



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa

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  
ÉLECTRIQUE

**FILIÈRE : ÉLECTROTECHNIQUE**

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE**  
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN  
ÉLECTROTECHNIQUE

OPTION : ÉNERGIE RENOUVELABLE

**THÈME**

---

**GESTION DE PUISSANCE D'UN VÉHICULE HYBRIDE  
TOUT ÉLECTRIQUE**

---

**RÉALISÉ PAR :**

BADJI LYÉS

ZAIDI AMINE

**ENCADRÉ PAR :**

Mme MOKRANI ZAHRA

**CO-ENCADRÉ PAR :**

Mr MEBARKI NASSER-EDDINE

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2020/2021

# *Remerciements*

*Avant tout, nous remercions ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné la santé, le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude en premier lieu à notre encadreur : mm Mokrani Zahra, Docteur à l'université de Bejaia pour son Encadrement, ses directives et sa disponibilité. Aussi, pour ses Encouragements, son indulgence, et sa sympathie. Nous remercions aussi notre co-encadreur Mr Mebaraki Nasser-eddine, Docteur à l'université de Bejaia, pour son aide et sa disponibilité. Nous adressons aussi nos remerciements aux autres membres du jury pour l'honneur de bien vouloir apporter leur jugement à notre travail.*

*Et nous tenons à remercier nos parents pour leur soutien et encouragement durant notre parcours scolaire*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à mes parents qui m'ont soutenu  
durant mon parcours scolaire et durant toute ma  
vie, que Dieu leurs accorde une longue vie et une  
bonne santé, À La mémoire de mon grand-père,  
À ma sœur Wassima, à toutes ma  
Famille paternelle et maternel, à mes amis Kramou  
,Merzouk,karim,sidalí,mouhoub,ramdane,najíb,nabíl,  
messí,ghílas,bílal,chafaa,et idír, thízirí,noureddíne,et  
à toute personne qui m'a aidé à accomplir ce travail.*

*ZAJDI Amine*

# *Dédicaces*

*Ce travail est dédié à toutes ces personnes que j'aime,  
À mes très chers parents, qui se sont sacrifié  
pour m'offrir un climat idéal de travail et qui n'ont  
jamais cessé de me témoigner leurs affections et de  
m'apporter leurs soutient depuis toujours. Et leurs  
encouragements, consentis dans le souci de ma  
réussite.*

*À La mémoire de ma grande mère et mon cousin  
Syphax.*

*À mes très chers frères Nassim et Nouredine.  
À ma très chères belle soeur Nihad, À tous mes  
cousins et cousines, À toute mes amis et amies.  
À toutes personnes qui nous ont aidés à réaliser ce  
mémoire*

*BADJI Iyes*

## Sommaire

### Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : État de l'Art des véhicules hybrides tout électrique. ....</b>	<b>4</b>
I.1 Introduction .....	5
I.2 Histoire de la voiture électrique.....	5
I.3 Véhicule tout électrique.....	7
I.3.1 Fonctionnement d'un véhicule tout électrique.....	7
I.3.2 Avantages et inconvénients de la voiture électrique.....	8
I.4 Hybridation des sources de stockage de l'énergie :.....	8
I.4.1 Principe de l'hybridation des sources de stockage d'énergie: .....	8
I.4.2 Différentes associations des sources de stockage d'énergie: .....	9
I.5 Conclusion.....	11
<b>II. Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible.....</b>	<b>12</b>
II.1 Introduction : .....	13
II.2 Bref historique : .....	13
II.3 Définition et principe de fonctionnement de la pile à combustible:.....	14
II.4 Les différents types des piles à combustible .....	15
II.4.1 Pile à combustible à Basse Température : .....	16
II.4.2 Piles à combustible à haute température : .....	19
II.5 Applications des piles à combustibles:.....	21
II.6 Choix technologique de la pile à combustible :.....	24
II.7 Principe de fonctionnement de la PEMFC: .....	25
II.7.1 Avantages et inconvénients de la pile à combustible PEM :.....	25
II.8 Constitution d'une PEMFC : .....	26
II.8.1 Les plaques bipolaires : .....	27
II.8.2 Les électrodes : .....	28
II.8.3 La membrane :.....	29
II.9 Caractéristique de la pile à combustible PEM.....	30
II.10 Le modèle pile à combustible sous Matlab-Simulink .....	33
II.11 Conclusion.....	35
<b>III. Chapitre III : Étude et modélisation du super condensateur .....</b>	<b>36</b>
III.1 Introduction .....	37
III.2 Bref Historique .....	37

## Sommaire

III.3	Principe de fonctionnement d'un super condensateur .....	37
III.4	Les différents types de super condensateur : .....	38
III.4.1	Catégories de super condensateurs – Électrodes : .....	38
III.4.2	Électrolyte : .....	40
III.4.3	Séparateur : .....	41
III.5	Applications potentielles des super-condensateurs .....	42
III.6	Avantage et inconvénient .....	42
III.7	Utilisation du super condensateur sur l'automobile: .....	42
III.7.1	Modèles de super condensateur : .....	43
III.8	Dimensionnement et modélisation des packs Super condensateur : .....	44
III.9	Conclusion .....	49
<b>IV.</b>	<b>Chapitre IV : Gestion de puissance du système hybride.....</b>	<b>50</b>
IV.1	Introduction .....	51
IV.2	Dimensionnement de la pile à combustible et du super condensateur .....	51
IV.2.1	Dimensionnement d'un Stack : .....	51
IV.2.2	Dimensionnement des super condensateurs .....	52
IV.3	Les différents modes possibles .....	53
IV.4	Organigramme de gestion proposé pour la gestion de puissance hybride PAC/SC : .....	54
IV.5	Explication du déroulement de l'organigramme de gestion : .....	55
IV.6	Simulation du programme de gestion sous Matlab/Simulink : .....	55
IV.7	Conclusion .....	57
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>59</b>

## Liste des figures

### Liste des figures

<b>Figure I-1:</b> Constitution d'un véhicule électrique.....	7
<b>Figure I-2:</b> Association d'une batterie/super condensateur .....	9
<b>Figure I-3:</b> Hybridation d'un super condensateur et une PAC .....	10
<b>Figure I-4:</b> Association d'une pile à combustible et une batterie .....	10
<b>Figure II-1:</b> Schéma de principe de la pile à combustible .....	15
<b>Figure II-2 :</b> Schéma de principe d'une PEMFC .....	17
<b>Figure II-3:</b> schéma de principe d'une DMFC .....	18
<b>Figure II-4:</b> schéma de principe d'une PAFC .....	18
<b>Figure II-5:</b> Schéma de principe d'une AF .....	19
<b>Figure II-6:</b> Schéma de principe d'une cellule MCFC alimentée en gaz naturelle (reformage interne) .....	20
<b>Figure II-7:</b> schéma de principe d'une cellule de SOFC .....	21
<b>Figure II-8:</b> Principe de fonctionnement d'une pile PEM .....	25
<b>Figure II-9:</b> structure d'un empilement de cellule PEMFC .....	26
<b>Figure II-10:</b> structure des électrodes et la zone de triple contacte .....	27
<b>Figure II-11:</b> Structure des électrodes et la zone de triple contacte.....	28
<b>Figure II-12:</b> structure de la membrane Nafion. ....	29
<b>Figure II-13:</b> Bilan de tension de sortie de la pile à combustible .....	30
<b>Figure II-14:</b> représentation électrique d'une PEMFC. ....	30
<b>Figure II-15:</b> Modèle de la pile à combustible PEM sur Matlab/Simulink .....	33
<b>Figure II-16:</b> Caractéristique Tension-Densité de courant. ....	34
<b>Figure II-17:</b> Caractéristique Puissance-Densité de courant .....	34
<b>Figure II-18:</b> Caractéristique tension-temps. ....	35
<b>Figure III-1:</b> Les quatre éléments principaux constituant un super condensateur .....	38
<b>Figure III-2:</b> Structure microscopique d'une électrode au charbon actif .....	39
<b>Figure III-3:</b> Structure microscopique d'une électrode en tissu activé.....	39
<b>Figure III-4:</b> Modèle électrique des super condensateurs.....	43
<b>Figure III-5:</b> Circuit simplifié des super-condensateurs modèle à deux branches .....	45
<b>Figure III-6:</b> Modèle de simulation Matlab du pack Super condensateurs .....	46
<b>Figure III-7:</b> Comparaison entre simulation et résultats expérimentaux pour une charge de super condensateur et cycle de décharge.....	48
<b>Figure III-8:</b> Tension du super condensateur.....	49
<b>Figure III-9:</b> Etat de charge du super condensateur.....	49
<b>Figure IV-1:</b> Modularité d'un Stack : exemple de conception d'une PAC de 700 W .....	51
<b>Figure IV-2:</b> Caractéristiques du super condensateur utilisé. ....	53
<b>Figure IV-3:</b> Organigramme de gestion de puissance du système hybride (pile à combustible super condensateur).....	54
<b>Figure IV-4 :</b> Schéma bloc de simulation.....	55
<b>Figure IV-5 :</b> Puissance demandée par le véhicule .....	56
<b>Figure IV-6 :</b> Puissance de la PAC .....	56
<b>Figure IV-7 :</b> Puissance du super condensateur .....	56
<b>Figure IV-8:</b> les différentes puissances .....	57
<b>Figure IV-9:</b> Entrées et sorties du système étudié .....	57

## Liste des tableaux

### Liste des tableaux

<b>Tableau II-1</b> : Tableau comparatif des différentes piles à combustibles .....	16
<b>Tableau III-1</b> : Les paramètres du circuit équivalent du SC .....	45
<b>Tableau IV-1</b> : principales caractéristiques de la PAC .....	52
<b>Tableau IV-2</b> : Tableau représentant les différents modes .....	54



## Nomenclatures

### Abréviations et symboles

**ER** : Énergie renouvelable

**SEH** : Système d'énergie hybride

**CA** : Courant alternatif

**CC** : Courant continu

**ENT** : Nombre entier

**EDC** : 'État de charge de la batterie

**PDP** : Profondeur de décharge de la batterie

**EDC<sub>max</sub>** : Etat de charge de la batterie maximal [90%]

**EDC<sub>min</sub>** : Etat de charge de la batterie minimum [30%]

**CO<sub>2</sub>** : Dioxyde de carbone

**PAC** : La pile à combustible

**H<sub>2</sub>**: L'hydrogène

**VE** : Véhicules électriques

**VEH** : Véhicules électriques hybrides

**SC** : Super condensateur

**EDC**: État de charge

**O<sub>2</sub>** : Dioxygène

**PEM** : La pile à combustible membrane échangeuse de protons

**PAFC** : Les piles à combustible à acide phosphorique

**H<sub>2o</sub>**: La formule brute de l'eau

**MCFC** : Pile à combustible à carbonate fondu

**PEMFC** : La pile à combustible à membranes polymères échangeuse de protons

**H<sup>+</sup>** : Proton

**NO<sub>x</sub>** : Oxyde d'azote

**N<sub>s</sub>** : Le nombre de cellules mises en série qui fixe la tension du Stack

**S** : La surface d'une cellule qui fixe le courant du Stack

**V<sub>act</sub>** : Polarisation d'activation de la pile

**V<sub>ohm</sub>** : Polarisation ohmique

**V<sub>cons</sub>** : Polarisation de concentration

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

## Nomenclatures

$P_{H_2}$  : Pression partielle de l'interface d'hydrogène (atm)

$P_{O_2}$  : Pression partielle de l'interface d'oxygène (atm)

$i_{pac}$  : La densité de courant  $i_{pac}$

$I_{pac}$  : Le courant de la pile à combustible

$A_{cell}$  : La surface active d'une membrane

$V_{PAC}$  : la tension totale de la pile à combustible

$V_{cell}$  : La tension élémentaire d'une cellule

$N_{cell}$  : Le nombre de cellule

$P_{PAC}$  : La puissance brute fournie par la pile à combustible

$V_{PEMFC}$  : La tension réelle d'une pile unitaire(volt)

$E_{Nerst}$  : Potentiel thermodynamique (idéal) de chaque pile et représente la tension réversible(volt)

$U_{act}$  : Pertes d'activation (volt)

$U_{ohm}$  : Pertes ohmique(volt)

$U_{conc}$  : Pertes de concentration (volt)

$C_{O_2}^*$  : La concentration de l'oxygène dans l'interface de la surface cathodique ( $mol/cm^3$ )

$C_{H_2}^*$  : La concentration de l'hydrogène dans l'interface de la surface anodique ( $mol/cm^3$ )

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

$P_{anod}$  : Pression de l'hydrogène à l'anode

$P_{O_2}^*$  : Pression partielle de l'oxygène (atm)

$P_{H_2}^*$  : Pression partielle à l'interface de l'hydrogène (atm)

$T_{PEMFC}$  : Température opératoire absolue de la pile ( $^{\circ}K$ )

$X_{H_2O}^{sat}$  : Fraction molaire de saturation d'eau dans le gaz humidifié (=0.5)

$j$  : Densité de courant ( $A/cm^2$ )

$s_{cell}$  : Surface active des cellules ( $cm^2$ )

$R_c$  : Résistance équivalente de contact à la conduction des électrodes ( $\Omega$ )

$R_m$  : Résistance équivalente de la membrane ( $\Omega$ )

$r_m$  : Résistance spécifique de la membrane ( $\Omega \cdot cm$ )

$\sigma$  : Conductivité de la membrane ( $S \cdot cm^{-1}$ )

$e_m$  : Epaisseur de la membrane ( $\mu m$ )

$\lambda$  : La teneur en eau dans la membrane

## Nomenclatures

$\alpha_i$   $E_t$   $\beta_i$  : Constantes adimensionnelles présent dans les travaux d'Amphlett

**OPEP** : Organisation des pays exportateurs de pétrole

**SC** : Super condensateur

**R** : La résistance série équivalente traduisant les pertes

**C** : La capacité principale du supercondensateur

**Esc** : L'énergie stockée à la tension

**Usc** : La tension pack du SC

**Ceq** : La capacité équivalente du pack SC

**Np\_sc** : Le nombre de branches parallèles

**Ns\_sc** : Le nombre de connexions en série de SC

**Csc** : La capacité SC.

**UM** : Tension assignée UM

**Vsci** : Tension initiale

**Vscf** : Tension finale

**K** : Coefficient de l'efficacité

**$P_N \Delta t$**  : L'énergie extraite des SC

**C1** : La capacité principale

**R1** : Résistance principale

**Q1** : La charge instantanée de C1

**I1** : Le courant passant dans le condensateur principal C1

**C0** : Capacité constante

**Cv** : Un paramètre constant (F/V)

**Rf** : Le courant de fuite

**Usc** : La tension du pack SC

**Isc** : Le courant du pack SC

**Vsc** : La tension élémentaires du SC

**Isc** : Le courant élémentaires du SC

**C2** : La capacité secondaire

**R2** : La résistance secondaire

**V2** : La tension dans la capacité secondaire C2

**Q2** : La charge instantanée de C2

**I2** : Le courant passant dans le condensateur principal C2

## **Nomenclatures**

**W<sub>sc</sub>** : L'énergie totale stockée

**E<sub>sci</sub>**: L'énergie initiale du pack SC

**E<sub>scr</sub>** : L'énergie finale du pack SC

# **Introduction générale**

## Introduction générale

### Introduction générale

L'explosion démographique de la population mondiale et l'épuisement des ressources naturelles et fossiles à cause de la combustion à marche forcée engendre des problèmes écologiques.

La pollution environnementale est un problème majeur de notre siècle, des problèmes énergétiques et environnementaux nous accompagnent tout au long de notre vie : le prix du carburant conventionnel d'origine pétrolière qui fluctue, les aléas climatiques avec une météo de plus en plus capricieuses et imprévisibles.

Les changements liés à l'environnement sont un sujet d'actualité, et par conséquent le public est de plus en plus sensible aux conséquences sociales et économiques que ces changements engendrent à l'échelle planétaire. Les problèmes environnementaux sont multiples, citons :

- Les changements climatiques y compris le réchauffement climatique et les épisodes de sécheresse et d'inondation plus intenses et plus fréquents ;
- La perte de biodiversité ;
- Les modifications des systèmes hydrologiques et de l'approvisionnement en eau douce ;
- La dégradation des sols ;
- Les pressions exercées sur les systèmes de production vivrière.

Il est devenu clair que les réserves d'énergies fossiles ne sont pas infinies et avec les conséquences que ça engendre il faut se focaliser sur le cœur du problème dans le cas des défis énergétiques et environnementaux. D'autre part le secteur des transports est l'une des principales sources d'émission de gaz à effet de serre. Parmi les différents modes de transport, le transport routier dont ses impacts environnementaux sont :

- Les émissions de CO<sub>2</sub>
- La pollution d'air
- Les nuisances sonores
- La pollution sur le milieu aquatique

Face à tous ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de l'énergie d'origine fossile et fissile. Certain pays, se sont tournés vers la nouvelle forme d'énergie dite « renouvelable » faisant appel à des ressources d'énergie inépuisable dans le temps et non polluante pour

## **Introduction générale**

l'environnement. Ainsi, le véhicule tout électrique vient exploiter cette énergie et qui a été présenté comme une solution prometteuse, grâce à son indépendance vis-à-vis du pétrole.

C'est dans ce contexte, que vient d'inscrire notre travail, qui consiste à étudier la gestion de puissance d'un véhicule hybride tout électrique.

Les travaux présentés dans ce manuscrit s'articulent autour de quatre chapitres comme suite :

- On introduit notre travail par le premier chapitre qui définit l'état de l'art des véhicules hybrides tout électrique.
- Dans le deuxième chapitre on va élaborer une étude et modélisation de la pile à combustible.
- Le troisième chapitre sera consacré à l'étude et modalisation du super condensateur.
- Puis dans le quatrième chapitre on va réaliser un système de gestion de puissance hybride accompagné par une simulation sous Matlab-Simulink.

On finira notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

**Chapitre I : État de l'Art  
des véhicules hybrides  
tout électrique**



### I.1 Introduction

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter l'état de l'art des véhicules hybrides tout électrique, en définissant le principe de fonctionnement des véhicules électrique et les différents types d'hybridation existants, avec l'exposition des avantages et inconvénients, en commençant avec un historique sur cette technologie qui tôt ou tard révolutionnera le monde.

### I.2 Histoire de la voiture électrique

- Le premier véhicule électrique a fait son apparition aux alentours de 1830 (1832-1839). La première personne à avoir inventé une voiture électrique est Robert Anderson, un homme d'affaires écossais. Il s'agissait plutôt d'une carriole électrique.
- Vers 1835, l'américain Thomas Davenport construit une petite locomotive électrique. Vers 1838 l'écossais Robert Davidson arrive avec un modèle similaire qui peut rouler jusqu'à 6 km/h. Ces deux inventeurs n'utilisaient pas de batterie rechargeable.
- En 1859, le français Gaston Planté invente la batterie rechargeable au plomb acide. Elle sera améliorée par Camille Faure en 1881.
- En 1884, on voit sur cette photo Thomas Parker assis dans une voiture électrique, qui pourrait être la première au monde. La photographie a été rendue publique en avril 2009 par son petit-fils Graham Parker.
- En 1891, l'américain William Morrison construit la première vraie voiture électrique (voir photo).
- En 1896, la Riker électrique d'Andrew Riker remporte une course automobile.
- En 1897, on peut apercevoir les premiers taxis électriques dans les rues de New York.
- En 1899 en Belgique, une société construit « La Jamais Contente » la première auto électrique à dépasser les 100 km/h (elle atteindra les 105 km/h). L'auto était pilotée par le belge Camille Jenatzy, et munie de pneus Michelin. Elle était en forme de torpille.
- Dès 1900, la voiture électrique connaît ses beaux jours. Plus du tiers des voitures en circulation sont électriques, le reste étant des autos à essence et à vapeur.
- En 1902 la Phaeton de Wood pouvait rouler 29 kilomètres à une vitesse de 22.5 km/h et coûtait 2000 dollars.
- En 1912, la production des véhicules électriques est à son apogée. Mais l'introduction de la Ford Model T à essence en 1908 va commencer à se faire sentir.
- L'Anderson Electric Car Company présente son modèle en 1918 à Détroit.
- Dans les années 1920, certains facteurs mèneront au déclin de la voiture électrique. On peut citer leur faible autonomie, leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que les Ford à essence.
- En 1966, le congrès américain recommande la construction de véhicules électriques pour réduire la pollution de l'air. L'opinion publique américaine y est largement favorable et avec l'augmentation du prix de l'essence en 1973 (premier choc pétrolier: embargo de l'OPEP envers les Etats-Unis) le momentum est bien là. Pourtant rien ne décollera vraiment.

## Chapitre I : État de l'Art des véhicules hybrides tout électrique

- En 1972, Victor Wouk le parrain du véhicule hybride construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de General Motors (GM).
- En 1974, la Vanguard-Sebring CitiCar, qui ressemble beaucoup à une voiturette électrique de Golf (voir photo), fait son apparition à l'Electric Vehicle Symposium de Washington, D.C. Elle peut rouler sur 64 kilomètres à une vitesse de 48 km/h. En 1975 la société est le sixième constructeur américain mais elle sera dissoute quelques années plus tard.
- En 1976, le Congrès américain adopte le Electric and Hybrid Vehicle Research, Development, and Demonstration Act. , qui a pour but de favoriser le développement des nouvelles technologies de batteries, moteurs et composants hybrides.
- Dès 1988, le président de GM Roger Smith lance un fond de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui deviendra l'EV 1.
- En 1990, l'État de la Californie vote le Zero Emission Vehicle (ZEV), un plan qui prévoit que 2% des véhicules devront avoir zéro émission polluante en 1998 (puis 10% d'entre eux pour 2003). Cette même année, le pdg de GM présente son concept à deux sièges l' « Impact » au Los Angeles Auto Show.
- Entre 1996 et 1998 GM va produire 1117 EV1, dont 800 d'entre elles en location avec un contrat de 3 ans.
- En 1997, Toyota lance la Prius, la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires seront vendus au Japon la première année.
- De 1997 à 2000, de nombreux constructeurs lancent des modèles électriques hybrides: la Honda EV Plus, la G.M. EV1, le Ford Ranger pickup EV, Nissan Altra EV, Chevy S-10 EV et le Toyota RAV4 EV.
- Cependant à partir de 2000 la voiture électrique va re-mourir à nouveau.
- En 2002, G.M. et DaimlerChrysler poursuivent le California Air Resources Board (CARB) pour faire annuler la loi Zero Emission Vehicle (ZEV) de 1990. Le président américain George Bush se joint à eux.
- En 2003 en France, Renault fait une tentative avec la sortie de sa voiture hybride Kangoo Elect'road mais abandonnera la production après environ 500 véhicules.
- En 2003-2004, c'est la fin de l'EV1. GM va récupérer un par un tous les véhicules pour les détruire, et ce malgré plusieurs mouvements de protestation.
- En 2006, Chris Paine sort un documentaire intitulé Who Killed the Electric Car? qui analyse la montée en puissance et la mort de la voiture électrique à la fin des années 90. Il s'attarde principalement à EV1 de GM.
- La même année Tesla Motors dévoile pour la première fois le cabriolet électrique Roadster.
- En 2007, il y a encore 100 000 véhicules électriques en circulation aux Etats-Unis.
- De 2008 à 2010, le constructeur californien Tesla Motors Inc. produit sa voiture de sport électrique Tesla Roadster.
- En 2009, Mitsubishi Motors lance l'i-Miev au Japon. Suite à un partenariat avec le constructeur japonais, PSA Peugeot Citroën présente les cousines européennes de la Miev, la Peugeot ion (2009) et la Citroën C-Zero (2010).

