

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des sciences et de la technologie

Département : Génie électrique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Master 2 en : Electrotechnique Option : Solaire photovoltaïque

Thèse :

Commande et gestion d'un system multisource

Préparé par :

- Adjroud Salaheddine

- Lebsaira Mohamed Seif Eddine

Encadré par :

- Saadi Ramzi

Année universitaire : 2019 / 2020

Remerciement

LOANGE A ALLAH "الله" QUI NOUS DONNE LA FOI, LE COURAGE, LA PATIENCE ET LA VOLONTE POUR REALISER CE MODESTE TRAVAIL DANS DES MEILLEURES CIRCONTANCES ET EN BON ETEA.

Ce travail de thèse à été effectué au Laboratoire d'étude M.S.E du département de Génie électrique, faculté des sciences et de la technologie, université Mohamed Khider Biskra

- ✓ Mes respectueux remerciements s'adressent à mon directeur de thèse Docteur **Saadi Ramzi de l'Université Mohamed Khider Biskra** qui a dirigé mes travaux de recherche ainsi que pour leurs disponibilités, leur patience et leurs précieux conseils, leurs encouragements et les efforts qu'il m'a prodigués durant la réalisation de ce travail.
- ✓ Meilleurs salutations aux membres du jury de thèse pour l'honneur qu'ils m'ont fait de participer à l'évaluation de mon travail.

Je tiens à exprimer encore mes sincères remerciements au :

- ✓ Toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont aidée à finaliser travail.
- ✓ Tous les enseignants du département de Génie électrique.
- ✓ A mes chers parents.
- ✓ Remerciements
- ✓ A mes chéris frères et sœurs
- ✓ Ma famille.
- ✓ A mes collègues.
- ✓ A tous mes amis.

Sommaire

Introduction générale :.....	1
Chapitre I : Véhicule hybride.....	Error! Bookmark not defined.
I - Définition du véhicule hybride :	4
II - Historique du véhicule électrique hybride :	5
III - Véhicule hybride à pile à combustible :.....	7
III – 1 – Les composants du véhicule hybride :.....	9
III – 2 – Les différentes architectures hybrides :.....	10
II-2-2-Architecture parallèle :	12
III – 3 – Le Moteur électrique :	14
IV - Principaux modes de fonctionnement :	16
IV-1-Le mode thermique pur :	16
IV-2-Le mode électrique pur :.....	16
IV-3-Le mode hybride :	16
Chapitre II : Généralité sur la pile à combustible.....	Error! Bookmark not defined.
I-Introduction	19
II-Historique :.....	20
II-1-Densité de puissance :.....	21
II-2-Température de fonctionnement :.....	21
II-3-Structure solide :.....	21
III-Principes de fonctionnement :.....	22
IV-Types de piles à combustible :.....	24
IV-1-Pile à combustible de type PEM (PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	24
IV-2-Hydrogène :	26
V-Construction de pile à combustible de type PEM :	27
V-1-Assemblage membrane-électrodes :.....	27
V-1-1-Electrodes :	28
V-1-2-Electrolyte :.....	29
V-1-3-Plaque bipolaire :	30
V-2-Humidificateur :	31
VI-Système Pile A Combustible Embarqué :.....	32
VI-1-Configuration système :.....	33

Sommaire

VI-2-Reformeur :.....	33
VI-3-Gestion de l'air :.....	34
VI-4-Gestion de l'eau :.....	34
VI-5-Gestion thermique :.....	34
VII-Applications Des Piles À Combustible :.....	35
VII-1-Applications portables :	35
VII-2- Applications stationnaires :	36
VII-3- Applications embarquées :	37
VIII-Modèle de pile PEM :.....	38
VIII-1- Pertes d'activation :.....	38
VIII-2-Pertes ohmiques :.....	39
VIII-3-Pertes de concentration :.....	39
IX-La simulation de la pile à combustible dans MATLAB :.....	40
IX-1-Schéma bloc de la pile à combustible :	40
Chapitre III : Généralité sue les supercondensateurs.....	Error! Bookmark not defined.
I-Introduction :	42
II- Principes de fonctionnement des supercondensateurs :	44
II-1-Principes physiques de base :.....	44
II-2-Couche double électrique :.....	46
III-Technologie des supercondensateurs :	47
1. Matériaux d'électrodes :	47
2. Électrolyte :	48
3. Séparateur :	49
IV-Type de stockeur d'énergie :	50
IV-1-Stockeur d'énergie fixe :	50
IV-2-Stockeur d'énergie embarqué :	51
V-Comparaison entre les batteries et les supercondensateurs :.....	52
➤ Les avantages :	53
➤ Les inconvénients :.....	53
VI- Modélisation des supercondensateurs :	54
VI-1-Variation de la charge d'un supercondensateur en fonction de la température :	56
VIII-Conclusion :	58
Chapitre IV : Commande et la simulation du system.....	Error! Bookmark not defined.
Introduction :.....	60

Sommaire

I-Schéma bloc du system :	61
I-1-Schéma de la simulation de la charge R-L :	62
II-Commande et convertisseurs :	63
II-1-Le schéma de principe de l'hacheur survolteur :	63
II-3- Commande du hacheur survolteur :	64
II-4- Commande des convertisseurs DC-DC par mode glissant :	65
III- Les paramètres nécessaires pour la simulation :	66
III-1-Identification des paramètres :	69
III-2- Paramètres FC:	70
IV-Résultats et interprétation de la simulation:	70
IV-1-Interprétation des résultats (V_{bus} , V_{pile} et $V_{supercapacité}$) :	72
IV-2-Interprétation des résultats (I_{charge} , I_{pile} et $I_{supercapacité}$) :	74
Conclusion :	77

List des Tableaux

Tab 1: Flux énergétiques au sein du groupe motopropulseur.....	8
Tab. 2 : Exemples de véhicules à pile à combustible.....	15
Tab. 3 : Différents types de pile à combustible (ion traversant l'électrolyte, température de fonctionnement et applications typiques.....	25
Tab. 4 : comparaison entre les batteries et les supercondensateurs.....	52

List des figures

Figure 1 : Automobile Pieper en 1900 avec une propulsion essence-électrique.....	5
Figure 2 : Exemple d'architecture de véhicule à pile à combustible hybride.....	9
Figure 3 : Véhicule hybride série.....	10
Figure 4 : L'architecture hybride parallèle simple arbre.....	12
Figure 5 : l'architecture double arbre.....	13
Figure 6 : L'architecture hybride combinée.....	13
Figure 7 : présente le fonctionnement dynamique du VEH.....	17
Figure 8 : L'expérience de Sir William Grove	20
Figure 9 : Fonctionnement de principe d'une pile à combustible.....	22
Figure 10 : schéma de principe d'une pile a combustible PEMFC.....	22
Figure 11 : Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique.....	23
Figure 12 : Principe des piles à combustible à électrolyte acide ou alcalin.....	24
Figure 13 : schéma du principe de fonctionnement d'une pile.....	25
Figure 14 : Assemblage membrane-électrodes de sept couches de la compagnie 3M.....	28
Figure 15 : Membrane DuPont.....	29
Figure 16 : Plaques bipolaire de pile PEM.....	30
Figure 17 : Schéma de construction de la pile à combustible.....	31
Figure 18 : Schéma illustrant les différents éléments d'un système PaC.....	32
Figure 19 : Différents constituants d'un système pile à combustible.....	33
Figure 20 : Petit système simple de pile à combustible.....	35
Figure 21 : Pile à combustible portable pour recharger un Smartphone.....	36
Figure 22 : Cinq systèmes de piles à combustible UTC (PureCell™ 200, 200 kW) en Alaska, USA.....	37

List des figures

Figure 23 : Pile à combustible 75 kW UTC pour des voitures et des autobus.....	37
Figure 24 : Caractéristique statique de pile PEM.....	38
Figure 25 : Schéma bloc de la pile à combustible.....	40
Figure 26 : Plan de Ragone pour divers dispositifs de stockage et de conversion d'énergie.....	44
Figure 27 : Schéma de principe des supercondensateurs.....	45
Figure 28 : Principe d'assemblage des supercondensateurs.....	46
Figure 29 : Principe de la couche double électrique.....	46
Figure 30 : Pack de supercondensateurs dédié çà la récupération de l'énergie lors du freinage.....	50
Figure 31 : Système MITRAC utilisant les supercondensateurs pour le stockage de l'énergie.....	51
Figure 32 : Schéma électrique équivalent d'un supercondensateur à l'image d'une ligne de transmission.....	55
Figure 33 : Schéma électrique équivalent d'un supercondensateur.....	55
Figure 33 : Évolution de la tension aux bornes d'un pack de 4 supercondensateurs en série en fonction du temps, à courant constant et pour -40°C et 18°C	57
Figure 34 : Schéma bloc du supercondensateur.....	57
Figure 35 : Schéma bloc complet du system simulé dans MATLAB.....	61
Figure 36 : Schéma de la simulation de la charge R-L	62
Figure 37 : Schéma électrique du convertisseur.....	63
Figure 38 : Régulation de la tension du bus par hacheur.....	64
Figure 39 : La tension bus-continu.....	70
Figure 40 : La tension de la pile à combustible.....	71

List des figures

Figure 41 : La tension du supercondensateur.....	71
Figure 42 : Le courant du générateur (pile à combustible).....	73
Figure 43 : Le courant de la charge.....	73
Figure 44 : Le courant de la supercapacité.....	74
Figure 45 : les trois puissances (Puissance de la charge en magenta, Puissance de la supercapacité en rouge et la puissance de la pile à combustible en Blue).....	75

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

Actuellement, la crise énergétique et l'augmentation du niveau de pollution sont des problèmes majeurs à travers le monde. Des sources d'énergies nouvelles, renouvelables et propres doivent donc être considérées. Une nouvelle source possible est la pile à combustible (en Anglais : Fuel Cell, FC), dont le principe a été découvert par Sir William Grove en 1839 [Tho].

Une pile à combustible utilise l'énergie chimique de l'hydrogène et de l'oxygène pour produire de l'électricité, sans pollution. Les autres produits sont simplement de l'eau pure et de la chaleur. Les scientifiques ont déjà et continuent à développer différents types de piles à combustible, caractérisés par la nature des gaz et de l'électrolyte utilisé, déterminant ainsi ses caractéristiques de fonctionnement. Un type prometteur, léger et facile à construire, est la pile à membrane électrolyte polymère (PEMFC), utilisée par la NASA dans les années 1960 dans le programme spatial Gemini [Usd].

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

Dans cette thématique, s'intègrent les véhicules hybrides à pile à combustible qui combinent d'une part une pile à combustible pour la production embarquée d'électricité et d'autre part un élément de stockage de l'énergie électrique (supercapacités, batteries...). Ces véhicules possèdent les bénéfices des voitures électriques concernant notamment une zéro émission et une indépendance totale du pétrole d'une part et d'autre part l'avantage d'un véhicule conventionnel à savoir une autonomie meilleure et une possibilité de ravitaillement rapide avec l'utilisation de l'hydrogène stocké dans des réservoirs sous pression ou produit à bord .

Dans un futur proche, l'utilisation des systèmes hybrides électriques deviendra plus importante, ce phénomène s'expliquant par la réduction de la production de pétrole et la demande de réduction des émissions de gaz dangereux. Le plus souvent, les sources électriques diverses comme les systèmes photovoltaïques, les piles à combustibles ou les éoliennes, les organes de stockage comme les batteries ou les supercondensateurs sont présents en nombre dans ce type de système.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du contrôle d'une source hybride utilisant un bus continu, convertisseurs, pile à combustible et des supercondensateurs pour traction électrique « Véhicule hybride ». Il est équipé des éléments suivants :

- Une pile à combustible de type PEM, utilisé comme source principale.
- un module de supercondensateurs, employé comme source d'appoint de puissance.

L'adaptation des niveaux de tension entre les sources et la charge dans le véhicule nécessite deux convertisseurs statiques, l'un de type Boost, l'autre Buck-boost, permettant de maintenir constante la tension du bus continu à une valeur constante et d'imposer la puissance ou le courant demandé par la charge.

Dans le premier chapitre, on présentés les véhicules hybrides d'une façon générale, leurs modes de fonctionnement ainsi que les principaux types utilisés.

Le deuxième chapitre, a été dédié à la pile à combustible, son principe de fonctionnement, les différents types ainsi que sa modélisation et sa simulation par MATLAB.

Dans le troisième chapitre, à été présenté une théorie sur les supercondensateurs ; leurs principe de fonctionnement et les applications courantes, puis la modélisation mathématique et la simulation par MATLAB.

Le quatrième chapitre traite la commande de la source hybride et comporte deux parties importantes :

- La modélisation mathématique de la pile PEMFC avec un hacheur boost, en utilisant le sumilink-MATLAB.
- La structure hybride des deux sources : la pile PEMFC avec la supercapacité en utilisant un hacheur « boost » pour contrôler la pile par un simple régulateur PI, et un autre hacheur « buck-boost » pour contrôler le supercondensateur par une commande robuste qui est la commande par mode glissant.

Enfin une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I : **Véhicule hybride**

I - Définition du véhicule hybride :

Une automobile hybride est une automobile faisant appel à deux stockages d'énergie embarqués distincts pour se mouvoir, dont l'un de nature électrique.

L'architecture la plus répandue pour ce type de véhicule hybride associe le moteur électrique à un moteur thermique, généralement à essence.

La nature réversible de la partie motrice électrique permet la récupération d'une partie de l'énergie cinétique du véhicule par freinage régénératif. Le moteur électrique devient alors générateur et produit de l'électricité en fournissant un couple résistant aux roues, laquelle est stockée dans une batterie d'accumulateurs ou de super condensateurs.

Les systèmes hybrides impliquent un surcoût de plusieurs milliers d'euros ainsi que d'énergie grise, lors de leur fabrication. En contrepartie, ils peuvent réduire les émissions directes de CO₂ par le véhicule de 15 à 30 %, lorsque utilisés en ville, où la circulation est erratique.

On définit communément trois familles d'architectures hybrides :

- Les hybrides parallèles, pour lesquels le moteur thermique fournit directement un couple aux roues.
- Les hybrides série, où le moteur thermique n'est pas directement lié aux roues.
- Les hybrides combinés, dont l'architecture reprend les caractéristiques des hybrides série et parallèle.

Selon l'architecture choisie, le véhicule hybride peut exploiter plusieurs fonctionnalités qui peuvent participer à la réduction de la consommation de carburant, ou à la récupération d'énergie électrique.

II - Historique du véhicule électrique hybride :

En 1894, Paul Pouchain, un inventeur lillois conçoit une voiture avec un moteur à essence sous le capot et des moteurs électriques [1]. En 1899 Une autre automobile de ce type est présentée par les Établissements Pieper (de), de Liège. Étonnamment similaire dans ses caractéristiques aux hybrides modernes, elle utilise un moteur à pétrole de 3,5 chevaux qui entraîne directement les roues. Sur l'arbre de transmission, en amont d'une boîte de vitesses à engrenages à deux rapports avec embrayage, est intercalée une dynamo, selon le principe de l'hybride parallèle. Le moteur fonctionne toujours à pleine charge, la dynamo permet la charge d'accumulateurs, pour un poids de seulement 25 kg. Lorsque la tension de la dynamo est supérieure à celle de la batterie celle-ci est chargée sinon le courant électrique s'inverse et la dynamo se comporte alors comme un moteur électrique. La puissance de l'ensemble moteur-dynamo peut alors atteindre 6 ch.



Figure 1 : Automobile Pieper en 1900 avec une propulsion essence-électrique

Plusieurs constructeurs se lancent, pendant la première décennie du vingtième siècle, dans ce qui est alors appelé l'automobile mixte, ou pétroléoélectrique, dont la Lohner-Porsche mixte, créée par Ferdinand Porsche en 1900 pour Ludwig Lohner (de) ou les Auto Mixte fabriquées sous la marque GEM par Léonce Girardot. Aucun de ces coûteux modèles ne rencontrant le succès, la technologie disparaît avec la Première Guerre mondiale.

Il faut attendre plus de 80 ans avant la mise sur le marché, en grande série, de la Toyota Prius, fin 1997 au Japon, dans une version commercialisée uniquement dans l'archipel. La troisième version de la Prius (modèle NHW20) a reçu le titre européen de voiture de l'année en 2005.

Le coupé deux-places Honda Insight sorti en 1999 a été exporté aux États-Unis et dans quelques autres pays mais pas en France. Sans approcher le succès de la Prius, Honda commercialise depuis plusieurs années une version hybride dite IMA de la Honda Civic et un modèle spécifique, l'Insight.

En 2007, Toyota remporte avec sa Camry Hybride plusieurs prix d'importance dans le monde automobile, l'Association des journalistes automobiles du Canada ayant octroyé à la Camry Hybride 2007 les titres de voiture canadienne de l'année et de meilleure voiture familiale de plus de 30 000 \$ CAN et l'association canadienne des automobilistes le prix Pyramide 2007 CAA pour des initiatives environnementales.

Le constructeur français Peugeot a adopté une position originale en utilisant la structure existante d'un véhicule à traction Diesel en ajoutant deux moteurs électriques sur les roues arrière.

En 2018, Honda prévoyait la sortie de son véhicule hybride Honda Clarity qui présente la plus forte autonomie de conduite en mode tout électrique, jusqu'à 76 km. De plus, le constructeur vise à ce que les véhicules électriques représentent les deux tiers de ses ventes automobiles mondiales d'ici 2030.

III - Véhicule hybride à pile à combustible :

Une automobile hybride est un véhicule faisant appel à plusieurs sources d'énergie distinctes pour se mouvoir. Le concept d'un véhicule hybride électrique remonte aux débuts de l'histoire de l'automobile sauf que le but principal n'était pas de réduire la consommation de combustible mais plutôt d'aider le moteur à combustion interne, à cette époque à faible performance, à assurer un niveau acceptable de compétences. A ce propos, si les premiers véhicules hybrides étaient montrés au salon de Paris en 1899, ce n'est qu'à la fin du 20ème siècle, précisément en 1997, que la commercialisation des premières voitures hybrides a commencé avec la Toyota Prius et la Honda Insight.

Dans un véhicule à pile à combustible hybride, c'est la source de puissance qui est hybride, la motorisation restant entièrement électrique. Un véhicule à pile à combustible hybride utilise donc une source secondaire d'énergie électrique réversible en puissance (fonctionnement en charge et en décharge). Les rôles de la source secondaire d'énergie sont :

- Assister en puissance la pile à combustible :

La source secondaire fournit le complément de puissance lorsque la pile atteint sa puissance maximale (par exemple lors d'accélération du véhicule).

- Récupérer l'énergie cinétique lors des freinages :

La récupération de l'énergie cinétique lors des phases de freinage permet d'économiser de l'hydrogène et d'augmenter l'autonomie du véhicule.

- Introduire un degré de liberté dans la répartition des puissances :

L'hybridation permet de répartir la demande de puissance entre le système pile à combustible et la source secondaire d'énergie. Les points de fonctionnement du système PAC peuvent ainsi être déplacés vers les zones de meilleurs rendements en utilisant des stratégies de commande adaptées, ce qui permet de réduire la consommation d'hydrogène.

Au sein du groupe motopropulseur d'un véhicule à pile à combustible hybride (Fig. I.1), plusieurs modes d'opérations peuvent être identifiés. Ces modes d'opérations (traction, freinage, arrêt) induisent des flux énergétiques différents.

Mode	Puissance	Schéma des flux énergétiques	Description
Traction	$P_{ME} > 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} = 0$		Le système PAC alimente seul la machine électrique.
	$P_{ME} > 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} > 0$		Le système PAC et la source secondaire alimentent ensemble la machine électrique.
	$P_{ME} > 0$ $P_{sysPAC} = 0$ $P_{SSE} > 0$		La source secondaire alimente seule la machine électrique.
	$P_{ME} > 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} < 0$		Le système PAC alimente la machine électrique et recharge la source secondaire.
Freinage	$P_{ME} < 0$ $P_{sysPAC} = 0$ $P_{SSE} < 0$		La source secondaire récupère l'énergie cinétique de freinage.
	$P_{ME} < 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} < 0$		La source secondaire récupère l'énergie cinétique de freinage et reçoit également de la puissance du système PAC.
Arrêt	$P_{ME} = 0$ $P_{sysPAC} = 0$ $P_{SSE} = 0$		Aucun flux énergétique.
	$P_{ME} = 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} < 0$		Le système PAC recharge la source secondaire.

