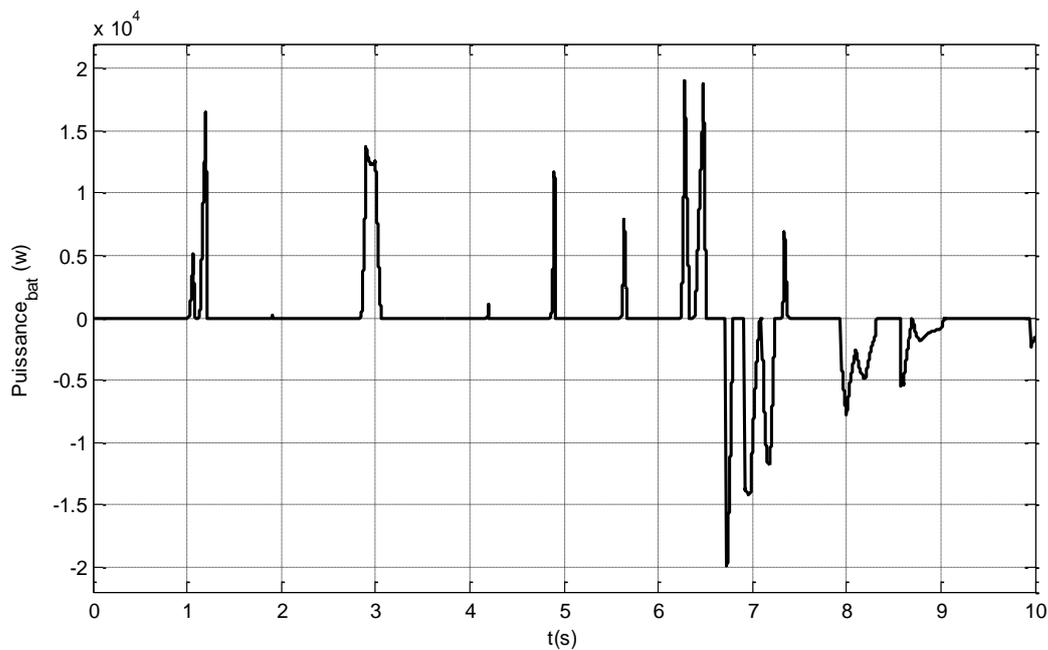


**Fig.IV.5 Puissance délivre par la pile à combustible**

La figure **Fig. IV. 5** Montre le comportement de la puissance de la pile à combustible sur une période de 10 seconds. on remarque des forte demande de puissance supérieur à la puissance maximal qui peut fournir la pile à combustible toute seule (20 kw) , donc on doit faire intervenir un autre dispositif d'alimentation et de stockage pour compenser la demande en puissance, jusqu'à elle atteint sa limite 20kW.