## Chapitre I : État de l'Art des véhicules hybrides tout électrique

- En mars de cette même année, Vincent Bolloré annonce la sortie pour 2010 en location mensuelle à 330 euros de la Pininfarina Blue Car.
- En 2009, Renault produit sa première voiture électrique, la Fluence ZE, basée sur la Renault Mégane III. Suivront les modèles Twizy (2011), Kangoo ZE (2011) et Zoe (2012).
- 2010 voit la naissance d'une référence de l'électrique, la Nissan Leaf, qui va être pendant une décennie le véhicule électrique le plus vendu dans le monde.
- En 2012, Tesla sort la berline sport Model S. Puis suivront le SUV Model X (2015), et la berline familiale Model 3 (2017) [1]
- En 2015 Toyota lance la Toyota Mirai : trois minutes suffisent pour faire un plein d'hydrogène, La même année, la Chine dévoile le premier tramway à hydrogène d'une capacité de 380 passagers.
- En 2020 Toyota annonce l'arrivée d'une nouvelle génération de sa Mirai, qui s'est déjà écoulée à quelques milliers d'exemplaires dans le monde.
- En 2020 Renault lance Kangoo et Master Z.E. Hydrogen : un maximum d'autonomie 100 % électrique
- En 2021 Le premier véhicule électrique de Dacia

### I.3 Véhicule tout électrique

L'expression "tout électrique" ou "en mode tout électrique", que l'on peut trouver à de nombreuses reprises dans les discours des médias ou les articles de presse, désigne un véhicule qui roule sans utiliser de moteur thermique. Le résultat ? Une consommation de carburant et un taux d'émission de CO<sub>2</sub> totalement nuls [2].

#### I.3.1 Fonctionnement d'un véhicule tout électrique

Le véhicule électrique comporte une batterie pour stocker l'énergie, un moteur à courant continu avec un système de contrôle et un chargeur de batteries (voir la figure I.1). Ainsi, le ou les moteurs électriques de traction sont reliés aux roues motrices. L'ordinateur contrôle, gère et régule la puissance. Une fiche de raccordement au réseau électrique permet le chargement des batteries via une prise traditionnelle [3].

VELCRI - Véhicule ELectrique à Charge Rapide Intégrée

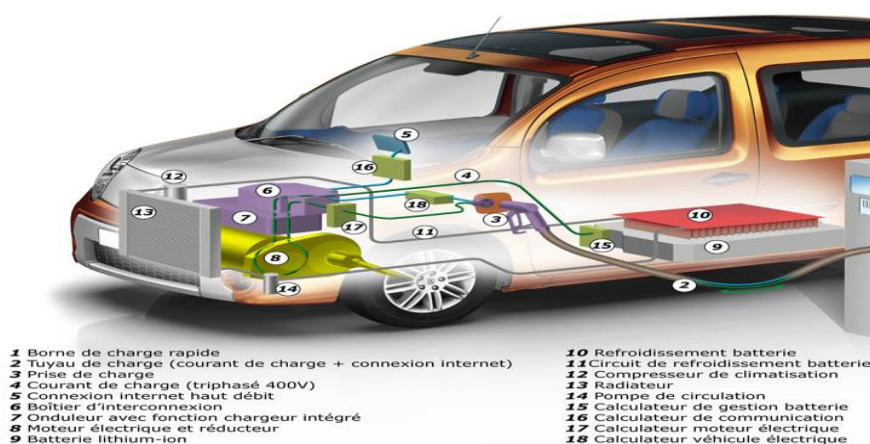


Figure I-1: Constitution d'un véhicule électrique

## Chapitre I : État de l'Art des véhicules hybrides tout électrique

### **I.3.2 Avantages et inconvénients de la voiture électrique [4] :**

- **Avantage :**

- Pas de polluants de l'air et pas d'émission de CO<sub>2</sub> à l'utilisation
- La réduction de l'utilisation des combustibles des fossiles pour le transport
- Économique à l'utilisation peu d'entretien

- **Inconvénient :**

- L'impact de ses batteries (son utilisation accroît la pression sur le métal Lithium rare)
- La capacité des batteries diminue au court du temps
- Le temps de recharge et la disponibilité des bornes
- Le coût élevé des voitures et cherté des batteries.

## **I.4 Hybridation des sources de stockage de l'énergie :**

### **I.4.1 Principe de l'hybridation des sources de stockage d'énergie:**

L'hybridation, qui par principe, combine les avantages de deux technologies (énergie spécifique élevée pour la première, puissance spécifique importante et disponible sur des durées appréciables pour la seconde), permet en particulier de séparer les dimensionnements en puissance moyenne et en puissance transitoire, l'intérêt principal résidant ici dans un gain substantiel en termes de volume et de masse.

Dans un système hybride, trois régimes de fonctionnement peuvent être définis :

Un régime dit "normal", pour lequel la puissance de la charge est inférieure à la puissance maximale de la source principale. La source principale fournit alors de l'énergie à l'organe de stockage et à la charge.

Un régime dit "décharge", pour lequel la puissance de la charge est supérieure à la puissance maximale de la source principale. Par conséquent, la source principale et l'organe de stockage fournissent de l'énergie à la charge.

Un régime dit "récupération", pour lequel l'utilisation du mode freinage permis de fournir de l'énergie à l'organe de stockage (et peut être à la source principale, si elle est rechargeable) [9].

### I.4.2 Différentes associations des sources de stockage d'énergie:

#### I.4.2.1 Association Batterie/super condensateur :

L'idée principale qui conduit au concept de source hybride consiste à introduire, en plus de la source d'énergie primaire (Batterie), une source de puissance (Super condensateur). Cette solution d'hybridation présente de bonnes performances notamment en terme du coût, de dimensionnement et de durée de vie des batteries qu'un système composé uniquement de batteries [6].

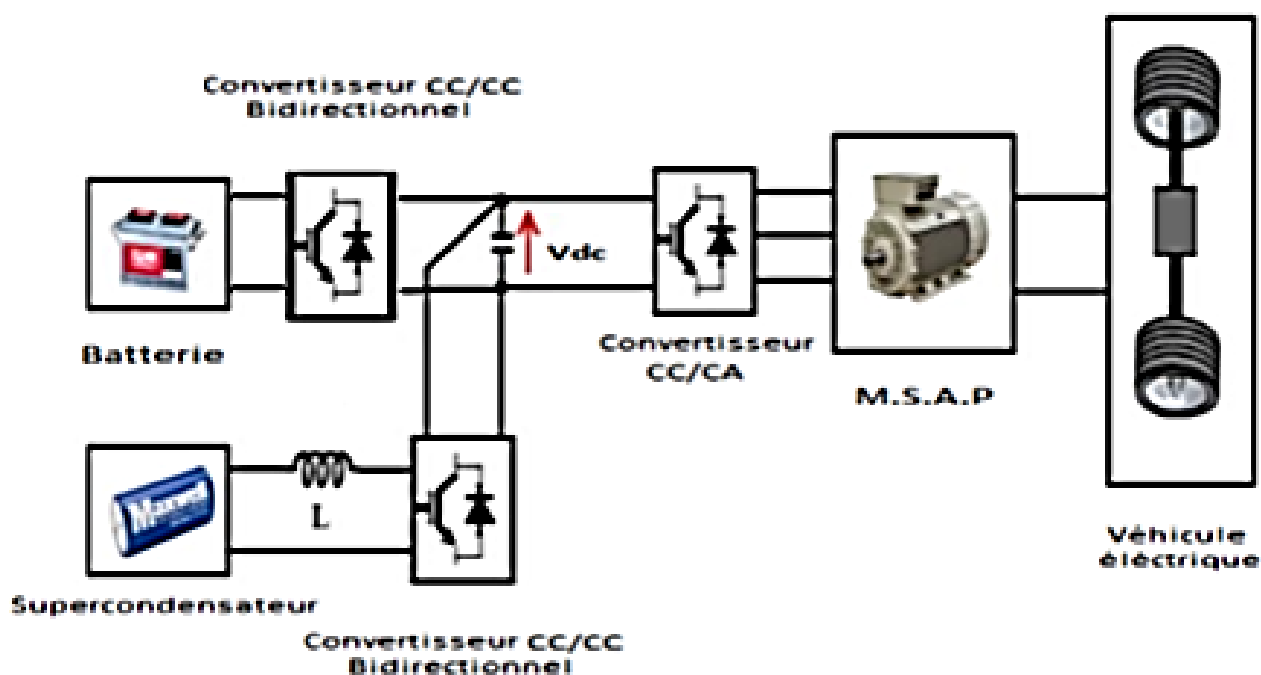
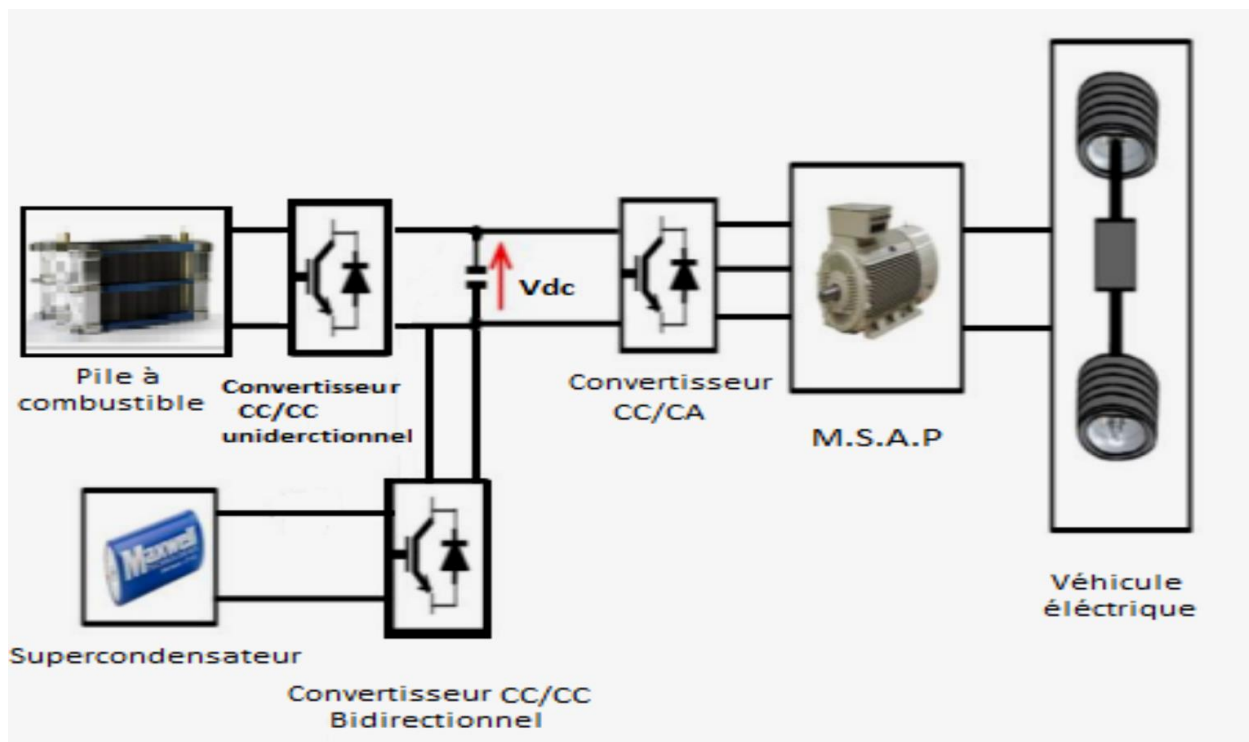


Figure I-2: Association d'une batterie/super condensateur

#### I.4.2.2 Hybridation super condensateur/pile à combustible :

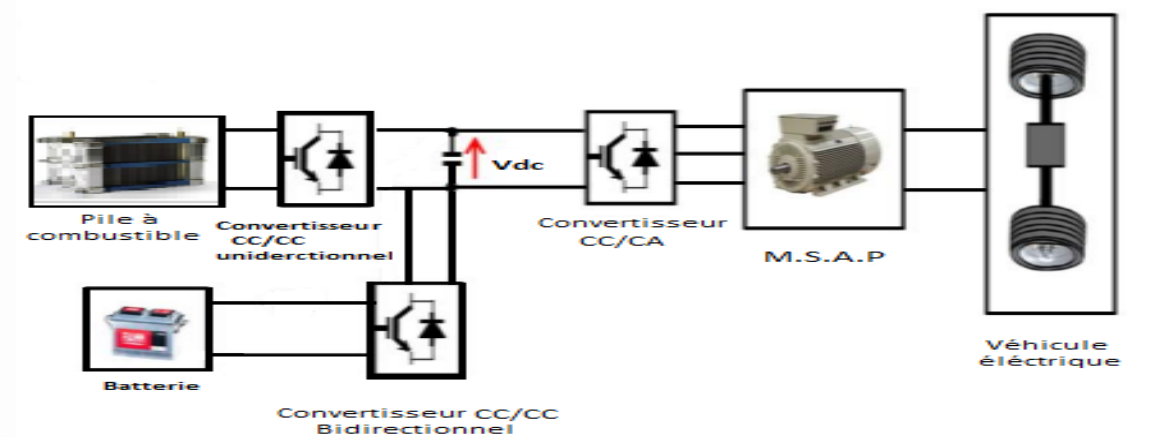
Cette hybridation consiste à combiner entre les deux puissances pour fournir la charge, une partie dédiée à la pile à combustible et l'autre aux super condensateurs. Cette répartition de puissance dépend de la stratégie de commande. La structure de cette source hybride contient un bus continu (CC) alimenté par une pile à combustible à travers un hacheur élévateur qui maintient la tension de la Pile à Combustible, un moyen de stockage basé sur des super condensateurs qui est connecté au bus continu à travers d'un hacheur abaisseur-élévateur bidirectionnel en courant. La pile à combustible est la source principale, son rôle est de fournir la majorité de l'énergie à la charge alors que le moyen de stockage (super condensateur) est une source auxiliaire qui alimente la charge pendant les régimes transitoires et récupère de l'énergie selon le mode de fonctionnement et son état de charge EDC [7].



**Figure I-3:** Hybridation d'un super condensateur et une PAC

#### **I.4.2.3 Hybridation d'une batterie et une pile à combustible :**

Ce Système hybride à pile à combustible/batterie, combine les avantages des deux sources d'énergie. La pile à combustible est considérée comme source principale qui fournit la majorité de la demande de la charge, alors que la batterie sert à compenser la puissance intermittente ou transitoire de la charge. De cette façon, ce système d'alimentation peut être intéressant pour certaines applications de secours ou de propulsion des véhicules électriques et les petits avions selon le type de la pile à combustible. Les sources de cette structure sont connectées à un bus continu à travers deux convertisseurs CC/CC [8].



**Figure I-4:** Association d'une pile à combustible et une batterie

### **I.5 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de présenter les types des véhicules à motorisation électrique avec leur principe de fonctionnement, leurs avantages et inconvénients et les différentes techniques d'hybridation de ces sources.

Dans notre étude nous allons prendre le cas de l'hybridation des sources par l'association de la pile à combustible/super condensateur d'où l'intérêt de ce véhicule hybride tout électrique est sa capacité de combiner entre les deux sources d'énergie et de bénéficier ainsi des avantages du véhicule tout électrique (zéro pollution et récupération d'énergie).

Dans le prochain chapitre nous allons faire l'étude et la modélisation de la pile à combustible.

# **Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible**



### II.1 Introduction :

Les piles à combustibles offrent des possibilités intéressantes pour alléger les problèmes principalement liés à la production et à la consommation d'énergie.

Dans ce 2<sup>ème</sup> chapitre, nous détaillons le principe de fonctionnement des piles à combustible différentes caractéristiques tels que la tension à vide, le rendement... etc.

### II.2 Bref historique :

- 1766 – L'hydrogène est découvert par Lavoisier comme élément distinct (il y a environ 250 ans)
- 1801 – Humphry Davy démontre le principe de ce qui va devenir la pile à combustible
- 1806 – Le développement du premier moteur à combustion qui utilise de l'hydrogène et de l'oxygène
- 1839 – Sir William Grove invente le principe de la batterie alimentée par des réactifs gazeux H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>, appelée plus tard pile à combustible
- 1842 – On démontre qu'il est effectivement possible de produire suffisamment d'électricité avec des batteries alimentées par des réactifs gazeux, de l'hydrogène et de l'oxygène. On démontre l'utilité.
- 1889 – Charles Langer et Ludwig Mond développent l'invention de William Grove et l'appelle pile à combustible
- 1955 – La pile à combustible du type PEM (Proton Exchange Membrane) est inventée. PEM= membrane échangeuse de protons
- 1966 – La NASA utilise pour la première fois une pile à combustible pour une mission spatiale (il y a plus de 50 ans)
- 1970s – Les crises pétrolières incitent au développement de technologies énergétiques alternatives, notamment les piles à combustible à acide phosphorique (PAFC)
- 1980s – La marine militaire US utilise des piles à combustible dans des sous-marins
- 1990s – Des piles à combustible stationnaires de fortes puissances sont développées pour des sites commerciaux et industriels (il y a environ 30 ans)
- 2003 – Le premier avion motorisé par une pile à combustible décolle
- 2004 – Des bus à hydrogène motorisés par une pile à combustible circulent dans Londres
- 2007 – Des piles à combustible portables commencent à être commercialisées

## **Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible**

- 2008 – La première voiture à pile à combustible de type PEM est introduite sur le marché US
- 2009 – On commercialise les premiers chargeurs de batteries alimentés par une pile à hydrogène
- 2015 – La première station-service hydrogène est inaugurée en Angleterre. Des taxis hydrogène commencent à circuler dans Paris (Hype)
- 2016 – Le premier avion avec passagers utilisant une pile à combustible décolle
- 2017 – Les premiers trams propulsés par une pile à combustible sont lancés en Chine. La flotte de taxis hydrogène parisiens atteint les 100 véhicules.
- 2018 – Un premier train à hydrogène est inauguré en Allemagne. La police de Londres ajoute des véhicules hydrogène à leur flotte, les pompiers de la Manche en France font de même... Il y a de plus en plus de projets de ce type en Europe et dans le monde.
- 2019 – Un drone alimenté par une pile à combustible vole pendant une heure avec une charge utile de 5kg [11].

### **II.3 Définition et principe de fonctionnement de la pile à combustible:**

La pile à combustible est connue depuis assez longtemps, cette dernière nécessite de l'hydrogène, consomme l'oxygène et rejette de l'eau, ce qui en fait une source d'énergie particulièrement propre.

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est le principe inverse de l'électrolyse, comme un accumulateur, la pile à combustible comporte deux électrodes : l'anode et la cathode où se déroulent des réactions d'oxydation et de réduction. Ces deux électrodes sont séparées par un électrolyte. On alimente en hydrogène et oxygène et on constate l'apparition d'une tension électrique entre les deux électrodes: le dispositif est devenu un générateur électrique qui fonctionnera aussi longtemps qu'il sera alimenté. Pour cela elle est constituée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte, matériau qui bloque le passage des électrons mais laisse circuler les ions (figure II.1). Selon le type de pile, les réactions chimiques intermédiaires qui interviennent diffèrent mais le principe demeure le même [12].

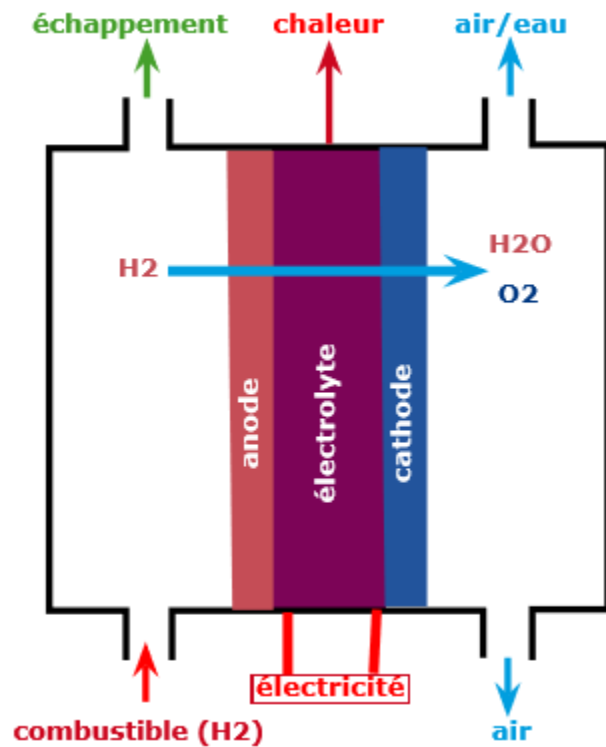


Figure II-1:Schéma de principe de la pile à combustible

### II.4 Les différents types des piles à combustible

Les piles à combustible sont classées en se basant sur des critères différents telles que : la température de fonctionnement (haute de 600° à 1000° et basse de 60° à 250°), la nature de la membrane utilisée (liquide ou solide) et le type de combustible (hydrogène, méthanol, gaz naturel). De ceci ils ont fini par avoir six types différents des piles à combustible qui sont :

Les piles à basse température de fonctionnement :

- Les piles à combustible à membranes polymères échangeuse de protons (**PEMFC** Proton Exchange Membranes Fuel Cell).
- Les piles à combustible à méthanol directe (**DMFC** Direct Methanol Fuel Cell).
- Les piles à combustible à acide phosphorique (**PAFC** Phosphorique Acid Fuel Cell).
- Les piles à combustible alcaline (**AFC** Alkaline Fuel Cell).