Tab 1: Flux énergétiques au sein du groupe motopropulseur

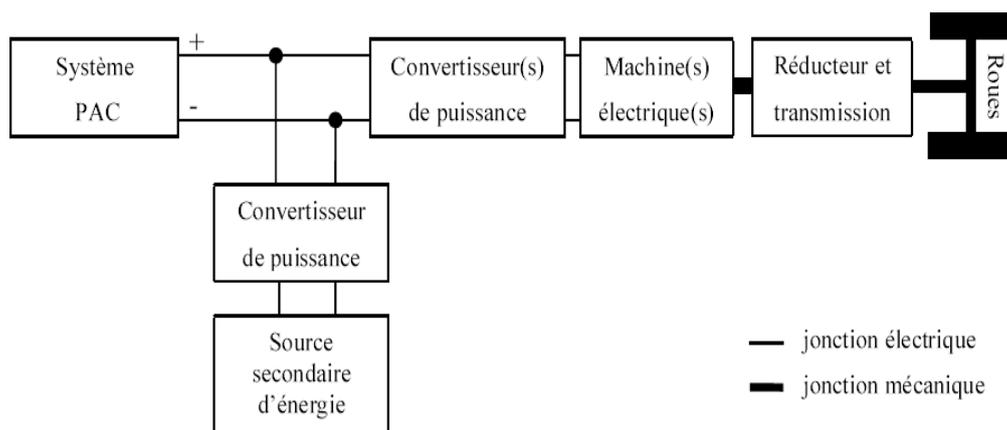


Figure 2 : Exemple d'architecture de véhicule à pile à combustible hybride

III – 1 – Les composants du véhicule hybride :

Les véhicules hybrides thermiques-électriques sont des véhicules intermédiaires entre les véhicules conventionnels et les véhicules électriques. Ils sont constitués des mêmes éléments que ceux des véhicules conventionnels c'est-à-dire :

- Un transformateur irréversible d'énergie tel qu'un moteur thermique ou un pack de piles à combustible.
- Son stockage d'énergie non réversible associée (essence, gazole, gazole de synthèse, gaz de pétrole liquéfié, hydrogène, méthane, air comprimé, etc.).
- Le système de transmission (courroie, boîte de vitesse et liaisons aux roues motrices).
- Les freins mécaniques dont la gestion peut être optimisée.

A cela est ajouté un réseau électrique de bord de plus ou moins haut tension selon le taux d'hybridation du véhicule.

Ce réseau électrique, similaire à celui d'un véhicule électrique, est constitué :

- D'un ou plusieurs transformateurs réversibles (ou non) d'énergie électrique : moteurs électriques et génératrices (ou alternateurs).
- D'un stockage réversible d'énergie : le stockage électrochimique est de loin le plus de convertisseurs statiques adaptant la tension entre les différents éléments de stockage et de transformation de l'énergie ainsi qu'entre le réseau de puissance et le circuit électrique de bord.
- D'un calculateur qui assure la gestion de l'énergie.

III – 2 – Les différentes architectures hybrides :

On distingue trois grandes familles d'architecture : série, parallèle et combinée. Une manière de différencier les deux premières est de considérer la nature du point de jonction entre les différentes chaînes de traction, appelé 'nœud'. Dans l'architecture 'Série', le nœud est électrique, dans l'architecture parallèle, il est mécanique.

III-2-1-Hybride série :

Ce type de véhicule est équipé d'une propulsion électrique (voir la Figure 2) qui est assurée par un ou plusieurs moteurs électriques. Une source auxiliaire d'énergie permet d'effectuer les opérations de démarrages du véhicule. La source principale d'énergie assure la recharge de la source auxiliaire d'énergie et l'alimentation de la motorisation électrique. Quand on a besoin d'énergie supplémentaire, pour les reprises lors des dépassements ou dans les côtes par exemple, c'est la source auxiliaire d'énergie qui fournit ce supplément d'énergie. Le moteur thermique peut être un moteur Diesel ou à essence mais d'autres solutions sont envisagées, comme les batteries, la turbine et la pile à combustible.

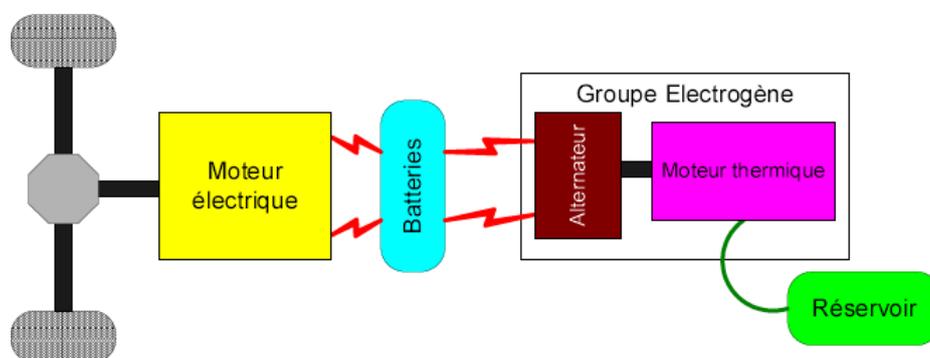


Figure 3 : Véhicule hybride série

Parmi les avantages du véhicule hybride série nous citons :

- La source principale d'énergie peut être un moteur thermique (connecté à une génératrice), des batteries, une pile à combustible....

- La liaison mécanique entre l'arbre moteur et l'axe des roues motrices est assurée via une simple boîte de vitesse.
- La possibilité d'utilisation de stratégies de contrôle simples.
- La possibilité d'utiliser deux moteurs ou même quatre, au lieu d'un, sans complexité au niveau de la transmission de la puissance aux roues.

Et parmi les inconvénients du véhicule hybride série nous citons :

- Des frais supplémentaires concernant le prix et le poids de la génératrice couplée au moteur thermique.
- Les pertes énergétiques dues à la conversion de l'énergie mécanique du moteur thermique à l'énergie électrique via la génératrice électrique.
- Le moteur de traction doit être dimensionné pour répondre à la forte demande de puissance, car il est seule source d'énergie reliée aux roues.

Un des inconvénients majeur de ce type d'architecture est le faible rendement global de l'ensemble car la puissance mécanique délivrée par le moteur thermique est tout d'abord convertie en puissance électrique par l'alternateur, éventuellement stockée dans les batteries, puis reconvertie en puissance mécanique par le moteur électrique. Cependant, du point de vue de la commande, cette architecture offre deux degrés de liberté : le régime et le couple du moteur thermique peuvent être choisis quasiment indépendamment des conditions de conduite.

II-2-2-Architecture parallèle :

Pour l'architecture parallèle, le point de jonction entre les différentes chaînes de traction est cette fois mécanique. Lorsque les différents moteurs sont solidaires du même arbre, via une boîte à vitesse permet la transmission de la puissance aux roues Figure 4, on parle d'architecture hybride parallèle simple arbre.

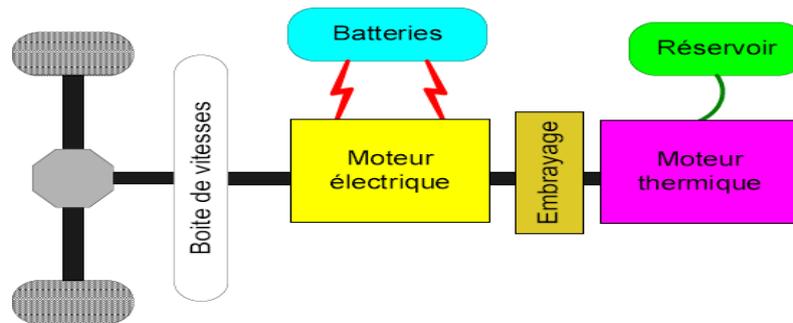


Figure 4 : L'architecture hybride parallèle simple arbre

Lorsque le moteur électrique a une très faible puissance, on parle alors d'alternodémarrreur et celui-ci est placé avant l'embrayage. Dans ce cas, la propulsion est quasi intégralement assurée par le moteur thermique et l'alternodémarrreur n'est utilisé que dans la phase de démarrage du moteur thermique. Le moteur thermique est arrêté dès que le véhicule est arrêté afin de réduire la consommation et les émissions de polluants. Lors des phases de démarrage, le moteur thermique pouvant être entraîné à régime beaucoup plus élevé qu'avec un démarreur classique, les émissions de polluants sont réduites de manière significative.

Lorsque les deux moteurs ont des puissances similaires, le moteur électrique est placé entre l'embrayage et la boîte de vitesses. Les régimes des deux moteurs sont linéairement dépendants du régime des roues. Il s'agit alors de répartir le couple aux roues nécessaire à la propulsion du véhicule entre les deux moteurs, en tenant compte des rapports de boîte. L'un des inconvénients inhérent à cette architecture est la perte de couple aux roues apparaissant lors des changements de rapports, qui dégrade le confort de conduite.

Pour remédier à cet inconvénient, la boîte de vitesses peut être remplacée par un variateur continu de vitesse. Le moteur électrique peut également être connecté sur un arbre différent, on parle dans ce cas d'architecture double arbre, Figure 5. On s'aperçoit que le dimensionnement des composants et la répartition de puissance sur les deux chaînes de traction sont moins contraints. Dans l'architecture double arbre, les deux moteurs ont des

régimes indépendants et à tout moment la traction du véhicule est assurée par un des deux moteurs.

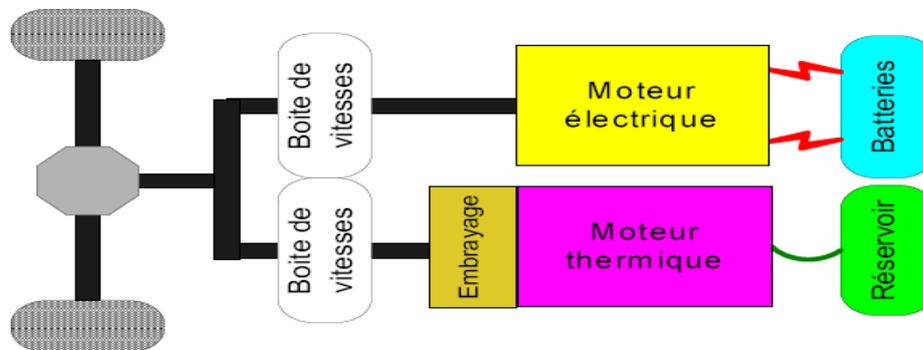


Figure 5 : l'architecture double arbre

Lorsque le moteur électrique est relié directement aux roues, pour assurer une réduction de consommation de carburant et des émissions de polluants significative, sa puissance doit être relativement importante. L'utilisation d'un moteur électrique de moindre puissance reste possible si une deuxième boîte de vitesses est ajoutée, Figure 5. Cependant, pour des raisons de coût et de complexité mécanique cette dernière solution semble difficilement envisageable.

Dans les architectures simple et double arbre, le couple aux roues résulte de l'addition des couples fournis par les moteurs (aux rapports de réduction près). L'architecture combinée met en œuvre un train planétaire afin de réaliser une addition de vitesse, Figure 6.

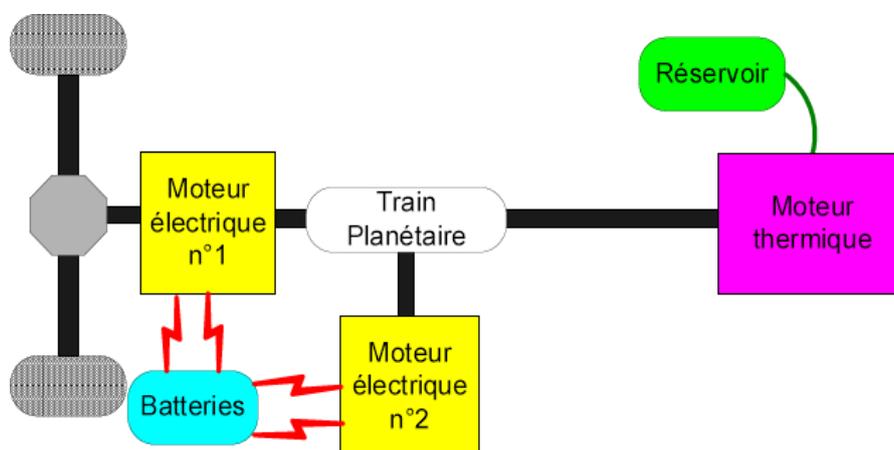


Figure 6 : L'architecture hybride combinée.

Si seulement un moteur thermique et un moteur électrique sont utilisés, le seul degré de liberté est le choix des régimes de chacun des moteurs. Par contre, si un deuxième moteur électrique est ajouté, Figure 6, alors le couple et le régime du moteur thermique peuvent être choisis presque indépendamment des conditions de conduite (vitesse du véhicule, couple demandé aux roues par le conducteur).

Cette liste d'architectures est loin d'être exhaustive, mais représente les configurations les plus utilisées. D'autres ont été proposées mais elles sont généralement plus complexes (plusieurs embrayages, 3 moteurs électriques, etc.).

III – 3 – Le Moteur électrique :

Lors qu'on s'intéresse au véhicule hybride ou électrique, plusieurs critères pour le choix du ou des moteurs sont à examiner :

- Le rendement
- La puissance massique et volumique ;
- Le coût de la commande rapprochée associée ;
- L'entretien.

Constructeur	Véhicule	Pile à combustible	Source secondaire d'énergie	Stockage de l'hydrogène	Auto-nomie	Motorisation
Honda /Honda/	FCX 	86 kW (Honda)	Super-condensateurs	Réservoir haute pression (156,6 l, 350 bar)	430 km	80 kW
Toyota /Toyota/	Highlander FCHV* 	90 kW (Toyota)	Batteries Ni-MH	Version 3: Hydrure métallique Version 4: Réservoir haute pression Version 5: Reformeur	300 km 250 km -	80 kW
Nissan /Nissan/	X-Trail FCHV* 	90 kW (Nissan)	Batterie Li-ion	Réservoir haute pression (700 bar)	500 km	90 kW
General Motors /GM/	Zafira Hydrogen3 	94 kW	sans	Version liquide: Réservoir d'hydrogène liquide (68 l) Version gaz: Réservoir haute pression (77,4 l, 700 bar)	400 km 270 km	60 kW
Daimler-Chrysler /AFH2/	Class A F-Cell 	85 kW (Ballard)	Batteries Ni-MH	Réservoir haute pression (350 bar)	150 km	65 kW

Tab. 2 : Exemples de véhicules à pile à combustible.

IV - Principaux modes de fonctionnement :

Les véhicules hybrides disposant de plusieurs sources d'énergie pour assurer leur propulsion. Une propulsion hybride consiste à combiner un ou plusieurs moteurs électriques avec un moteur thermique. Lorsque le véhicule est immobile, les deux moteurs sont à l'arrêt.

On distingue trois principaux modes de fonctionnement possibles. D'une façon très générale, on peut les résumer de la manière suivante :

IV-1-Le mode thermique pur :

- Lorsqu'une accélération plus forte est demandée, le moteur thermique est démarré pour fournir le supplément de puissance et remplacer progressivement le moteur électrique, ce mode correspond à une propulsion intégralement assurée par le moteur thermique. Les performances en termes de consommation et de pollution sont alors similaires à celles d'un véhicule conventionnel.

IV-2-Le mode électrique pur :

- La mise en mouvement de la voiture est assurée par le moteur électrique seul, jusqu'à une vitesse maximum variant entre 70 à 130 km/h. Ce mode correspond à une propulsion intégralement assurée par le moteur électrique. Le véhicule est alors dit ZEV (Zero Emission Vehicle) et les performances en terme de dynamique et d'agrément de conduite sont similaires à celles d'un véhicule électrique. Ce mode conduit à plus ou moins long terme à la décharge des batteries.

IV-3-Le mode hybride :

- En cas de demande de puissance importante (forte accélération ou forte pente), les deux moteurs fonctionnent simultanément pour additionner leurs couples moteurs.

En traction, l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule peut être délivrée soit par les deux moteurs, soit par le moteur thermique seul. Le moteur électrique est alors utilisé pour recharger les batteries en roulant.

En phase de décélération ou de descente, le freinage régénératif permet au moteur/générateur de convertir une part de l'énergie cinétique en énergie électrique, rechargeant la batterie. Ce rôle de frein moteur peut être accru en forçant le moteur thermique à tourner sans injection de carburant, soulageant les freins mécaniques à friction. Celui-ci peut au contraire être arrêté pour réduire la consommation et la pollution, ce qui désactive son frein-moteur.



La figure 7 : présente le fonctionnement dynamique du VEH.

CHAPITRE II :
Généralité Sur La Pile A
Combustible

I-Introduction

En 1802, Sir Henry Davy découvre le principe de la pile à combustible en construisant une cellule en carbone opérant à haute température, avec de l'acide nitrique comme électrolyte. La première cellule hydrogène-oxygène fut construite par Sir W. Grove, en 1839. Cinquante ans plus tard, en 1889, L. Mond et C. Langer apportent des perfectionnements dans la pile notamment avec l'introduction des catalyseurs (noir de platine) ou des électrolytes pouvant être contenus dans des matrices poreuses en plâtre, en amiante.

En 1921, E. Baur met en évidence l'importance de la cinétique, il met au point une cellule fonctionnant à haute température (1000°C), avec une anode de carbone, de l'oxyde de fer comme cathode, et des carbonates alcalins comme électrolytes.

En 1956, F.T. Bacon et J.S. Frost de l'Université de Cambridge, démontrent la faisabilité d'un groupe de puissance de 6 kW.

K.Ihring, de la firme américaine Allis-Chalmers met au point un tracteur de 20 ch. équipé d'une pile à combustible. Il y a dans les années 60 une certaine effervescence dans ce secteur de la recherche, mais qui retombe progressivement du fait de la compétition avec d'autres moyens de conversion moins onéreux. cependant l'une des grandes réalisations pratiques des piles à combustible réside dans leur utilisation par la NASA, pour l'alimentation électrique des programmes Gemini, Apollo, et Shuttle (navette spatiale).

(Pour Apollo XIII, le problème est survenu à la suite de la purge des blocs d'oxygène servant à alimenter les piles du vaisseau.)

II-Historique :

La pile à combustible (PAC) convertit de l'énergie chimique en énergie électrique. Sa technologie est devenue de plus en plus familière aux cours des dernières décennies mais a pourtant été découverte il y a plus de 150 ans. En 1839, Sir William Grove, un juriste anglais et chercheur amateur en chimie, décrit une expérience où de l'eau et de l'électricité sont produites à partir d'oxygène et d'hydrogène. L'expérience de Grove donne naissance à la batterie à gaz (Figure 8), rebaptisée plus tard pile à combustible /Fuel Cell Today/ /SAE/.

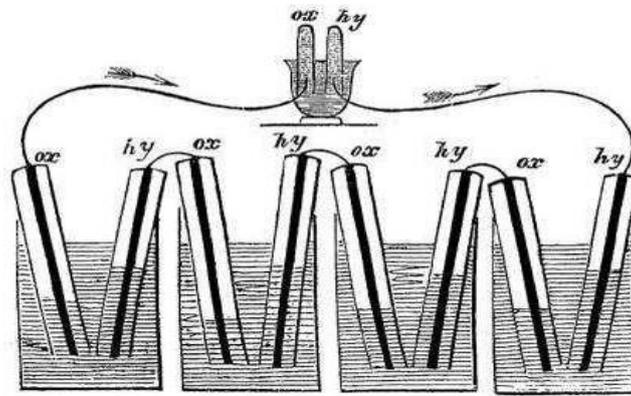


Figure 8 : L'expérience de Sir William Grove

La découverte de W. Grove ne fut cependant pas exploitée et fut reléguée au rang de curiosité scientifique, alors que l'extraction des combustibles fossiles et le développement du moteur thermique étaient en plein essor. En 1932, le docteur Francis Bacon reprend les recherches initiées par W. Grove et parvient à réaliser une pile à combustible de 5kW en 1959.

La pile à combustible a connu son émergence grâce à la NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) qui cherchait un moyen de produire de l'électricité à bord de ses engins spatiaux. La pile à combustible apparut comme un système idéal du fait de la présence d'oxygène et d'hydrogène disponible dans les systèmes de propulsion. Des piles à combustible furent utilisées avec succès par la capsule Gemini en 1964 /Burke 2003/, et l'eau produite par la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène était consommée par les astronautes. Il s'agit d'une des premières utilisations concrètes des piles à combustible. L'intérêt de l'utilisation de la pile à combustible dans le domaine des transports remonte à 1973. La première crise pétrolière a conduit les gouvernements, les industries et les laboratoires à

chercher une alternative aux énergies fossiles pour tenter de s'assurer une indépendance énergétique. De nombreux efforts et moyens ont été fournis pour réduire les coûts de fabrication des systèmes pile à combustible, pour augmenter leur fiabilité et pour améliorer leur compacité. En 1993 un bus à pile à combustible est réalisé par l'entreprise

Ballard (aujourd'hui l'un des leaders mondiaux dans le domaine de la pile à combustible) en partenariat avec le constructeur automobile Daimler-Benz /Prater 1992/. La pile à combustible était de type PEM (« Proton Exchange Membrane » ou « membrane échangeuse de proton »). L'hydrogène nécessaire à l'alimentation de la pile était produit par le reformage embarqué de méthanol. Depuis les années 1990, les piles à combustibles et l'hydrogène sont considérés comme des candidats possibles à la production d'énergie durable et propre, que ce soit pour des applications mobiles ou stationnaires. Parmi les différents types de pile à combustible, la pile de type PEM (« Proton Exchange Membrane », également appelée PEFC (« Polymer Electrolyte Fuel Cell »), est la technologie généralement retenue pour l'usage automobile. Plusieurs raisons expliquent ce choix /Lachaize 2004/ /Emadi et al. 2005/ /Boettner et al. 2002/ :

II-1-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.

