REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. YAHIA FARES de MEDEA
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie mécanique

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en génie mécanique

.

Option : mécatronique

Thème

q

Synthèse sur l'étude d'un véhicule a pile à combustible

Présenté par :

M^elle^ Korsane imene
M^elle^ ben aicha hafidha

Proposé etencadré par :

Pr. ABUDURA SALAM
Dr.Belhadj abdelmoneim

Promotion 2015/2016

Remerciements

Avant tout nous remercions Allah tout puissant de nous avoir donnés le courage et la patience pour terminer ce travail

En particulier. Nous remecionsDr.abudura Salam et come promoteur Dr .Belhadj abdlmoneim .qui a accepte d’être notre gestionnaire de mémoire

الإهـــداءُ

Dédicace

Tout d'abords , je rends grâce à Allah pour toutes les bénédictions et la grâce de la réussite.

A ma chére mére , pour ses scarifies de puis qu'elle m'a mise au monde ;

A mon cher père,qui ma toujours soutenu et ma aider a affronter les difficultes ;

A ma cheres sœurs djamila et mes cheres freres : Hakim ,Ben aleya ,Morad ,Ahmed ,

Mohamed et Sid ali

A tous ma famille

A tous mes amis :Amina ,Khadidja ,Nawal ,Amel ,Saliha ,Aicha ,merieme,samira,Hanane,a

Ma binome Imene korssan

HAFIDHA

الإهـــداءُ

Dédicace

Tout d’abords , je rends grâce à Allah pour toutes les bénédictions et la grâce de la réussite.

A ma chére mére , pour ses scarifies de puis qu’elle m’a mise au monde A mon cher père,qui ma toujours soutenu et ma aider a affronter les difficultes

A ma cheres sœurs :Hanan, Hamida,Zahira,Nor,Razika,Samira,Ikram et ma freres : Mohamed,Imed Edine,Walid et Akram

A tous ma famille

A tous mes amis : Khadidja, Hanan , Malika , Amina

Ma binome : Ben aicha Hafidha

Liste des figures

Figure 1-1 : L'expérience de Sir William Grove /ClubPac/.....8

Figure 1-2 : Technologies des piles à combustible et domaines d'application. ……..…11

Figure 1-3 : Schéma de principe de la pile à combustible PEM.....12

Figure 1-4 : Exemple d'assemblage d'une cellule élémentaire /Ruge 2003/. ……....12

Figure 1-5 : Exemple d'un assemblage de pile à combustible /Ruge2003/.....14

Figure 1-6 : Courbe de polarisation classique d'une cellule de pile à combustible PEM……...14
Figure 1-7 : Architecture d'un système à pile à combustible /Boettner et al. 2002/. ……17

Figure 1-8 : Puissances caractéristiques d'un système PAC (puissances brutes, nette et auxiliaires……...…18

Figure 1-9 : Rendements caractéristiques de la PAC et du système PAC……..…19

Figure 1-10 : Exemple d'architecture de groupe motopropulseur à pile à combustible……..…20

Figure 1-11 : Exemple d'architecture de véhicule à pile à combustible hybride. ……..…25

Figure 1-12 : Plan de Ragone /Schneuwly et al. 2002/. 26

Figure 1-13 : Exemple des puissances mise en jeu en accélération et en maintien de vitesse du véhicule……...…28

Figure 1-14 : Stratégies de commande thermostatique et proportionnelle. ……..……..31

Figure 2-1 : Structure des sous-modèles (gauche) et exemple du moteur électrique (droite) ...36

Figure 2-2 : Exemples de modèles à flux unique (batterie, à gauche, et véhicule, à droite) 36

Figurre2-3 : schéma électrique équivalent d'un élémentrie de batte……..…38

Figure 2-4 : Tension à vide d'un élément de batterie.....39

Figure 2-5 : Résistance interne d'un élément de batterie. 40

Figure 2-6 : Schéma électrique équivalent d'un supercondensateur. 41

Figure 2-7 : Schéma de la chaine de traction. 43

Figure 2-8: Bilan des forces s'exerçant sur le véhicule.....44

Figure 2-9: Schéma de puissance du groupe motopropulseur.....49

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Les principaux types de piles à combustible.....10

Tableau 1-2 : Exemples de véhicules à pile à combustible.....22

Tableau 1-3 : Flux énergétiques au sein du groupe motopropulseur.....24

Tableau 2-1 : Conditions de fonctionnement du système pile à combustible. 37

Résumé

Un véhicule hybride à pile à combustible fournit l' énergie pour la traction par via un système pile à combustible associé à un élément de stockage de l'énergie électrique par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. La gestion de l'énergie à bord du véhicule est une phase nécessaire dans le but de minimisation du combustible consommé qu'est l'hydrogène. Cette optimisation passe par une étape de Modélisation et de calcul des rendements des différents éléments constituant le bloc générateur.
Mots clés Véhicule hybride, pile à combustible, rendement, gestion de l'énergie, modélisation, optimisation.