☐ Les piles à haute température de fonctionnement :

- Les piles à combustible à oxydes solides (**SOFC** Solid Oxyde Fuel Cell).
- Les piles à combustible à carbonates fondus (**MCFC** Molten Carbonate Fuel Cell) [13].

## Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible

La comparaison entre ces différents types est résumée dans le tableau suivant (tableau II.1)

**Tableau II-1** : Tableau comparatif des différentes piles à combustibles [14]

Type de la pile.	PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	MCFC	SOFC
<b>Electrolyte</b>	Membrane en polymère solide.	Membrane en polymère solide.	Acide phosphorique liquide H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> .	Potasse liquide KOH.	Sels fondus Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /Na <sub>2</sub> CO.	Céramique.
<b>Température de fonctionnement</b>	60°-100°C	60°-100°C	160°-220°C	50°-250°C	600°-800°C	750°-1050°C
<b>Combustible utilisé</b>	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène	Hydrogène, Gaz naturel.	Hydrogène, Gaz naturel.	Hydrogène, Gaz naturel.
<b>La puissance électrique</b>	1W-700kW	1W-100Kw	10kW-10MW	1W-100Kw	500Kw-100MW	1MW-100MW, (1GW cogénération).
<b>Rendement électrique</b>	40-55%	30-45%	35-50%	45-60%	45-55%	45-70% (60-90% cogénération)
<b>Applications</b>	Immeuble, véhicule, sous-marins, spéciales	Immeuble, véhicule, sous-marins, spéciales.	Cogénération, transport.	Spatiale militaire	Cogénération production de l'électricité décentralisée	Cogénération production de l'électricité décentralisée

### II.4.1 Pile à combustible à Basse Température :

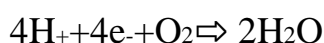
Ce sont des piles qui fonctionnent à une température basse (60°C-250°C), on distingue quatre types qui sont : PEMFC, DMFC, PAFC et AFC.

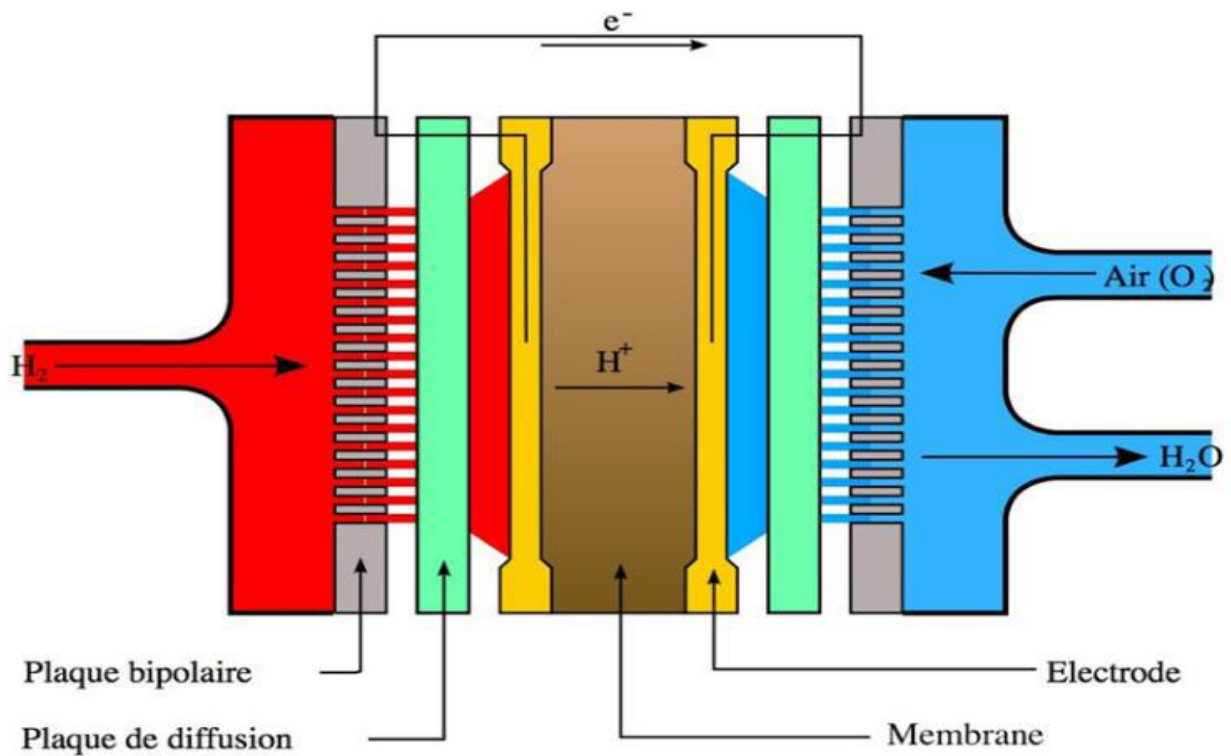
#### II.4.1.1 Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) :

Cette technologie de pile est la plus répandue et la plus étudiée, elle fonctionne à des températures basses au voisinage de 80°C, elle transforme l'énergie chimique libérée durant la réaction électrochimique du dihydrogène (H<sub>2</sub>) et du dioxygène (O<sub>2</sub>) en énergie électrique, cette opération est l'opposée de l'électrolyse de l'eau. L'hydrogène est injecté vers l'anode, il est directement divisé à l'aide d'un catalyseur (platine) en protons et électrons. La réaction d'oxydation dans la demi-cellule à l'anode est la suivante :



Instantanément, l'oxygène présent dans l'air est injecté vers la cathode, les molécules de dioxygène réagissent avec les protons traversant la membrane électrolyte polymère alors que les électrons passent par le circuit externe afin de former les molécules d'eau. La réaction de réduction dans la demi-cellule électrolytique s'écrit



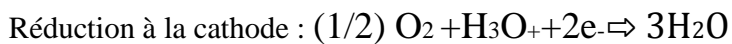
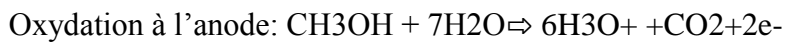


**Figure II-2 :** Schéma de principe d'une PEMFC

#### II.4.1.2 Pile a Methanol Direct: (DMFC)

Cette technologie de pile utilise du méthanol et l'eau comme combustible directement injecté sur l'anode. Elle utilise une membrane échangeuse de protons. Le catalyseur à l'anode est composé d'un mélange de ruthénium et de platine qui empêche l'empoisonnement par le monoxyde de carbone. Les plaques bipolaires sont, quant à elles, faites de graphite, de métal ou de composite [15] [16].

Les deux réactions d'oxydation et de la réduction sont les suivantes :



## Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible

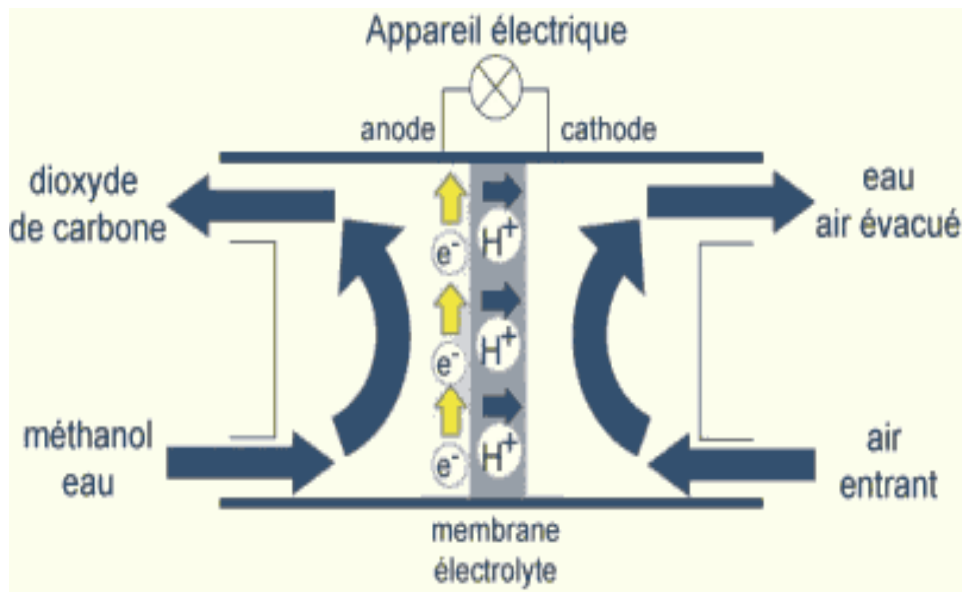


Figure II-3: schéma de principe d'une DMFC

### II.4.1.3 Pile à acide phosphorique (PAFC) :

Cette technologie est généralement utilisée pour les applications stationnaires, l'électrolyte utilisé est l'acide phosphorique H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, il est contenu dans une matrice poreuse. Un des avantages de l'acide phosphorique est qu'il ne réagit pas avec le CO<sub>2</sub> qui rend possible l'utilisation de gaz issus de reformage, cependant cette pile doit être maintenue à une température supérieure à 42°C même à l'arrêt pour éviter la solidification de l'électrolyte. Elle fonctionne sous une température comprise entre 180°C et 210°C. Les électrodes sont réalisées en charbon actif et sont recouvert de platine.

Les réactions catalysées sont les suivantes :

À l'anode:  $2\text{H}_2 \Rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

À la cathode:  $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \Rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

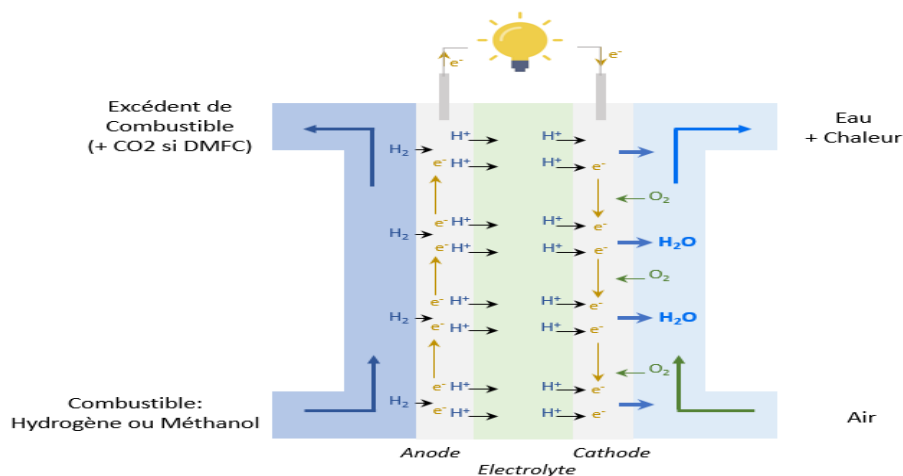


Figure II-4: schéma de principe d'une PAFC

## Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible

### II.4.1.4 Pile alcaline (AFC) :

Cette technologie est parmi les plus anciennement développées, elle a été utilisée pour alimenter la navette spatiale Apollo, elle fonctionne sous température moyenne entre 100 et 120°C, à pression atmosphérique, mais elle peut supporter une température d'environ 230°C à haute pression, elle nécessite un catalyseur noble à la cathode mais peuvent s'en passer à l'anode ou le nickel est suffisant.

Cette pile utilise la potasse sous forme aqueuse (KOH) comme électrolyte, les gaz réactifs ne doivent pas contenir du monoxyde ni du dioxyde de carbone pour éviter de contaminer le platine à la cathode par le CO et aussi pour éviter de réduire la mobilité des ions à cause du CO<sub>2</sub>, son rendement est le plus élevé comparé aux autres technologies de piles.

Les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode sont les suivantes :

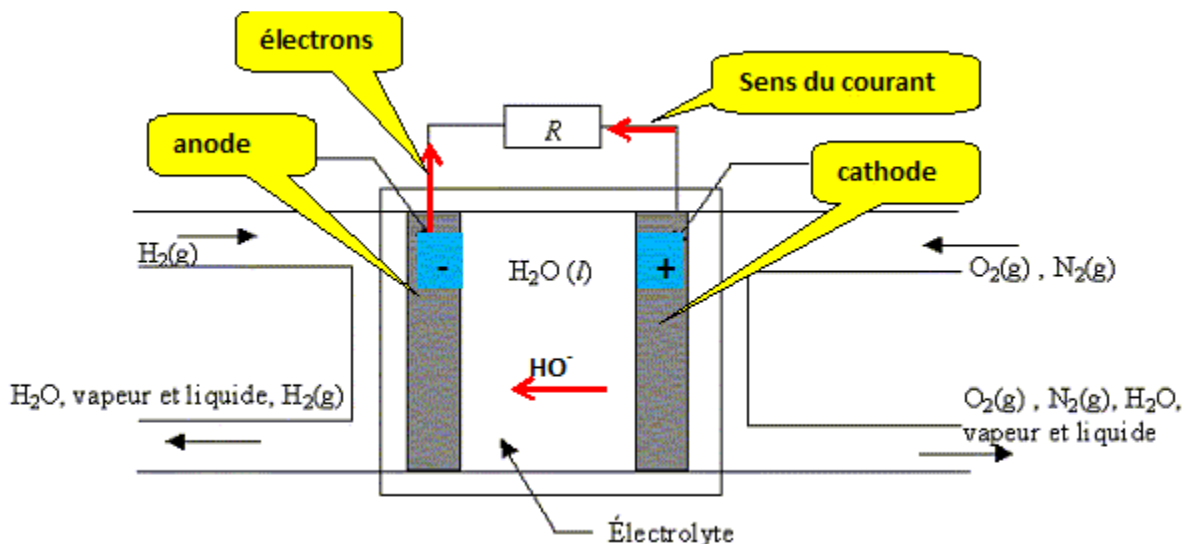
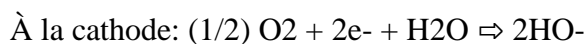
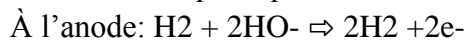


Figure II-5: Schéma de principe d'une AFC

### II.4.2 Piles à combustible à haute température :

Ce sont des piles à combustibles utilisées généralement pour la production décentralisée de l'énergie électrique, on distingue deux types qui sont : MCFC et SOFC.

#### II.4.2.1 Pile à carbonate fondue (MCFC) :

Les MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell), considérées comme étant des piles de deuxième génération, elles ont une température de fonctionnement très haute entre 600 et 800°C ce qui améliore la cinétique de la réaction de réduction de l'oxygène et rend inutile l'utilisation de métaux nobles comme catalyseurs.

Elles utilisent un mélange de carbonate de lithium et de potassium (Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 62% - 38%) comme électrolyte. Ces composés ont des particularités très intéressantes ils sont de bons conducteurs ioniques entre 600 et 700°C, ont un point de fusion assez bas et leurs non

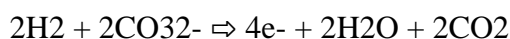
## Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible

toxicité. Les carbonates sont maintenus dans une matrice en aluminat de lithium ( $\text{Li AlO}_2$ ) son épaisseur est de l'ordre de 400 nm.

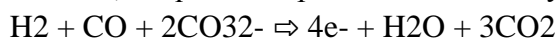
Dans ce type de pile les ions carbonatés  $\text{CO}_3^{2-}$  sont les ions qui font la transaction ionique à travers l'électrolyte.

Les réactions d'oxydation et réduction dans le cœur de la pile sont les suivantes :

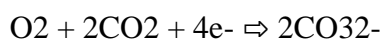
À l'anode:



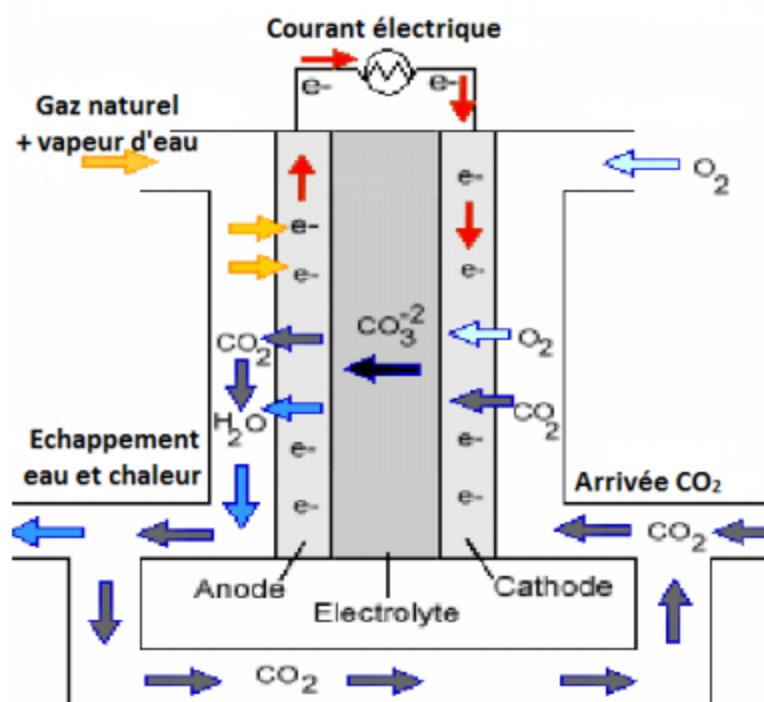
Généralement l'hydrogène est produit par reformage interne à partir d'hydrocarbures ou d'alcool, ce qui fait la présence du monoxyde de carbone et la réaction devient comme suite :



À la cathode:



La figure (II-6) suivante explique le processus de reformage interne du gaz naturel au cœur d'une pile de type MCFC:



**Figure II-6:** Schéma de principe d'une cellule MCFC alimentée en gaz naturelle (reformage interne)

### II.4.2.2 Pile à oxyde solide (SOFC):

Ce type de piles aussi fonctionne à de très hautes températures de l'ordre de  $650^\circ\text{C}$  à  $1000^\circ\text{C}$ , mais à la différence de la technologie MCFC, elles ont un rendement électrique plus important (50% à 70%), elles sont généralement exploitées en cogénération pour la production décentralisée d'électricité et chauffage, ou elles peuvent produire des puissances allant de 1KW à des centaines de MW.



## Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible

Elles se caractérisent par leur moindre sensibilité aux différents types de combustibles. Le fonctionnement à très hautes températures permet le remplacement des métaux précieux aux électrodes par d'autres moins chers ce qui rend les coûts de fabrication plus bas. L'électrolyte utilisé dans la conception de cette technologie est sous forme solide généralement du Zircon (Zr<sub>2</sub>) dopé avec de l'ytterbium (Y<sub>3</sub><sup>+</sup>) lequel joue le rôle de conducteur pour l'ion oxygène (O<sub>2</sub><sup>-</sup>). Contrairement aux autres technologies, la pile à oxyde solide peut être de forme tubulaires ou planaires [17] [18].

Les électrodes de la SOFC sont de type poreux, ce qui permet aux gaz d'accéder plus rapidement aux lieux d'oxydoréduction. Les ions qui traversent l'électrolyte sont les ions oxygène O<sub>2</sub><sup>-</sup>.

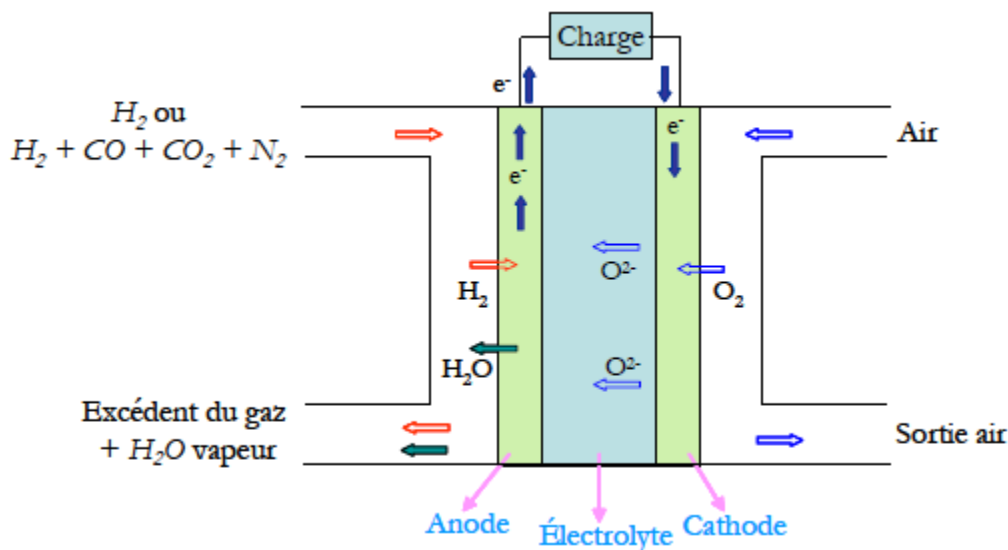
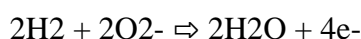
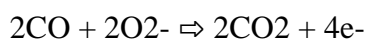


Figure II-7: schéma de principe d'une cellule de SOFC

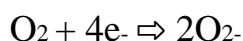
Les réactions à l'anode et à la cathode sont les suivantes :  
À l'anode :



En cas d'utilisation d'un autre combustible que l'hydrogène : méthane, essence, charbon gazéifié, méthanol....., qui deviennent après reformage un mélange constitué essentiellement de H<sub>2</sub> et CO.



À la cathode dans les deux cas, à l'aide d'un catalyseur au manganite de luthane dopé au strontium, on a la réaction suivante :



### II.5 Applications des piles à combustibles:

La pile à combustible est utilisée pour remplacer les piles et batteries actuelles. En effet, au niveau énergétique, une PEMFC stocke 3 fois plus d'énergie qu'une batterie standard. On

## Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible

remarque aussi qu'elle a une bonne autonomie, une durée de vie plus longue mais surtout qu'elle ne se décharge pas en dehors de l'utilisation.

### ➤ **Le transport:**

La PAC est utilisée dans les transports depuis XVIIIème siècle, les physiciens Jacques Charles et Noël Robert ont effectué un voyage aérien dans un ballon appelé « aérostat à gaz hydrogène ». Elle est également utilisable pour la propulsion dans le domaine des transports. Utilisé pour la propulsion de fusée (Ariane V). Pour les avions et les bateaux (sous-marins) l'utilisation de l'hydrogène n'est pas encore maîtrisée, les expériences en sont au stade de prototype. En revanche, les piles à combustible ont de nombreuses opportunités.