II-2-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.

II-3-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.

III-Principes de fonctionnement :

Une pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique (figure 9). L'énergie est produite quand l'hydrogène réagit chimiquement avec l'oxygène de l'air. Dans un moteur à combustion interne, lorsque la réaction se produit, l'énergie est relâchée sous forme de chaleur, dont une partie peut effectuer un travail utile en poussant un piston. Dans une pile à combustible, la réaction est électrochimique et produit de l'énergie électrique et de la chaleur. L'énergie électrique peut être employée pour effectuer le travail utile directement tandis que la chaleur est soit gaspillée soit employée par ailleurs.

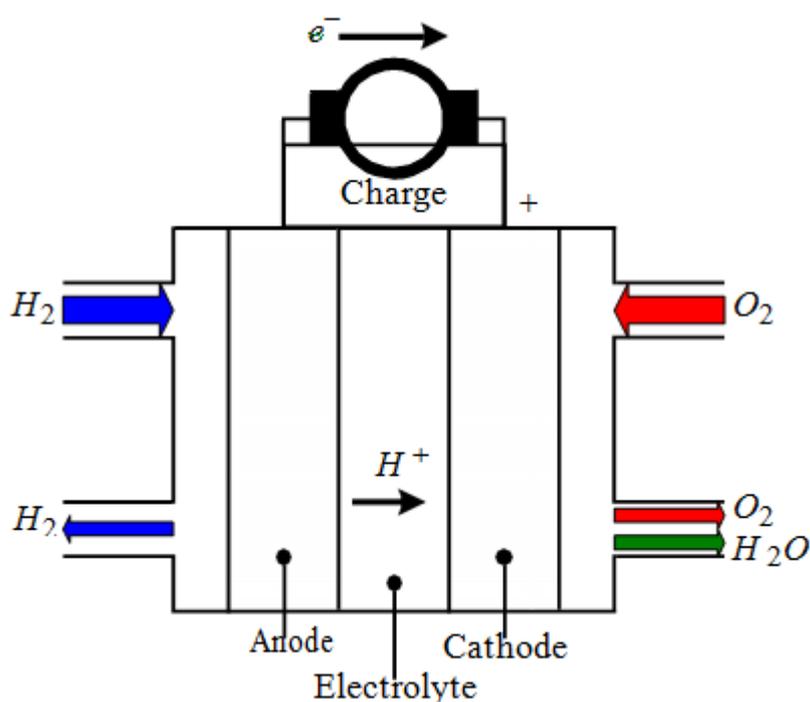


Figure 9 : Fonctionnement de principe d'une pile à combustible

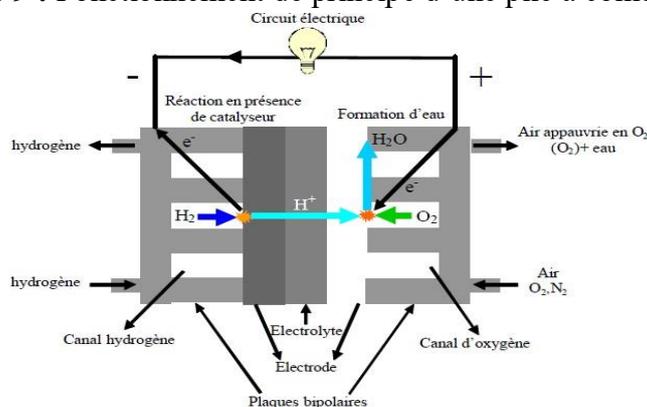


Figure 10 : schéma de principe d'une pile a combustible PEMFC

Une caractéristique fondamentale des piles à combustible est que la charge électrique détermine le taux de consommation d'hydrogène et d'oxygène. Les gaz sont fournis, à l'anode pour l'hydrogène et à la cathode pour l'oxygène. Ainsi, la structure d'une pile à combustible comporte des arrivées de gaz des deux côtés de l'électrolyte.

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains fonctionnent à haute température, d'autres à basse température. Les piles à combustible fonctionnant à basse température tendent à exiger des catalyseurs en métal noble, typiquement du platine, destiné à améliorer les réactions aux électrodes. La plupart des piles à combustible destinées aux applications automobiles emploient un électrolyte solide à basse température qui conduit des ions d'hydrogène.

En principe, une pile à combustible peut fonctionner en utilisant une variété de carburants et d'oxydants. L'hydrogène a été reconnu comme le carburant le plus efficace parce qu'il a une plus haute réactivité électrochimique que les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou les alcools. Et l'oxygène est l'oxydant par excellence en raison de sa haute réactivité et son abondance dans l'air.

Dans le cœur d'une pile à électrolyte basique comme les SOFC, ces réactions deviennent :

- **à la cathode** : réduction catalytique de l'oxygène :
 $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$
- **à l'anode** : oxydation catalytique de l'hydrogène qui capture les ions O^{2-} qui ont traversé l'électrolyte pour donner de la chaleur et de l'eau :
 $\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Q (chaleur)} + 2\text{e}^-$

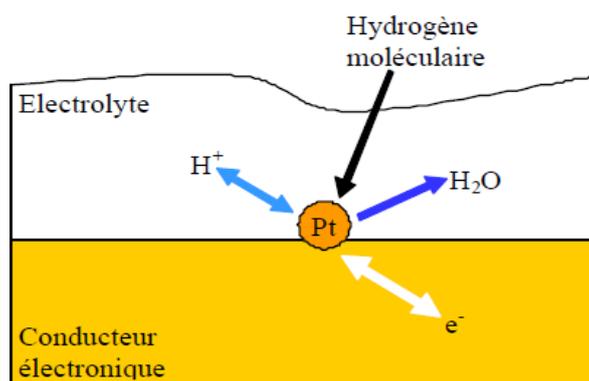


Figure 11 : Principe de la réaction catalytique dans l'électrode volumique.

Dans les deux cas, les électrons sont libérés sur l'anode puis, bloqués par l'électrolyte, passent par le circuit extérieur de la pile et fournissent de l'énergie électrique (force électromotrice) avant de se recombinaison sur la cathode avec l'oxygène.

Le rôle du catalyseur dans l'oxydation de l'hydrogène à l'anode et de la réduction de l'oxygène à la cathode est essentiel dans le rendement de la pile. On utilise encore aujourd'hui principalement le platine, qui est déposé en couches minces sur la surface des deux électrodes, mais en plus grande quantité sur la cathode, la réaction de réduction y étant plus difficile à catalyser. Or le platine est un métal rare, très coûteux, qui pèse lourdement sur la compétitivité des piles à combustible actuelles. Des nanomatériaux catalytiques sont activement étudiés pour surmonter cet obstacle majeur.

IV-Types de piles à combustible :

IV-1-Pile à combustible de type PEM (PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

La pile à combustible de type PEM est actuellement le type le plus prometteur de piles à combustible pour les applications automobiles et a été utilisée dans la majorité des prototypes construits. Dans cette thèse, nous nous intéressons exclusivement à ce type de pile à combustible.

La structure d'une cellule de pile à combustible de type PEM est représentée dans la figure 12. Se déplaçant dans la direction de x, les gaz viennent de canaux gravés dans des plaques bipolaires (épaisseur 1-5 millimètres). De la vapeur d'eau est ajoutée aux gaz pour humidifier la membrane. Les couches de diffusion (100-500 micromètres) assurent une bonne distribution des gaz aux couches de réaction (5-50 micromètres). Ces couches constituent les électrodes de la cellule où des particules de platine, qui jouent le rôle du catalyseur, ont été déposées dans un support carbone sur la membrane.

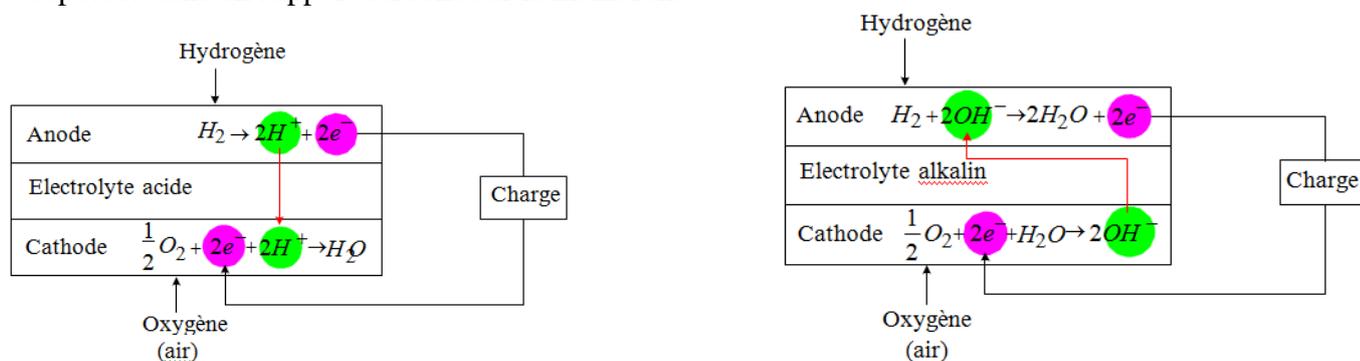


Figure 12 : Principe des piles à combustible à électrolyte acide ou alcalin

Tab. 3 : Différents types de pile à combustible (ion traversant l'électrolyte, température de fonctionnement et applications typiques.

Type	Électrolyte	Température	Rendement énergétique (pratique)
DMFC (pile à méthanol)	H ₂ SO ₄	70°C	40 %
AFC	Solution alcaline (NaOH, KOH)	60°-120°C	25 à 50 %
SPEFC, SPFC PEMFC	Membrane conductrice ionique (Nafion)	20-120°C	25 à 60 %
PAFC	Acide phosphorique (H ₃ PO ₄)	160°-200°C	25 à 40 %
ACFC-MCFC	Carbonates fondus (KLiCO ₃)	650°-800°C	30 à 54 %
SOFC	Oxydes solides (ZrO ₂ , Y ₂ O ₃)	800°-1000°C	25 à 55 %

Type	Puissances obtenues	Industriels et Centres de recherches
DMFC (pile à méthanol)	5 kW	CNRS, Hitachi, Sanyo, Alstom, Siemens
AFC	7-100 kW	Siemens, Fuji Electric, Zevco
SPEFC, SPFC PEMFC	10 kW	Université d'Oxford, Sorapec, ERL, Ballard, De Nora
PAFC	250 W à 11 MW	Sanyo, Fuji Electric, IFC, Engelhard, Westinghouse
ACFC-MCFC	1 kW à 25 kW	IFC, Hitachi, Fuji, Matsushita, Mitsubishi, Ensaldo
SOFC	500 W à 3 kW	ABB, Dornier, ECN, TNO, KepCo, I.C, Allied Signal

Systèmes	Anode	Electrolyte	Cathode	Température
AFC	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\leftarrow OH^- \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$	60-80 °C
PEMFC PAFC DMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\Rightarrow H^+ \Rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	60-220 °C
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\leftarrow CO_3^{2-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	600-660 °C
ITSOFC SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\leftarrow O^{2-} \leftarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$	600-1000 °C

Figure 13 : schéma du principe de fonctionnement d'une pile

IV-2-Hydrogène :

L'hydrogène (H) est l'élément le plus abondant dans l'univers. Il compose 75% de la masse de toute la matière dans les étoiles et les galaxies. Un atome d'hydrogène a seulement un proton et un électron. Cependant l'hydrogène comme gaz (H_2) n'existe pas naturellement sur terre et se présente sous formes composées. Combiné avec l'oxygène, c'est l'eau (H_2O).

Combiné avec le carbone, il forme les composés organiques tels que le méthane (CH_4), le charbon ou le pétrole. La plupart de l'énergie que nous utilisons aujourd'hui vient des carburants fossiles. Seulement sept pour cent viennent des sources d'énergie renouvelable. Dans une optique de raréfaction des carburants fossiles, l'hydrogène apparaît comme un vecteur énergétique prometteur. Puisque le gaz d'hydrogène n'existe pas naturellement sur terre, il faut le produire.

Il y a plusieurs manières de faire cela. Si l'hydrogène est produit à partir de l'électrolyse de l'eau, l'électrolyseur étant alimenté à partir d'une source d'énergie renouvelable (panneau solaire, éolienne ou turbine hydroélectrique), il n'y aura pas d'émissions de dioxyde de carbone. Le développement des piles à combustible conduira à différents modes de production liés aux méthodes locales de production énergétique.

En raison de l'abondance de gaz naturel, de la disponibilité du méthanol et du propane, et du manque d'une infrastructure de production et de distribution de l'hydrogène, on prévoit que les carburants hydrocarbures seront les carburants dominants pour les applications stationnaires de piles à combustible. Tant que ces carburants sont disponibles à faible coût, le reformage hydrocarbure est la méthode la plus simple et la plus efficace pour produire de l'hydrogène.

V-Construction de pile à combustible de type PEM :

Beaucoup de cellules sont reliées électriquement en série pour former le stack. Chaque cellule se compose d'un assemblage membrane-électrodes qui constitue l'anode, la cathode et l'électrolyte serré entre deux plaques en graphite. Les plaques dirigent le carburant et l'air des deux côtés opposés de l'assemblage.

Un système de refroidissement est utilisé pour régler la température de fonctionnement de la pile à combustible. Pour faciliter cela, des circuits de refroidissement par cellule ou par groupe de cellules permettent d'absorber ou de fournir (au démarrage) la chaleur. Les joints entre les plaques en graphite s'assurent que l'oxydant, le carburant et le liquide de refroidissement ne se mélangent jamais dans la pile à combustible.

Aux extrémités du stack se trouvent les connexions électriques, les bornes d'alimentation des gaz et de départ des gaz non utilisés et les bornes d'arrivée et de départ du fluide de refroidissement. Soit au total huit bornes où circulent constamment des fluides.

La conception d'une pile à combustible vise à utiliser au mieux la surface de la membrane et joue sur le compromis surface de la membrane-nombre de cellule pour obtenir la puissance désirée. Les points critiques sont les joints, les tolérances des circuits de distribution des fluides et l'alignement des cellules. Comme pour tout produit commercial, la conception résultante doit être fiable, simple à fabriquer, économiquement viable et avoir une durée de vie acceptable.

V-1-Assemblage membrane-électrodes :

L'assemblage membrane-électrodes est le cœur de la pile à combustible. Il se compose d'une membrane d'électrolyte de polymère solide serrée entre deux électrodes de carbone poreuses. Un catalyseur à base de platine est intégré entre la membrane et les électrodes. Les électrodes incluent souvent des joints améliorant le contact avec les composants adjacents et évitant les fuites. A titre d'exemple, la figure 1.5 présente l'assemblage membrane-électrodes de sept couches de la compagnie 3M.

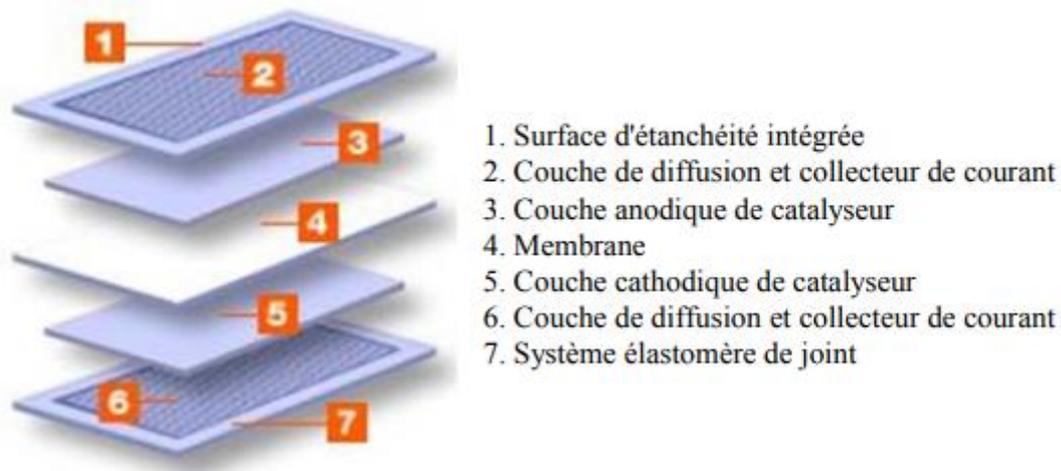


Figure 14 : Assemblage membrane-électrodes de sept couches de la compagnie 3M

V-1-1-Electrodes :

Les électrodes fournissent l'interface entre les gaz réactifs et l'électrolyte. Elles doivent permettre le passage du gaz humide, fournir une surface de réaction où les gaz entrent en contact avec l'électrolyte, être conductrices aux électrons libres et assurer le passage des ions vers la membrane. Du papier en fibre de carbone est typiquement utilisé pour cet objectif parce qu'il est poreux, hydrophobe (non-mouillable), conducteur et non-corrosif. Le matériau d'électrode est très mince pour faciliter le transport des gaz et de l'eau.

Un catalyseur est ajouté à la surface de chaque électrode où il est en contact de l'électrolyte afin d'augmenter l'efficacité de la réaction chimique. Le catalyseur améliore la réaction chimique en fournissant les sites de réaction mais n'est pas consommé dans le procédé. Le platine est typiquement utilisé en raison de sa haute activité, sa stabilité et sa conductivité électrique. Le platine était onéreux, la quantité utilisée (exprimée en mg.cm^{-2}) est un facteur significatif dans le coût d'une pile à combustible. Les concepteurs de pile à combustible essaient de minimiser la quantité de platine utilisée tout en maintenant le bon fonctionnement des cellules.

V-1-2-Electrolyte :

L'électrolyte en polymère solide est la caractéristique distinctive d'une pile à combustible de type PEM. L'électrolyte est une membrane mince d'une épaisseur de 50 à 175 μm . Tous les électrolytes acides en polymère solide exigent la présence de molécules d'eau pour conduire les ions d'hydrogène, les ions d'hydrogène se déplaçant ainsi que des molécules d'eau pendant la réaction d'échange ionique. La proportion d'eau par rapport aux ions d'hydrogène pour obtenir une conductivité efficace est typiquement dans un rapport de 3 pour 1. Pour cette raison, les gaz en contact avec une membrane doivent être saturés en eau pour assurer un fonctionnement efficace.

Les membranes doivent être conductrices pour les protons, isolantes pour les électrons et imperméables aux gaz. De plus elles doivent avoir une bonne tenue mécanique et être stables. L'intégration dans un assemblage membrane-électrodes leur apporte une structure facilitant leur intégration dans les cellules. Un certain nombre de membranes commerciales sont disponibles comme le Nafion, produit par Dupont (figure 15). En outre, certains fabricants de piles à combustible comme Ballard ont développé leurs propres membranes.



Figure 15 : Membrane DuPont

V-1-3-Plaque bipolaire :

Les plaques bipolaires dirigent le carburant et l'oxydant des deux côtés opposés des assemblages membrane-électrodes. Chaque plaque contient des canaux de conception sinueuse qui maximise la répartition des gaz (figure 1.7). La forme des canaux de gaz est un paramètre important pour la production uniforme d'électricité, un fonctionnement stable des cellules et la gestion de l'eau. Des conceptions différentes des plaques bipolaires sont adaptées aux diverses applications de pile à combustible.

Chaque plaque doit être électriquement conductrice pour que le courant issu de la réaction électrochimique puisse passer d'une cellule à l'autre, et finalement aux bornes électriques. Les plaques sont typiquement faites de graphite les canaux étaient usinés ou pressés. Le graphite est le matériau préféré en raison de sa conductivité excellente, sa neutralité et son coût relativement bas.

Les plaques de refroidissement placées entre les cellules ou les groupe de cellules sont de conception similaire, les canaux de refroidissement étant conçus pour maximiser les échanges thermiques. Les plaques bipolaires de refroidissement comportent les entrées et sorties de fluides et assurent la liaison avec les plaques voisines. Des joints entre les plaques s'assurent que les flux de carburant, d'oxydant et de liquide de refroidissement ne se mélangent pas.