Apstra

A hybrid fuel cell provides the energy for traction by using a fuel cell system associated with a storage element of electrical energy through power converters. The energy management in the vehicle is a necessary phase in the minimization of fuel purpose What consumed hydrogen. This optimization involves a stage of Modeling and yield calculation of various elements constituting the generator block.
Keywords hybrid vehicles , fuel cell efficiency, energy management , modeling, optimization

Arabe

توفر خلية وقود هجينة الطاقة للجر باستخدام نظام خلية الوقود المرتبطة بعنصر تخزين الطاقة الكهربائية من خلال محولات الكهرباء. إدارة الطاقة في السيارة هي مرحلة ضرورية في التقليل من غرض الوقود ما يستهلك الهيدروجين . ويشمل هذا التحسين مرحلة النمذجة و العائد حساب مختلف العناصر المكونة لكتلة المولد.
كلمات المركبات الهجينة ، وكفاءة خلايا الوقود ، وإدارة الطاقة ، والنمذجة ، والتحسين

Sommaire

Liste des tablea……...1
Notation……..2
INTRODUCTION GENERALE……5
Chapitre 1. La pile à combustible pour la traction automobile
1.1 INTRODUCTION.....8
1. 1.2. LA PILE À COMBUSTIBLE : HISTORIQUE APPLICATIONS...ET..... 8
1.3. LA PILE À COMBUSTIBLE À MEMBRANE POLYMÈRE (TYPE PEM) 12
1.3.1. Principe de fonctionnement..... 12
1.3.2. Cellule élémentaire et assemblage de la pile à combustible. 13
1.3.3. Caractéristique électrique de la pile à combustible.....15
1.3.4. Système pile à combustible.....17
1.4.GROUPES MOTOPROPULSEURS À PILE À COMBUSTIBLE ..... ……19
1.4.1. Contraintes dans les applications automobiles.....19
1.4.2. Véhicule hybride à pile à combustible 23
1.4.3.la source secondaire d'énergie……...25
1.5. DIMENSIONNEMENT ET STRATÉGIES DE COMMANDE :
ÉTAT DE L'ART 27
1.5.1. Dimensionnement de la source de puissance hybride..... 27
1.5.2. Stratégies de commande.....30
.6. CONCLUSION 33
Chapitre 2. Modélisation d'un véhicule hybride à pile à combustible
2.1 INTRODUCTION……...35
2.2 :PRINCIPE DE.MODÉLISATION……35
2.3. LE SYSTÈME PILE À COMBUSTIBLE ……36
2.4. LA BATTERIE…….....37
2.5. LES SUPERCONDENSATEURS …….…….....41
2.6. LE VÉHICULE ET SON GROUPE MOTOPROPULSEUR …….…….....43
2.6.1. Le véhicule…….....44
.2.6.2. Architecture électrique du véhicule……..4
2.7. CONCLUSION…….……54
CONCLUSION GENERALE……51
Références……..…….....52

Notations

Notations

Système pile à combustible

A_{CELL}	surface active de membrane d'une	(cm²)
E_{cell}	tention à vide d'une cellule	(V)
iPAC	densité de	(A/cm²)
IPAC	courant débité par la pile à combustible	(A)
iPACmax	densité de courant maximale	(A/cm²)
Ncell	nombre de cellules	(-)

n_{e^-}	nombre d'électrons libérés d'une molécule d'hydrogène (n_{e^-} =2)	(-)
PsysPAC	densité de puissance du système pile à combustible	(W/cm²)
V_{cell}	tension d'une cellule	(V)
λ *air*	coefficient stœchiométrique pour l'alimentation en air	(-)