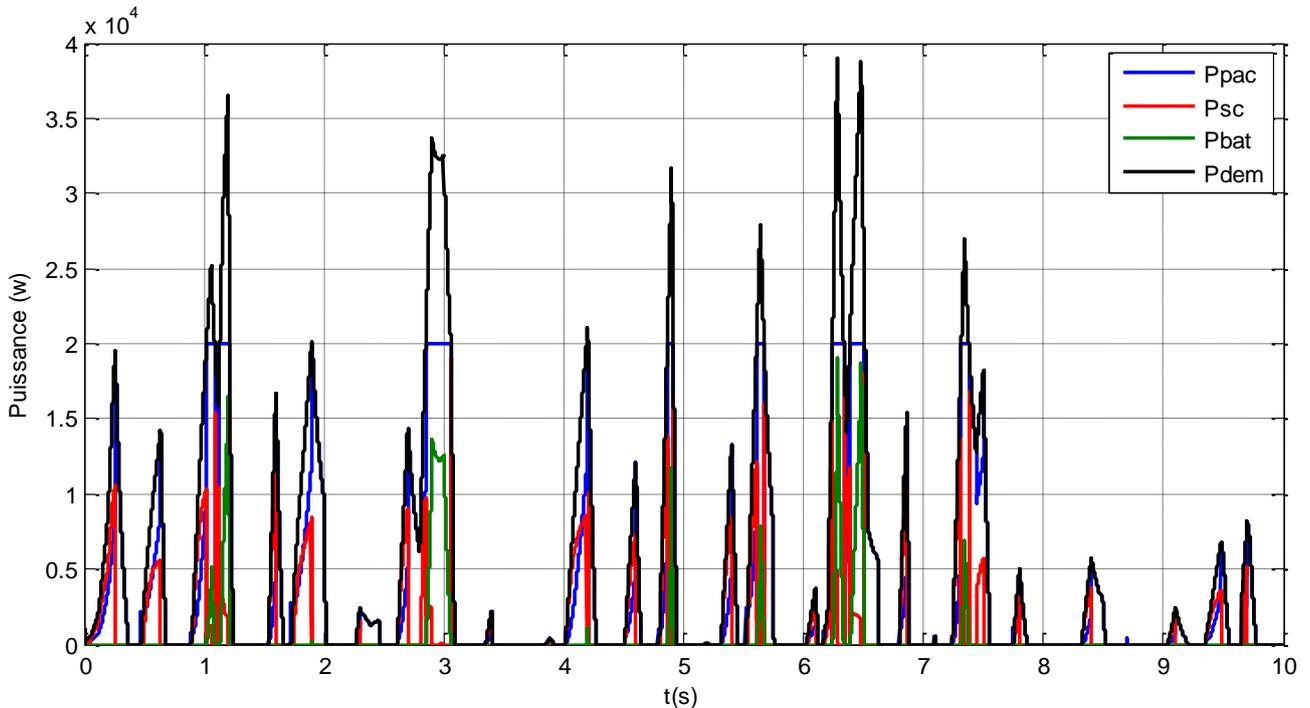
**e) Puissance du super-condensateur****Fig.IV.6 Puissance du super-condensateur**

La figure **Fig. IV.6** montre le comportement de la puissance des super condensateurs, la Puissance positive signifiée celle dissipée au moteur électrique, et la puissance Négative signifiée celle récupérée aux moments de freinage.

**f) Puissance délivrée par la batterie****Fig.IV.7 Puissance délivrée par la batterie**

La figure **Fig. IV.7** montre l'allure de la puissance délivrée par les batteries, en remarque elle peut atteindre les 19 kw lors de la forte demande en puissance, et les super-condensateurs interviennent pour compenser toujours la demande en puissance.

**g) Profile des puissances durant le mode de traction**



**Fig.IV.8 Profile des puissances durant le mode de traction**

La **figure IV.8** Montre les allures des différentes puissances des sources d'énergie de système étudié lors de traction, en remarque bien que notre système reprend au besoin de la charge durant le profil de vitesse testé. Et pour une puissance demandé inférieur à 20kW la pile à combustible et les super condensateurs assurent la traction, et pour des fortes demandes en puissance ( $P_{dem} > 20\text{kW}$ ) en fait appel aux batteries pour satisfaire la demande de la charge.