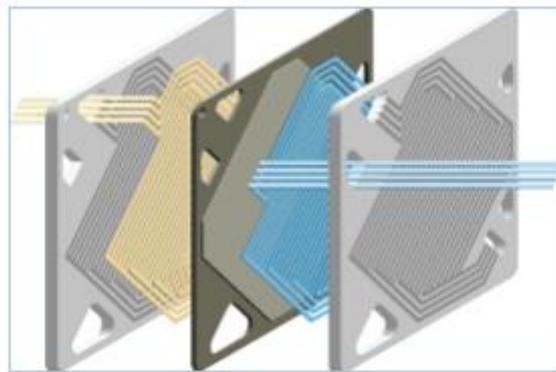


Figure 16 : Plaques bipolaire de pile PEM

V-2-Humidificateur :

L'humidification des gaz réactifs est un aspect important du fonctionnement des piles PEM. Sans une bonne humidification de la membrane, la conduction des ions ne peut pas se produire et des dommages de la pile à combustible peuvent résulter. La quantité d'eau qu'un gaz peut absorber dépend fortement de la température d'humidification, en particulier à basse pression. Sur certains stack, des humidificateurs sont intégrés au stack lui-même. Sur d'autres, les humidificateurs sont des composants externes.

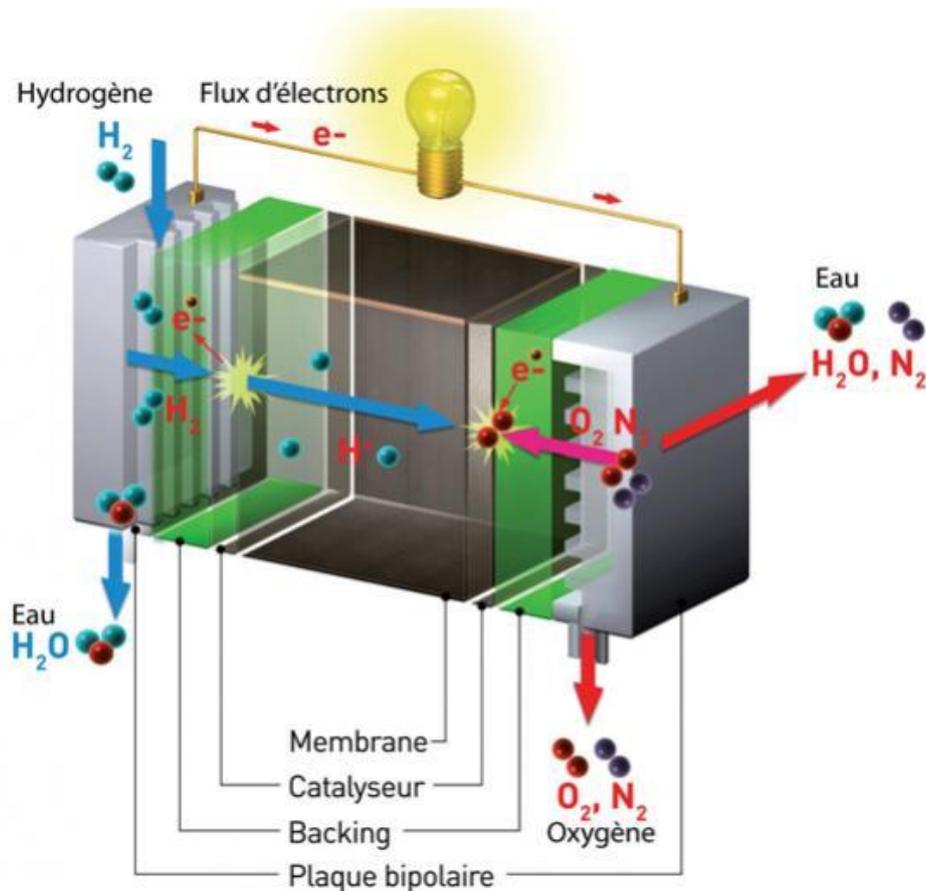


Figure 17 : Schéma de construction de la pile à combustible

VI-Système Pile A Combustible Embarqué :

Le système ou générateur PàC se compose donc de la pile et de composants auxiliaires destinés à la faire fonctionner. La figure ci-dessous fait apparaître un exemple de schéma relatif à un système PàC embarqué.

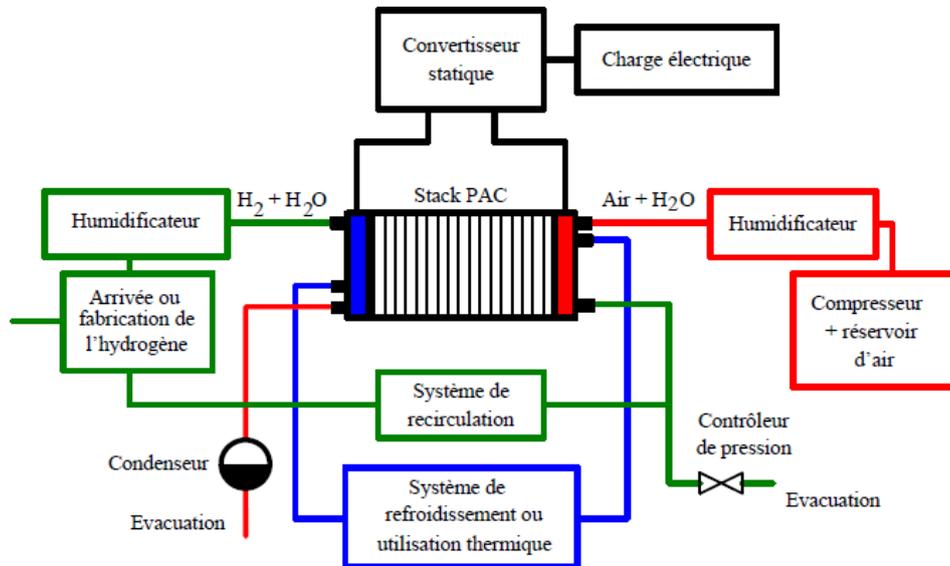


Figure 18 : Schéma illustrant les différents éléments d'un système PàC

Un système pile à combustible exige du carburant, de l'oxydant et du liquide réfrigérant afin de fonctionner. Les pressions et les débits du carburant et de l'oxydant doivent être réglés.

En outre, les gaz doivent être humidifiés et la température du système doit être contrôlée.

Pour atteindre ceci, un stack de pile à combustible doit être entouré d'un système de fourniture du carburant, un système d'alimentation en air, un système de refroidissement du stack et un système d'humidification.

En fonctionnement, l'énergie produite doit être adaptée pour être utilisée par une charge. Des alarmes doivent arrêter le processus en cas de condition de fonctionnement dangereuse. Un système de mesure de la tension des cellules doit surveiller le fonctionnement du stack. Ces fonctions sont assurées par un système de contrôle.

VI-1-Configuration système :

Les différents constituants d'un système pile à combustible sont représentés dans la figure 19. Comme cette figure l'indique, un système pile à combustible se compose de six sous-systèmes fondamentaux : le stack présenté précédemment, la production du carburant, la gestion de l'air, la gestion de l'eau, la gestion thermique et le système de conditionnement de l'énergie électrique produite. La conception de chaque sous-système est une partie de la conception du système complet et est un élément fondamental de la réalisation de systèmes pile à combustible performants.

VI-2-Reformeur :

Parce que la plupart des piles à combustible utilisent de l'hydrogène comme carburant et que la plupart des sources d'énergie primaires sont des hydrocarbures, un dispositif de production de carburant est parfois nécessaire pour convertir le carburant initial en hydrogène.

La complexité du procédé de reformage dépend du type de système pile à combustible et de la composition du carburant d'origine. Pour les systèmes fonctionnant à basse température comme les piles PEM, ce procédé est relativement complexe et comporte généralement un désulfuriseur, un vaporeformeur ou un réacteur d'oxydation partielle, et un système de filtrage de gaz pour enlever le monoxyde de carbone du gaz d'anode. Le développement d'un reformeur économique et compact permettant de produire un gaz riche en hydrogène pour les piles à combustible basse température, pour les applications du bâtiment ou du transport automobile est un défi actuel.

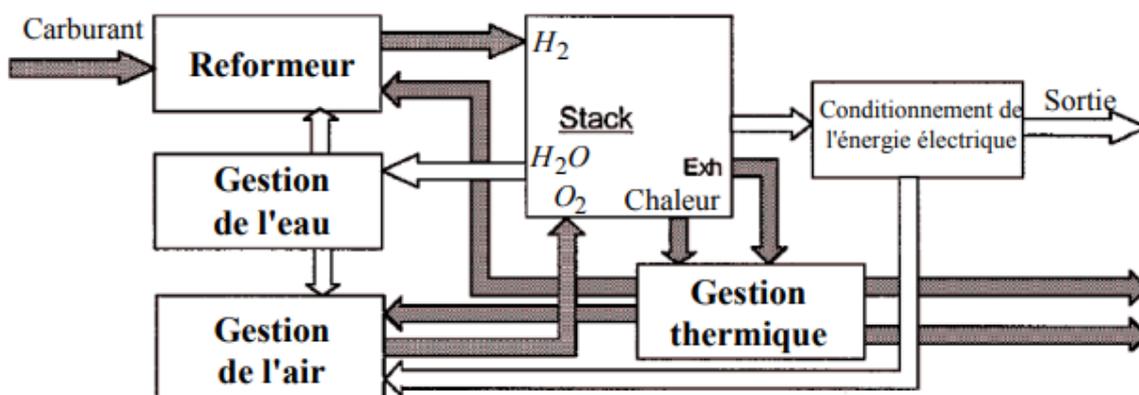


Figure 19 : Différents constituants d'un système pile à combustible

VI-3-Gestion de l'air :

En plus du carburant, la pile à combustible exige un oxydant, qui est typiquement de l'air. L'air est fourni à la cathode de la pile à combustible à basse pression par un ventilateur ou à haute pression par un compresseur d'air. Le choix entre basse pression et haute pression n'est pas évident. D'une part, l'augmentation de la pression de l'air améliore la cinétique des réactions électrochimiques et mène à une plus grande densité de puissance et à une meilleure utilisation du stack. D'autre part, la puissance exigée pour comprimer l'air réduit la puissance disponible. Une partie de cette énergie peut être récupérée en plaçant une turbine sur la sortie d'air du côté de la cathode. Néanmoins, le compresseur d'air emploie typiquement plus de puissance que n'importe quel autre dispositif auxiliaire dans le système. Actuellement, la plupart des stacks de pile à combustible fonctionnent à une pression comprise entre 1 et 8 atmosphères. Afin d'obtenir des densités de puissance importantes et pour améliorer la gestion de l'eau, la plupart des systèmes développés pour l'automobile à partir de pile PEM fonctionnent à des pressions de 2 à 3 atmosphères.

VI-4-Gestion de l'eau :

L'eau est nécessaire à plusieurs endroits dans un procédé de reformage. Dans les systèmes de pile PEM, les gaz réactifs doivent être humidifiés afin d'éviter de dessécher la membrane. Si de l'eau est fournie au niveau de la réaction, celle-ci n'est pas toujours suffisante et l'air (et parfois l'hydrogène) doit être humidifié. Dans des systèmes autonomes, elle peut être récupérée dans les gaz d'échappement.

VI-5-Gestion thermique :

Un stack de pile à combustible de type PEM produit pratiquement autant d'énergie thermique que d'énergie électrique. Cette énergie thermique peut être employée de différentes manières. Elle peut être utilisée pour préchauffer les gaz dans un système de reformage, transférée extérieurement pour satisfaire les besoins thermiques d'une application particulière ou être rejetée dans l'environnement. Pour les systèmes de petite puissance (< 200 W), l'air en excès circulant à la cathode est suffisant pour refroidir le système. Pour des systèmes plus importants la circulation d'air, d'eau ou d'un liquide de refroidissement dans des canaux spécifiques est nécessaire. Avec un liquide de refroidissement, le stack est plus compact. En outre, avec un liquide, il est plus facile de transférer l'énergie thermique vers d'autres applications telles que le chauffage d'espace ou le chauffage d'eau dans des applications de cogénération.

La figure 20 présente un exemple de système simple de pile à combustible d'une puissance de 300 W. Ce système inclut deux compresseurs (pour l'hydrogène et l'air), deux valves sur le circuit d'hydrogène (une en entrée, une en sortie), quatre ventilateurs pour refroidir le stack et un système de contrôle à base de microcontrôleur.

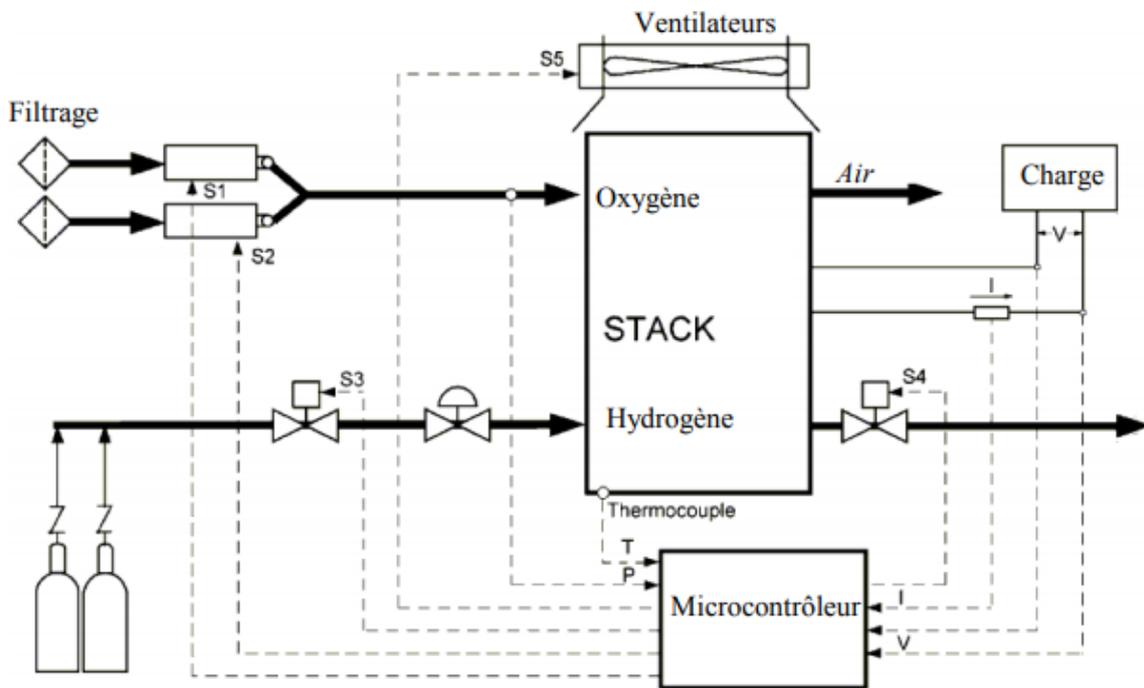


Figure 20 : Petit système simple de pile à combustible

VII-Applications Des Piles À Combustible :

VII-1-Applications portables :

- Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement. La technologie qui est utilisée est

la pile PEM du fait de sa basse température de fonctionnement et de sa technologie tout solide alimentée soit directement en hydrogène, soit avec du méthanol. En terme de coût, la référence est celle de la meilleure batterie actuelle soit environ 0,80 €/Wh.



Figure 21 : Pile à combustible portable pour recharger un Smartphone

VII-2- Applications stationnaires :

- Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW). De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. Ils sont généralement basés autour de la technologie PEMFC même si d'autres technologies (MCFC, SOFC) font également l'objet de tests mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation. Dans le deuxième domaine, plusieurs projets sont également en cours de réalisation. Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent électricité et chaleur (chauffage et eau chaude). Ils sont alimentés par des combustibles classiques : un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible.



Figure 22: Cinq systèmes de piles à combustible UTC (PureCell™ 200, 200 kW) en Alaska, USA

VII-3- Applications embarquées :

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



Figure 23 : Pile à combustible 75 kW UTC pour des voitures et des autobus

VIII-Modèle de pile PEM :

De nombreux travaux proposent un modèle statique décrivant la courbe de polarisation de la pile PEM (figure 24) comme la somme de quatre termes : la tension théorique à vide E , la surtension d'activation V_{act} (ou chute d'activation de la région 1), la surtension ohmique V_{ohm} (ou chute ohmique de la région 2) et la surtension de concentration V_{conc} (ou chute de concentration de la région 3) :

$$V_{FC} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc}$$

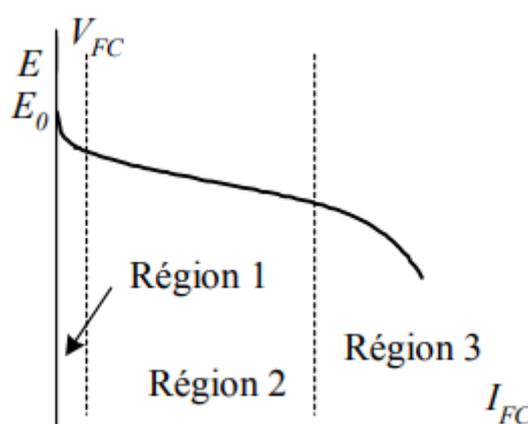


Figure 24 : Caractéristique statique de pile PEM

VIII-1- Pertes d'activation :

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

$$V_{act} = A \ln \left(\frac{I_{FC} + i_a}{i_o} \right)$$

Où I_{FC} est le courant délivré par la pile à combustible, I_0 le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte, i_n le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte et A la pente de la droite de Tafel.

VIII-2-Pertes ohmiques :

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

$$V_{ohm} = R_m (I_{FC} + i_n)$$

R_m est la résistance totale de la pile à combustible.

VIII-3-Pertes de concentration :

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

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

$$V_{conc} = -B \ln \left(1 - \frac{I_{FC} + i_n}{i_L} \right)$$

IX-La simulation de la pile à combustible dans MATLAB :

Dans cette partie on va présenter le schéma bloc de la pile à combustible utilisé dans la simulation ainsi que les équations données dans les blocs simulink.

IX-1-Schéma bloc de la pile à combustible :

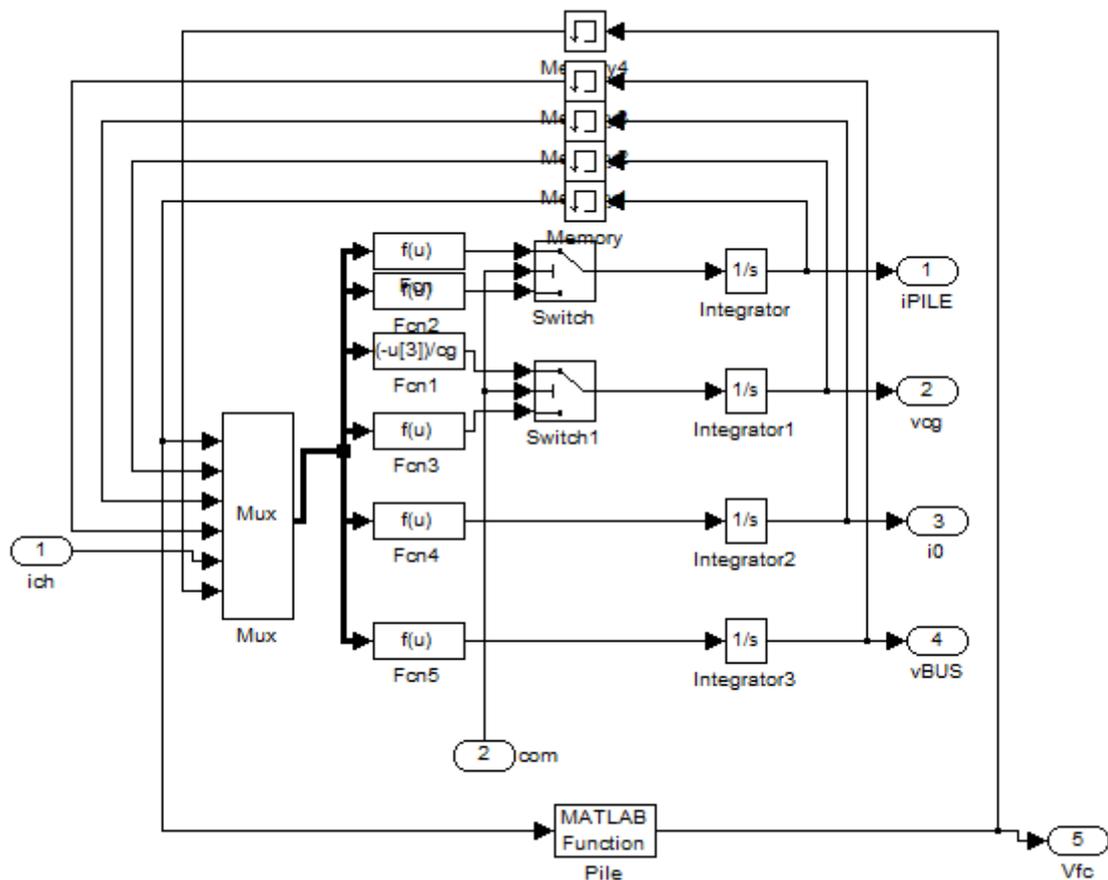


Figure 25 : Schéma bloc de la pile à combustible

CHAPITRE III :
Généralité Sur Les
Supercondensateurs

I-Introduction :

L'utilisation de dispositifs de stockage d'énergie électrique est nécessaire dans de nombreuses applications : télécommunication, sauvegarde mémoire, véhicules électriques et hybrides. Les spécifications auxquelles doivent répondre ces dispositifs sont le plus souvent donnés en termes d'énergie stockée (en W.h) et de puissance maximale (en W), ainsi qu'en termes de poids, d'encombrement, de durée de vie et de coût initial. Pour une technologie de stockage donnée, les besoins en puissance et en énergie peuvent s'avérer incompatibles avec le souci, souvent présent dès lors qu'il s'agit de systèmes embarqués, d'un poids et d'un encombrement réduits. On aura intérêt alors à réaliser une source hybride, soit donc à séparer les fonctions puissance et énergie en associant plusieurs technologies de stockage, les unes (batteries d'énergie, pile à combustible) étant dimensionnées en terme d'autonomie, les autres (batteries de puissance, condensateurs) en terme de puissance instantanée requise sur une durée plus ou moins longue. Pour des durées supérieures à la seconde, la technologie "supercondensateur" comme organe de puissance se révèle relativement adéquate.