### ➤ **Voiture**

L'entreprise Honda a mis en place la « Honda FCX Clarity », dont les premiers essais ont eu lieu en 2009. Son autonomie beaucoup plus élevée que les voitures électriques, 700km et son temps de chargement nettement plus rapide, seulement 3 minutes. Elle n'est cependant pas commercialisée du fait de son prix exorbitant. De plus pour les rares clients pouvant se l'offrir il est nécessaire de vivre assez proche d'une station. De plus l'installation d'une station à hydrogène coûterait entre 2.5 et 4 millions d'euros. 358 piles à combustible forment "une batterie" situées sous le capot. Il y a deux réservoirs, un principal de 117 litres plaqué contre le dossier de la banquette tandis qu'un second, de 24 litres, sous l'assise. Il y en a deux car le stockage de l'H<sub>2</sub> à 700 bars impose une forme cylindrique à la bonbonne, il faut donc trouver une place suffisante.

### ➤ **Train**

L'entreprise Alstom a signé un contrat fin 2017 pour 14 rames de trains sur la région de Basse-Saxe. Les premiers trains devraient circuler en Allemagne d'ici 2021. Ces trains sont high tech et ne rejettent que de la vapeur d'eau. Ils peuvent transporter 300 personnes à 140km/h avec une autonomie de 1000km et sont totalement silencieux. Les réservoirs d'hydrogène qui alimentent la pile sont situés sur le toit.

### ➤ **Vélo**

L'entreprise Pragma industrie à Biarritz a mis en place des vélos électriques. Les vélos "Alpha" ont été financés par une campagne de financement participatifs. La 1ère génération de vélos est sortie fin 2017. Leur autonomie est d'une centaine de kilomètres

### ➤ **Bateau**

Les piles à combustible ont un rôle important dans la propulsion des sous-marins car elles sont bien plus autonomes que les batteries classiques. De plus leur fonctionnement est bien plus discret. Elles alimentent donc des sous-marins militaires. De plus, le 06 Novembre 2017, la ville de La Rochelle a inauguré Yélo H<sub>2</sub>, le premier bus maritime propulsé à l'hydrogène.

### ➤ **Appareils portables**

## Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible

Les piles à combustibles sont aussi utilisées dans le domaine portable. Que ce soit les téléphones mobiles, les ordinateurs portables ou encore les tablettes tactiles, leur autonomie est considérablement augmentée grâce à la pile à combustible. Par exemple, la société BIC s'était lancée dans le développement de batteries de portables alimentées par une pile à combustible mais les évolutions des batteries au lithium se sont avérées plus rapides. En 2014, BiC a donc décidé d'abandonner son projet de mini-piles à combustible pour smartphone et de revendre ses activités au plus offrant. C'est finalement Intelligent Energy une société britannique a récupéré les technologies ainsi que les brevets développés par BiC depuis 2003. Intelligent Energy a développé un prototype d'iPhone 6 équipé d'une pile à combustible qui lui confère une semaine d'autonomie. La seule modification visible sur l'iPhone est la présence d'évents à l'arrière de la coque, ils évacuent la vapeur d'eau produite par la pile à combustible. Cette dernière est rechargée par une cartouche contenant de l'hydrogène qui se branche sur la prise casque du téléphone. Cependant une prise pourrait être intégrée au portable.

On remarque en étudiant ces exemples que le développement des applications liées à la pile à combustible s'est accéléré ces 10 dernières années. De plus, la pile à combustible a de nombreux avantages pour les appareils portables en matière de rendement mais aussi de coût. La pile à combustible devient alors un concurrent sérieux en matière de production d'électricité.

### ➤ **Appareils stationnaires**

Les piles à combustibles peuvent également être sources d'énergie délocalisée. Les domaines d'applications sont la production collective et la production individuelle. Le rendement est variable selon la taille de l'installation. Les petites unités sont utilisées pour le chauffage domestique. Elles fournissent également de l'eau chaude et de l'énergie électrique, c'est la cogénération (capacité de récupérer la chaleur en plus de l'électricité). L'électricité produite est autoconsommée. Le surplus est livré au réseau, sans comptage. Le rendement total est estimé à un peu plus de 80%.

En France, depuis début 2015, 7 piles à combustible appartenant à l'entreprise Vaillant sont installées : 2 en Île-de-France, 3 en Alsace, une dans l'Aube et une dans le Nord. Pour la production collective le premier modèle a été mis en place en France début 2000 par EDF afin d'alimenter le groupe HLM à Chelles. La pile fournit chaleur et électricité à l'équivalent de 200 foyers. À terme l'objectif est d'abaisser la facture d'électricité et de chauffage de 20% [19].

### ➤ **Innovations et applications futures**

L'utilisation de la pile à combustible peut être améliorée de différentes manières. Tout d'abord la méthode de production de H<sub>2</sub> via panneaux photovoltaïques peut être développée. Les chercheurs tentent d'utiliser une photosynthèse artificielle ou coupler une cellule solaire simple et une photo anode. Le rendement actuel de 5 % dans la conversion de la lumière solaire en hydrogène. Ce couplage pile à combustible/panneaux solaires permettrait de réaliser la transformation de l'eau en dioxygène et en dihydrogène selon le principe de

## **Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible**

l'électrolyse. Ce dispositif pourrait par conséquent alimenter un appareil de manière autonome. Une application concrète de cette méthode est la plateforme Myrte située en Corse.

La plateforme est composée de panneaux solaires (3700 m<sup>2</sup>) associé à un système de production et de stockage d'hydrogène. Un autre principal objet de recherche concerne la diminution de prix du catalyseur car le platine est extrêmement coûteux. C'est pourquoi des études sont menées pour réussir à le récupérer afin de le recycler. Il existe aujourd'hui des procédés industriels permettant sa récupération, ils sont basés sur l'hydrométallurgie (consiste à séparer et récupérer des métaux) et produisent des gaz toxiques en grande quantité. Les nouveaux traitements se basent sur l'hydrométallurgie car l'impact environnemental est plus faible. L'utilisation d'autres catalyseurs comme le cobalt est envisagée, il est beaucoup moins cher mais le rendement est nettement inférieur. Le problème de stockage du dihydrogène est également un vecteur important de recherches. La société McPhy propose de stocker le dihydrogène sous forme solide en plus de la réserve classique. Cela permet de réduire le volume occupé et de réduire le risque d'explosion. Une autre solution est d'utiliser des galettes d'hydrure de magnésium, il est possible d'éviter ces risques grâce à l'absorption et la désorption endothermique de l'hydrogène qu'il n'est plus nécessaire de mettre sous pression. Cependant l'hydrogène n'est pas relâché assez vite dans la pile, des solutions doivent donc être mises en place afin de palier à ce problème.

### **II.6 Choix technologique de la pile à combustible :**

#### **➤ La PEM dans la traction de véhicule hybride**

Parmi tous les types de piles à combustible connus, la pile à membrane échangeuse de protons reste la plus utilisée dans le domaine d'automobile, mais elle n'a pas été choisie aléatoirement, plusieurs raisons expliquent ce choix.

#### **➤ 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 avec une densité de puissance comprise entre 1 kg/kW et 3 kg/kW.

#### **➤ 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 et elle est, ensuite, insensible à la présence du CO<sub>2</sub> dans l'air, contrairement à la filière alcaline [15] [20].

### II.7 Principe de fonctionnement de la PEMFC:

La PEMFC fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, le cœur de la pile est constitué d'une électrode négative (anode) où a lieu la réaction d'oxydation du carburant (Hydrogène) et d'une électrode positive (cathode) où est réduit le comburant (Oxygène présent dans l'air), le carburant et le comburant sont acheminés à travers des couches de diffusions pour atteindre les électrodes, ces dernières sont séparées par un électrolyte qui fait office de barrière pour les électrons, ce qui fait qu'ils passent par le circuit électrique extérieur à travers une charge électrique (figure II.8).

Les réactifs doivent être fournis à la pile tout en respectant certaines conditions de pression, température et hygrométrie pour garantir des performances optimales [21] [22].

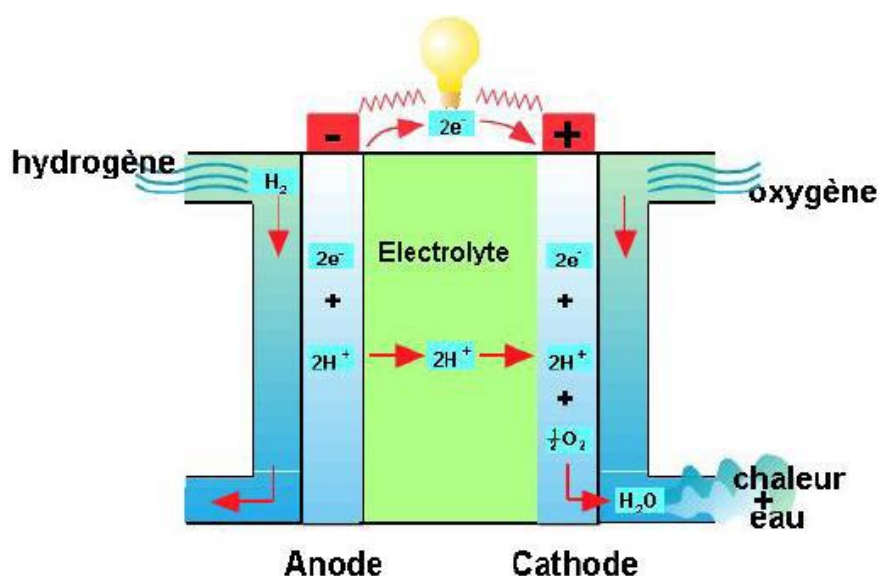
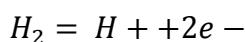
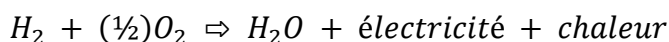


Figure II-8: Principe de fonctionnement d'une pile PEM

À l'anode on a la réaction de l'Hydrogène avec le catalyseur (Platine) pour donner des protons ( $H^+$ ) et des électrons ( $e^-$ ) selon la réaction suivante :



Au finale nous avons la réaction globale :



L'équation (I.3) résume le principe de fonctionnement de la pile à combustible et montre les différents échanges entre l'anode et la cathode [21].

#### II.7.1 Avantages et inconvénients de la pile à combustible PEM :

Les avantages et les inconvénients des piles à combustible diffèrent d'un type à l'autre, ils dépendent donc de la nature de la pile, et de l'usage auquel elle est destinée. Notre intérêt ici est dirigé vers la pile de type PEM. Plusieurs avantages et inconvénients de cette pile on les trouve dans les autres types de piles.

## Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible

### ➤ Avantages :

- ❖ Un rendement de conversion important
- ❖ Un générateur propre
- ❖ Un système modulable
- ❖ Utilisées en production décentralisée d'électricité
- ❖ La possibilité de faire appel à de multiples combustibles
- ❖ Des coûts de maintenance à priori très réduits
- ❖ Ils peuvent fonctionner à des températures relativement basses
- ❖ Ils ont une haute densité de tension, de courant et d'énergie.

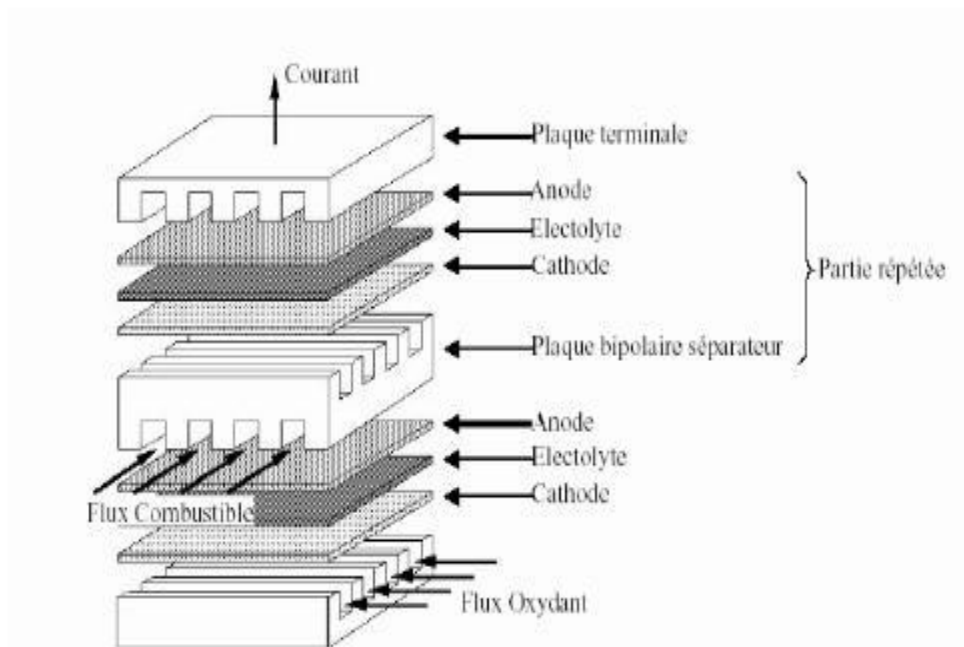
### ➤ Inconvénients :

- ❖ Coûts de fabrications élevés
- ❖ Une durée de vie encore faible
- ❖ Ils ont une dynamique lente
- ❖ Ils sont très sensibles aux impuretés de l'hydrogène.
- ❖ Ils ont besoin d'unités d'humidification des gaz réactifs [23]

## II.8 Constitution d'une PEMFC :

L'élément de base principal du cœur de la pile est la cellule élémentaire. Celle-ci est constituée d'un empilement regroupant les électrodes (anodes et cathodes), l'électrolyte (membrane), les couches de diffusion et les plaques bipolaires [24].

La figure (II.9) illustre les composants du stack de la PEMFC [25].



**Figure II-9:** structure d'un empilement de cellule PEMFC

## Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible

### II.8.1 Les plaques bipolaires :

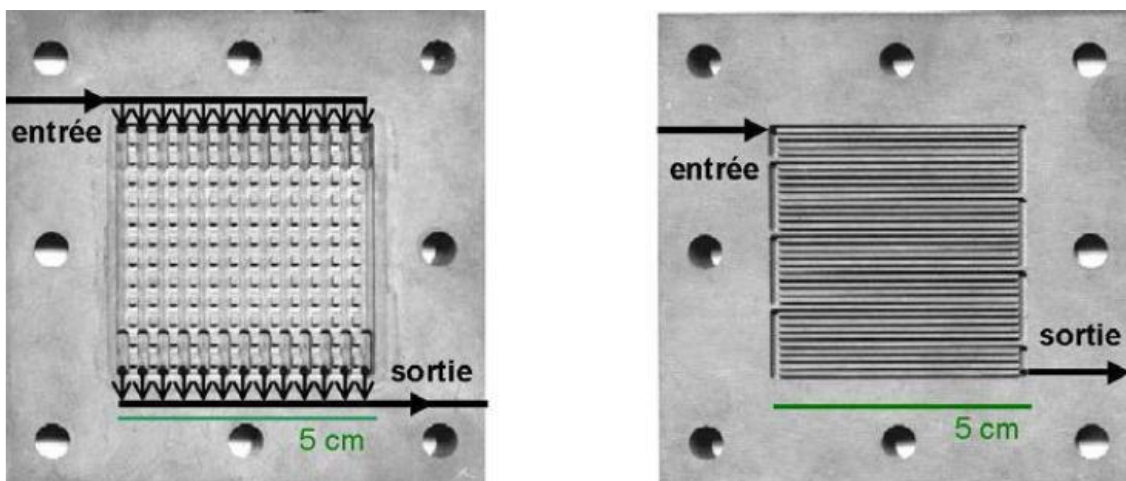
Les plaques bipolaires sont équipées de canaux de distribution des gaz combustible et comburant de chaque côté, elles sont aussi en contact avec les surfaces des électrodes ce qui permet :

- ✓ La collecte des électrons (du courant).
- ✓ La distribution et la séparation des gaz à l'anode et à la cathode.
- ✓ L'évacuation des produits formés (l'eau à l'anode).

Les plaques doivent avoir une perméabilité très faible à l'hydrogène, et une très bonne conductivité électrique (supérieur à 10 siemens/cm) et une bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides présents dans le cœur de la pile (eau, acide, oxygène).

La plupart des plaques bipolaires sont réalisées en graphite les gaz acheminés passe par des canaux usinés. La phase d'usinage des canaux rend les prix de ces plaques très élevés. Malgré leur disponibilité sur le marché les prix élevés ne permettent pas d'envisager une utilisation industrielle. Pour réduire ce coût, deux autres plaques bipolaires ont été mise au point.

Les plaques bipolaires à base de composites organiques. Ces plaques reposent sur l'utilisation de charge (carbone, graphite ...) dispersé dans un matériau thermoplastique ou thermodurcissable. Ces charges vont donner aux plaques bipolaires la conductivité électrique nécessaire à la collecte de courant et le liant polymère leur bonne tenue mécanique nécessaire à l'assemblage des différents éléments. L'intérêt majeur réside d'une part dans le faible cout des matières de base et d'autres part dans le fait que les canaux de distributions peuvent être obtenus directement par moulage du polymère chargé sur une empreinte sans phase ultérieur d'usinage.



**Figure II-10:** structure des électrodes et la zone de triple contact

Les plaques bipolaires à base de métaux et alliages, et particulièrement les aciers inoxydables celle-ci présentent un ensemble de propriété (tenue mécanique, étanchéité, conductivité électrique, aptitude à la mise en forme et l'assemblage par des procédés de

## Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible

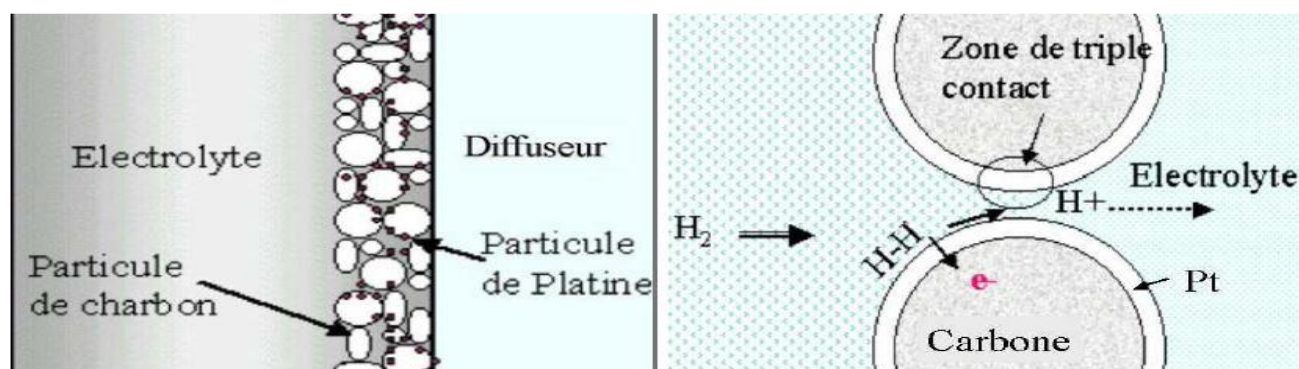
production de masse) qui en font des candidates de choix pour la conception et la réalisation de plaques bipolaires compactes, légères et bon marché. Leur densité supérieure à celle du graphite impose de les utiliser sous forme de feuilles minces, facilement mises en forme par emboutissage. Dans ces conditions, l'évacuation des calories et le contrôle de la température du module en fonctionnement peuvent être assurés précisément par circulation d'un fluide de refroidissement interne [26].

### II.8.2 Les électrodes :

Les mécanismes réactionnels, à l'anode et à la cathode sont en réalité composés d'étapes intermédiaires faisant intervenir la platine, catalyseur de la réaction et les espèces absorbées.

La complexité du mécanisme réactionnel à la cathode se traduit par des surtensions cathodiques nettement plus importantes que les surtensions anodiques.

Les électrodes doivent pouvoir assurer le transfert des protons depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites de réductions de l'oxygène via la membrane. De même, les électrons produits à l'anode doivent pouvoir être évacués puis redistribués à la cathode par le circuit extérieur. Ainsi, les électrodes doivent assurer une bonne conductivité ionique et électronique. Pour cela, elles sont constituées d'un mélange intime de carbone (conducteur électronique), d'électrolyte (conducteur protonique) et de platine (catalyseur). Ces zones de triple contact, comme illustré sur la figure (II.11), sont nécessaires à leur bon fonctionnement [27].



**Figure II-11:** Structure des électrodes et la zone de triple contact.

Elles sont réalisées par dépôt d'un mélange de poudre de carbone platinée, de particules de PTFE et d'électrolyte polymère sur un tissu de carbone actif, puis généralement déposées par pressage à chaud sur la membrane. Les conditions de fabrication de ces composants, et par conséquent leur différence de structure, déterminent largement leur performance de structure, déterminant largement leurs performances. L'épaisseur des électrodes poreuses ne dépasse pas quelques dizaines de  $\mu m$ .

Avec le temps, on peut assister à une baisse d'activité des particules de catalyseurs qui, bien qu'elles ne soient pas consommées lors de la réaction, s'effritent progressivement et n'assurent plus le contact avec l'électrolyte. De plus, les électrodes sont très sensibles au



## Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible

monoxyde de carbone qui peut être un des produits du reformage de l'hydrogène. Quelques ppm de CO suffisent à empoisonner les sites actifs, avec pour conséquence une chute de potentiel.

Le fonctionnement en oxygène pur ou air enrichi en oxygène dans les diffuseurs et surtout dans les pores de l'électrode est facilitée. Toutefois, ces progrès sont à comparer aux surcouts et à difficultés relatives à la complexification du système [28].

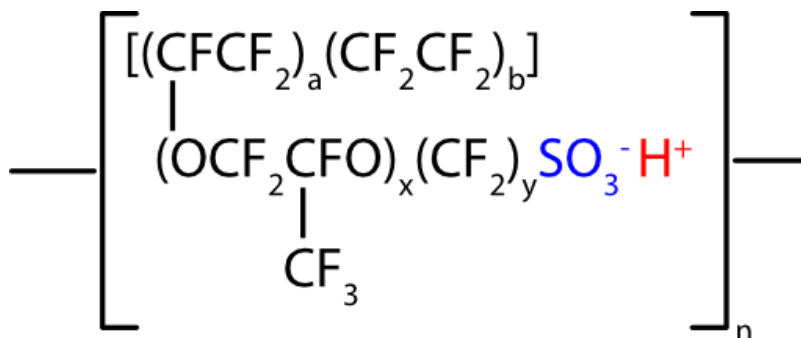
### II.8.3 La membrane :

C'est l'une des constituants les plus importants de la pile PEMFC. Les performances de la pile dépendent directement de ces caractéristiques électriques, chimiques et mécaniques. Son rôle principal : la séparation entre les deux compartiments anodiques et cathodiques.