## IV.3.2 Mode freinage

## a) Profil des puissances de super condensateurs durant le mode de freinage

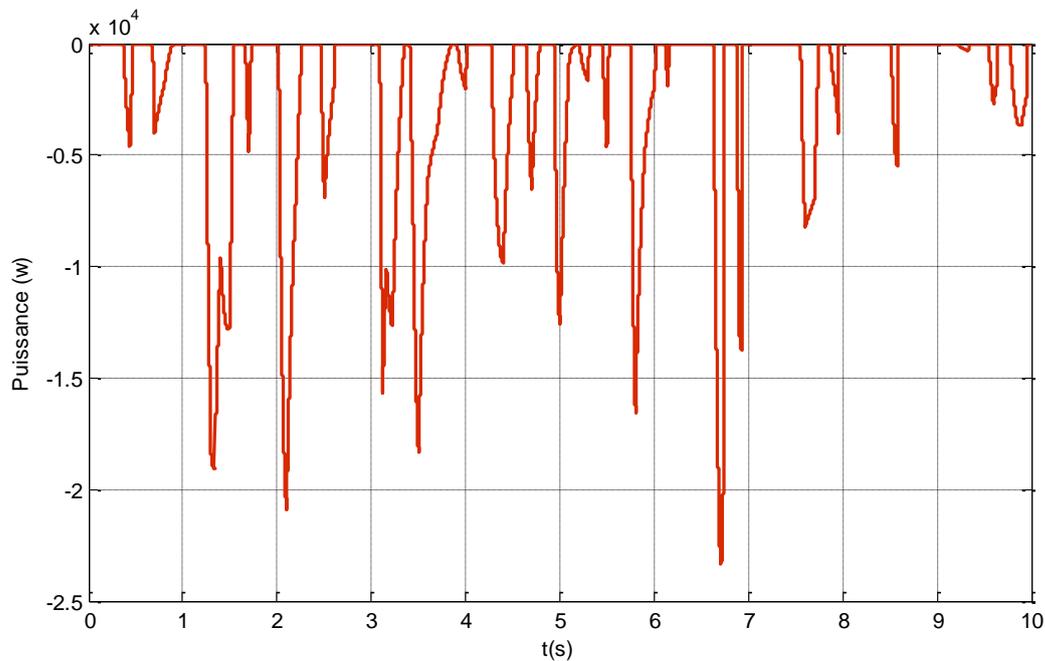
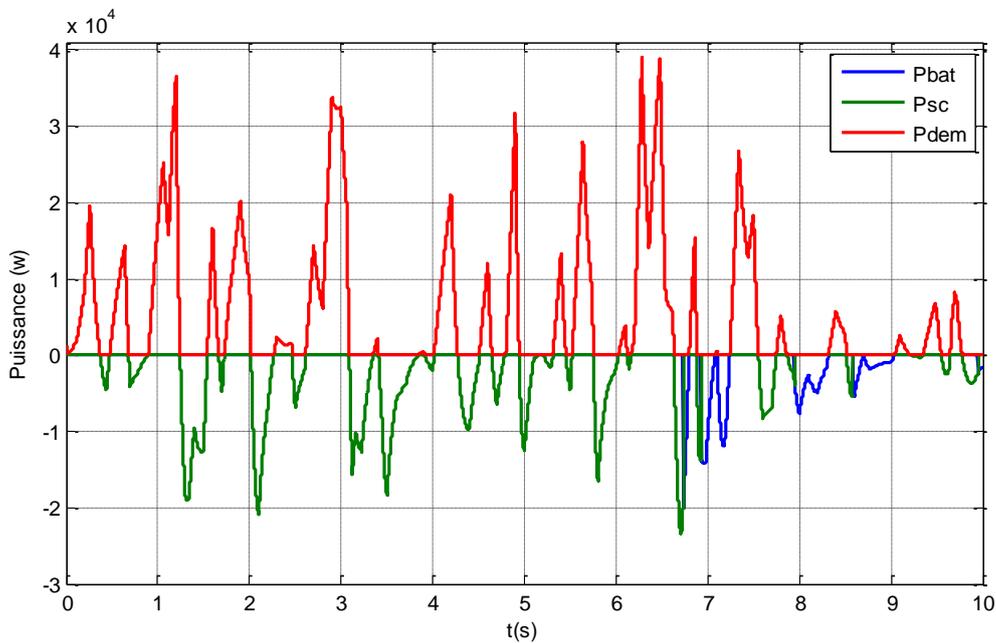


Fig.IV.9 Profil des puissances de super condensateurs durant le mode de freinage

D'après les résultats de cette figure en remarque bien que les super condensateurs récupèrent l'énergie de freinage pour au magasinier cette énergie afin d'intervenir pendant les fortes demandes en puissance, qui indique que les super condensateurs ne sont pas chargés à 90%.