On trouve ce composant sous diverses appellations : supercondensateur, bien sûr, mais aussi supercapacité, capacité à couche double électrique, et enfin des termes plutôt utilisés en anglais, comme ultracapacité, capacité électrochimique ou capacité à couche double électrochimique (respectivement "ultracapacitor", "electrochemical capacitor" et "electrochemical double-layer capacitor"). Toutes désignent ce composant de stockage qui utilise, par le recours à des matériaux d'électrodes poreux, les propriétés capacitives de l'interface entre un conducteur électronique solide et un conducteur ionique liquide. Les termes "supercapacité" et "supercapacitor" sont entrés dans le langage commun, étant en fait la dénomination des premiers dispositifs commercialisés, en l'occurrence par la Nippon Electric Company (NEC). Le terme "ultracapacitor", nom donné par la société Pinnacle Research Institute (PRI) à ses modules supercapacitifs fabriqués pour l'armée des Etats Unis d'Amérique [Pin], est également largement utilisé. Nous aurons recours, pour notre part, aux termes de supercapacité et de supercondensateur.

L'histoire de ce composant débute à la moitié du 19^{ème} siècle, avec la découverte en 1853, par le physicien Hermann von Helmholtz, du phénomène capacitif nommé couche double électrique. La modélisation dudit phénomène s'étend jusqu'à la moitié du 20^{ème} siècle, avec notamment les études de Helmholtz, Gouy et Chapman, Stern, et Grahame.

Le premier brevet, déposé par la société General Electric pour un composant à électrolyte aqueux et électrodes carbonées poreuses, date de 1957. En 1969, un second brevet, de la société américaine Sohio Corporation, décrit des dispositifs supercapacitifs à tenue en tension plus élevée, par usage d'électrolytes non-aqueux. Ce brevet sera cédé à NEC en 1971, société qui commercialisera avec succès les premières supercapacités à couche double électrique sous la dénomination "supercapacitor". Il s'agit de dispositifs de petite dimension (capacités de quelques farads, énergie spécifique modeste, de l'ordre de 0,5 Wh.kg⁻¹), destinés à des applications de faible puissance, telle que la sauvegarde mémoire. A la fin des années 70 et au cours des années 80, plusieurs entreprises se lancent dans la production de supercondensateurs. Matsushita Electric Industrial Company, plus connue sous le nom de Panasonic, développe en 1978 la série "Gold Capacitor", également dédiée à la sauvegarde mémoire. En 1987, la société Elna sort une série baptisée "Dynacap", pour applications de faible puissance. Les supercondensateurs de puissance apparaissent dans les années 90. Un programme de développement fut lancé en 1989 par le Department of Energy (DOE) américain avec, pour objectif à court terme, des dispositifs d'énergie spécifique supérieure à 5 Wh.kg⁻¹ et de puissance spécifique supérieure à 0,5 kW.kg⁻¹, et pour objectif à long terme (après 2003), des dispositifs d'énergie spécifique supérieure à 15 Wh.kg⁻¹ et de puissance spécifique supérieure à 2 kW.kg⁻¹. Ces composants étaient supposés venir en complément de batteries ou de piles à combustible dans les véhicules hybrides, pour fournir la puissance nécessaire durant les phases d'accélération, et de permettre la récupération durant les phases de freinage.

Les supercondensateurs constituent une nouvelle technologie de stockage, d'énergie spécifique supérieure à celle des condensateurs usuels, et de puissance spécifique supérieure à celle des accumulateurs électrochimiques. Dans le plan de Ragone, les supercondensateurs se situent donc entre les condensateurs traditionnels et les batteries, comme indiqué figure 25, figure tirée de la référence. En outre, les supercondensateurs à couche double électrique présente une durée de vie élevée, conséquence d'un mode de fonctionnement électrostatique.

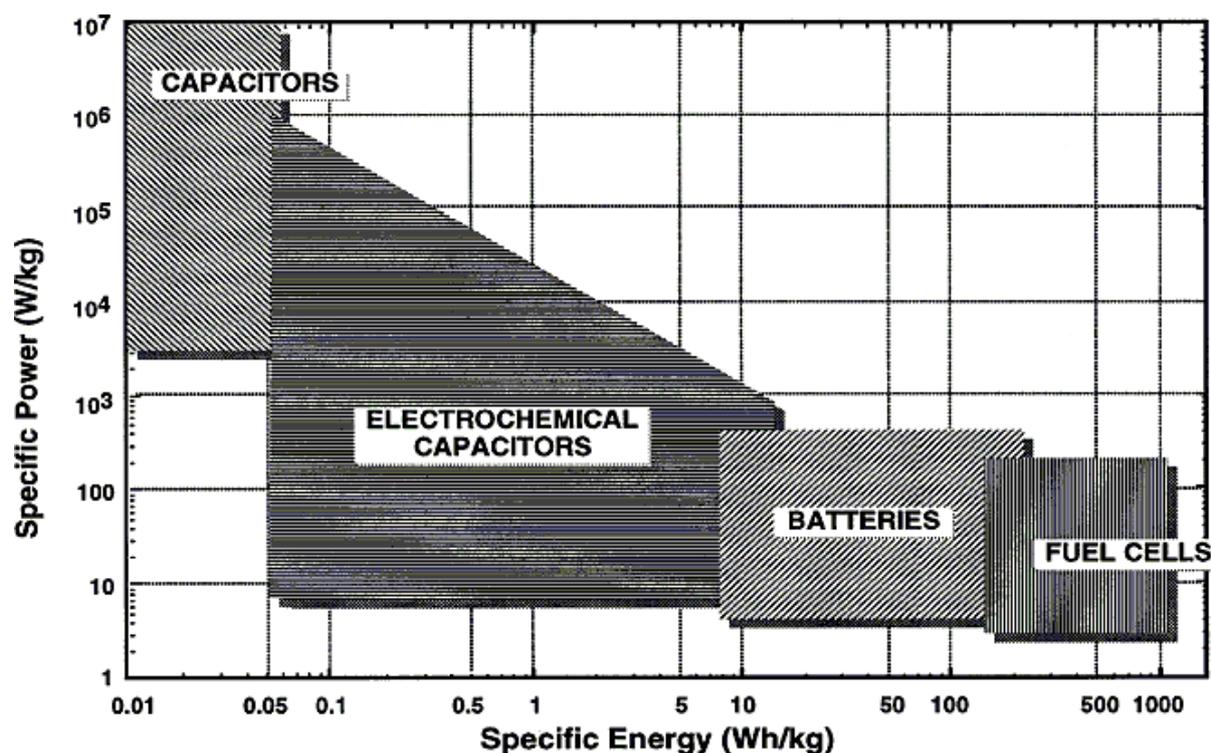


Figure 26 : Plan de Ragone pour divers dispositifs de stockage et de conversion d'énergie

II- Principes de fonctionnement des supercondensateurs :

II-1-Principes physiques de base :

La structure de la couche double électrique, sur laquelle repose le principe de stockage d'énergie dans les supercondensateurs, et ses potentialités en matière de stockage d'énergie, furent pour la première fois étudiées par Helmholtz dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle.

Un siècle plus tard, apparaissait la première génération industrielle de supercondensateurs, permise tant par l'évolution des matériaux que par l'émergence d'un réel besoin en des sources d'énergie à la fois puissantes, rapidement rechargeables, et fiables.

Les supercondensateurs à couche double électrique, curieusement appelées capacités électrochimiques, ont en fait un fonctionnement analogue à celui des capacités électrostatiques classiques. Lesdites sont typiquement constituées de deux électrodes métalliques séparées par un matériau diélectrique. L'énergie est stockée sous forme d'une charge électrique induite au voisinage de l'interface électrode-diélectrique, par l'application d'une différence de potentiel entre ces deux électrodes. Le rapport de la charge stockée sur la tension appliquée est connu sous le nom de capacitance, ou capacité, et est représentatif de

l'aptitude du dispositif à stocker de l'énergie. Les relations de base s'écrivent, pour une capacité linéaire :

$$C = \frac{Q}{V} = \varepsilon \frac{A}{d} \quad \text{Et :} \quad W = \frac{1}{2} CV^2$$

C étant la capacitance, Q la charge électrique, V la tension appliquée, ε la constante diélectrique du matériau isolant, A sa surface, d son épaisseur, et W l'énergie électrostatique stockée.

Le stockage d'énergie dans les supercondensateurs s'effectue de façon similaire, mais à l'interface entre l'électrode (conducteur électronique) et l'électrolyte (conducteur ionique), comme indiqué figure 26.

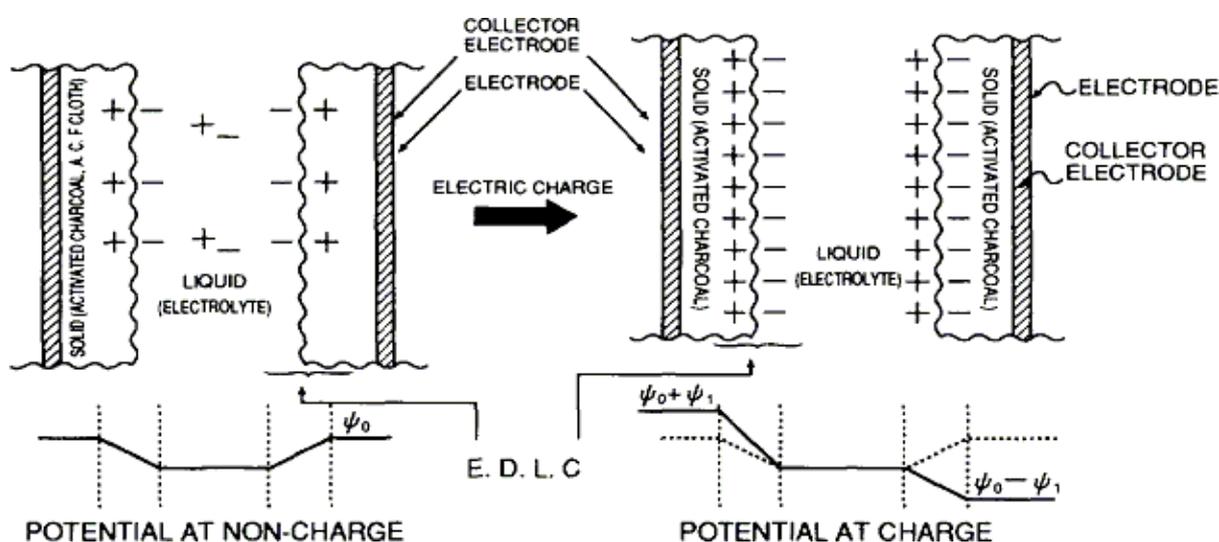


Figure 27 : Schéma de principe des supercondensateurs

Des supercondensateurs se compose donc, comme schématisé figure 2.3, de deux électrodes poreuses imprégnées d'électrolyte, et séparées par une membrane isolante et poreuse (pour assurer la conduction ionique). La couche double électrique se développe sur chaque interface électrode-électrolyte, de sorte que l'on peut voir, de façon simplifiée, un supercondensateur comme l'association série de deux capacités (cf. figure 2.4) : l'une, C1, développée à l'électrode positive, et l'autre, C2, à l'électrode négative. La capacité totale vaut donc :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

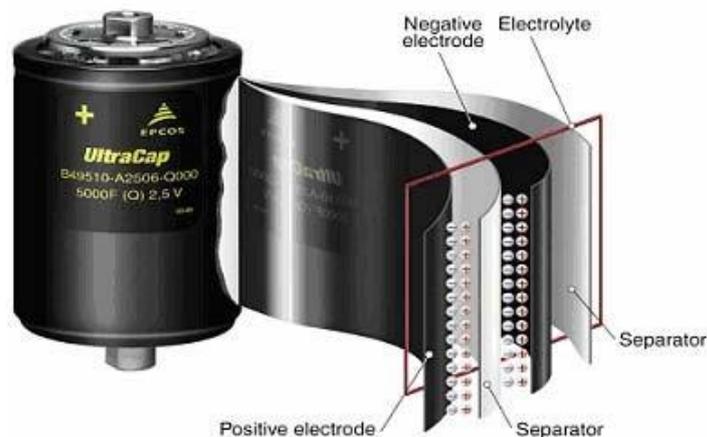


Figure 28 : Principe d'assemblage des supercondensateurs

II-2-Couche double électrique :

En 1853, le physicien Hermann Von Helmholtz observa, suite à l'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans un électrolyte, que le phénomène de décomposition de l'électrolyte faisait apparaître un seuil de tension en dessous duquel le comportement du système était principalement capacitif. Ce faisant Helmholtz découvrait le principe de base des supercondensateurs, à savoir les propriétés capacitives de l'interface entre un conducteur électronique solide et un conducteur ionique liquide.

Le stockage d'énergie s'effectue par distribution des ions de l'électrolyte au voisinage de la surface de chaque électrode, sous l'influence électrostatique de la tension appliquée. Il se crée ainsi aux interfaces une zone de charge d'espace, appelée couche double électrique, d'épaisseur limitée à quelques nanomètres, et dans laquelle règne un champ électrique, relativement intense, de l'ordre de $10 \text{ kV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$. Un supercondensateur peut donc être schématisé, comme figure III.1, par deux capacités représentatives des charges stockées, et connectées en série par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte.

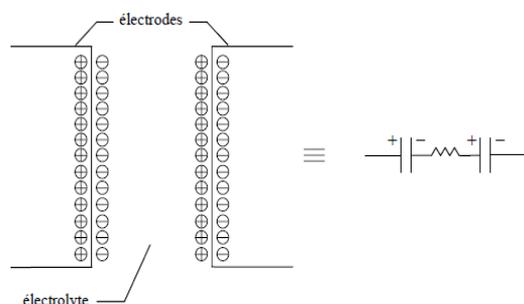


Figure 29 : Principe de la couche double électrique

III-Technologie des supercondensateurs :

1. Matériaux d'électrodes :

- Il y a trois grandes catégories de matériaux d'électrodes : les charbons actifs, les oxydes métalliques, et les polymères conducteurs électroniques. Historiquement, les charbons actifs furent les premiers employés industriellement, et restent aujourd'hui la technologie d'électrode la plus répandue. Comme déjà dit auparavant, les dispositifs associés fonctionnent sur le principe électrostatique de la couche double électrique, et présentent à ce titre une puissance spécifique élevée, de plusieurs kW.kg^{-1} , et une durée de vie, théoriquement infinie, de plus de 100000 cycles en pratique. Les carbones utilisés peuvent se présenter sous différentes formes, suivant les constructeurs : carbone pulvérulent, fibre de carbone, nanotubes. Les surfaces spécifiques sont supérieures à $1000 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$, et peuvent atteindre $3000 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$. A noter que seule une fraction relativement faible de cette surface est utile (ions parfois trop grands pour accéder à la microporosité, porosité plus ou moins fermée par la présence de liants ou d'impuretés). Les capacités spécifiques observées restent tout de même élevées, de l'ordre de 120 F.g^{-1} à 180 F.g^{-1} en milieu aqueux (acide sulfurique), et de 60 F.g^{-1} à 100 F.g^{-1} en milieu organique.
- Les deux autres technologies d'électrodes utilisent des matériaux, en l'occurrence les oxydes métalliques conducteurs électroniques (oxyde de ruthénium, oxyde d'iridium) et les polymères conducteurs électroniques (polypyrole, polythiophène, polyaniline), permettant d'obtenir une interface électrode-électrolyte pseudo-capacitive. Ces technologies sont onéreuses, et certains problèmes concernant les polymères conducteurs (stabilité en température, puissance et cyclabilité limitées) restent à résoudre.

2. Électrolyte :

- Le choix de l'électrolyte est au moins aussi important que celui du matériau d'électrode. De fait, l'électrolyte conditionne la tenue en tension du dispositif, et donc son énergie spécifique et sa puissance spécifique, toutes deux variant comme le carré de la tension nominale. En outre, la puissance spécifique du dispositif est également fonction de sa résistance interne, laquelle dépend en partie de la conductivité de l'électrolyte, c'est-à-dire :
 - de la concentration en porteurs de charge libres (fonction de la solubilité du sel dans le solvant, et du taux de dissociation du sel),
 - de la mobilité de ces porteurs (fonction de la viscosité du solvant et de la taille effective des ions en solution),
 - de la solvatation des ions,
 - de la valence des ions.
- Enfin, la capacité spécifique du dispositif, et ce faisant son énergie spécifique, dépend en autres choses de la taille effective des ions en solution. On trouve deux types d'électrolyte pour supercondensateurs : les électrolytes aqueux, tels que l'acide sulfurique ou la potasse, et les électrolytes organiques, tel que le carbonate de propylène ou l'acétonitrile.
- Les électrolytes aqueux, historiquement les premiers employés pour la réalisation industrielle des supercondensateurs, présentent une excellente conductivité ionique (de l'ordre de 1 S.cm^{-1}), de sorte qu'ils permettent d'obtenir des puissances spécifiques de quelques 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 supercondensateurs à électrolyte aqueux est limitée à 1,2 V, tension d'électrolyse de l'eau. Par conséquent, l'énergie spécifique de ces dispositifs est faible, typiquement de 1 Wh.kg^{-1} .

- L'utilisation d'électrolytes organiques permet d'obtenir des tensions de polarisation, sans effets faradiques, plus importantes. Actuellement, la tension nominale des dispositifs à électrolyte organique est de 2,5 V. La densité d'énergie, de l'ordre de 5 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, ce par rapport aux dispositifs à électrolyte aqueux.

3. Séparateur :

- La construction des supercondensateurs fait également intervenir une membrane isolante poreuse, donc conductrice ionique, séparant les deux électrodes imprégnées d'électrolyte. On utilise généralement un polymère ou du papier en milieu organique, une céramique ou de la fibre de verre en milieu aqueux. Le séparateur introduit un terme supplémentaire dans la résistance totale du composant, terme dépendant de la porosité et de l'épaisseur de la membrane.

IV-Type de stockeur d'énergie :

IV-1-Stockeur d'énergie fixe :

Les autorités de quelques villes européennes telles que Cologne, Dresde et Madrid, ainsi que de Portland Oregon, aux États-Unis, ont décidé d'introduire des systèmes de stockage à base de supercondensateurs pour récupérer l'énergie de freinage dans le domaine du transport ferroviaire urbain. Le système, développé par les ingénieurs de Siemens Transportation Systems, construit sous le nom de « SITRAS® SES » [17], équipe des sous-stations du réseau d'alimentation. Son introduction à Dresde et à Portland en 2002 a permis d'effectuer des économies de plus de 30 %. Le principal intérêt réside cependant dans la stabilisation du réseau d'alimentation électrique, car le stockeur fournit localement les pics de puissance réclamés lors de la phase de démarrage des trams.

Les supercondensateurs BCAP0010 de Maxwell, qui sont utilisés dans le système "SITRAS® SES", sont caractérisés par une capacité de 2600 Farads, une résistance interne de 0.4 mOhm et une tension d'utilisation de 2.5 Volts. Le stockeur d'énergie de 64 Farads, composé de 1300 BCAP0010, est conçu pour une tension nominale de 750 Vdc. Avec la cabine, le convertisseur et l'électronique de contrôle, le système occupe un volume de 2.8 m x 2.9 m x 2.8 m et pèse 5.5 tonnes. Il fournit une puissance maximale de 1 mégawatt dans un rayon de 3 km. La batterie de supercondensateurs permet de réduire en moyenne la puissance consommée de 50 kW.