De nombreux essais ont été réalisés pour concevoir une membrane idéale pour la pile PEM, couronnés d'échec, les chercheurs se sont orientés vers l'élaboration d'une membrane à structure perfluorée pour obtenir une bonne stabilité chimique en milieu oxydo-réducteur, cette structure sert aussi de support mécanique qui supporte les électrodes sur chacune de ses faces.

La membrane Nafion est l'électrolyte le plus commercialisé, c'est un polymère composé de groupements d'acides sulfonates  $\text{SO}_3^-$  qui assure le transfert des protons de l'anode vers la cathode.

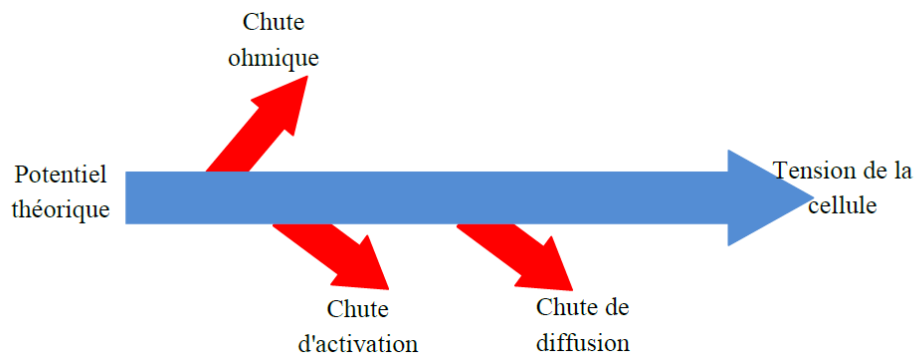
La figure I.12 représente la structure de la membrane Nafion.



**Figure II-12:** structure de la membrane Nafion.

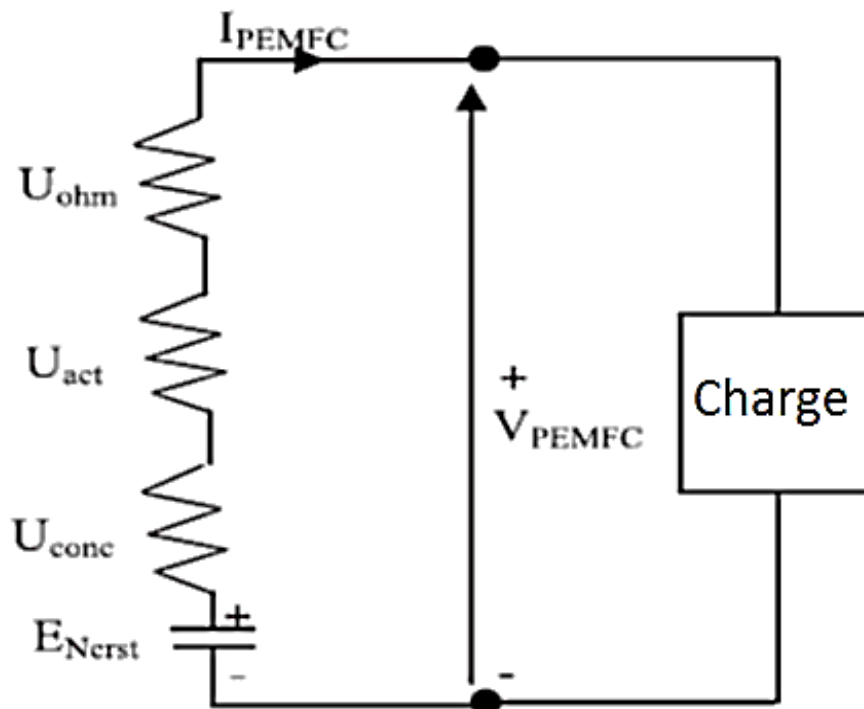
Les ions d'hydrogène ne sont pas liés à la structure de la membrane, ils ont pour mission de transporter la charge positive de l'anode vers la cathode, par contre les ions négatifs  $\text{SO}_3^-$  sont liés à la structure de la membrane.

Plusieurs paramètres interviennent dans la conception de la membrane : les caractéristiques mécaniques, la conductivité ionique, la permittivité aux gaz, donc un compromis entre ces paramètres doit avoir lieu, c'est pour cette raison que l'épaisseur de la membrane polymère échangeuse de protons est généralement comprise entre 50 et 150  $\mu\text{m}$  [29].



**Figure II-13:**Bilan de tension de sortie de la pile à combustible

## II.9 Caractéristique de la pile à combustible PEM



**Figure II-14:**représentation électrique d'une PEMFC.

L'équation suivante représente la tension à la sortie du PAC :

$$V_{PEMFC} = E_{Nerst} - U_{act} - U_{ohm} - U_{conc} \quad (II.1)$$

$V_{PEMFC}$  : La tension réelle d'une pile unitaire (volt);

$E_{Nerst}$  : Potentiel thermodynamique (idéal) de chaque pile et représente la tension réversible (volt);

## Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible

$U_{act}$  : Pertes d'activation (volt);

$U_{ohm}$  : Pertes ohmique (volt);

$U_{conc}$  : Pertes de concentration (volt);

L'équation du potentiel thermodynamique (idéal) est donnée par l'équation suivante :

$$E_{Nerst} = \alpha_1 + \alpha_2(T_{PEMFC} - 298.15) + \alpha_3 T_{PEMFC} (0.5 \ln P_{O_2} + \ln P_{H_2}) \quad (II.2)$$

### ➤ Pertes d'activation

Les pertes d'activation sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Elles surgissent des mouvements de transfert des charges dans l'interface (électrode-électrolyte). Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode. Il s'ensuit que les pertes d'activation sont essentiellement dues aux réactions cathodiques.

Les polarisations d'activation de la réaction d'oxygène décroissent parce que le potentiel se déplace dans le sens négatif, ce qui fait que, les polarisations d'activations sont importantes, que pour des densités de courant faible. Les facteurs qui peuvent contribuer aux polarisations d'activation sont la pression ainsi que la concentration des gaz réactifs :

$$u_{act} = \beta_1 + \beta_2 T_{PEMFC} + \beta_3 T_{PEMFC} \ln(j \cdot 5 \cdot 10^{-3}) + \beta_{24} T_{PEMFC} \ln C_{O_2}^* \quad (II.3)$$

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{5.08 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(\frac{-498}{T_{PEMFC}}\right)} \quad (II.4)$$

$$C_{H_2}^* = \frac{P_{H_2}^*}{1.08 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(\frac{77}{T_{PEMFC}}\right)} \quad (II.5)$$

$$P_{O_2}^* = P_{cath} [1 - X_{H_2}^{sat} o] \quad (II.6)$$

$$P_{H_2}^* = P_{anod} \left[1 - \frac{1}{2} X_{H_2}^{sat} o\right] \quad (II.7)$$

Avec :

$C_{O_2}^*$  : est la concentration de l'oxygène dans l'interface de la surface cathodique ( $mol/cm^3$ )

$C_{H_2}^*$  : est la concentration de l'hydrogène dans l'interface de la surface anodique ( $mol/cm^3$ )

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

$P_{anod}$  : Pression de l'hydrogène à l'anode

$P_{O_2}^*$  : Pression partielle de l'oxygène ( $atm$ )

$P_{H_2}^*$  : Pression partielle à l'interface de l'hydrogène ( $atm$ )

$T_{PEMFC}$  : Température opératoire absolue de la pile ( $^{\circ}K$ ).

## Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible

$X_{H_2O}^{sat}$ : Fraction molaire de saturation d'eau dans le gaz humidifié (=0.5)

### ➤ Pertes ohmique

Les chutes de tension ohmiques sont dues à la résistance qu'opposent les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et la membrane au passage des protons [37]:

$$U_{ohm} = \frac{e_m}{\sigma S_{cell}} j \quad (II.8)$$

$$U_{ohm} = I_{PEMFC}(R_m + R_c) \quad (II.9)$$

$$R_m = \frac{r_m * I_{PEMFC}}{S_{cell}} \quad (II.10)$$

Avec :

$$r_m = \frac{181.6[1+0.03\left(\frac{I_{PEMFC}}{S_{cell}}\right)+0.062\left(\frac{T_{PEMFC}}{303}\right)^2\left(\frac{I_{PEMFC}}{S_{cell}}\right)^{2.5}]}{\left[\lambda-0.634-3\left(\frac{I_{PEMFC}}{S_{PEMFCI}}\right)\right] \exp\left[4.18\left(\frac{T_{PEMFC}-303}{T}\right)\right]} \quad (II.11)$$

$$U_{ohm} = \frac{I_{PEMFC}}{S_{cell}} \left( \frac{181.6[1+0.03\left(\frac{I_{PEMFC}}{S_{cell}}\right)+0.062\left(\frac{T_{PEMFC}}{303}\right)^2\left(\frac{I_{PEMFC}}{S_{cell}}\right)^{2.5}]}{\left[\lambda-0.634-3\left(\frac{I_{PEMFC}}{S_{cell}}\right)\right] \exp\left[4.18\left(\frac{T_{PEMFC}-303}{T}\right)\right]} I_{PAC} + S_{cell} R_c \right) \quad (II.12)$$

Avec :

-j : densité de courant (A/cm<sup>2</sup>)

-S<sub>cell</sub> : Surface active des cellules (cm<sup>2</sup>)

-R<sub>c</sub> : Résistance équivalente de contacte à la conduction des électrodes (Ω)

-R<sub>m</sub> : Résistance équivalente de la membrane (Ω)

-r<sub>m</sub> : Résistance spécifique de la membrane (Ω.cm)

-σ : Conductivité de la membrane (S.cm-1)

- e<sub>m</sub> : Epaisseur de la membrane(μm) .

- λ : La teneur en eau dans la membrane, admettant une valeur minimale et maximale respectivement de 0 et de 22.

### ➤ Pertes de concentration

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

La chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite (*i<sub>L</sub>*), pour lequel tout le combustible étant utilisé, sa pression tomberait à zéro, et d'une constante B appelée constante de transport ou de transfert de masse ( $B = 0.016 V$ ).

## Chapitre II : Étude et modélisation de la pile à combustible

$$U_{\text{conc}} = -B \ln\left(1 - \frac{j}{j_{\text{max}}}\right) \quad (\text{II.13})$$

-  $\alpha_i$  et  $\beta_i$  : Constantes adimensionnelles présent dans les travaux d'Amphlett.

La modélisation sous Matlab/Simulink d'une cellule d'une pile à combustible, permet d'obtenir les caractéristiques électriques suivantes, en utilisant les paramètres cités au-dessus :

### II.10 Le modèle pile à combustible sous Matlab-Simulink

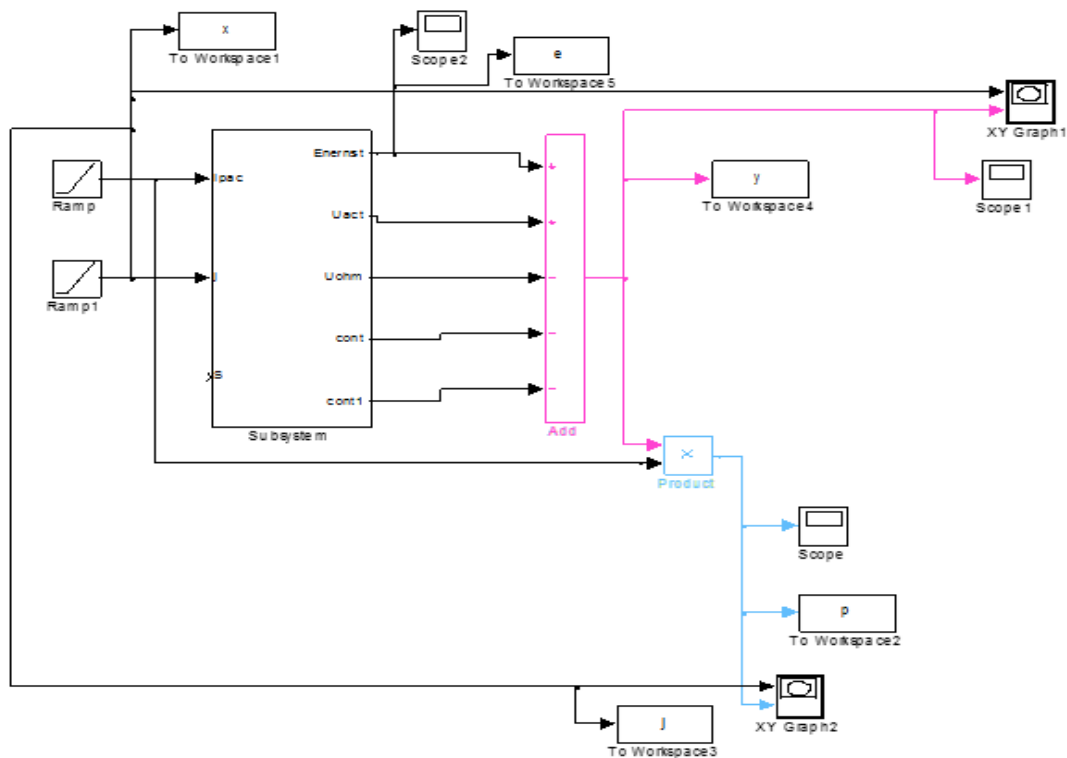
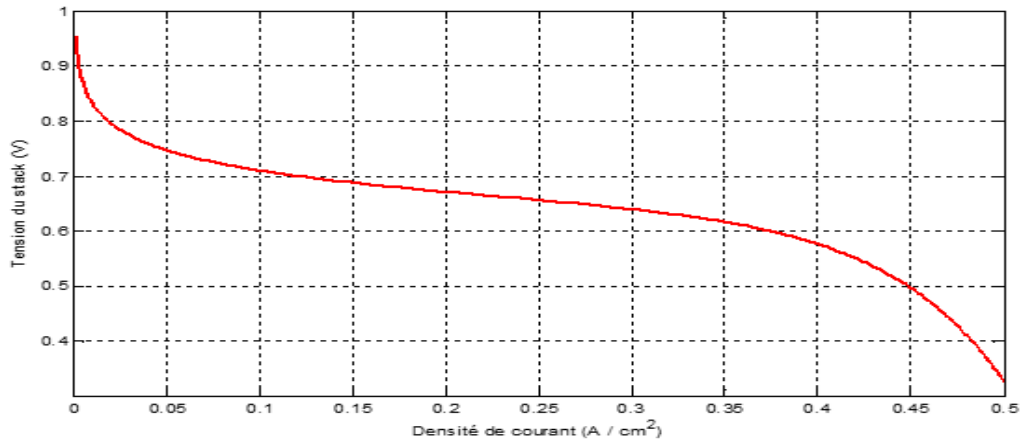


Figure II-15:Modèle de la pile à combustible PEM sur Matlab/Simulink

- **Caractéristique tension-densité de courant d'une PEMFC**

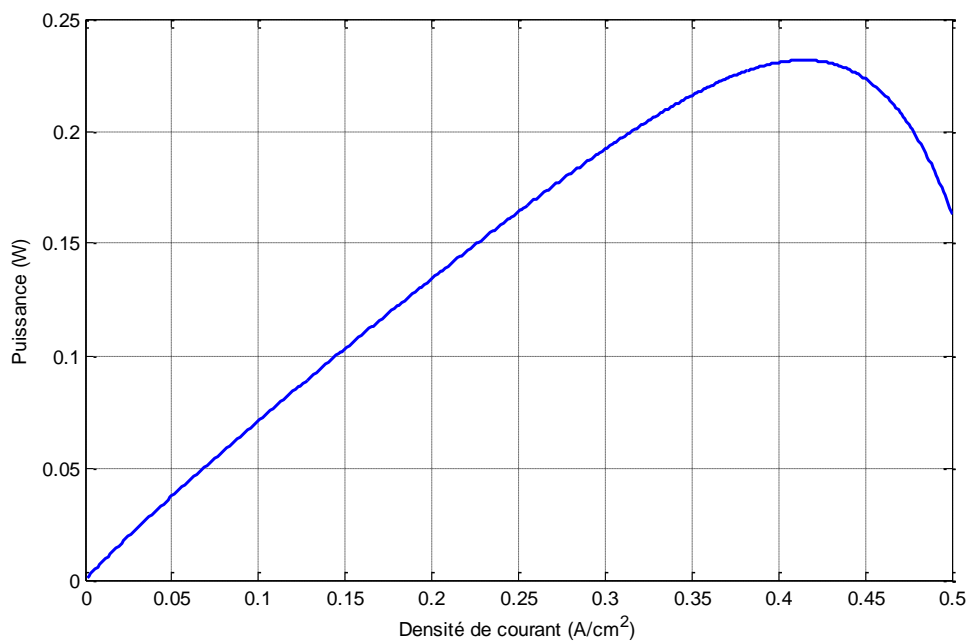
La figure (II.16) représente la caractéristique électrique d'une cellule de la PEMFC.



**Figure II-16:** Caractéristique Tension-Densité de courant.

- **La caractéristique Puissance-Densité de courant d'une PEMFC**

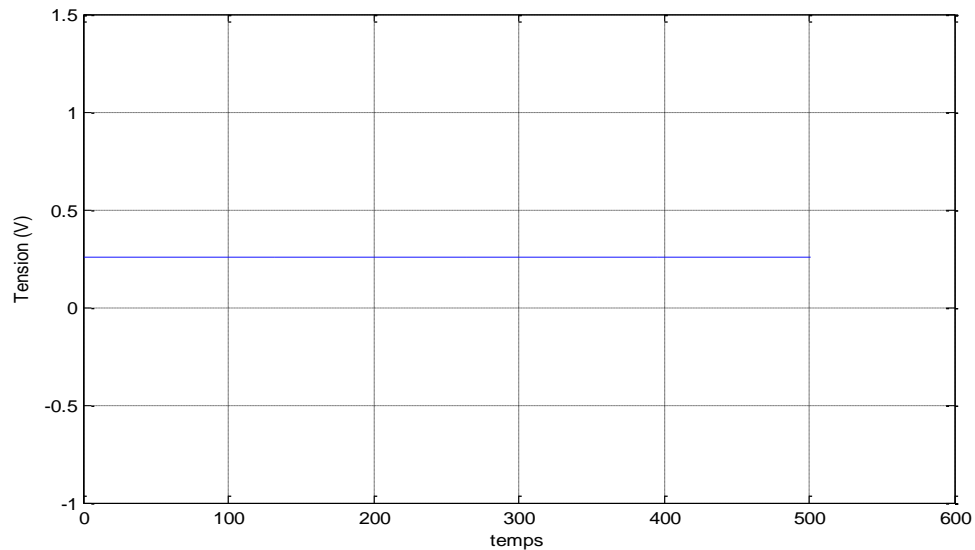
La figure (II.17) représente la caractéristique Puissance-Densité de courant la PEMFC.



**Figure II-17:** Caractéristique Puissance-Densité de courant

- **Caractéristique tension-temps d'une PEMFC**

La figure (II.18) représente la caractéristique tension-temps de la PEMFC.



**Figure II-18:** Caractéristique tension-temps.

### II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la pile à combustible, les différentes technologies existantes et leurs différents domaines d'application, suivis d'une comparaison caractéristique entre elles. Puis son principe de fonctionnement ou les avantages et les inconvénients de la pile sont présentés. À cause de sa température de fonctionnement relativement basse, la pile à combustible PEM (PEMFC) est l'un des types les plus prometteurs, sa durée de vie plus ou moins raisonnable fait d'elle le modèle idéal pour l'application au véhicule hybride tout électrique.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude et la modélisation du super condensateur.

# **Chapitre III : Étude et modélisation du super condensateur**



### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous détaillons le principe de fonctionnement des super condensateur différentes caractéristiques tels que la tension à vide, le rendement... etc. Dans cet intérêt, l'application des super condensateurs s'étend sur plusieurs domaines stationnaires, portables et mobiles super condensateur est généralement associé à un élément de stockage de l'énergie électrique pour alimenter un moteur électrique dans une structure dite 'hybride'.

### III.2 Bref Historique

- 1853 : Concept de la double couche (Helmholtz)
- 1957 : Brevet Becker (U.S. Patent 2, 800,616) General Electric : deux électrodes en acier inox recouvertes de carbone – électrolyte acide sulfurique)
- 1966 – 1970: Brevets SOHIO Corporation (US patent 3,288,641, US patent 3,536,963) ; électrolyte organique) « Electrokinetic Capacitor »
- 1978 : NEC (Japon) premiers systèmes « Supercapacitor » (licence SOHIO, aqueux)
- 1991 : Maxwell (etat unis d'amerique) ; Boostscap ;  $1F < C < 3000F$ , 2,7V
- 1995 : Nippon Chemicon (Japon) ; DLCAP ;  $C > 300F$ , 2,7V
- 1998 : esscap (Corée) ;  $10 < C < 2500 F$  en milieu organique ; Capacité  $> 300F$
- 2001 : olloré (France) : Batscap, 600 F à 9000F ; 2,7V [5]

### III.3 Principe de fonctionnement d'un super condensateur

Le diélectrique est remplacé par un électrolyte. (Un électrolyte est une substance contenant des ions mobiles.) La charge des plaques est alors compensée par des ions de charge opposée, qui sont attirées à leur surface. On obtient ainsi deux doubles couches (dites de Helmholtz), on fait deux condensateurs en série. Dans ces couches les charges de signe différent ne sont séparées que par quelques dixièmes de nanomètre.

En plus, il faut offrir le plus de surface possible aux plaques pour qu'une grande quantité d'ions puissent s'y accrocher. Les plaques des super-condensateurs commerciaux sont composées de charbon actif, un matériau plein de pores fournissant une surface par unité de volume élevée. Les pores sont des petites zones dont la taille est de l'ordre du nanomètre (un nanomètre est un million de fois plus petit qu'un millimètre). La plaque pleine de pores agit un peu comme une « éponge électrique ».