**b) Profil des puissances durant le mode de freinage****Fig.IV.10 Profil des puissances durant le mode de freinage**

D'après les résultats de cette figure on remarque bien que les super condensateurs et les batteries récupèrent l'énergie de freinage, et on remarque aussi que les super condensateurs ont une plus grande efficacité de récupération d'énergie pendant le freinage, ce qui indique que les super condensateurs ne sont pas chargés à 90%. Par contre les batteries ne chargent pas sur une période de 6.8 secondes ce qui indique que les batteries sont chargées sur cette période ensuite elles se mettent à charger parce que le soc des batteries a diminué de 80%

## IV.4 Combinisent des résultats

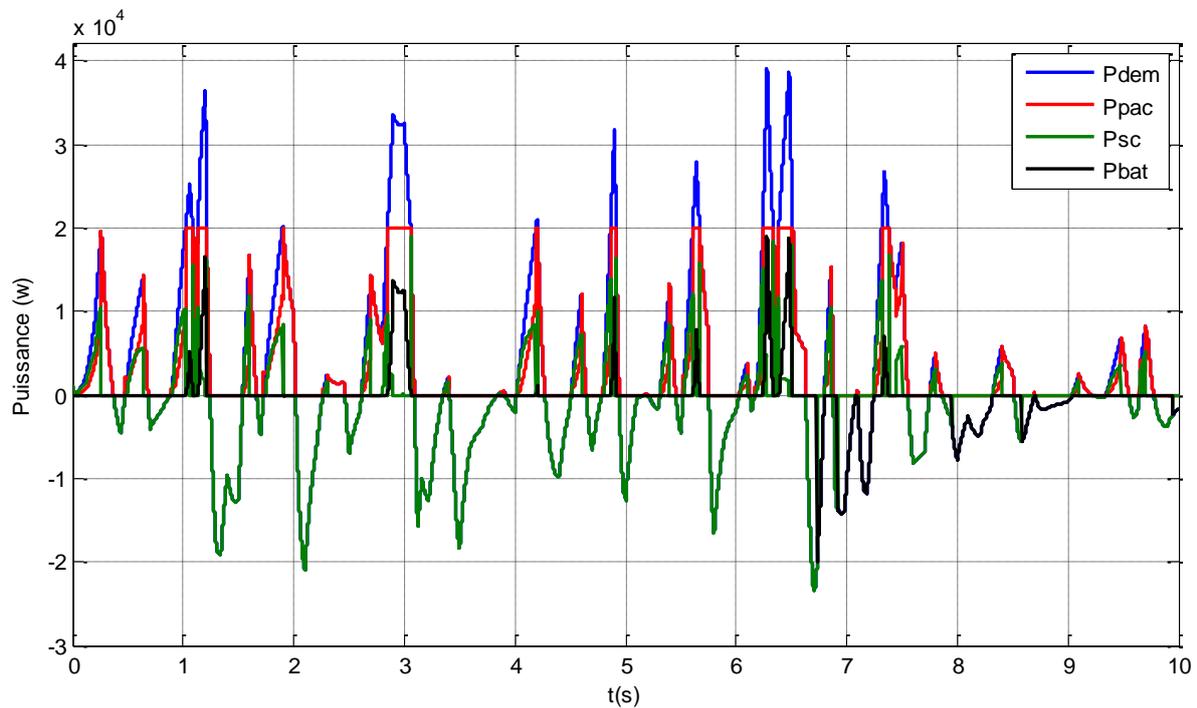
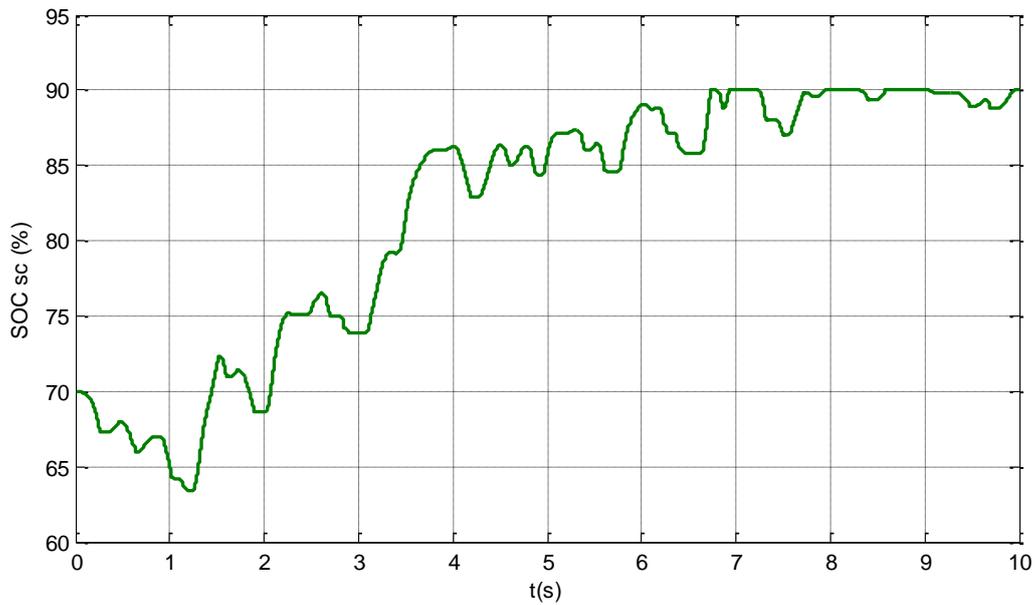