Batterie

C_{batt}	capacité courante de la batterie	(Ah)
E_{batt}	tension à vide d'un élément de batterie	(V)
I_{batt}	courant de la batterie	(A)
M_{batt}	masse d'un élément de batterie	(kg)
N_{batt}	nombre d'éléments de batterie	(-)
N_{batt}	résistance interne d'un élément de batterie	(ohm)
SOC	état de charge	(-)
V_{bat}	tension d'un élément de batterie	(v)
ηf	rendement faradique	(-)

Notations

Super condensateur

C_{sc}	capacité du super condensateur	(F)
c_{sc}^{eq}	capacité équivalente du pack de super condensateur	(F)
E_{sc}	tension à vide d'un super condensateur	(V)
Esc_{max}	tension à vide maximale d'un super condensateur	(V)
I_{sc}	courant du super condensateur	(A)
R_{sc}	résistance interne d'un supercondensateur	(ohm)
SOC	état de charge	(-)
U_{sc}	tension du pack de supercondensateur	(V)
V_{sc}	tension d'un supercondensateur	(V)
X_{sc}	énergie contenu dans un supercondensateur	(J)
Xsc_{max}	énergie maximale contenu un supercondensateur	(J)

Véhicule

A_f	surface frontale	(m^2)
$C\ r$	coefficient de résistance au roulement	(-)
Cx	coefficient de résistance aérodynamique	(-)
F_{aero}	effort résistant aérodynamique	(N)
F_{pent}	effort résistant en montée	
$F_{traction}$	effort de traction appliquée à la caisse du véhicule	(N)
G	constante de gravité ($g = 9.81 m/ s2$)	(m/s^2)
M_{sse}	masse de la source secondaire d'énergie	(kg)

Notations

M_{veh}	masse totale du véhicule	(kg)
Meq	masse équivalente des éléments en rotation	(kg)
V_{veh}	vitesse du véhicule	(m/s)
α	pente de la route	(rad)
ρ_{air}	densité de l'air ($1,29 / 3\ air\ \rho = kg\ m$)	(kg/m3)

Introduction générale :

Dans les prochaines décennies, la stagnation probable de la production de pétrole entre 2020 et 2030, la concentration du pétrole brut au proche orient et les conséquences du changement climatique obligeront les gouvernements à employer l'énergie .nouvelles sources d'énergie moins polluantes. L'hydrogène se présente comme une solution portable. Sa capacité de stockage, de l'ordre de 3000 Wh/Kg, à conduit au développement de nouvelles technologies à base de pile a combustible. L'application des piles à combustible s'étend sur plusieurs domaines : stationnaires ou embarquées.

Les véhicules hybride dans lesquels une source secondaire d'énergie électrique vient soutire le moteur 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 hématique, s'intègrent les véhicules hybride à pile à combustible pour la production embarquée d'électricité et d'autre part un élément Erie de stockage de l'énergie électrique (supercapacitér, 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 savoirs une autonomie meilleure et une possibilité de ravitaillement rapide avec l'utilisation de l'hydrogène stocker dans des réservoirs sous pression ou produit à bord.

Si les véhicules hybrides sont mondialement commercialisés, les véhicules à pile à combustible restent au niveau prototypes bien que la plupart des grands constructeurs automobiles soient impliqués dans une phase de recherche et de développement dessus. Une des situations idéales visées serait la l'hydrogène à

partir de l'électrolyse de l'eau moyennant les énergies renouvelables tel l'énergie solaire, éolienne, hydraulique ou géothermique, on stockage et sa distribution dans

Des stations venant remplacer les stations à essence existants partout.

Introduction générale

Dans un futur proche, l'utilisation des systèmes hybrides électriques deviendra plus importante, ce phénomène s'explique par la production de pétrole et la demande de réduction d'émission de gaz dangereux .le plus souvent, les sources

Electriques diverses comme les systémes photovoltaiques,les piles à combustibles ou les éoliennes ,les organes de stockage comme les battrer ou les supercondensateurs sont présents en nombre dans ce type de systé

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés dans le cadre d'une convention de recherche entre le Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielle Les axes thématiques portent sur l'utilisation de la pile à combustible pour la traction automobile.

Pour présenter le travail, nous avons organisé notre mémoire deux chapitres :

Ce premier chapitre introduite de la pile à combustible dans environnement de la automobile, En deuxième chapitre, un modèle de véhicule à pile à combustible hybride a été présenté l'objectif était de disposer d'un modèle modulaire permettant de tester facilement de système pile à combustible et de source secondaire d'énergie.