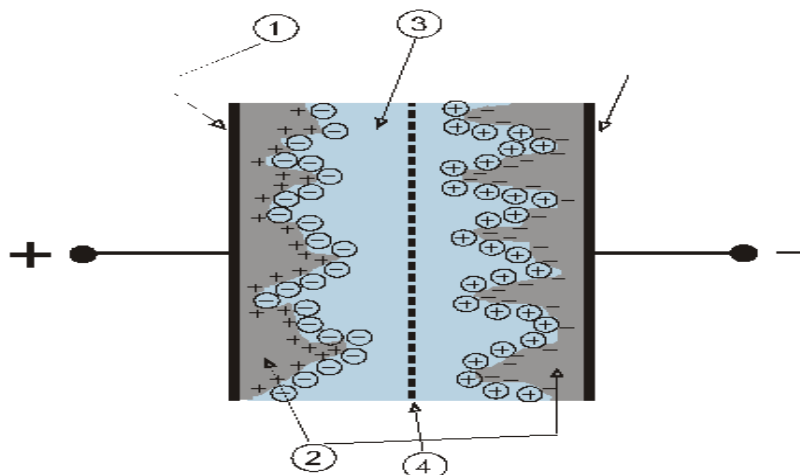
Enfin, un séparateur microporeux empêche tout court-circuit entre les plaques. Il doit tout de même laisser passer les ions de l'électrolyte.

L'épaisseur des couches de charbon actif est de l'ordre de 0,1 mm, la surface effective peut atteindre 3000 m<sup>2</sup> pour 1 g de charbon actif. Ce qui est énorme !

Les super-condensateurs « standards » sont chargés à une tension de l'ordre de 2,5 V. Pour obtenir une tension de 500 V il faut disposer 20 super-condensateurs en série. (Les tensions s'ajoutent alors.)

## Chapitre III : Étude et modélisation du super condensateur

La densité d'énergie des super-condensateurs actuellement commercialisés atteint 15 Wh/kg. À titre de comparaison, les meilleurs accumulateurs lithium-ion atteignent 350 Wh/kg [24].



**Figure III-1:** Les quatre éléments principaux constituant un super condensateur

1. Les collecteurs de courant
2. Le charbon actif des plaques
3. L'électrolyte
4. Le séparateur microporeux

Les charges encerclées représentent des ions de l'électrolyte, les charges du charbon actif un défaut ou un excès d'électrons.

### III.4 Les différents types de super condensateur :

#### III.4.1 Catégories de super condensateurs – Électrodes :

On peut classer les super-condensateurs en deux groupes suivant la nature des électrodes:

- super condensateurs à stockage d'énergie électrostatique : technologie d'électrodes au charbon actif,
- super-condensateurs à stockage d'énergie électrochimique : technologie d'électrodes aux oxydes métalliques ou aux polymères conducteurs [32].

##### III.4.1.1 Super-condensateurs à stockage d'énergie électrostatique:

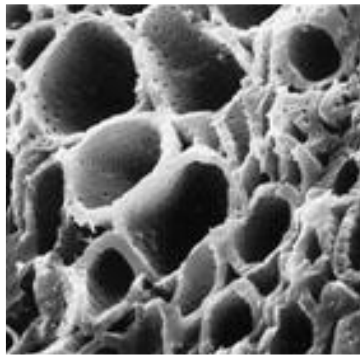
Actuellement, la technologie la plus répandue est celle au charbon actif, dont les surfaces spécifiques dépassent 1000 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>, et atteignent 3000 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> [6, 7]. Ces super-condensateurs fonctionnent selon un principe du type électrostatique :

L'électricité est stockée par accumulation d'ions dans la couche double électrique existant à l'interface électrode-électrolyte. L'absence de véritables réactions chimiques permet une excellente réversibilité, et donc une durée de vie, théoriquement infinie, de plus de 100 000 cycles en pratique. Citons deux autres particularités de ces super-condensateurs :

### Chapitre III : Étude et modélisation du super condensateur

- Le stockage d'énergie principalement électrostatique leur confère une puissance spécifique potentiellement élevée, typiquement d'un seul ordre de grandeur inférieure à celle des condensateurs électrolytiques,
- Le faible coût des procédés de fabrication et surtout de la matière première.

Le charbon actif est obtenu par calcination et activation de matières hydrocarbonées comme le bois de pin. Il existe deux types d'activation : physique ou chimique. Dans le premier cas, les produits végétaux sont broyés, concassés et carbonisés à 600 °C. L'activation est réalisée par un mélange de vapeur d'eau et de gaz carbonique CO<sub>2</sub>. Le charbon obtenu est relativement exempt d'impuretés et présente une porosité peu distribuée. Dans le second cas, une sciure de bois de pin est imprégnée avec de l'acide orthosympathique et puis chauffée à haute température. Ces charbons ont une distribution de porosité importante (figure III.-2).



**Figure III-2:** Structure microscopique d'une électrode au charbon actif

D'autres technologies sont basées sur l'utilisation du tissu de carbone (super capacités Maxwell).

C'est un produit ayant comme précurseur des fibres polymères ayant subi une calcination et une activation physique, avec dans certains cas une co-activation chimique. Cette dernière se fait au moyen de produits comme des hydroxydes de terres rares ou de nickel, qui en réagissant avec le carbone créent une porosité particulière (figure III-3). Les surfaces spécifiques sont dans ce cas aussi importantes, typiquement de 2000 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>. Ces produits présentent des porosités bien supérieures aux charbons actifs, une meilleure conductivité électronique avec moins d'impuretés. Les procédés de fabrications restent toutefois onéreux.



**Figure III-3:** Structure microscopique d'une électrode en tissu activé

## **Chapitre III : Étude et modélisation du super condensateur**

Notons à ce niveau que, même si la surface spécifique de ces matériaux est relativement élevée, seule une fraction de cette surface, celle accessible aux ions de l'électrolyte, est utile. En effet les ions peuvent être trop grands pour accéder à la microporosité (pores de taille inférieure à 2 nanomètres). De plus, la porosité peut être plus ou moins fermée par la présence de liants ou d'autres impuretés. Ainsi pour une surface spécifique de 1500 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>, la surface utile pourra n'être que de 60 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>. Les capacités spécifiques observées restent tout de même élevées, de l'ordre de 120 F.g<sup>-1</sup> à 180 F.g<sup>-1</sup> en milieu aqueux (acide sulfurique), et de 60 F.g<sup>-1</sup> à 100 F.g<sup>-1</sup> en milieu organique.

### **III.4.1.2 Super condensateurs à stockage d'énergie électrochimique:**

Cette technologie utilise des matériaux d'électrodes permettant d'obtenir une interface électrode électrolyte pseudo-capacitive. Deux types de matériaux sont utilisés [35, 36] :

- les oxydes métalliques conducteurs électroniques,
- les polymères conducteurs électroniques.

Concernant les oxydes métalliques, il est impératif que ceux-ci ne se dissolvent pas dans le milieu électrolytique, ce qui limite le nombre de candidats possibles. On utilise principalement l'oxyde de ruthénium ou l'oxyde d'iridium en milieu acide sulfurique [37]. Cette technologie est relativement onéreuse, aussi bien au niveau de la matière première qu'à celui des procédés de fabrication. En outre, le comportement électrique de ces super condensateurs est complexe.

Quant aux polymères conducteurs électroniques, tels que le polypyrole [38], le polythiophène ou la polyaniline, ils permettent d'obtenir des capacités spécifiques élevées, de l'ordre de 200 F.g<sup>-1</sup> et pouvant atteindre 400 F.g<sup>-1</sup>. De nombreux problèmes restent cependant à résoudre, eu égard notamment à la stabilité en température, ainsi qu'à une puissance et une cyclabilité limitées.

### **III.4.2 Électrolyte :**

La puissance maximale que peut fournir une source d'énergie électrique dépend directement de sa résistance interne. Dans le cas des super condensateurs, cette dernière est composée de deux termes, l'un associé à la conduction électronique et donc dépendant de la qualité électrique des électrodes, et l'autre associé à la conduction ionique. Ce second terme, dans lequel intervient la conductivité de l'électrolyte, ainsi que l'aptitude des ions à migrer plus ou moins aisément dans la porosité de l'électrode jusqu'à la couche double, est par conséquent essentiellement lié aux caractéristiques de l'électrolyte, telles que :

- la concentration en porteurs de charge libres (fonction de la solubilité du sel dans le solvant, et du taux de dissociation du sel),
- la mobilité de ces porteurs (fonction de la viscosité du solvant et de la taille effective des ions en solution),
- la solvation des ions,
- la valence des ions.

Rappelons de plus que la densité d'énergie des super condensateurs dépend fortement de leur tenue en tension, paramètre étroitement lié à la stabilité électrochimique du solvant

### Chapitre III : Étude et modélisation du super condensateur

électrolytique. C'est le second critère, majeur, guidant le choix des électrolytes utilisés dans la fabrication des super condensateurs. Ainsi trouve-t-on deux types d'électrolyte pour super condensateurs [39] [40] :

- Les électrolytes aqueux, tels que l'acide sulfurique ou la potasse,
- Les électrolytes organiques, tels que le carbonate de propylène.

Les électrolytes aqueux furent historiquement les premiers employés pour la réalisation industrielle des super condensateurs, en raison de leur excellente conductivité ionique (de l'ordre de  $1 \text{ S.cm}^{-1}$ ).

Les dispositifs associés présentent des puissances spécifiques élevées, typiquement de quelques  $\text{kW.kg}^{-1}$ . De plus, les ions sont de taille relativement faible (1 à 2 nanomètres) et accèdent facilement à la microporosité de la matière active de l'électrode. Aussi observe-t-on des capacités plus élevées en milieu aqueux qu'en milieu organique (pour lequel les ions, de taille généralement plus importante, voient une surface effective plus faible). En revanche, la tenue en tension des super condensateurs à électrolyte aqueux est limitée à 1,2 V, tension d'électrolyse de l'eau (ceci d'une manière analogue aux condensateurs classiques pour lesquels la tension de service est limitée par le claquage du diélectrique). Par conséquent, l'énergie spécifique de ces dispositifs est faible, typiquement de  $1 \text{ Wh.kg}^{-1}$ . En outre, la nature corrosive de l'électrolyte aqueux impose des restrictions dans le choix des matériaux d'électrode.

L'utilisation d'électrolytes organiques a eu pour but l'obtention de tensions de polarisation, sans effets faradiques, plus importantes : jusqu'à 4 V, voire 5 V pour certains électrolytes. La densité d'énergie, de l'ordre de  $5 \text{ Wh.kg}^{-1}$ , est donc considérablement accrue. Cependant, la conductivité ionique de ces composés étant médiocre (elle dépasse difficilement  $0,03 \text{ S.cm}^{-1}$ ), le gain en tension de service ne se traduit que par une augmentation modérée de la puissance spécifique. Plusieurs travaux, tels que ceux présentés par G.Herlem et al [41], sont actuellement menés pour améliorer la conductivité des électrolytes organiques.

#### **III.4.3 Séparateur :**

La construction des super condensateurs fait également intervenir une membrane isolante poreuse, donc conductrice ionique, séparant les deux électrodes imprégnées d'électrolyte. Généralement, on utilise des séparateurs en plastique permettant d'obtenir des épaisseurs et des porosités variables.

D'autres matériaux sont aussi employés, comme le polypropylène, le celgard ou le papier cellulosique avec fibres polymères de renfort. Élément indispensable pour le fonctionnement correct des super condensateurs, le séparateur introduit un terme supplémentaire, dépendant de son taux de porosité, dans la résistance totale du composant [32].

### III.5 Applications potentielles des super-condensateurs

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

- **L'informatique et la télécommunication pour les petits composants à faible énergie spécifique**
- **Les alimentations de secours**
- **Secteur automobile**
- **Autres utilisation en complémentarité avec les batteries.**
- **L'application dans le domaine des recherches spatiales**

### III.6 Avantage et inconvénient

- **Avantages**

1. Courants de charge et décharge élevés (jusqu'à quelques 100 A pour les gros éléments).
2. Faible durée de charge et décharge (de l'ordre de 1s à quelques 10s).
3. Durée de vie ou nombre de cycles élevée (quelques 100 000 cycles) par rapport aux accumulateurs.
4. Densité puissance élevée.
5. État de charge facile à gérer (linéaire en fonction de la tension).
6. Le fait de bénéficier d'une puissance instantanée.
7. À la différence de la batterie, il est plus léger et n'est pas sensible aux variations de température.

- **Inconvénients**

1. Faible densité d'énergie
2. Tension maximale très faible par cellule (2,7V) pour la technologie charbon actif
3. Électrolyte dangereux (acétonitrile) charge/décharge
4. Composants pouvant contenir de l'acétonitrile (inflammable)

### III.7 Utilisation du super condensateur sur l'automobile:

En général, le super condensateur est utilisé comme source secondaire. Son principal problème reste ses modalités de restitution de l'énergie. En effet, cet appareil délivre une quantité d'énergie importante très rapidement. De façon indirecte, il permet toutefois le démarrage de certains poids lourds et des motos cross à injection qui ne disposent pas de démarreur électrique [31].

### III.7.1 Modèles de super condensateur :

#### III.7.1.1 Modèle de base RC

Le modèle le plus simple est celui proposé en général par le constructeur, il s'agit d'un circuit RC en série. R représente la résistance série équivalente traduisant les pertes par effet Joule dans le super condensateur et C la capacité principale du super condensateur. Dans ce modèle on ne tient compte ni de l'influence de la tension de charge sur la capacité du composant ni du phénomène de redistribution des charges internes dans le super condensateur.

#### III.7.1.2 Modèle à deux branches de Zubieta

À partir du profil de charge à courant constant d'une cellule de super condensateur un modèle appelle modèle à deux branches. Il s'agit de représenter le comportement du super condensateur à l'aide de deux circuits RC. Le premier circuit RC représente une énergie rapidement stockée et la deuxième cellule RC correspond à une énergie lentement stockée et représente en principe le phénomène de redistribution des charges à la fin de chaque charge ou décharge du super condensateur (Figure III.4).

Durant les opérations de charge/décharge, la branche lente est considérée inactive du fait de la constante de temps  $R_2C_2$  qui est beaucoup plus grande que  $R_1C_1$ .

On obtient donc un modèle à deux cellules RC qui décrit l'évolution de l'énergie électrostatique stockée dans le super condensateur :

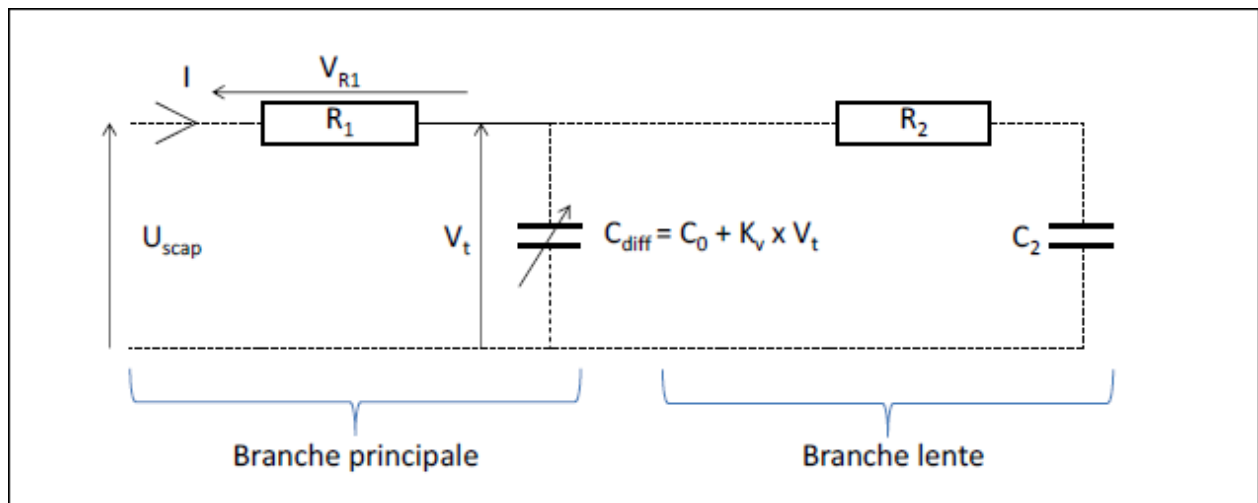


Figure III-4: Modèle électrique des super condensateurs

Le modèle RC à deux branches représente fidèlement le comportement du super condensateur recherché

### III.8 Dimensionnement et modélisation des packs Super condensateur :

Nous avons choisi que les super-condensateurs, ajoutés en tant que dispositifs de stockage de haute puissance, doivent fournir la pleine puissance  $P_{load} = P_N$  pendant  $\Delta t = 10$  s, l'énergie délivrée est alors estimée à environ 4,8 MJ.

L'énergie  $E_{sc}$  stockée à la tension  $U_{sc}$  de la tension pack du SC peut s'exprimer comme suit :

$$E_{sc} = \frac{1}{2} C_{eq} U_{sc}^2 = \frac{1}{2} \frac{N_{p_{sc}}}{N_{s_{sc}}} C_{sc} U_{sc}^2 \quad (III.1)$$

Où  $C_{eq}$  est la capacité équivalente du pack SC,  $N_{p_{sc}}$  et  $N_{s_{sc}}$  sont le nombre de branches parallèles et le nombre de connexions en série de SC, respectivement, et  $C_{sc}$  est la capacité SC.

Les super-condensateurs considérés dans cet article sont de type Maxwell/BCAP3000, classés 3000 F, 2,7 V. ayant les paramètres donnés dans le tableau 1.

Il est généralement permis d'utiliser 75 % de l'énergie stockée dans le pack du SC en déchargeant le pack de sa tension assignée  $U_M = 300$  V (environ 80 % de la tension du bus continu [27]) à la moitié de cette valeur égale à  $U_m = 150$  V. Chaque SC élémentaire est alors déchargé d'une tension initiale  $V_{sci} = 2,7$  V à une tension finale  $V_{scf} = 1,35$  V. De plus, les pertes internes dans les SC peuvent être prises en compte grâce à l'efficacité coefficient  $k = 0,9$  [27]. L'énergie extraite des SC peut alors s'écrire :

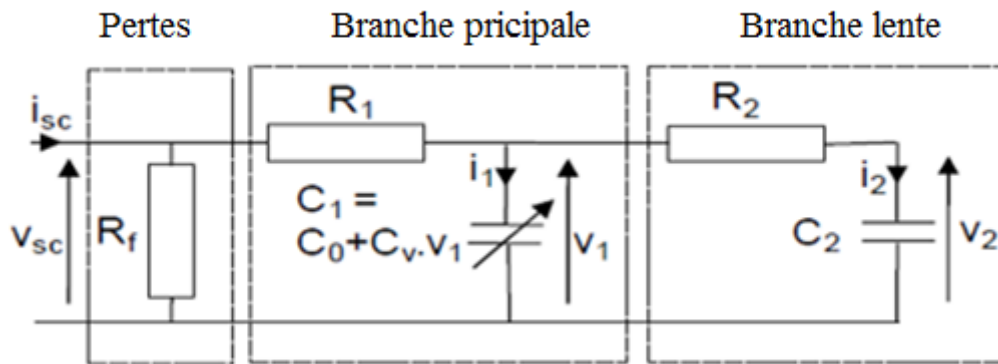
$$P_N \Delta t = K \times \left( \frac{1}{2} C_{eq} U_M^2 - \frac{1}{2} C_{eq} U_m^2 \right) \quad (III.2)$$

Ceci conduit, en considérant une énergie de 4,8 MJ, à un pack de SC ayant une capacité équivalente

$C_{eq} = 158$  F. En se référant à la tension initiale du pack SC, on obtient  $N_{s_{sc}} = 112$  et  $N_{p_{sc}} = 6$ .

Pour optimiser la combinaison des super-condensateurs avec la batterie dans les applications UPS, nous devons établir un modèle pour décrire le comportement des super-condensateurs pendant les cycles de charge et de décharge rapides. Nous considérons le circuit électrique équivalent à deux branches RC proposé par [28], [29] comme le montre la figure (III-5).





**Figure III-5:**Circuit simplifié des super-condensateurs modèle à deux branches

La capacité principale  $C_1$  (capacité différentielle [28]) dépend de la tension  $v_1$ . Il se compose d'Incapacité constante  $C_0$  (en F) et un paramètre constant  $C_v$  (en F/V) et il s'écrit  $C_1 = C_0 + C_v v_1$ .

La branche  $R_1 C_1$  détermine le comportement immédiat du super condensateur lors d'une charge et d'une décharge rapides cycles en quelques secondes.

La cellule  $R_2 C_2$  est la branche lente. Il complète la première cellule de la plage de longue durée de l'ordre de quelques minutes et décrit la distribution d'énergie interne à la fin de la charge (ou décharge).

L'équivalent la résistance parallèle  $R_f$  représente le courant de fuite et peut être négligée lors de la charge/décharge rapide du super condensateur

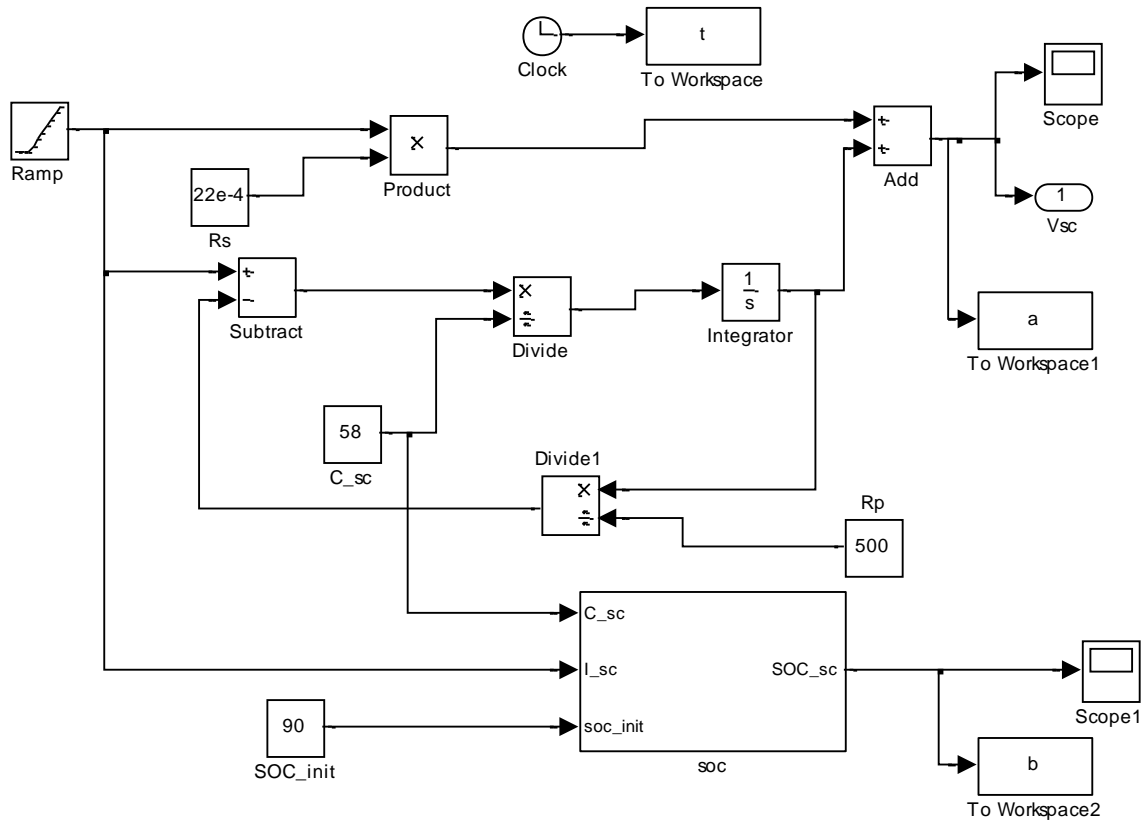
Pour identifier les paramètres du modèle proposé, nous avons réalisé un seul contrôle rapide test de charge/décharge à courant constant 250 A et -250 A, respectivement. La méthode expérimentale qui détermine les paramètres du circuit équivalent du super condensateur est décrit dans Les valeurs obtenues sont :

**Tableau III-1 :** Les paramètres du circuit équivalent du SC

$R_1$	0.360 mΩ
$C_0$	2100 F
$C_v$	623 F/V
$R_2$	1.92 Ω
$C_2$	172 F

Le circuit de simulation avec Matlab/Simulink du pack de super condensateurs est illustré sur la figure (III-6).