Fig.IV.11 profil de toutes les puissances

Nous remarquons de ces résultats de simulation que les super-condensateurs sollicitent la demande en puissance durant tout le parcours routier. Pour les différentes vitesses. L'ajout des super condensateurs dans cette configuration a pour rôle de reprendre aux fortes demandes en puissance et d'améliorer la durée de vie de la batterie en respectant le **socmin** et le **socmax**

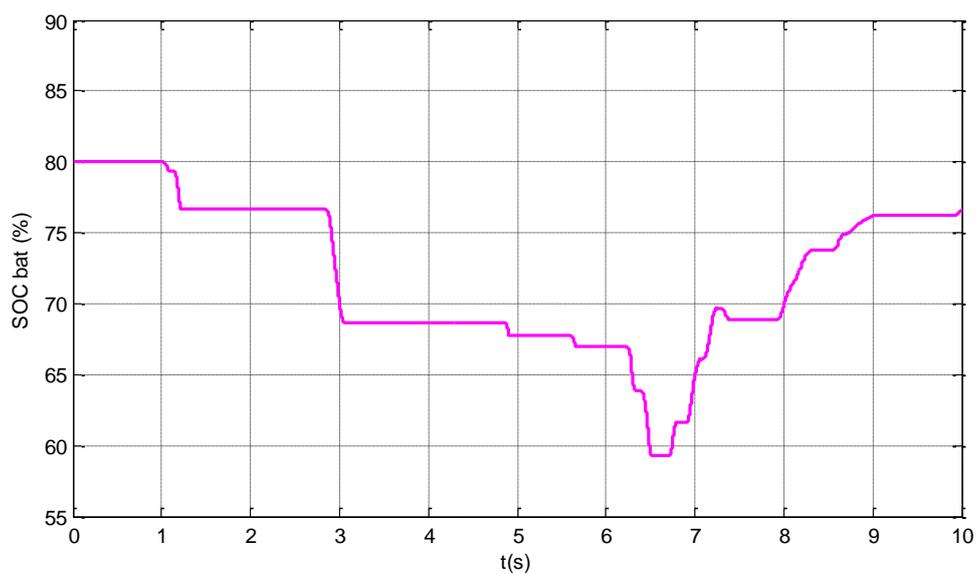
### IV.5 Etat de charge des super-condensateurs



**Fig.IV.12 : Etat de charge des super-condensateurs**

La figure ci-dessus représente l'état de charge des super condensateurs (**SOC Stat Of Charge**), en remarque qu'elle est protégée entre les deux niveaux de charges, décharge pendant le fonctionnement moteur correspondant à une diminution du soc (state of charge), pour alimenter le moteur électrique, et recharge pendant le fonctionnement générateur correspondant à une augmentation du soc, et récupération de l'énergie cinétique des roues.