Figure 30 : Pack de supercondensateurs dédié à la récupération de l'énergie lors du freinage

Dans le cas de transport souterrain l'avantage est encore plus marqué. Lors du freinage, l'énergie du véhicule ne peut pas toujours être réinjectée dans le réseau, comme en soirée lorsque le nombre d'utilisateurs est faible. Dans un réseau seul 60% de cette énergie en moyenne peut être reprise par le réseau. L'énergie étant emmagasinée dans les supercondensateurs plutôt que dissipée sous forme de chaleur dans des résistances, l'élévation de température environnementale se trouve fortement réduite.

Les opérateurs qui ont mis en place un système « SITRAS® SES » réalisent des économies de coûts de fourniture d'énergie pouvant se monter jusqu'à 150 000 euros par année. Parallèlement à cette économie financière, le système évite l'émission équivalente de plus de 300 tonnes de CO₂.

IV-2-Stockeur d'énergie embarqué :

Lorsqu'il est question d'économie d'énergie de freinage de système de transport léger ou de réduction de l'intensité des pics de puissance dans un réseau, les ingénieurs se trouvent devant le choix, soit de placer le stockeur d'énergie à bord du véhicule, soit de le laisser fixe dans une sous-station du réseau. Bombardier test son système économiseur d'énergie « MITRAC® », sur un tram de la ville de Mannheim, depuis septembre 2003. Il est équipé d'un stockeur d'énergie capacitif se trouvant dans un conteneur de 1.9 m x 0.95 m x 4.5 m, pesant 450 kg, placé sur le toit du tram. Sa tension nominale est de 750 Vdc. Sans compter les gains effectués sur les investissements qui eussent été nécessaires pour renforcer la puissance du réseau, l'économie annuelle d'énergie se monte à 30 000 €. A l'avantage économique s'ajoute encore l'amélioration de la situation environnementale, liée à la réduction d'émission de CO₂.

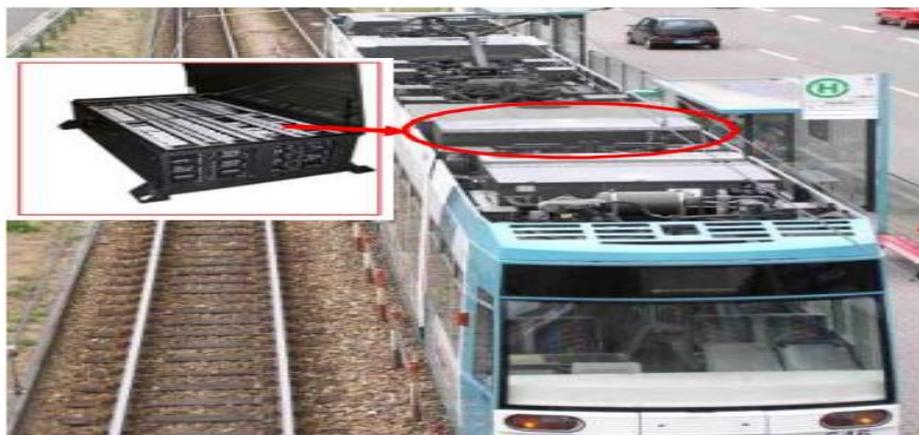


Figure 31 : Système MITRAC utilisant les supercondensateurs pour le stockage de l'énergie

La résistance entre la sous-station et le véhicule augmente à mesure que la distance les séparant en fait de même. Pour un courant typique de 1000 A, la chute de potentiel, vue par le tram à l'endroit le plus éloigné de l'alimentation, est de l'ordre de 100 Vdc. En réduisant l'intensité du courant, cette chute de potentiel diminue proportionnellement. En plus du gain en stabilité de tension, le système profite de la réduction des pertes ohmiques dans la caténaire.

Les mesures ont démontré qu'avec un stockeur capacitif embarqué, les pointes de puissance échangées avec le véhicule sont réduites de 40%. Ce résultat se traduit par un choix conceptuel pour dimensionner l'infrastructure : soit les sous-stations peuvent être éloignées les unes des autres en gardant des performances et des coûts d'exploitation constants, soit ces derniers sont améliorés en maintenant les caractéristiques de l'infrastructure. Les calculs montrent que la distance entre les sous-stations pourrait être augmentée jusqu'à 70%.

V-Comparaison entre les batteries et les supercondensateurs :

	Condensateur électrolytique	Supercondensateur	Batterie
Temps de charge t	$\mu s < t < ms$	$1s < t < 30s$	1 heure < t < 5 heures
Temps de décharge	$\mu s < t < ms$	$1s < t < 30s$	0.3 heure < 3 heures
Rendement charge/décharge	> 95%	entre 85% et 98%	entre 70% et 85%
Densité de puissance (W/kg)	$> 10^6$	10^4	$< 10^3$
Densité d'énergie (Wh/kg)	entre 10 et 100	entre 1 et 10	entre 10 et 100
Durée de vie nombre de cycles	10^{10}	10^6	10^3

Tab. 4 : comparaison entre les batteries et les supercondensateurs

➤ **Les avantages :**

- Cycle de vie charge / décharge important comparé aux batteries chimiques sans dégradation des caractéristiques ;
- Densité de puissance élevée (2000-4000W/kg) correspondant à 10 fois celles des batteries de lithium-ion de puissance élevée et 100 fois celles des condensateurs classiques ;
- Capacité de capture d'énergie (freinage rétroactif) à cadence élevée : des batteries sont souvent endommagées par les charges rapides ;
- Capacité élevée (énergie élevée qui peut être déchargée rapidement) ;
- ESR (résistance série) très basse ;
- Courant de fuite très faible (peut maintenir une charge sur une longue durée) ;
- Energie stockée supérieure à celle d'un condensateur conventionnel ;
- Charge très rapide.

➤ **Les inconvénients :**

- Basse énergie spécifique (10 Wh/kg) ;
- Plage de tension limitée ;
- Technologie moins mûre que celle des batteries ;
- Prix plus élevé par rapport aux batteries d'acides de plomb qui sont assez peu coûteuses aujourd'hui et économiques ;
- Energie spécifique plus faible que celle des batteries ;
- Coût.

VI- Modélisation des supercondensateurs :

Compte tenu des phénomènes physiques aux interfaces de la double couche électrique d'un supercondensateur, ce dernier ne peut pas être représenté par un simple condensateur formé par une capacité, une résistance série et une résistance de fuite. La théorie de Helmholtz permet de décrire le fonctionnement de la double couche électrique. Elle permet d'expliquer les différents phénomènes physiques qui se passent à l'interface entre un conducteur ionique liquide (électrolyte) et un conducteur électronique solide (électrodes). L'interface est modélisée par deux répartitions superficielles de charges, électronique pour l'électrode et ionique de signe opposé pour l'électrolyte. D'un point de vue modèle électrique et thermique, il est très difficile, voir impossible, de mettre en équation analytique le fonctionnement d'un supercondensateur pour plusieurs raisons. La première vient du fait qu'un ion doit passer au travers des pores du charbon actifs qui ne sont pas uniformes et donc difficiles à modéliser. De plus la présence d'une zone de charge d'espace à l'interface électrodes-électrolyte n'est pas prise en considération à cause de sa complexité. Une autre difficulté réside dans la variation de la conductivité électrique du charbon actif et de la conductivité ionique de l'électrolyte. D'autres théories ont amélioré la première comme celle de Gouy et Chapman et celle de Stern, mais elles ne permettent pas d'établir un modèle qui reproduit fidèlement le comportement électrique et thermique d'un supercondensateur.

Plusieurs auteurs proposent un modèle de type "circuit électrique" qui décrit le fonctionnement électrique d'un supercondensateur avec une bonne approximation. Ce modèle est basé sur la constante de charge répartie comme dans le cas d'une ligne de transmission (figure 4). Le calcul des paramètres du modèle est semblable à celui d'une ligne de transmission. Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques de différents dispositifs de stockage d'énergie.

Dispositif	Energie spécifique (Wh/kg)	Puissance spécifique (W/kg)
Condensateurs	10 ⁻³ - 10 ⁻¹	10 ² - 10 ⁵
Super condensateurs	10 ⁻² - 10 ¹	10 ³ - 10 ⁴
Batteries	10 ¹ - 10 ²	10 ¹ - 10 ²
Volants d'inertie	10 ² - 10 ³	10 ³ - 10 ⁴
PAC	10 ³ - 10 ⁴	10 ⁴ - 10 ⁵

Le modèle consiste à résoudre les deux équations aux dérivées partielles qui décrivent la variation de la tension et du courant le long de la ligne. L'inconvénient de ce modèle est le calcul complexe des différents éléments du modèle. De plus le temps de calcul en simulation est élevé, ceci est lié aux nombres de branches RC.

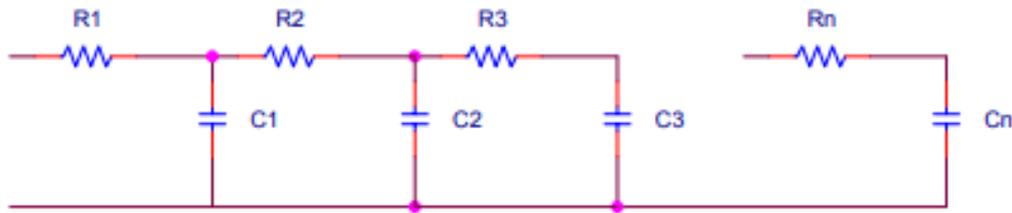


Figure 32 : Schéma électrique équivalent d'un supercondensateur à l'image d'une ligne de transmission

En utilisant des approximations et suivant le domaine d'utilisation des supercondensateurs, on peut simplifier le précédent modèle pour simplifier les simulations. Dans le domaine du stockage de l'énergie embarquée et pour des applications dans le véhicule hybride, le supercondensateur est utilisé comme tampon de puissance. Il fournit la puissance ou récupère la puissance lors du freinage, par exemple pendant une dizaine de secondes. Un modèle à deux branches dont la capacité est non linéaire et varie en fonction de la tension à ses bornes (figure 33) est largement suffisant. Ce modèle a été établi par les Canadiens Bonert et Zubieta.

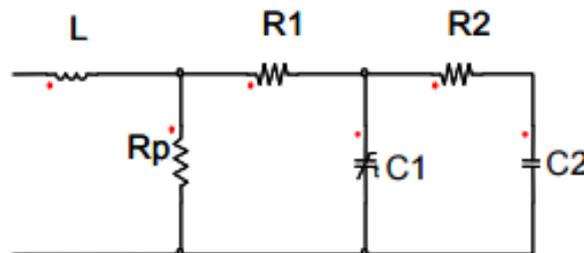


Figure 33 : Schéma électrique équivalent d'un supercondensateur

La branche dite rapide $R1C1$ intervient dans le régime transitoire et la branche lente $R2C2$ traduit les constantes de temps plus importantes. Dans cette étude qui s'intéresse uniquement aux phénomènes dynamiques du supercondensateur, on peut négliger cette branche lente car elle représente le phénomène de redistribution des charges au sein de la cellule. $R1$ est la résistance série du supercondensateur, $C1$ sa capacité et R_p la résistance de fuite. Pour tenir compte des phénomènes physiques à l'interface des matériaux du supercondensateur, $C1$ est composée d'une capacité constante $C0$ et d'une capacité variable en fonction de la tension entre ses bornes. Nous avons $C1 = C0 + C_v = C0 + kV1$. k est une constante et $V1$ est la tension aux bornes de $C1$. Précisons qu'en régime transitoire, la

résistance de fuite R_p est négligée. Les paramètres du modèle proposé peuvent être déterminés en faisant une charge du supercondensateur à courant constant d'une tension nulle à sa tension maximale. Le calcul des éléments du modèle se fait à l'aide des paramètres déterminés expérimentalement en utilisant un cycle de charge/décharge du supercondensateur. Pour plus d'informations sur les calcul des paramètres, il faut consulter les articles de Zubieta et Bonert.

VI-1-Variation de la charge d'un supercondensateur en fonction de la température :

Les supercondensateurs ont un comportement thermique meilleur par rapport aux batteries. Sur la figure 6 est représentée la charge d'un pack de 4 supercondensateurs de 2700F chacun en série. Ceci pour des températures de -40°C et 18°C . Le courant de charge est constant environ 100A. On constate que le saut de tension au début de la charge est plus important à -40°C . Ceci se traduit par une résistance série plus élevée à -40°C qu'à 18°C . Des études menées au Laboratoire L2ES à Belfort et par des fabricants de supercondensateurs ont montré que la résistance série augmente quand la température diminue. L'augmentation est plus importante entre -20°C et -40°C . Ces résultats expérimentaux montrent également que la durée de charge du pack à 18°C (environ 60s) est plus élevée que celle à -40°C (environ 50s). Mais il est difficile de conclure sur la valeur de la capacité Cette variation de temps de charge est liée à deux effets. Le premier est dû aux variations de la résistance série du supercondensateur en fonction de la température, et par conséquent une constante de temps qui varie en fonction de la température. Le second effet est lié à la diminution de la capacité totale du supercondensateur en fonction de la température. En effet la variation de la valeur de la capacité du supercondensateur est liée aux variations des caractéristiques du charbon actif, de la conductivité ionique de l'électrolyte en fonction de la température ainsi que la variation de l'épaisseur effective de la double couche en fonction de la température cependant la variation de la capacité globale en fonction de la température est moins importante que celle de la résistance série.

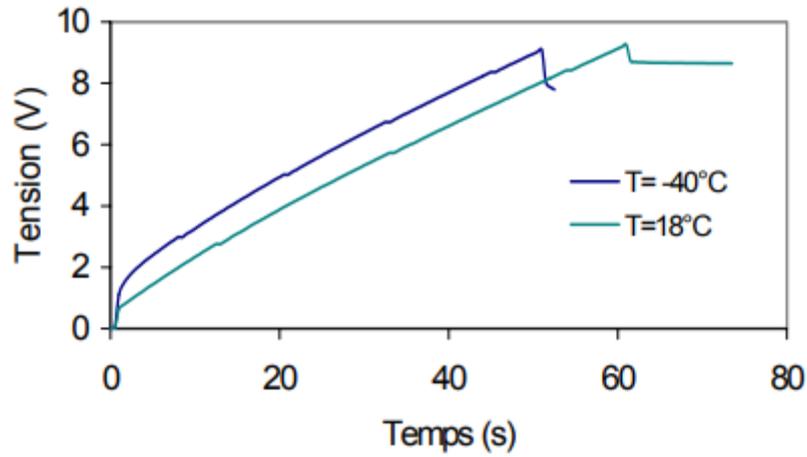


Figure 34 : Évolution de la tension aux bornes d’un pack de 4 supercondensateurs en série en fonction du temps, à courant constant et pour -40°C et 18°C

VII-Schéma bloc du supercondensateur dans MATLAB :

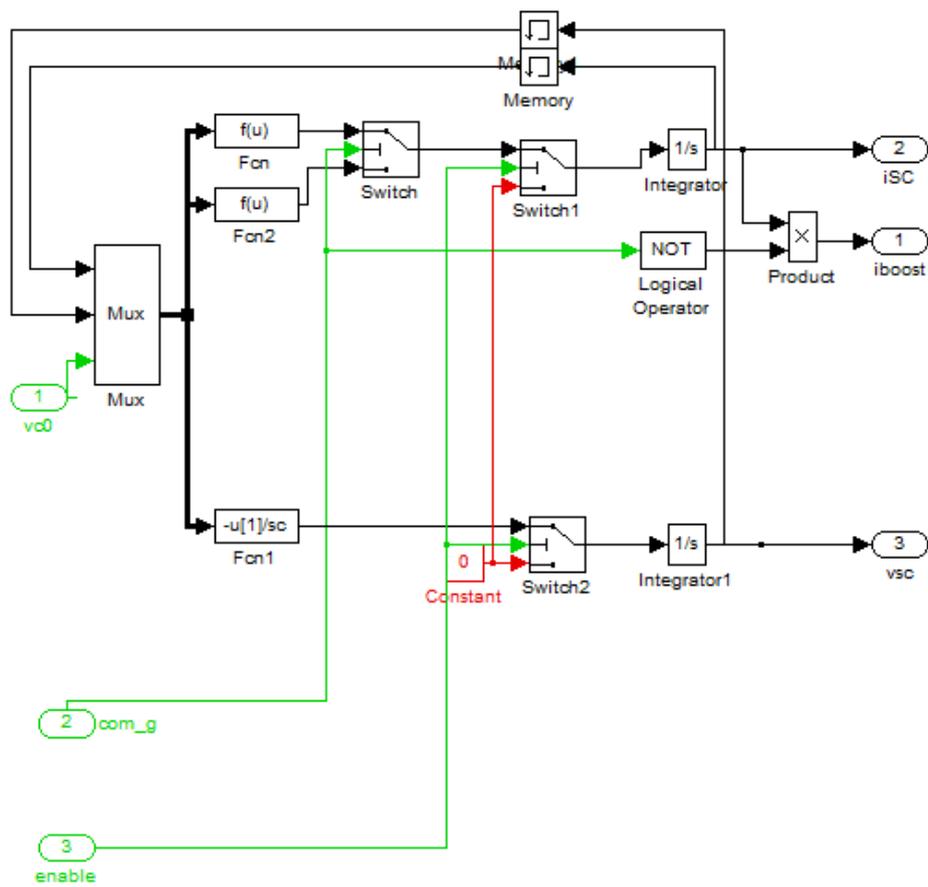


Figure 34 : Schéma bloc du supercondensateur

VIII-Conclusion :

Les supercondensateurs sont des éléments potentiels pour le stockage de l'énergie. Leur association avec les batteries ou avec une pile à combustible permet de réduire la consommation énergétique d'un véhicule. Les applications présentées dans cet article montrent que le supercondensateur peut jouer un rôle important dans le développement des véhicules hybrides et des transports en commun grâce à la récupération de l'énergie lors du freinage et à sa durée de vie très élevée.

CHAPITRE IV :
Commande et la
simulation du system

Introduction :

Ce chapitre est dédié à la partie de la simulation dans MATLAB, est ce compose de 4 parties :

- Le schéma bloc complet de la simulation
- Les paramètres nécessaires pour la simulation
- Convertisseurs (boost, back-boost)
- La commande effectuée
- Les résultats et l'interprétation après la simulation

Ce chapitre est dédié pour la simulation complet du system qui comporte deus sources (pile à combustible et supercondensateur) pour réalisé la commande de ce system.