Chapitre 1. La pile à combustible pour la traction automobile

1.1. INTRODUCTION.....8
1. 1.2. LA PILE À COMBUSTIBLE : HISTORIQUE ET APPLICATIONS... **……..…**8
1.3. LA PILE À COMBUSTIBLE À MEMBRANE POLYMÈRE (TYPE PEM) ……..….12
1.3.1. Principe de fonctionnement.....12
1.3.2. Cellule élémentaire et assemblage de la pile à combustible. 13
1.3.3. Caractéristique électrique de la pile à combustible.....15
.1.3.4. Système pile à combustible..... 17
1.4. GROUPES MOTOPROPULSEURS À PILE À COMBUSTIBLE 19
1.4.1. Contraintes dans les applications automobiles.....19
1.4.2. Véhicule hybride à pile à combustible 23
1.4.3.la source secondaire d'énergie…….....25
1.5. DIMENSIONNEMENT ET STRATÉGIES DE COMMANDE : ÉTAT DE L'ART….27
1.5.1. Dimensionnement de la source de puissance hybride..... 27
1.5.2. Stratégies de commande.....30
.6. CONCLUSION 33

1.1. Introduction

Ce premier chapitre présente les technologies de pile à combustible et en particulier celles utilisées dans le domaine automobile.

Après un bref historique, les principaux domaines d'application de la pile à combustible (PAC) seront présentés. Les limites d'utilisation liées à l'environnement automobile favorisent l'usage d'une technologie en particulier. Son principe de fonctionnement et ses contraintes d'utilisation sont décrits. Certaines de ces contraintes peuvent être levées par l'adjonction d'une source secondaire d'énergie (par exemple des batteries). Le système hybride ainsi obtenu fait l'objet de ce mémoire

1.2. La pile à combustible : historique et applications

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 1-1), rebaptisée plus tard pile à combustible /Fuel Cell Today/ /SAE/.

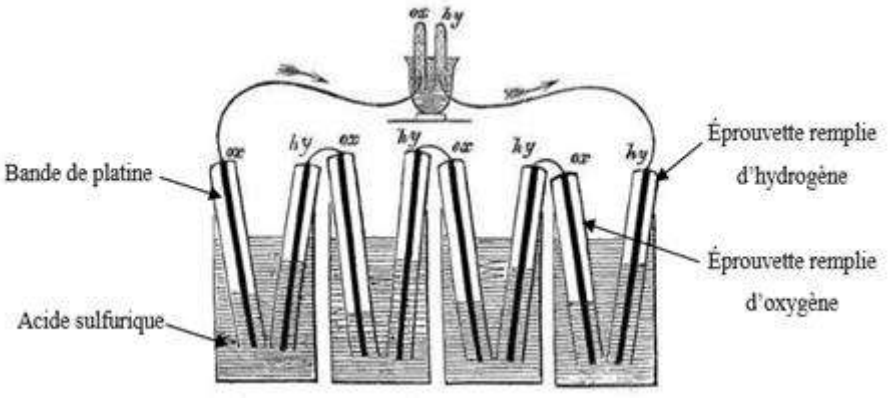


Figure1.1 : l'expérience de Sir willam grove /clubPac/ [1]

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 Aéronautique 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 concrète 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 couts 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 pourdes applications mobiles ou stationnaires.

Les piles à combustibles sont répertoriées en fonction de leurs températures de fonctionnement, de leurs électrolytes et de leurs plages de puissance. Les principales technologies de pile à combustible ainsi que leurs caractéristiques sont données dans le tableau 1-1 /CEA 2004/ /Axane/

	Non	*Electrolyte*	*Plage de puissance*	*Température de fonctionnement*	*Domaines d'applications*
PAC Bassese Températures	*DMFC (Direct methanol ful cell)*	*Membrane Polymère*	*1mW à 100 kW*	*60-90 c°*	*Portable*
	PEMFC (proton exchange membrane fuel cell)	*Membrane Polymére*	*100W à 500kW*	*60-90 c°*	*Transport Portable Stationnaire*
	AFS (alkaline fuel cell)	*Solution alcaline aqueuse*	*10kW à 100 kW*	*50-250 c°*	*Transport spatial*
	PAFC (phosphoric acid fuel cell)	*Acide phosphorique*	*Jusqu' à 10MW*	*160-220 c°*	*Stationnaire*
PAC Hautes température	*MCFC (molten carbonate fuel cell)*	*Carbonate fondue*	*Jusqu' à 100 MW*	*650c°*	*Stationnaire*
	SOFC (solide oxide fuel cell)	*Oxyde solide*	*Jusqu' à 100 MW*	*750-1050 c°*	*Stationnaire*