### IV.6 état de charge des batteries



**Fig.IV.13 : état de charge des batteries**

La figure **IV.13** montre l'état de charge des batteries durant le cycle de vitesse imposé, au Premier temps elles en plain charge après plusieurs intervention de la batterie lors des forte demande en puissance elle se décharge jusqu'à la valeur minimale  $soc_{min}$  donc elle se met à charger.

## IV.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des résultats de simulation du système globale Étudié, et de valider la gestion proposée dans cette simulation. On constate l'intérêt de la gestion de puissance dans un système de stockage hybride qui permet de gérer les sources d'énergies et charger le système de stockage, et d'assurer le fonctionnement de système sans interruption. L'importance de système de stockage (les batteries et les super condensateurs) récupère l'énergie cinétique des roues.



---

# *Conclusion générale*

---



## Conclusion générale

L'objectif de cette étude été de développer une approche de stockage d'énergie pour la grande famille des véhicules électriques utilisant des dispositifs d'accumulation d'énergies électrique. Pour répondre à cet objectif, un système de stockage hybride pour les véhicules électriques rechargeables et une méthode de stockage de l'énergie pour ces véhicules.

Nous avons tout d'abord présenter l'état de l'art de véhicule électrique qui contient des généralité sur le contexte énergétique et écologique dans le monde liée à l'utilisation des ressources d'énergie fossile pour le transport, puis l'histoire des VE, le marché et les différentes architectures des véhicules électriques. Cela nous a permis de définir l'architecture du véhicule électrique en deux parties : les moteurs et les sources d'énergie.

Notre chaine de traction commandée est un véhicule tout électrique a entrainement direct, qui est propulsé par un moteur de type synchrone a aiment permanant (MSAP) alimenté par une source d'énergie principale (batterie-pile à combustible). Enfin, nous terminons par un bref revu des efforts appliqués au véhicule électriques.

En effet, afin d'améliorer l'autonomie et éviter la décharge profonde de la source principale d'énergie (la pile à combustible) tout en tenant compte du rapport de coût hydrogène/électricité La méthode de stockage hybride de l'énergie électrique développée pour ce véhicule consiste à partager les fortes demande de puissance par le conducteur entre la source principale de et la source secondaire de moyenne puissance (batteries et super condensateur) en plus de sa la source secondaire elle a la capacité de récupérer l'énergie électrique et la stocké pendant le mode de farinage de véhicule grâce à l'inertie.

En deuxième lieu, et après une modélisation mathématique des efforts appliqués au véhicule, une modélisation des éléments interne de chaque sous-système (pile à combustible, batterie et super condensateur) ont été présenté en détail, ce qui nous a guidés lors de l'application des commandes proposées.

Ces sources sont connectées au bus continu par le moyen de deux convertisseurs de Puissance à courant continu, l'un est un élévateur et l'autre un convertisseur réversible en courant. La gestion d'énergie est élaborée par rapport à la puissance demandée par le véhicule et celle qui est disponible dans la source d'énergie à savoir la pile à combustible et le système de stockage d'énergie (SSE).La puissance électrique demandée est correctement distribuée à travers les éléments de cet étage d'alimentation, et cela afin d'assurer la demande en puissance nécessaire à la machine synchrone à aimants permanents pour l'entrainement du véhicule Les

éléments constituant l'étage d'alimentation électrique (PAC+SSE) ont été modélisés et dimensionnés dans le but de constituer une étude homogène basée sur un exemple d'un cas réel de prototypes de véhicules électrique légers. Un dimensionnement convenable est nécessaire pour fixer des contraintes réalistes devant être gérées par les algorithmes de gestion. Les quatre points essentiels présentés dans ce travail sont :

- ✓ Dimensionnement et modélisation de tous les constituants de la chaîne de traction ;
- ✓ Elaboration de la commande de la machine électrique dédiée à la traction du véhicule électrique.
- ✓ Une gestion des flux énergétiques dans le système du véhicule électrique, dans notre cas la gestion est faite par rapport à toutes les sources d'énergie telle qu'on aura lors des trois modes traction, freinage et arrêt.