## Chapitre III : Étude et modélisation du super condensateur



**Figure III-6:** Modèle de simulation Matlab du pack Super condensateurs

Ce circuit est basé sur les équations suivantes (le courant de fuite du super condensateur est négligé) :

$$U_{SC} = N_{SC} V_{SC} = N_{SC} (v_1 + R_1 i_{SC}) = N_{SC} (v_1 + R_1 \frac{I_{SC}}{N_{P_{SC}}}) \quad (\text{III.3})$$

Avec:

$U_{SC}$  Et  $I_{SC}$  sont respectivement la tension et le courant du pack SC

$V_{SC}$  Et  $I_{SC}$  sont respectivement la tension et le courant élémentaires du super condensateur

La tension  $V_2$  dans la capacité secondaire  $C_2$  est donnée par :

$$v_2 = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt = \frac{1}{C_2} \int \frac{1}{R_2} (V_1 - v_2) dt \quad (\text{III.4})$$

Soit  $Q_2$  la charge instantanée de  $C_2$ , on a :

$$Q_2 = \int i_2 dt \quad (\text{III.5})$$

### Chapitre III : Étude et modélisation du super condensateur

Le courant  $i_1$  passant dans le condensateur principal  $C_1$  s'exprime par :

$$i_1 = i_{sc} - i_2 \quad (\text{III.6})$$

D'autre part,  $i_1$  s'exprime en termes de charge instantanée  $Q_1$  et  $C_1$  sous la forme:

$$i_2 = C_1 \frac{dv_1}{dt} = \frac{dQ_1}{dt} = (C_0 + C_V \cdot v_1) \frac{dv_1}{dt} \quad (\text{III.7})$$

Où la charge  $Q_1$  est :

$$Q_1 = C_0 v_1 + \frac{1}{2} C_V \cdot v_1^2 \quad (\text{III.8})$$

Le seul élément du super condensateur est initialement supposé être complètement chargé à  $V_{sci} = v_{1i} = v_{2i} = 2,7 V$ .

Les valeurs initiales sont alors :

$$Q_{2i} = C_2 v_{2i} \quad (\text{III.9})$$

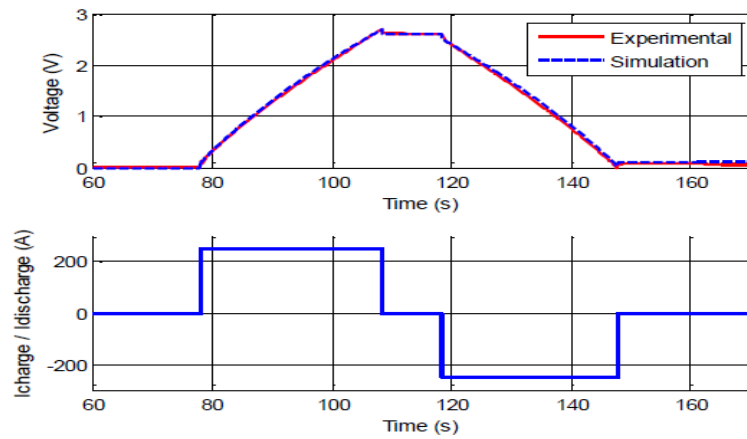
$$Q_{1i} = C_0 v_{1i} + \frac{1}{2} C_V \cdot v_{1i}^2 \quad (\text{III.10})$$

L'équation (III.10) conduit à la relation inverse entre  $v_1$  et  $Q_1$  qui représente la fonction  $f(u)$  dans la figure (III.5) et il est donné par :

$$v_1 = \frac{-C_0 + \sqrt{C_0^2 + 2C_V Q_1}}{C_V} \quad (\text{III.11})$$

Sur la figure (III-7) nous représentons les résultats expérimentaux comparés à la simulation réalisée à l'aide de Matlab/Simulink® pour le test de charge/décharge à courant constant 250 A et -250 A. On observe que le modèle de SC est en très bon accord avec les résultats expérimentaux.

### Chapitre III : Étude et modélisation du super condensateur



**Figure III-7:** Comparaison entre simulation et résultats expérimentaux pour une charge de super condensateur et cycle de décharge

Enfin, nous vérifions que le pack de super condensateurs dimensionné répond aux spécifications UPS définies précédemment. En fait, l'énergie instantanée  $W_{SC}$  stockée dans la branche principale d'un super condensateur élémentaire est donnée par :

$$W_{SC} = \int v_1 dQ_1 \quad (III.12)$$

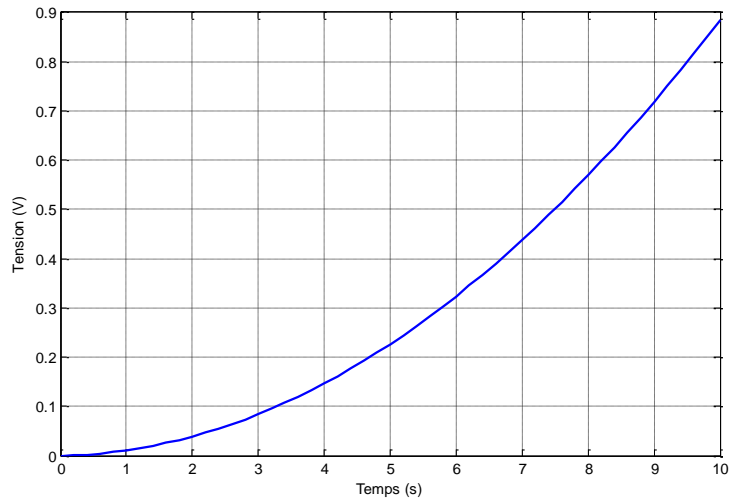
En négligeant l'énergie dissipée dans  $R_1$  et en se référant à l'équation (III.12), on obtient l'énergie  $W_{SC}$  stockée dans un élément SC comme suit :

$$W_{SC} = \left( \frac{1}{2} C_0 v_{sc}^2 + \frac{1}{3} C_v v_{sc}^3 \right) \quad (III.13)$$

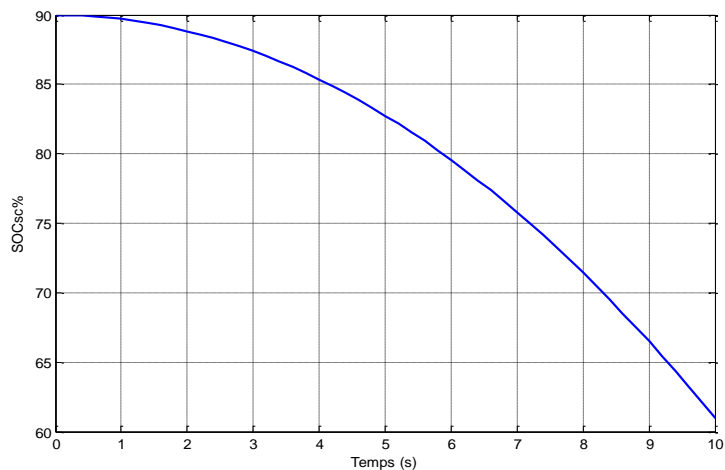
L'énergie totale stockée dans le pack SC est alors donnée par :

$$W_{SC} = N_{Sc} \cdot N_{psc} \cdot \left( \frac{1}{2} C_0 v_{sc}^2 + \frac{1}{3} C_v v_{sc}^3 \right) \quad (III.14)$$

L'élément de tension du SC passe d'une valeur initiale  $V_{sci} = 2,7V$  à une valeur finale  $V_{scf} = 1,35V$ , La différence entre l'énergie initiale  $E_{sci}$  et l'énergie finale  $E_{scf}$  du pack SC multipliée par le rendement, le coefficient  $k$  est égal à 5,6 MJ. Cela signifie que le dimensionnement de l'emballage du SC est en bonne concordance avec l'énergie PNt = 4,8 MJ précisée précédemment.



**Figure III-8:** Tension du super condensateur



**Figure III-9:** Etat de charge du super condensateur

### III.9 Conclusion

Le principal objectif de ce 3eme chapitre est de définir le principe de fonctionnement, la composition et le domaine d'application des super condensateurs avec leurs avantages et inconvénients.

Le modèle RC à deux branches représente fidèlement le comportement du super condensateur recherché.

Dans Le prochain chapitre on va dimensionner et modéliser le super condensateur et la pile à combustible où on appliquera ces dernières au véhicule électrique.

**Chapitre IV : Gestion  
de puissance du système  
hybride**

### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présentera l'organigramme de gestion et les différents modes possibles ainsi une explication de déroulement de cette gestion proposée et on dimensionnera et modélisera le super condensateur et la pile à combustible où on va appliquer ces dernières au véhicule hybride tout électrique.

Enfin, une simulation sous Matlab/Simulink du système.

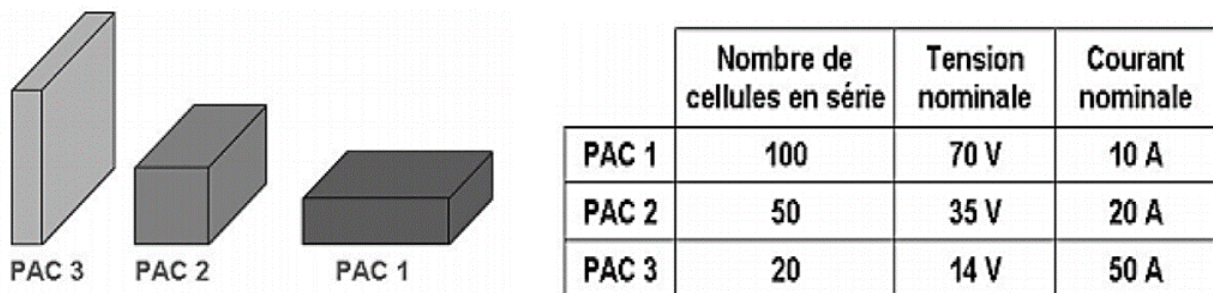
### IV.2 Dimensionnement de la pile à combustible et du super condensateur

#### IV.2.1 Dimensionnement d'un Stack :

Pour concevoir la pile à combustible correspondant au cahier des charges d'un projet donné, le concepteur dispose de deux degrés de liberté :

Le nombre  $N$  de cellules mises en série qui fixent la tension du Stack.

La surface  $S$  d'une cellule qui fixe le courant du Stack.



**Figure IV-1:** Modularité d'un Stack : exemple de conception d'une PAC de 700 W

Les limites technologiques actuelles semblent être :

Nombre de plaques bipolaires : limité à  $N \leq 100$  pour les plaques en graphite, pour les plaques métalliques le nombre est beaucoup plus important.

La densité de courant : limitée à  $1 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ .

La surface des plaques : limitée à  $800 \text{ cm}^2$ .

Les caractéristiques nominales typiques d'une cellule sont :

Tension typique d'utilisation nominale d'une cellule :  $0,7 \text{ V}$ .

Tension (pratique) à vide d'une cellule :  $1 \text{ V}$  [22].

## Chapitre IV : Gestion de puissance du système hybride

### ➤ Dimensionnement de la pile à combustible [42]

Comme on l'a expliqué précédemment, nous avons choisi une tension du bus DC égale 380V. Pour déterminer le nombre de cellules de la PAC à mettre en série on constate qu'une élévation d'un facteur 2 via le convertisseur boost donne un bon rendement. Le stack doit alors fournir une tension de :  $380/2 = 190V$  au point de puissance nominale.

Afin de maintenir un bon rendement de la PAC il ne faut pas descendre en dessous de 0.7 V par cellule et 0.6A/cm<sup>2</sup>.

On trouve alors le nombre de cellules :  
 $190/0.7 = 271.42 \approx 272$  cellules

La puissance demandée :

$P_d = 3KW$

$3000W/190V = 15.79A$

Et on déduit la surface active :

$15.79/0.6 = 26.31 \text{ cm}^2$

**Tableau IV-1:** principales caractéristiques de la PAC

Paramètre physique	Description	Valeurs
A	Surface active d'une cellule de la pile	16cm <sup>2</sup>
l	Epaisseur de la membrane	280μm
T	Température opératoire absolue de la pile	298.15K
P <sub>anode</sub>	Pression partielle de l'hydrogène	0.01atm
P <sub>cath</sub>	Pression partielle de l'oxygène	0.02atm
R <sub>C</sub>	Résistance équivalente de contact à la conduction des électrons	0.0003ohm
B	Constante empirique qui dépend du type de pile et de son fonctionnement	0.016V
ε <sub>1</sub>	Coefficients paramétrique pour chaque modèle de pile	0.9514
ε <sub>2</sub>	//	3.12*10 <sup>-3</sup>
ε <sub>3</sub>	//	1.96 10 <sup>-4</sup>
ε <sub>4</sub>	//	1.87 10 <sup>-4</sup>
δ <sub>H<sub>2</sub>O/SO<sub>3</sub><sup>-</sup></sub>	Teneur de l'eau dans la membrane	14molH <sub>2</sub> O/molSO <sub>3</sub>
J <sub>max</sub>	Densité de courant maximal	0.04934375A/cm <sup>2</sup>

### IV.2.2 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 calculées comme suivant : [43]


$$P_n = \frac{0.12V^2}{ESR_{DC} \times mass} = \frac{0.12 \times (16)^2}{0.022 \times 0.63} = 2.2KW \quad (IV.1)$$



## Chapitre IV : Gestion de puissance du système hybride

$$P_{max} = \frac{V^2}{4 \times ESR_{DC} \times mass} = \frac{17^2}{4 \times 0.022 \times 0.63} = 5.2KW \quad (IV.2)$$

DATASHEET 16V SMALL CELL MODULE	
<b>FEATURES AND BENEFITS</b> <ul style="list-style-type: none"><li>&gt; 16 V DC working voltage</li><li>&gt; Individually balanced cells</li><li>&gt; Compact, lightweight system</li><li>&gt; Screw terminals</li></ul>	<b>TYPICAL APPLICATIONS</b> <ul style="list-style-type: none"><li>&gt; Automotive subsystems</li><li>&gt; Consumer electronics</li><li>&gt; Portable power tools</li><li>&gt; Renewable energy systems</li><li>&gt; Short term UPS &amp; telecom</li><li>&gt; Wind pitch control</li></ul>



PRODUCT SPECIFICATIONS	
ELECTRICAL	BMOD0058 E016 B02
Rated Capacitance <sup>1</sup>	58 F
Minimum Capacitance, initial <sup>1</sup>	58 F
Maximum ESR <sub>DC</sub> , initial <sup>1</sup>	22 mΩ
Rated Voltage	16V
Absolute Maximum Voltage <sup>14</sup>	17V
Maximum Continuous Current (ΔT = 15°C) <sup>2</sup>	12.0 A <sub>RMS</sub>
Maximum Continuous Current (ΔT = 40°C) <sup>2</sup>	19 A <sub>RMS</sub>
Maximum Peak Current, 1 second (non repetitive) <sup>3</sup>	200 A
Leakage Current, maximum (B02 Suffix - Passive Balancing) <sup>4</sup>	25 mA
Maximum Series Voltage	750 V

Figure IV-2: Caractéristiques du super condensateur utilisé.

### IV.3 Les différents modes possibles

Quatre modes possibles sont proposés pour la gestion :

- **Mode 1**

La pile à combustible fournit la totalité de la puissance à la charge, car la puissance demandée est égale à la puissance de la PAC.

- **Mode 2**

La puissance demandée par la charge est inférieure à la puissance de la PAC, donc cette dernière fournit la puissance à la charge et le surplus est utilisé sert à charger le super condensateur en vérifiant le EDC de ce dernier.

- **Mode 3**

La puissance demandée par la charge est supérieure à la puissance de la pile, donc elle sera alimentée par l'énergie hybride produite par la pile et le super condensateur.

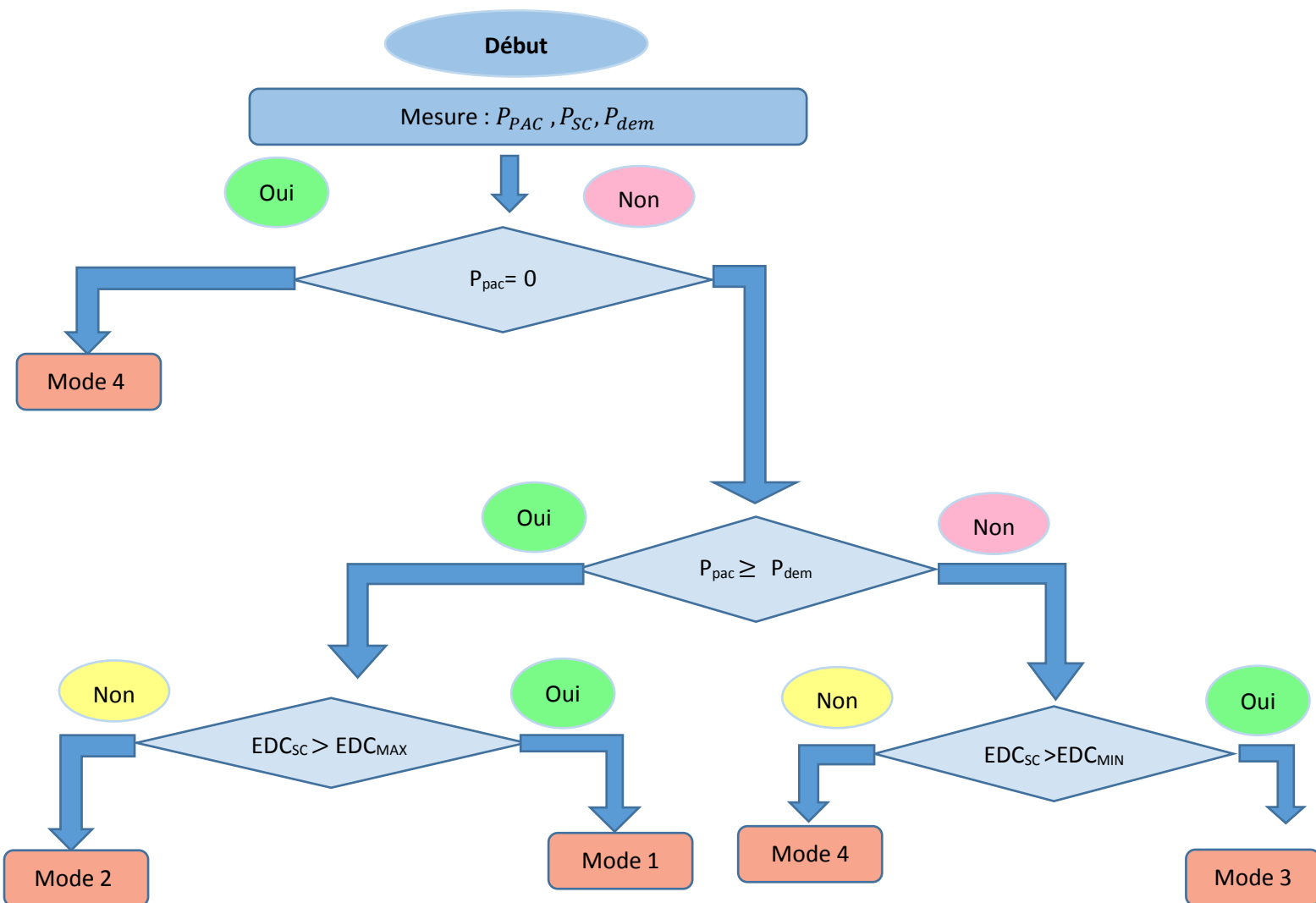
- **Mode 4**

- Dans le ce cas ou la pile à combustible ne fournit pas de puissance, le système est à l'arrêt. La charge est déconnectée pour faute d'approvisionnement.

**Tableau IV-2:** Tableau représentant les différents modes

Modes	$P_{ch}$
Mode 1	$P_{ch} = P_{pac}$
Mode 2	$P_{ch} = P_{pac} + \text{chargement des super condensateurs}$
Mode 3	$P_{ch} = P_{pac} + P_{SC}$
Mode 4	$P_{pac} = 0$

**IV.4 Organigramme de gestion proposé pour la gestion de puissance hybride PAC/SC :**



**Figure IV-3:** Organigramme de gestion de puissance du système hybride (pile à combustible super condensateur)

## Chapitre IV : Gestion de puissance du système hybride

### IV.5 Explication du déroulement de l'organigramme de gestion :

En premier lieu, nous comparons la puissance générée par la pile à combustible, si elle est assez suffisante pour alimenter la charge sinon le système ne fonctionne pas.