Tableau1-1 :les principaux type de pile à combustible

Chaque type de pile à combustible a un domaine d'application privilégié (tableau 1-1). Les piles dites à basses températures sont plutôt destinées aux applications mobiles, alors que les piles dites

Hautes températures sont généralement destinées aux applications stationnaires. Les principales applications mobiles concernent les appareils électroniques portables (ordinateur, téléphone cellulaire…) et le domaine des transports (voiture, bus…) les applications stationnaires concernent la production décentralisée d'énergie électrique (habitats collectifs ou ind2Dans ces dernières, la chaleur produite par les piles de hautes températures peut être récupérée par des procédés de cogénération ce qui augment le rendement global du système PAC /CEA 2004/. A la figure 1-2, les différents types de pile combustible et les plages de puissance sont liés par leurs domaines possibles d'application.

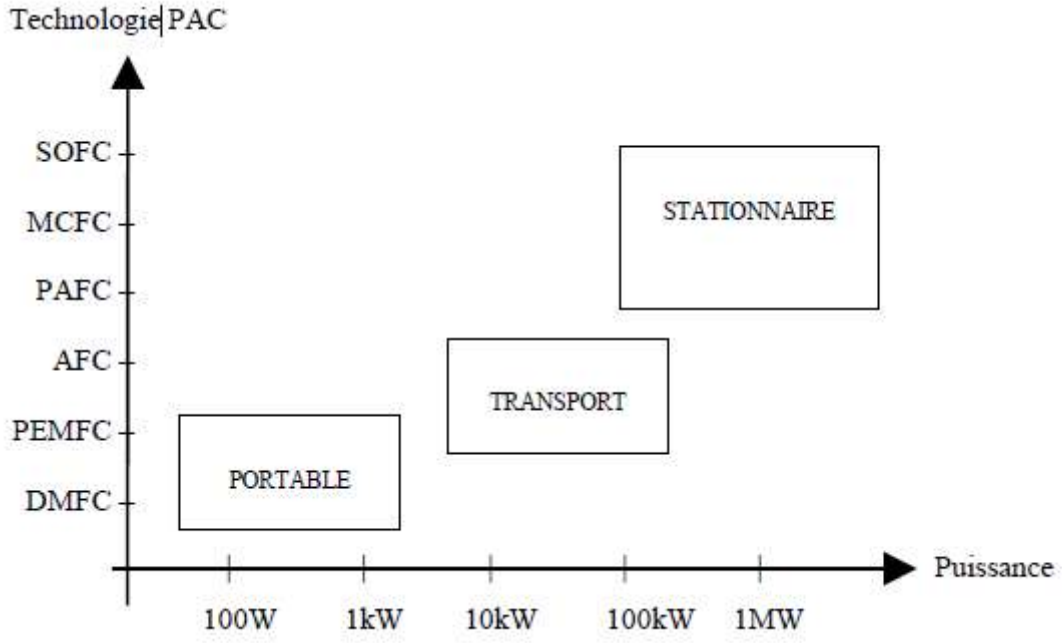


Figure1-2 : technologies des piles à combustible et domaines d'application

Parmi les différents types de pile à combustible, la pile de type PEM (« Proton La propulsion d'un véhicule requiert une puissance de quelques kilowatts à unes

Exchange Membrane », également appelée PEFC (« Polymer Electrolyte Fuel Cell »), est la technologie généralement retenue pour l'usage automobile. Plusieurs raisons expliquent ce choix /Lachaise 2004/ /Emadi et al. 2005/ /Boettner et al. 2002/ :

- **Densité de puissance** :

Centaine de kilowatts. En outre, le groupe motopropulseur doit avoir une masse et un encombrement acceptable. La PAC de type PEM répond le mieux à ces contraintes avec une densité de puissance comprise entre 1 kg/kW et 3 kg/kW.