I-Schéma bloc du system :

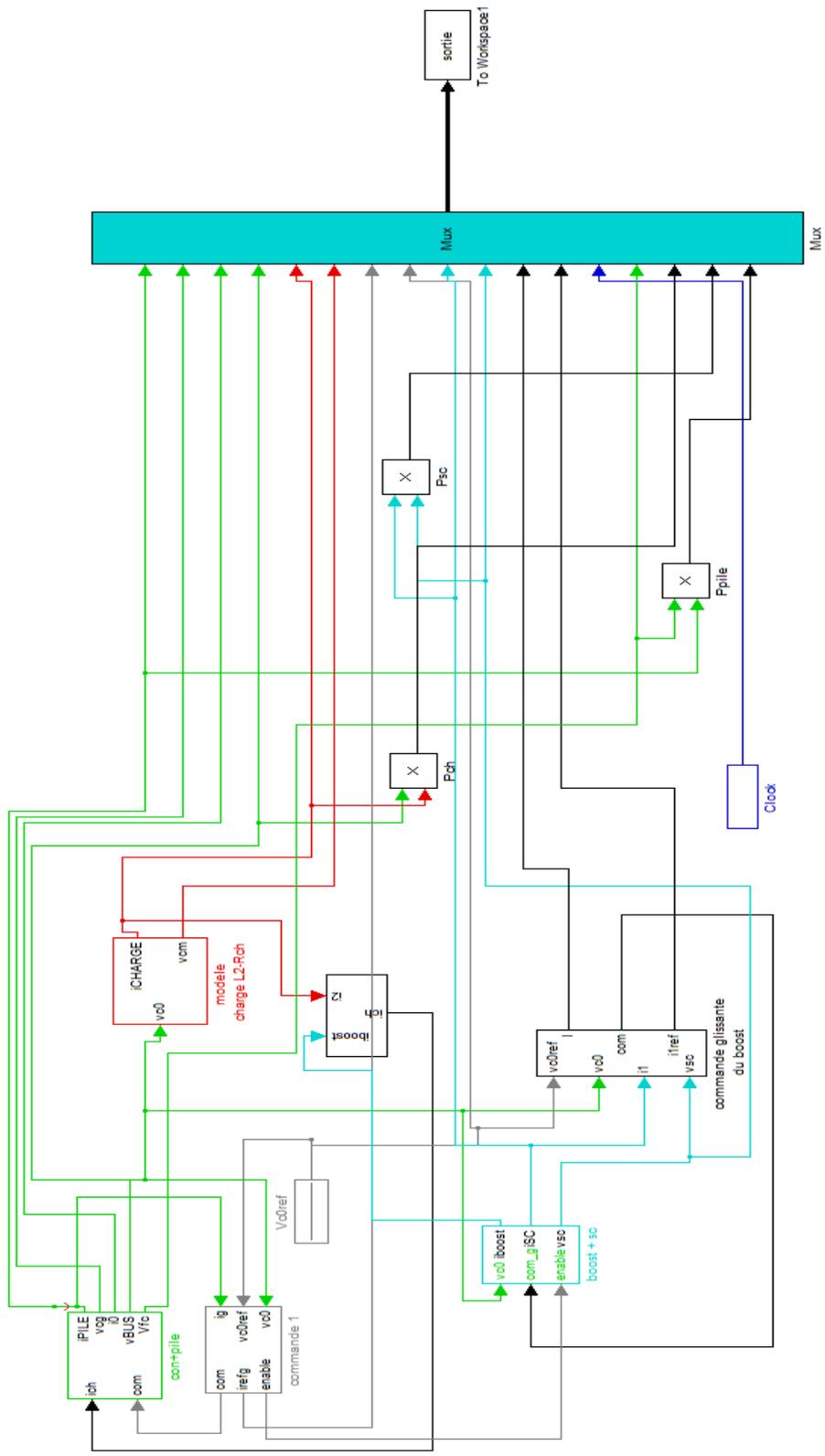


Figure 35 : Schéma bloc complet du system simulé dans MATLAB

I-1-Schéma de la simulation de la charge R-L :

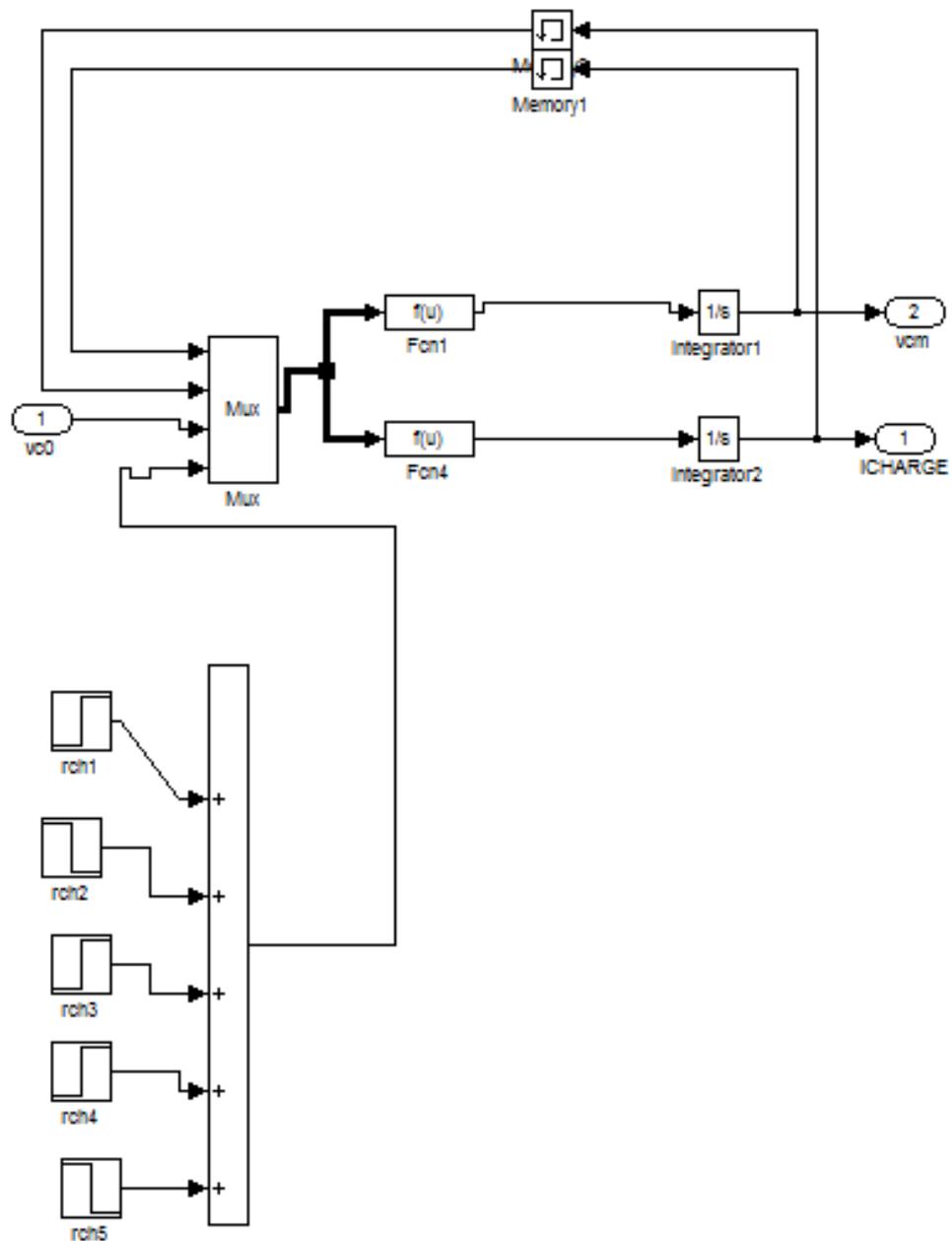


Figure 36 : Schéma de la simulation de la charge R-L

II-Commande et convertisseurs :

II-1-Le schéma de principe de l'hacheur survolteur :

Le schéma de principe de l'hacheur survolteur est montré sur la Fig II est utilisé premièrement pour adopté le niveau de tension et deuxièmement pour faire fonctionner la pile à combustible au point de puissance maximale.

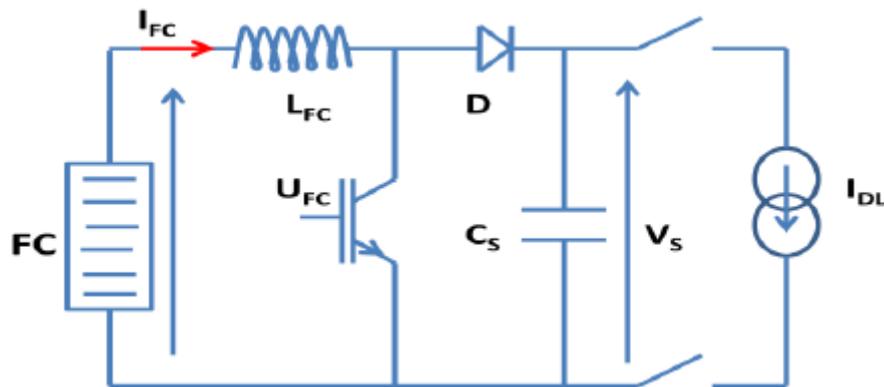


Figure 37 : Schéma électrique du convertisseur.

II-2- Modélisation du hacheur survolteur :

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse de différentes séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur T. Chaque état est représenté par une équation différentielle.

- Lorsque T est fermé :

$$\begin{cases} V_{FC} = L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} \\ 0 = C_S \frac{dV_S}{dt} + I_{DL} \end{cases}$$

- Lorsque T est ouvert :

$$\begin{cases} V_{FC} = L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} + V_S \\ I_{FC} = C_S \frac{dV_S}{dt} + I_{DL} \end{cases}$$

II-3- Commande du hacheur survolteur :

Concernant la commande du hacheur survolteur (figure IV.2), on a mis en place une commande de type cascade, une régulation du courant dans la bobine par hystérésis et une boucle de régulation de la tension VS.

A partir de l'erreur sur la consigne de courant et après passage dans un relais pour être entre 0 et 1, ce signal sert directement de commande pour l'interrupteur.

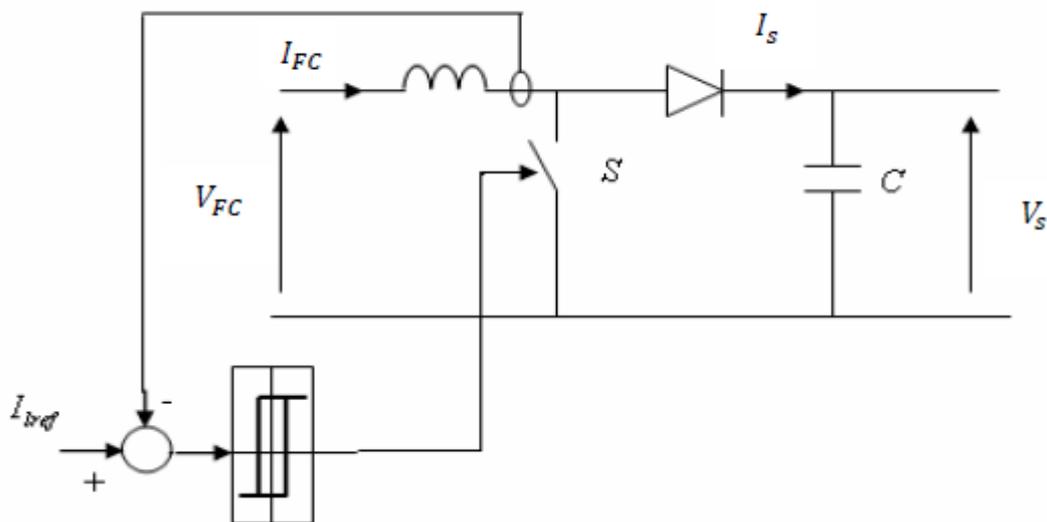


Figure 38 : Régulation de la tension du bus par hacheur

II-4- Commande des convertisseurs DC-DC par mode glissant :

L'adaptation des niveaux de tension et de courant des éléments de l'énergie électrique (la pile à combustible et supercondensateurs) par rapport à un bus continu nécessite un convertisseur statique DC-DC. Dans le véhicule électrique à pile à combustible étudié, les convertisseurs DCDC employés fonctionnent en mode élévateur de tension (Boost) quand les sources fournissent de l'énergie.

La commande par mode glissant est une commande robuste, rapide et est appropriée aux convertisseurs statiques.

Le comportement dynamique de ce convertisseur est décrit par un modèle non linéaire. Il nécessite donc une commande robuste et rapide en régime transitoire. Cette commande doit être adaptée aux systèmes à structure variable. Par ailleurs, elle doit être insensible et stable à la variation de courant de charge. Les caractéristiques attendues de la commande peuvent être réalisées par une synthèse fondée sur la technique du mode de glissement.

III- Les paramètres nécessaires pour la simulation :

```

lg=2*0.1e-3; % inductance cyclique du générateur
rg=2*0.02;   % résistance d'une phase générateur
eg=2*12;    % fem du generateur à 1500 tr/mn
cm=1000e-6; % capacité d'entrrée variateur moteur
cg=8800e-6; % capacité de sortie redresseur commandé
c0=3000e-6; % capacité bus continue
l0=10e-6;   % inductance cablage lissage alternateur batterie
r0=0.05;    % resistance enroulement 0 (charge recup)
r0=1; %charge decharge
l2=10e-6;   % inductance de cablage vers l'ensemble variateur - moteur
r2=1;       % resistance enroulement 2
l1=100e-6;  % inductance boost/buck
%r1=0.1;    % resistance enroulement 1
r1=0.05;
rb=1e6;     % resistance batterie
sc=175;     % valeur de la Super Capa
rc=0.05;    % valeur de la resistance Super Capa
Vc0ref=42;  %tension de reference bus continue
eb=36;
rb=0.1;
p0=500/1.5; % puissance mécanique dissipée par le moteur
rch=Vc0ref*Vc0ref/p0;
tch=0.25;
Ts=1/10000;
T1=1/10000;
Tsb=1/20000;
Te=1/100000;
% dimensionnement de base de la commande du generateur sur une charge p0

%-----
Ich=p0/Vc0ref;
eb=Vc0ref; % tension batterie à vide
Igmax=0.8*p0/eg; %0.97*(charge decharge) 0.8 (charge recup)
I2=Ich;
I0=Ich;
Vg=Vc0ref+r0*I0;V0=Vc0ref;
%Ig=eg/(4*rg);%la puissance max Pmax=eg*eg/(4*rg)
Ig=(eg-sqrt(eg*eg-4*rg*(p0+(r0*Ich*Ich))))/(2*rg);
U=0.5-I0/(2*Ig);

```

```

% fc=10e3;
fc=1e3;
taui=1/fc;
% ki=2*cg*Vc0ref/(taui*eg);
ki=2*cg*Vc0ref/(taui);
kiv=ki/taui; % charge recup
kpv=ki;
tg=kpv/kiv;
wpv=2*pi*100000;

kpv=1; % charge recup
kiv=5;

% kpv=1; % charge decharge
% kiv=50;

%régulation supercapacité
% sc=96; % valeur de la Super Capa
% rc=0.05; % valeur de la resistance Super Capa
Vscref=15; % tension super capa nopminale
Vsc0=Vscref;

trep=3; % temps de reponse souhaité
ksi=0.7; % amortissement souhaité
wn=3.1/trep; % pulsation de coupure souhaitée
kpvc=20*sc/(2*ksi/wn);
wsc=(wn^2)*sc/kpvc;
|

kib=2.1845; % charge recup
kpb=14.336;

% kib=0.01; % charge decharge ou charge recup
% kpb=0;

Tb=kpb/kib;
wpb=2*pi*1e5;

k2=0.015; % charge recup
k1=1;

% k2=0.05;
% k1=1;

% k2=0.02; % charge decharge
% k1=1;