Si ce n'est pas le cas, nous vérifions alors à son tours la puissance générée par la pile à combustible, si elle est supérieure ou égale à la puissance demandée, puis on vérifie le SOC du super condensateur, s'il atteint le SOC max c'est le mode 1 qui fonctionne sinon c'est le mode 2 qui fonctionne.

Si la puissance de la pile n'est pas supérieure ou égale à la puissance demandée on vérifie le SOC du super condensateur s'il atteint le SOC min c'est mode 3 qui fonctionne, si cette condition n'est pas vérifiée c'est le mode 4 qui va fonctionner.

### IV.6 Simulation du programme de gestion sous Matlab/Simulink :

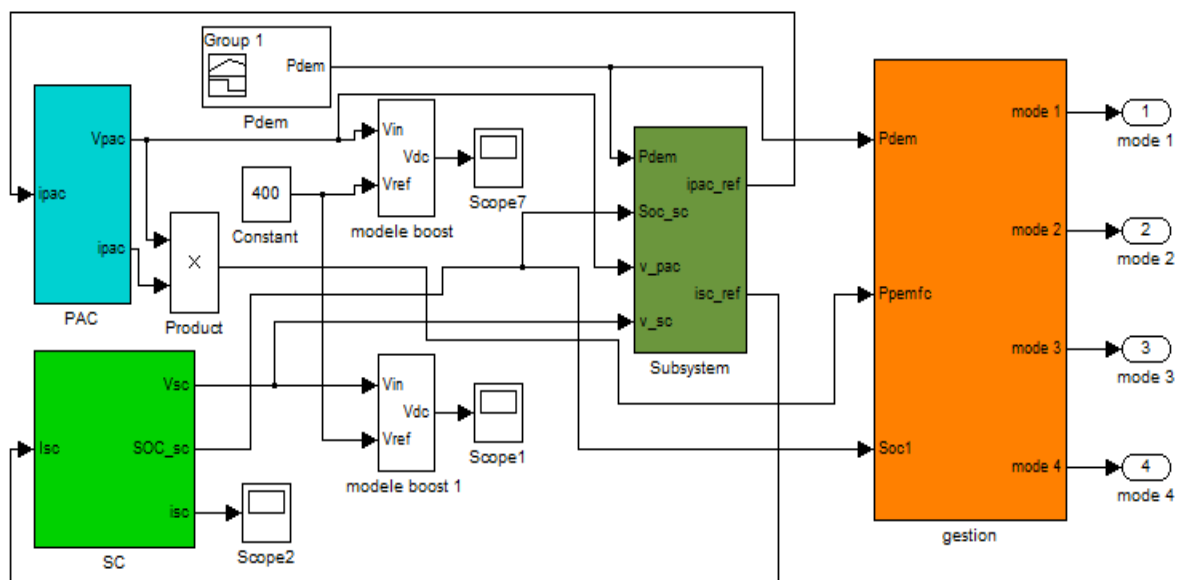


Figure IV-4 : Schéma bloc de simulation

Après avoir simulé l'algorithme de gestion sous Matlab/Simulink, on obtient les courbes de puissance suivantes :

## Chapitre IV : Gestion de puissance du système hybride

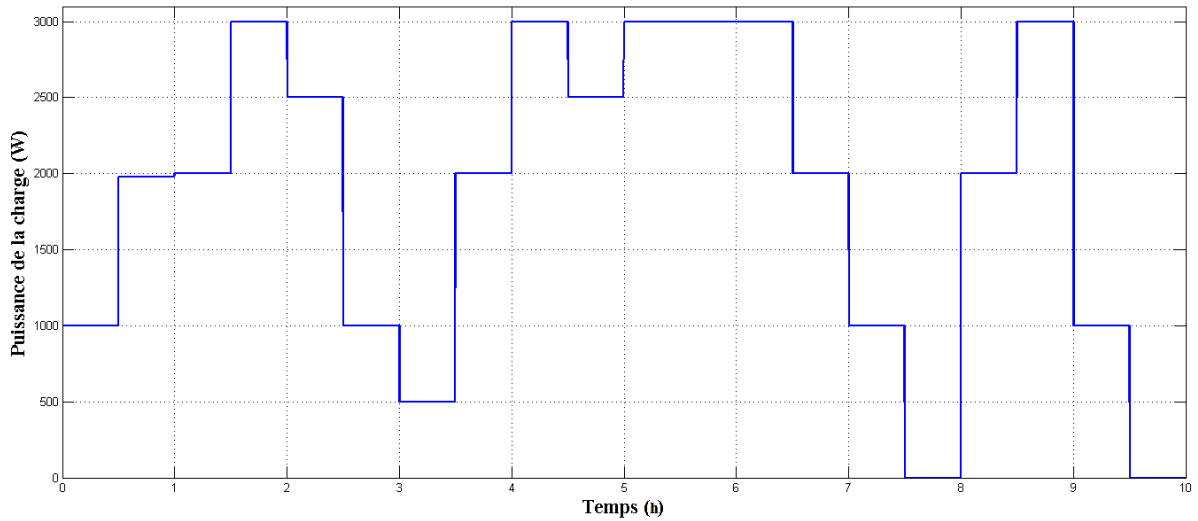


Figure IV-5 : Puissance demandée par le véhicule

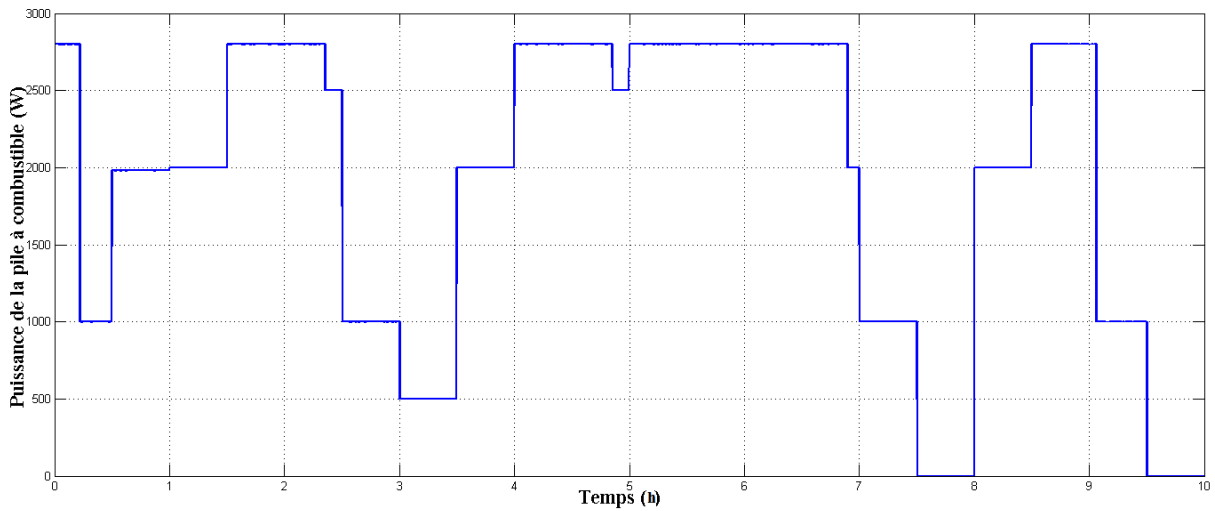


Figure IV-6 : Puissance de la PAC

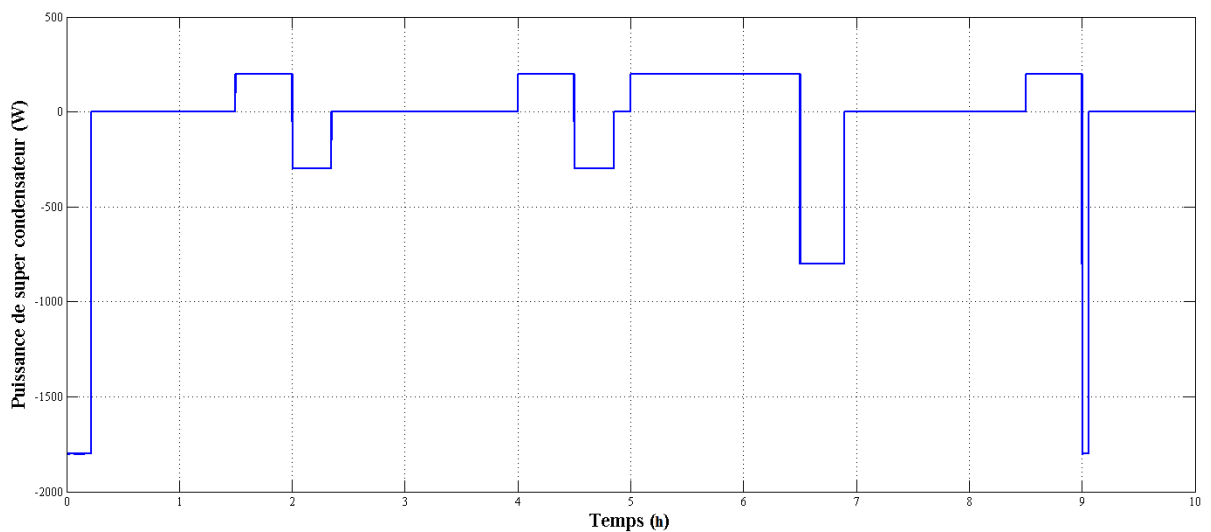


Figure IV-7 : Puissance du super condensateur

## Chapitre IV : Gestion de puissance du système hybride

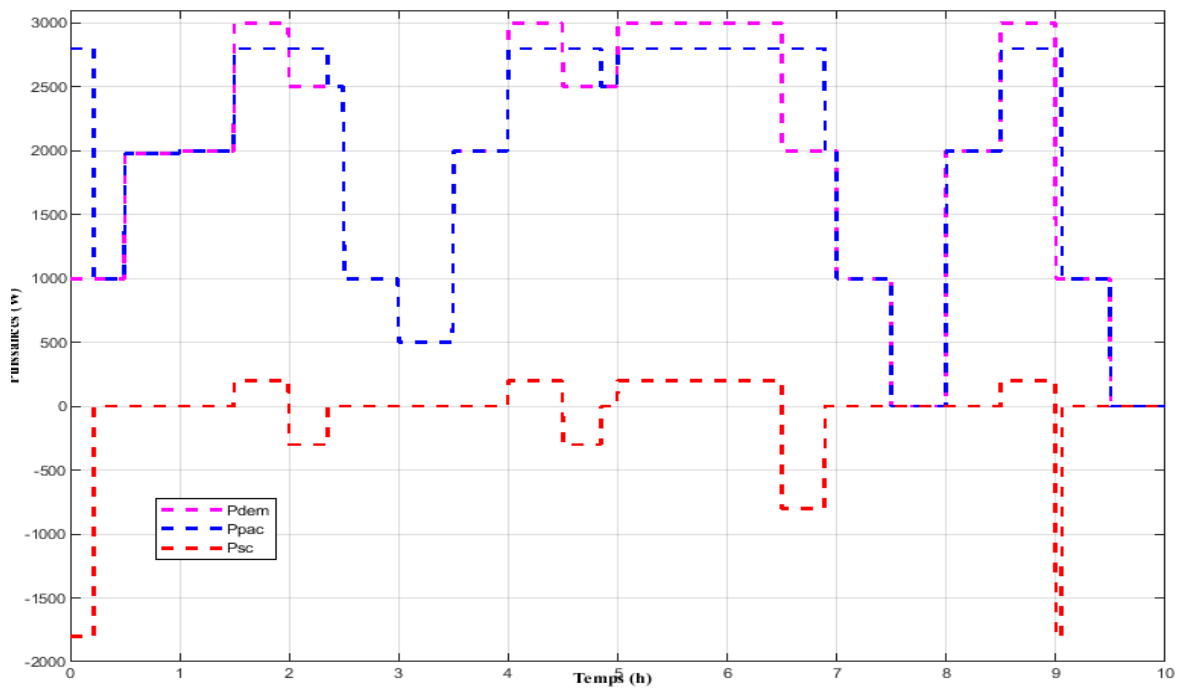


Figure IV-8: les différentes puissances

On propose le schéma suivant pour bien expliquer les entrées et les sorties du système, après avoir appliqué une gestion énergétique.

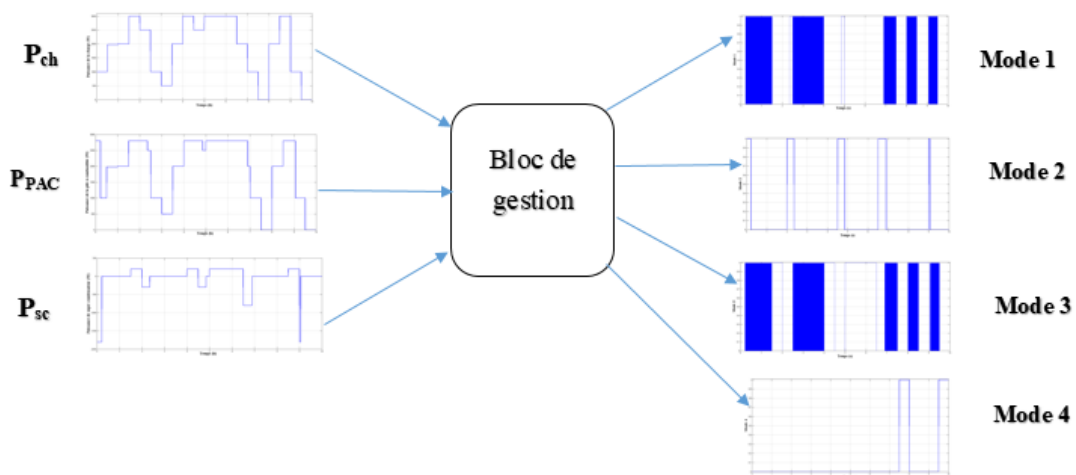


Figure IV-9: Entrées et sorties du système étudié

### IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait un dimensionnement du système étudié. Des modes de fonctionnement sont proposés et une gestion énergétique appliquée à ce système et simulée sous Matlab/Simulink.

Enfin, nous avons obtenus les modes proposés et les différentes puissances produites et consommées.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

### Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est la gestion d'énergie d'une source hybride composée de deux sources : l'une, principale composée d'un Stack de piles à combustible de type PEM (Proton Exchange Membrane), et la seconde qui est le super condensateur.

La combinaison choisie a pour but de diminuer la pollution, et avoir un impact positif sur la nature et l'environnement, tout en préservant la fluidité de transport.

Les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité de l'algorithme proposé pour la gestion d'énergie et ont démontré la complémentarité entre les deux sources d'énergies.

Cette étude nous a permis de tirer quelques conclusions :

- Le choix de la pile à combustible est important pour un rendement efficace, un générateur propre et un coût de maintenance réduit.
- Le super condensateur est un composant ayant une charge et une décharge élevées.
- L'hybridation est importante pour satisfaire le besoin en puissance de la charge.

En perspectives de ce travail, il serait intéressant :

- De finaliser l'étude de toute la chaîne de traction en ajoutant la partie modélisation du moteur ;
- D'ajouter une batterie ;
- D'intégrer ce système dans les transports publics ;
- De faire une gestion en utilisant des méthodes d'intelligence artificielle.

## Références bibliographiques

- [1] <https://www.voitureelectrique.net/histoire-de-la-voiture-electrique>, consulté en avril 2021.
- [2] <https://voiture.kidioui.fr/lexique-automobile/tout-electrique.html> , consulte en avril 2021.
- [3] <https://sites.google.com/site/waag78/la-voiture-dans-sa-complexite/fonctionnement-de-la-voiture- electrique>, consulte en avril 2021.
- [4] <https://www.ecoconso.be/fr/content/voiture-electrique-ses-avantages-et-inconvenients>, consulte en avril 2021.
- [5] [https://www.college-de-france.fr/media/jean-marie-tarascon/UPL19317\\_P\\_Simon\\_2F\\_vrier.pdf](https://www.college-de-france.fr/media/jean-marie-tarascon/UPL19317_P_Simon_2F_vrier.pdf) ,consulte en avril 2021.
- [6] [https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01065230/file/Resume\\_SGE2014\\_ESTACA\\_Mesbahi.pdf](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01065230/file/Resume_SGE2014_ESTACA_Mesbahi.pdf) , consulte en avril 2021.
- [7] Hattab MAKER, « Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et supercondensateur », thèse de doctorat, Université de technologie BELFORT Montbéliard, 2008.
- [8] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01497404/document#page=17&zoom=100,0>, consulte en avril 2021.
- [9] Alireza PAYMAN, « contribution à la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides multi-source, multi-charge », thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de LORRAINE, 2009.
- [10] Nicolas ALLALI, « Convertisseurs haut rendement à dimensionnement réduit pour batterie hybridée puissance/énergie de véhicule électrique : principe de source de courant contrôlée », thèse de doctorat, Centrale Lille, 2016
- [11] HySchools Histoire de l'hydrogene pour les enseignants avec video et liens internet FR,consulte en avril 2021
- [12] Denis CANDUSSO, « hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation d'un véhicule électrique », thèse de doctorat, institut National polytechnique de Grenoble ,2002.
- [13] Souad ZEGHOUANI, Hicham SLIMANI « étude d'un véhicule électrique (PAC/supercondensateur) », mémoire master, université de béjaia, 2017/2018.
- [14] Rezak ALKAMA, « Cours de stockage de l'énergie et pile à combustible », Université de Bejaia 2019/2020
- [15] K. Rajashekar, « Propulsion system strategies for fuel cell vehicles» SAE Technical paper series.
- [16] E. Santi , D. Franzoni , A .Monti, D. Patterson, F . Ponci, N. Barry, « A fuel cell based domestic uninterruptible power supply ». Applied Power Electronics Conference, APEC'02, 2002, vol. 1, pp. 605-613.



- [17] G. K. Andersen, C. Klumpner, S. B. Kjaer, F. Blaabjerg, «A new green power inverter for fuel cell». Power Electronics Specialists Conference, PESC'02, 2002, vol. 2, pp. 727-733.
- [18] K. W. E. Cheng, D. Sutanto, Y. L. Ho, K. K. Law Exploring, «the power conditioning system for fuel cell». Power Electronics Specialists Conference, PESC' 01, 2001, VOL. 4, PP. 2197-2202.
- [19] nasa institut national des science applique rouen normandie Projet de Physique P6 STPI/P6/2018-34
- [20] 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, institut national polytechnique de Toulouse, 2004.
- [21] S. Jemai. Modélisation d'une pile combustible de type PEM par réseau de neurones. Thèse de doctorat, 2004, Université de technologie de Belfort-Montbéliard et de l'université de Franche Comte).
- [22] A. Haddad, modélisation dynamique non linéaire de la pile a combustible du type PEM : Application à la régulation de l'humidité dans les membranes a électrolyte, thèse de doctorat, 25 juin 2009, université de technologie de Belfort-Montbéliard
- [23] A moins de 10001€/KW, les piles à combustibles stationnaires ont un réel avenir. REE n°2, février 2002, pp. 8-9.
- [24] K. Kordech and G. Simader, Fuels Cells and Their Applications. New York: Wiley, 1996.
- [25] Electrochemistry Encyclopedia <http://electrochem.cwru.edu/>.
- [26] A. Halim, Etude et modélisation d'une pile à combustible, thèse de magister, Université de Bejaia 2015/2016.
- [27] J. Ramousse, Transfert couples Masse-charge-chaueur Dans une cellule De pile à combustible A Membrane Polymère, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Soutenue le 21/11/2005.
- [28] G. Fontès, « Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques », thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, septembre 2005.
- [29] P. Rodatz, Dynamics of the Polymer Electrolyte Fuel Cell "experiments and model-based analysis", these de doctorat, ETH Zurich, 2003.
- [30] <https://www.science.lu/fr/electronique-electromobilite/comment-fonctionnent-les-super-condensateurs#:~:text=Quel%20est%20le%20principe%20de%20fonctionnement%20du%20supercondensateur%20%3F,sont%20attir%C3%A9s%20%C3%A0%20leur%20surface.>
- [31] <https://www.auto-moto.com/pratique/entretien/supercondensateur-comprendre-principe-de-fonctionnement-fp-161149.html>
- [32] A. LAGRANGE, "Condensateurs", Technique de l'Ingénieur, Traité Electronique, pp. E2060 (1-17), Mai 1996

- [33] X. ANDRIEU, L. MOREAU, B. PICHON, "Etude comparative d'électrodes de carbone pour supercapacités à électrolyte organique", Journées d'Etudes sur les Supercondensateurs, Paris, Février 1998
- [34] P. LE GOFF, , "Quelques informations sur des techniques de stockage de l'énergie", Site Internet <http://pl.legoff.free.fr>
- [35] A.F. BURKE, T.C. MURPHY, "Material characteristics and the performances of Electrochemical capacitors for electric / hybrid vehicle applications", Materials for Electrochemical Energy Storage and Conversion – Batteries, Capacitors and Fuel Cells Symposium, pp. 375-395, 1995
- [36] M.F. ROSE, "Performance characteristics of large surface areas chemical double-layer Capacitors", 33rd International Power Sources Symposium, pp. 572-591, Penningham, 1988
- [37] D. EVANS, J. ZHENG, S. ROBERSON, "Improved capacitor using amorphous RuO<sub>2</sub>", Site Internet <http://www.evanscap.com/technical.html>
- [38] D. NAEGELE, "Polypyrrole supercapacitors", Electronic properties of conjugated polymers III – Basic models and applications: proceedings of International Winter School on Electronic Properties of Polymers and Related Compounds, Vol. 91, pp. 428-431, March 1989
- [39] M. TOURNOUX, R. DURAND, "Materiaux pour le stockage et la transformation électrochimique de l'énergie", Rapport de l'Institut des Matériaux de Nantes, pp. 40-42, Site Internet <http://www.cnrs.fr/Chimie/Programmes/Materiaux/MateriauxStockage.html>
- [40] T. MORIMOTO, K. HIRATSUKA, Y. SANADA, K. KURIHARA, "Electric double-layer capacitor using organic electrolyte", Journal of Power Sources, Vol. 60, Fasc. 2, pp. 239-247, June 1996
- [41] G. HERLEM, B. FAHYS, M. HERLEM, "Nouveaux électrolytes non aqueux liquides pour supercapacités", Journées d'Etudes sur les Supercondensateurs, Paris, Février 1998
- [42] Philip Tritschler « Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergie pour un système à pile à combustible embarquée dédiée a l'application agricole thèse de doctorat l'INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE
- [43] H. Maker ' Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association pile à combustible et super condensateurs' thèse de doctorat de l'université de technologie BelfortMontbellard 4/11/2008