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 : la piles à combustible, 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



---

*Références*  
*Bibliographiques*

---



## Bibliographie

- [1] : Walid Lajnef. Modélisation des supercondensateurs et évaluation de leur vieillissement en cyclage actif à forts niveaux de courant pour des applications. Véhicules électriques et hybrides. PhD thesis, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2006.
- [2]: Sheldon S Williamson. Energy management strategies for electric and plug-in hybrid electric vehicles. Springer, 2013.
- [3]: P. Poudenx, "The effect of transportation policies on energy consumption and greenhouse gas emission from urban passenger transportation," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 42, pp. 901-909, 2008.
- [4]: S. G. Wirasingha and A. Emadi, "Classification and review of control strategies for plug-in hybrid electric vehicles," *vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 60, pp. 111-122, 2011.
- [5]: <https://beqtechnology.com/blog/histoire-voiture-electrique-evolution-impressionnante/>
- [6]: Iqbal Husain. *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*. CRC presse, 2003.
- [7] : Joseph Beretta. *Le génie électrique automobile : la traction électrique*. hermès Science, 2005.
- [8]: HAL Id: tel-00808946 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00808946v2> Submitted on 6 Jul 2017
- [9] :Jean-Jacques Cornaert. *L'avenir de l'automobile*. Armand Colin, 2010.
- [10]: Patricia Egede. *Environmental assessment of lightweight electric vehicles*.Springer, 2017.
- [11]:Helmut Tschoke. *Die elektrifizierung des antriebsstrangs*. Basiswissen Springer-Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [12]: HAL Id: tel-01127131 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01127131> Submitted on 7 Mar 2015
- [16]:B .Gasbaoui. *Analyse et Commande Directe du Couple d'un Véhicule Electrique a deux Roues Motrices*. PhD thesis, Universit ´e de Béchar,2012.
- [18]: XD Xue, KWE Cheng, and NC Cheung. Selection of electric motor drives for electric vehicles. In *2008 Australasian Universities Power Engineering Conférence*, pages 1–6. IEEE, 2008.

[20]:<http://fortishe.free.fr/conclusion.html>

[19]:U.Putnieks. Electric vehicle history. Students on their way to science,2012.

[20] : A. NEFFATI THÈSE En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE Délivré par : Université de Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) "Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride" avril 2013

[21] : V. Schwarz et B. Gindroz, « Le stockage électrochimique », rapport de l'ADEME, dossier stockage de l'énergie, 2005

[22] : R. MAOUEDJ « application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites Tlemcen et de Bouzareah ». Mémoire de magister, université de Tlemcen, 2005

[23] : Lassègues, J. C. Super condensateurs. Ed. Techniques Ingénieur. (2001).

[24] : H.Gualous\*, R.Gallay\*, A. Berthon\* Utilisation des super condensateurs pour les stockages de l'énergie embarquée : applications transport CH-1728 Rossens, Suisse

[25] : N.RIZOUG. « Modélisation électrique et énergétique des super condensateurs et méthodes de caractérisation : Application au cyclage d'un module de super condensateurs basse tension en grande puissance universite de lille 02/ 2006

[26] : J. 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,Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004

[27]: A. Devie, "Characterization of Lithium-ion batteries usage in electric and hybrid electric vehicles applications". Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, 2012.

[28]: A. Hijazi, "Electrothermal modeling, control and sizing of supercapacitor's energy storage system taking into account the ageing : application to the recovery of braking energy of electrical bus", Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, 2010.