```

```

%kisc=10; %terme integral dans la surface de glissement
% kisc=300;
kisc1=70;
kc=k1/k2;
kisc=2*kc;
kpisc=0.01*kc;
% kc=8.4;
x3max=50*kc;

% k2=0.01;
% k1=1;
% réglage des largeur d'hystérésis
epsg=2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Parameters FC                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Power of the stack = 500 W, 12V output
E   = 27.1 ;      %[V] at T=55°C, 23 cells
io  = 6.54e-3;   %[A]
Rm  = 0.045;     %[Ohm]
A   = 1.35;      %[V]
B   = 1.19;      %[V]
iL  = 100;       %[A]
in  = 0.23;      %[A]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Model                                       %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

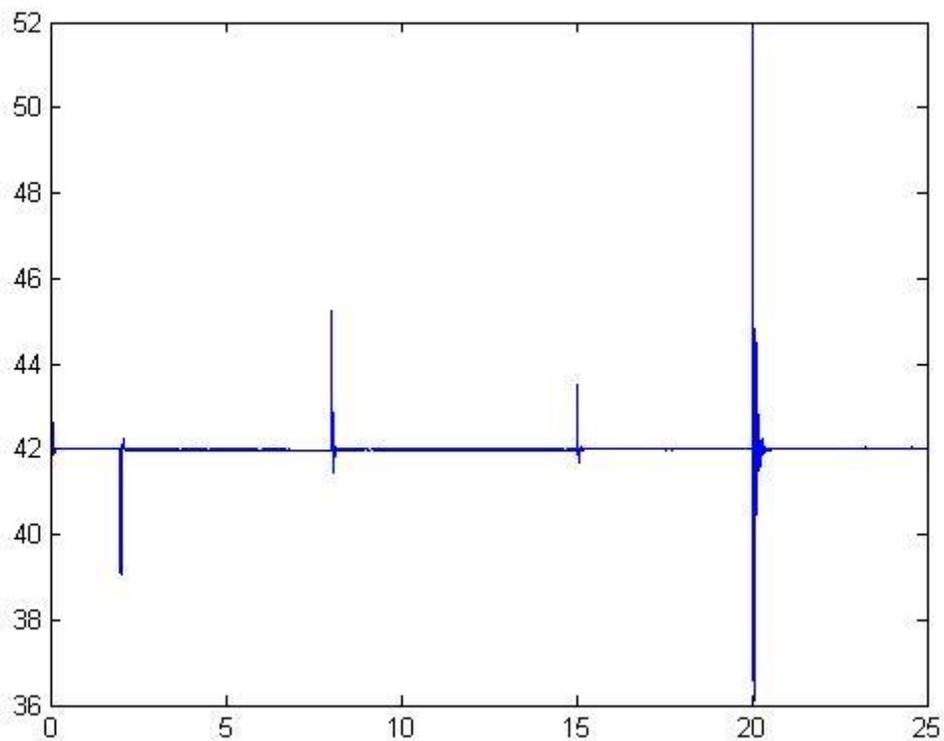
Les paramètres sont nécessaires pour démarrer la simulation car les équations simulé par le programme doit être identifier grâce aux paramètres identifier dans le fichier « m. ».

III-1-Identification des paramètres :

lg	inductance cyclique du générateur
rg	résistance d'une phase générateur
eg	fem du générateur à 1500 tr/mn
cm	capacité d'entrée variateur moteur
cg	capacité de sortie redresseur commandé
c0	capacité bus continue
l0	inductance câblage lissage alternateur batterie
r0	résistance enroulement 0 (charge recup)
l2	inductance de câblage vers l'ensemble
r2	résistance enroulement 2
l1	inductance boost/buck
r1	résistance enroulement 1
rb	résistance batterie
sc	valeur de la Super Capa
rc	valeur de la résistance Super Capa
Vc0ref	tension de référence bus continue
p0	puissance mécanique dissipée par le moteur
Rch, tch, Te, T1, Tsb, Ts	dimensionnement de base de la commande du générateur sur une charge p0
eb	tension batterie à vide
Vscref	tension super capa nominale
trep	temps de réponse souhaité
ksi	amortissement souhaité
wn	pulsation de coupure souhaitée

III-2- Paramètres FC:**Power of the stack = 500 W / Voutput = 12V / T=55°C / 23 cells**

E	27.1 V
Rm	0.045 Ohm
A	1.35 V
B	1.19 V
iL	100 A
In	0.23 A
io	6.54 e-3 A

IV-Résultats et interprétation de la simulation:**Figure 39 : La tension bus-continu**

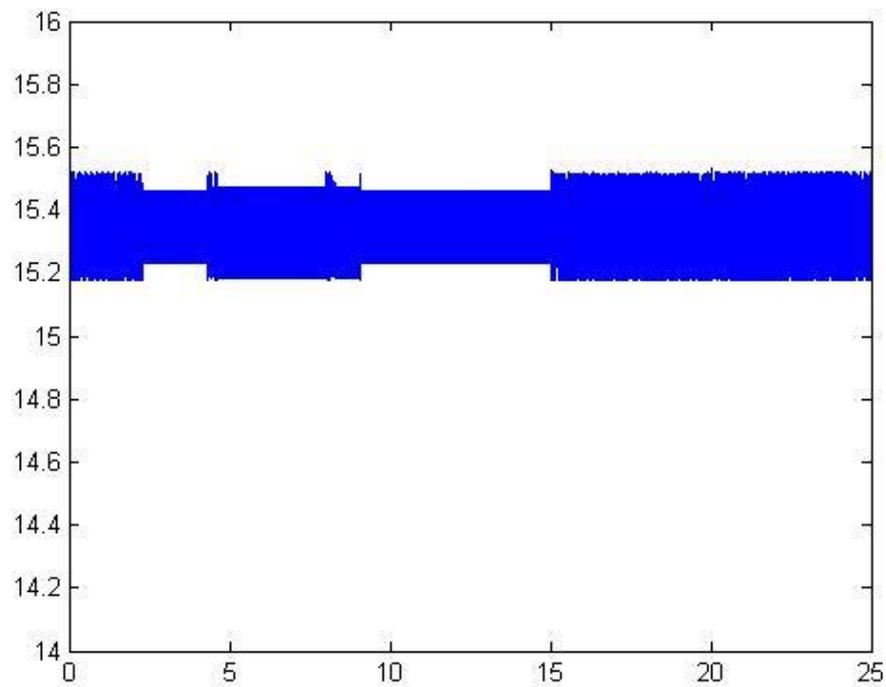


Figure 40 : La tension de la pile à combustible

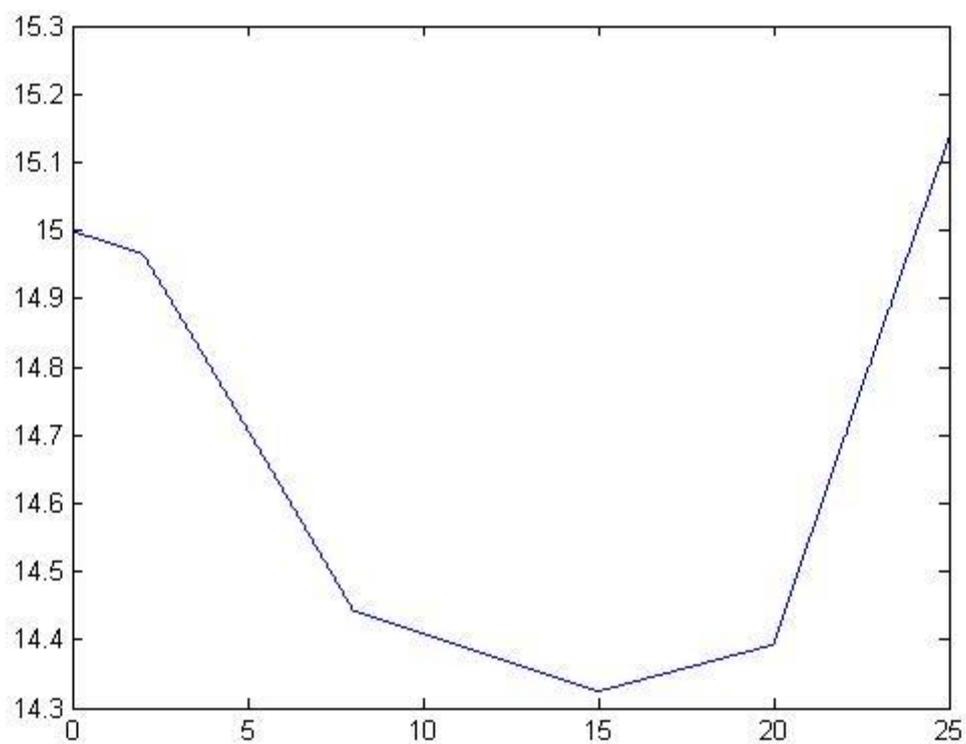


Figure 41 : La tension du supercondensateur

IV-1-Interprétation des résultats (V_{bus} , V_{pile} et $V_{supercapacité}$) :

- Dans la figure 39 la tension du bus continu avec sa référence, on observe que la tension du bus continu suit sa référence malgré les variations de la charge. Néanmoins on remarque qu'aux moments $t_1=2s$, $t_2=8s$, $t_3=15s$ et $t_4=20s$ la charge varie et entraîne des variations minimales de la tension du bus continu durant des laps de temps insignifiants, puis cette tension reprend le chemin de sa référence.
- Dans la figure 40 est présentée la tension de la pile à combustible, on observe de sa variation avec des valeurs de tension petite ; en générale on remarque que la tension est stable et continue avec une valeur de tension de 15.3 V.
- Dans la figure 41 on présente la tension de la supercapacité ; à $t=0s$ la tension est maximale et égale à 15V, c'est le phénomène inverse du courant de la supercapacité. On remarque que la tension commence à diminuer légèrement jusqu'à $t_0=2s$ puis diminue rapidement (c'est la décharge) jusqu'à $t_1=8s$; puis continue sa diminution mais d'une manière légère jusqu'à $t_2=15s$; à partir de ce moment le chargement de la supercapacité débute et la tension commence à augmenter jusqu'à $t_3=20s$, puis elle augmente rapidement jusqu'à $t_4=25s$. Il est à noter que durant les intervalles $[0-2]s$; $[8-15]s$, la puissance du générateur est égale à la puissance de la charge, et la tension de la supercapacité diminue légèrement.

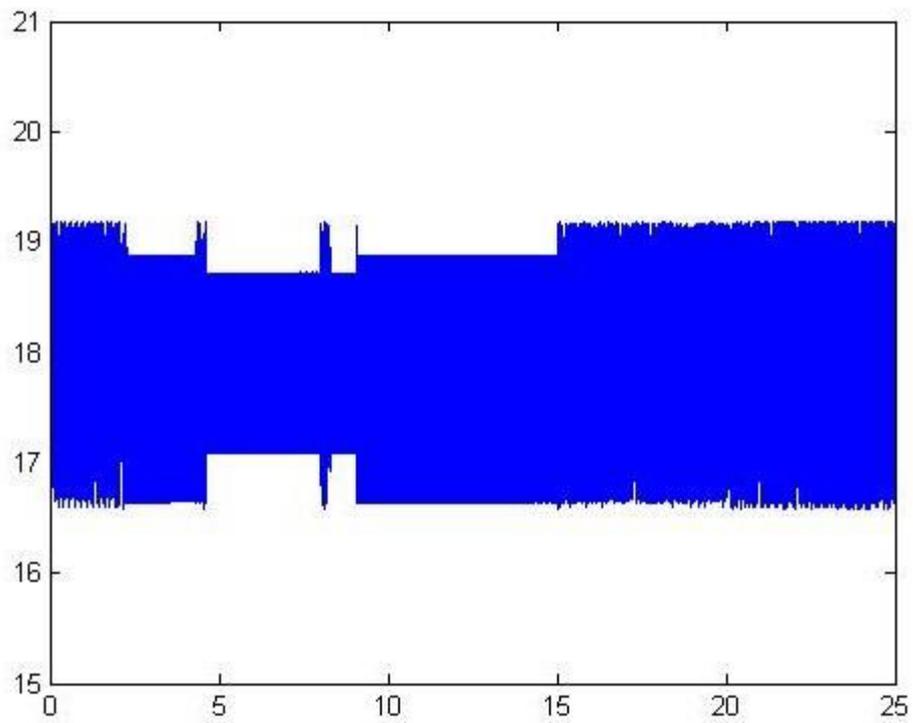


Figure 42 : Le courant du générateur (pile à combustible)

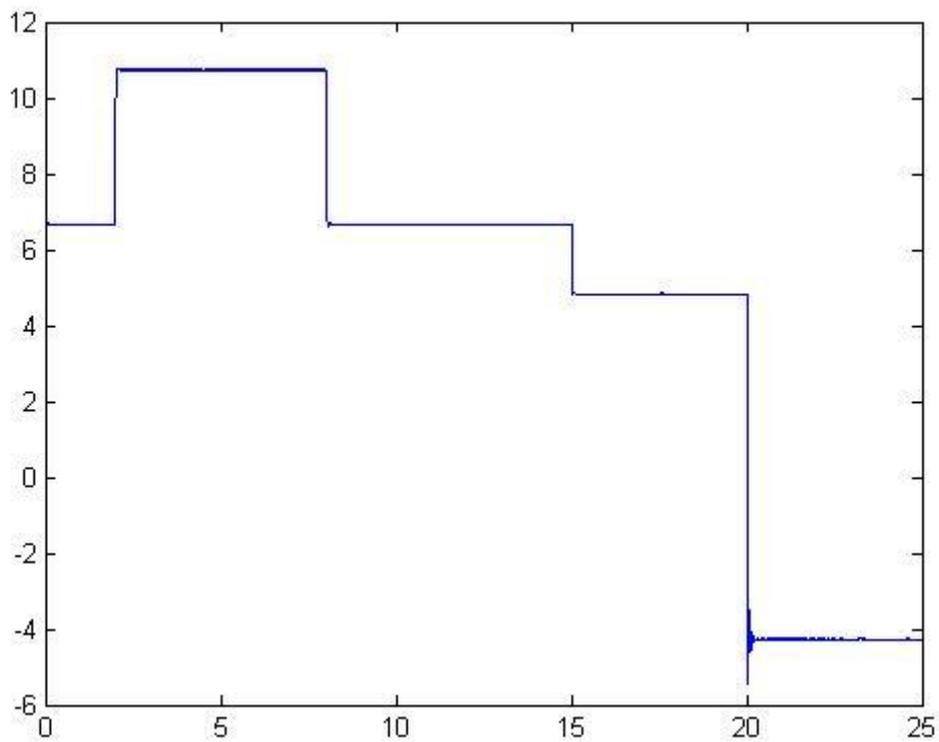


Figure 43 : Le courant de la charge

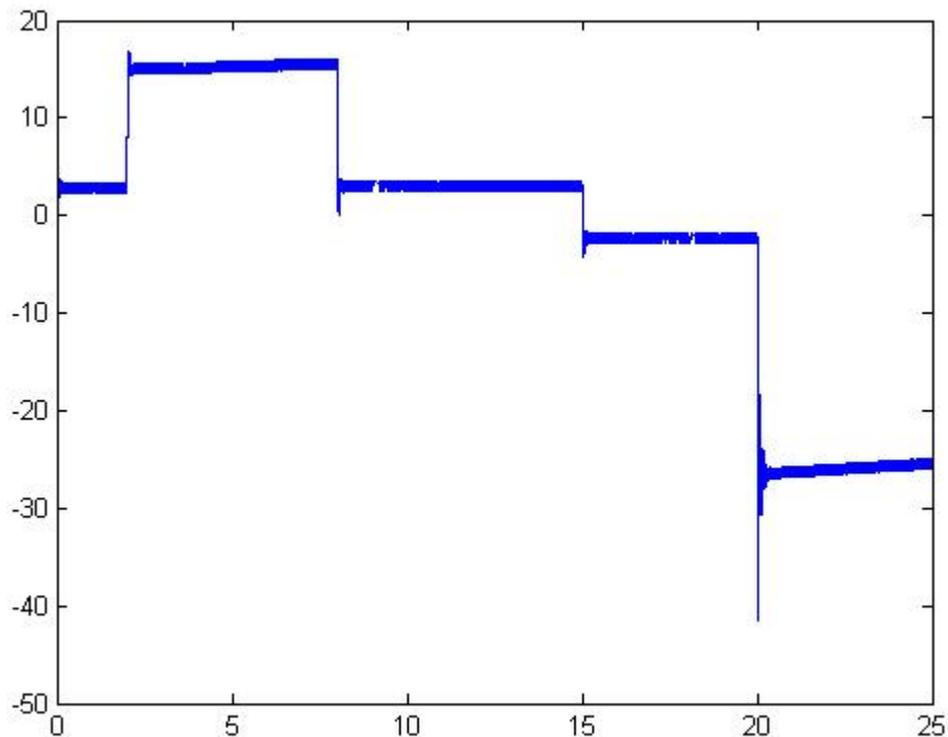


Figure 44 : Le courant de la supercapacité

IV-2-Interprétation des résultats (I_{charge} , I_{pile} et $I_{supercapacité}$) :

- Dans la figure 42 le courant du générateur avec sa référence, on observe que ce courant suit bien sa référence.
- Dans la figure 44 le courant de la supercapacité ; On remarque que dans l'intervalle du temps $2s < t < 10s$ la puissance de la charge devient supérieure à la puissance du générateur, ceci est dû à la décharge de la supercapacité supposée déjà chargée (à $t=0$ $V_{sc}=15V$) ; afin de maintenir constante la tension du bus contenu. Et dans l'intervalle du temps $15s < t < 25s$ la différence entre la puissance de la charge et celle du générateur est récupérée pour recharger la supercapacité. Dans l'intervalle où les deux puissances est égales la valeur du courant est très petite.

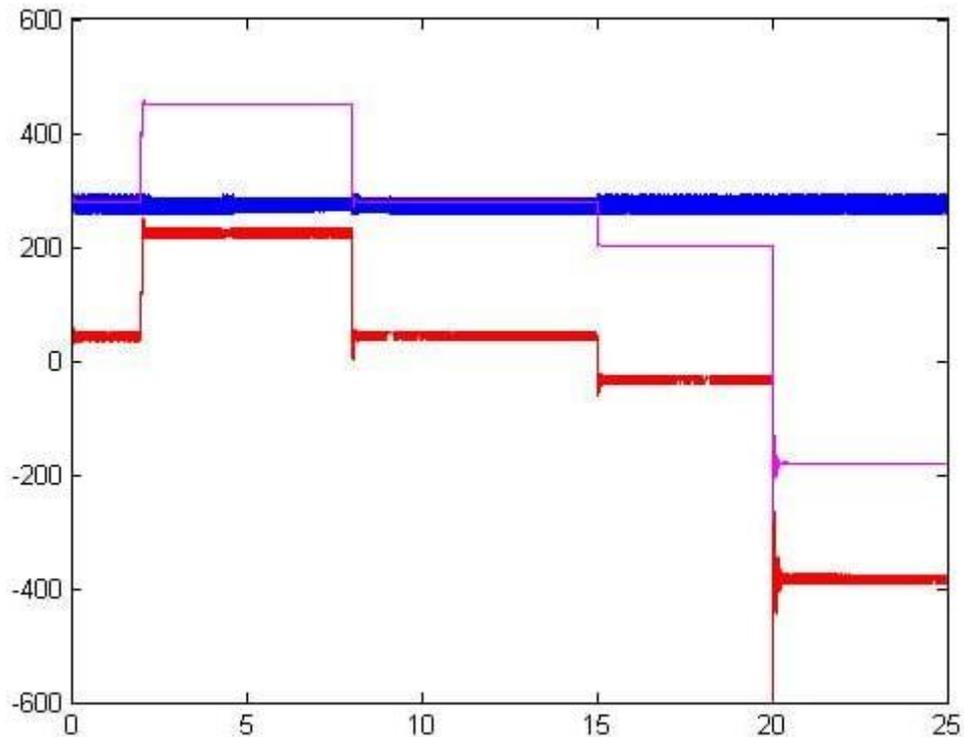


Figure 45 : les trois puissances (Puissance de la charge en magenta, Puissance de la superecapacité en rouge et la puissance de la pile à combustible en Blue)

- Dans la figure 45 les puissances du générateur et de la charge. On remarque que la puissance du générateur suit de la charge, quelle que soit les perturbations provoquées par la charge, car la source principale du système est une pile à combustible. Ainsi la relation entre les deux puissances est proportionnelle, autrement dit si la puissance du générateur augmente celle de la charge augmente aussi et si la puissance du générateur diminue, celle de la charge diminue aussi.

CONCLUSION

Conclusion :

Ce présent travail concerne l'analyse d'une alimentation hybride pour la traction d'un véhicule hybride, constitué de deux sources et un convertisseur DC-DC. La principale source est une pile à combustible, la source auxiliaire est un supercondensateur. Notre objectif principal est le contrôle de cette source hybride via un bus continu, en appliquant une commande robuste afin d'assurer toujours une tension constante au niveau de notre bus continu quelque soit d'une part les variations brusque de la charge et d'autre part la dynamique rapide du supercondensateur.

Les deux sources d'énergie sont connectées au bus continu via deux convertisseurs DCDC : Boost et Back-boost. Ces convertisseurs ont permis de réguler la tension du bus continu et de gérer le transfert de la puissance vers la charge. On utilise dans ce travail au lieu un moteur électrique une charge R-L pour tester notre système hybride.

Dans un premier temps et après modélisation des sources et dans le but de régler la tension au niveau du bus continu, on a simulé la pile à combustible avec hacheur boost, en utilisant un simple régulateur PI. Les résultats obtenus ont été satisfaisants.

Dans un deuxième temps, nous avons fait une simulation de tout le système, à savoir pile à combustible avec son hacheur « boost » et le supercondensateur avec son hacheur « buck boost », en utilisant une commande robuste basée sur le principe du mode glissant pour ce dernier. Cette commande optimale a permis au convertisseur DC-DC buck-boost du véhicule de forcer le système (pile à combustible+supercondensateur) à suivre les trajectoires selon les références qu'elle lui fournie.

La commande utilisée nous a permis d'établir une gestion optimale de l'énergie provenant de la pile à combustible et de la supercapacité, en tenant compte des contraintes subies par celle-ci. Les simulations ont permis de montrer que cette commande est robuste, efficace et stable pour notre système hybride.

Références bibliographiques

1. H.MAKER, « Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : Association Pile à Combustible et supercondensateurs », thèse de doctorat, Université de Technologie Belfort Montbeliard , 2008
2. W.HANKACHE, « Gestion Optimisée de l'Energie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, 2008.
3. M.ZANDI, « Contribution Au Pilotage des sources Hybrides d'énergie électrique » thèse de doctorat, Université NANCY Institut National Polytechnique de LORRAIN, 2010.
4. J.BERNARD, « Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande », thèse de doctorat, Université de Valenciennes, et du Hainaut-Cambresis, 2007.
5. N.MAHERZI, « Etude, Conception et réalisation d'un convertisseur d'énergie DC/DC associé à des supercondensateurs mémoire d'ingénieur CNAM », Conservatoire National des Arts et METIERS LYON, 2010.
6. M.MONTARU, « Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages », thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.
7. J.SCORDIA, « Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicule hybrides ». Doctorat de l'université Henri Poincaré-Nancy1, 2004.
8. S.DELPERT, « Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèle », doctorat de l'Université de Valenciennes et de Hainaut Cambresis ,2002
9. G.ROUSSEAU, « Véhicule hybride et commande optimale », L'école National Supérieure des Mines De Paris, 2008.
10. A.DUBRAY, « Adaptation des lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides suivant le profil de mission suivi », Doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble, 2002
11. J.BERNARD, « Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande », thèse de doctorat, Université de Valenciennes, et du Hainaut-Cambresis, 2007.

12. B.WAHDAME, « Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à Combustible par la méthode des plans d'expériences », thèse de doctorat, université de technologie de belfort montbéliard et de l'université de France – Comté,2006.
13. A.PAYMAN, « Contribution à la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides Multi-sources Multi-charges », thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
14. 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, L'institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
15. I.VALERO EXPOSITO, « INTRFACAGE ET CONTROLE COMMANDE DE PILES A COMMBUSTIBLE POUR APPLICATIONS STATIONNAIRE ET TRANSPORT », THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE JOSEPH FOURIER,2004.
16. R.SAISSET, « Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimique. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire », thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse ,2004
17. R. Benchrifa, D. Zejli, A. Bennouna; "Piles à combustible, mode efficace et propre de production d'électricité", International Congres on the Renewable Energies and the Environment, Sousse, Tunisia, March 2005.
18. P.THONTHONG, « CONCEPTION D'UNE SOURCE HYBIDE UTILISANT UNE PILE A COMBUSTIBLE ET DES SUPERCONDENSATEURS », THESE DE DOCTORAT, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,2005.
19. I.SADLI ; « MODELISATION PAR IMPEDANCE D'UNE PILE A COMBUSTIBLE PEM POUR UTILISATION EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE » ; thèse de doctorat de L'INPL ; National Polytechnique de LORRAINE; 2006
20. I. Sadli, P. Thounthong, J.P. Martin, S. Raël, B. Davat; "Behaviour of a PEMFC supplying a low voltage static converter"; Journal of Power Sources, Vol. 156, pp. 119-125, May 2006.

Résumé du Thème

Les piles à combustible ressemblent de près aux batteries, sachant que les deux éléments produisent une tension continue à leurs bornes en utilisant un procédé électrochimique.

Deux électrodes séparées par un électrolyte forment une anode et une cathode, une paire appelée une cellule. Les groupes de cellules produisent une puissance et une tension utilisables. Contrairement aux batteries, les piles à combustible convertissent l'énergie de ce combustible riche en hydrogène directement en électricité. Elles fonctionnent tant qu'elles sont alimentées avec du carburant. En outre, elles ont une grande constante de temps pour répondre à une augmentation ou une diminution de la puissance de sortie. Elles constituent un environnement propre, calme, et une manière efficace pour produire de l'électricité. Elles ont besoin de certains types de circuits de conditionnement de puissance pour être utile.

L'utilisation des supercondensateurs en tant que système de stockage de sources hybrides, en utilisant des piles à combustible ou des batteries, est tout à fait appropriée, permet un rasage de charge de pointe et compense les limites intrinsèques de la source principale.

Notre travail traite la conception des sources d'énergie hybride utilisant une pile à combustible comme source principale, une liaison à courant continu et des supercondensateurs comme source d'énergie transitoire pour la traction du véhicule.

Mots Clés :

Pile à combustible, supercondensateurs, régulateur PI, contrôle par mode glissant, véhicule hybride, hacheur « Boost », hacheur « Buck-Boost », bus continu,...etc.

Abstract:

Fuel cells are similar to batteries, knowing that both elements generate a voltage at their terminals using an electrochemical process.

Two electrodes separated by an electrolyte; they form an anode and a cathode, a pair called a cell. The groups of cells had an output and a voltage used. Unlike batteries, fuel cells convert the energy of the hydrogen rich fuel directly into electricity. They work as they are supplied with fuel. In addition, they have a large time constant to respond for an increase or decrease power output. They are a clean, quiet, and efficient way to produce electricity. They need some kind of power conditioning circuits to be useful.

The use of supercapacitors as a storage system for hybrid sources, using fuel cells or batteries, is quite appropriate, can shave peak load and compensates for the intrinsic limitations of the main source. Our work deals the design of hybrid energy sources, using a fuel cell as the primary source, a DC link and ultra capacitors as an energy source for the vehicle traction.

Tags:

Fuel cells, Supercapacitors, PI controller, Sliding mode control, hybrid vehicle, chopper "Boost" chopper "Buck-boost" DC Bus, etc....