[29] : G. Rousseau, "Hybrid vehicle and optimal control", Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008.

[30]: S. Tippmann, D. Walper, L. Balboa, B. Spier, and W. G. Bessler, "Low-temperature charging of lithium-ion cells part I: Electrochemical modeling and experimental investigation of degradation behavior," *J. Power Sources*, vol. 252, pp. 305–316, Apr. 2014.

- [31]:M. Petzl, M. Kasper, and M. A. Danzer, "Lithium plating in a commercial lithium-ion battery – A low-temperature aging study," *J. Power Sources*, vol. 275, pp. 799–807, Feb. 2015.
- [32] :M. Pahlevaninezhad, D. Hamza, and P. K. Jain, "An Improved Layout Strategy for Common-Mode EMI Suppression Applicable to High-Frequency Planar Transformers in High-Power DC/DC Converters Used for Electric Vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 3, pp. 1211–1228, Mar. 2014.
- [33]: W. Jiang and B. Fahimi, "Active Current Sharing and Source Management in Fuel Cell–Battery Hybrid Power System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 2, pp. 752–761, Feb. 2010.
- [34] :“Guide du véhicule électrique, 2017.”, Document Technique, Data Source.
- [35] : A. Eddahech, “Modélisation du vieillissement et détermination de l’état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride,” Thèse de doctorat 2013.
- [36] : Safa Hakim, M. Elyaqouti, L. Bouhouch, and A. Moudden ‘Comparaison de deux modèles de batterie utilisés dans les systèmes photovoltaïques’
- [37] : 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.
- [38] : Mamadou Bailo Camara, Super-condensateurs pour échange dynamique d’énergie à bord du véhicule électrique hybride. Modélisation, étude des convertisseurs et commande, Thèse de l'Universite de Franche-Comte, Dec. 2007.
- [39] : Mohamed.N , Sid, H. Alloui, K. Marouani M.Becherif Gestion Optimale de l’Energie d’un Système Multi-sources : Application au véhicule électrique Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014
- [40] : Farah.S « Identification et Commande de Moteurs Brushless Pour Mini-Drones »mémoire de fin d’étude UNIVERSITÉ LIBANAISE FACULTÉ DE GÉNIE - BRANCHE III .04 octobre 2013.
- [41] :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

- [42] : 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.
- [43] Stéphane Caux, Yacine Gaoua, and Pierre Lopez. A combinatorial optimization approach to energy management strategy for a hybrid fuel cell véhicule. *Energy*, 133 :219–230, 2017.
- [44] : 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.
- [45] Nischal Muralidhar, M Himabindu, and RV Ravikrishna. Modeling of a hybrid electric heavy duty vehicle to assess energy recovery using a thermoelectric generator. *Energy*, 148 :1046–1059, 2018.
- [46] Stéphane Caux, Yacine Gaoua, and Pierre Lopez. A combinatorial optimization approach to energy management strategy for a hybrid fuel cell vehicle. *Energy*, 133 :219–230, 2017.
- [47] Mehmet Erbas, Mehmet Kabak, Eren O’ zceylan, and Cihan C, etinkaya. Optimal siting of electric vehicle charging stations : A gis-based fuzzy multicriteria decision analysis. *Energy*, 163 :1017–1031, 2018.
- [48] Michele De Gennaro, Elena Pa\_umi, and Giorgio Martini. Customerdriven design of the recharge infrastructure and vehicle-to-grid in urban areas : A large-scale application for electric vehicles deployment. *Energy*, 82 :294–311, 2015.
- [49] Kandasamy Nandha Kumar and King Jet Tseng. Impact of demand response management on chargeability of electric vehicles. *Energy*, 111 :190–196, 2016.
- [50] : F. Brihmat, «L’Etude conceptuelle d’un système de conditionnement De puissance pour Une centrale hybride PV/Eolien», Mémoire de Magister de l’Université de Tizi-Ouzou, 2012.