- **Température de fonctionnement :**

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

- **Structure solide :**

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

1.3. La pile à combustible à membrane polymère (type PEM)

1.3.1. **Principe de fonctionnement**

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

- Oxydation à l'anode:

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \qquad (1.1)$$

- Réduction à la cathode:

$$O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2o \qquad (1.2)$$

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

$$H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2\ O + chaleur \qquad (1.3)$$

L'électricité est produite par les 2 électrons libérés par la molécule d'hydrogène (1.1). Les protons d'hydrogène H^+ traversent la membrane séparant l'anode de la cathode et se recombinent à la cathode avec les électrons et les atomes d'oxygène. Idéalement, les seuls produits secondaires de la réaction sont de l'eau et de la chaleur. La figure 1-3 résume le principe de la pile à combustible PEM.

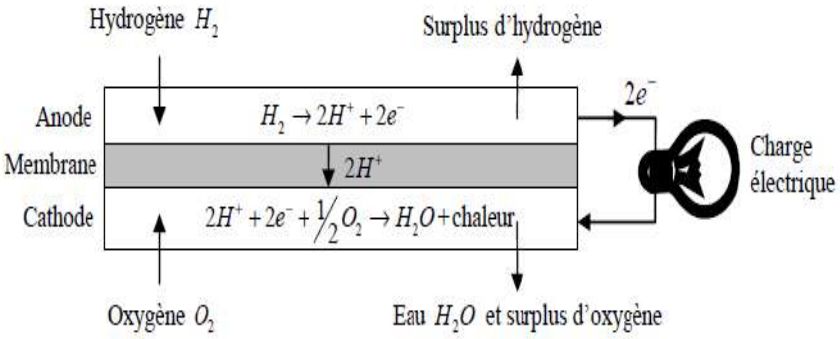
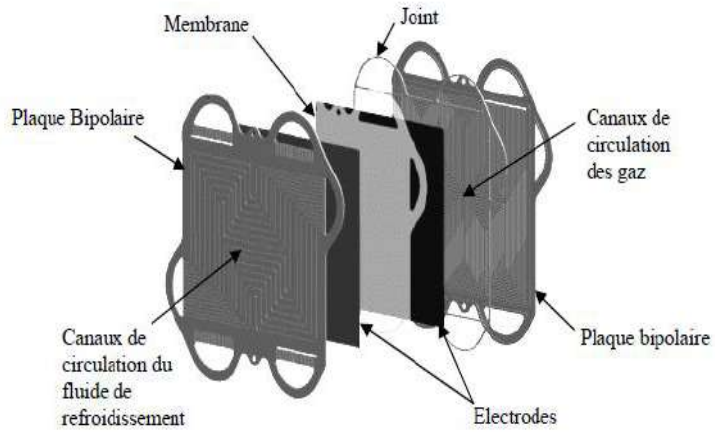


Figure1-3 schéma de principe de la pile combustible

1.3.2. Cellule élémentaire et assemblage de la pile à combustible.

La réaction électrochimique a lieu au sein d'une cellule élémentaire. Une cellule élémentaire consiste en un assemblage Electrode-Membrane-Electrode (EME) pressé entre 2 plaques bipolaires (figure 1-4).



Figuere 1-4 : exemple d'assemblage d'une cellule élémentaire/Ruge 2003/. [2]

La membrane est le cœur de la cellule élémentaire. La membrane est un électrolyte en polymère qui est perméable aux protons d'hydrogène H^+ et imperméable aux gaz. Pour garantir la perméabilité aux protons H^+, la membrane doit être en permanence humidifiée. La membrane Nafion® /Dupont/ est la plus répandue dans les piles à combustible PEM.

Un assemblage EME comporte 2 électrodes : l'anode et la cathode. Une électrode est faite de 2 couches de matériaux poreux. La couche de diffusion des gaz (ou GDL, « Gas Diffusion Layer ») transporte et répartit uniformément l'hydrogène et l'oxygène sur la membrane tout en évacuant l'eau produite. La couche de catalyseur (platine) permet d'activer et d'accélérer la réaction d'oxydoréduction.

Les plaques bipolaires remplissent 2 rôles. D'une part elles distribuent les gaz de manière Uniforme à l'assemblage EME par le biais de fins canaux (figure 1-4). D'autre part, elle permettent la circulation d'un fluide de refroidissement pour refroidir la cellule élémentaire. Les plaques bipolaires doivent être conductrices et résister à un environnement corrosif (par exemple, le graphite ou l'acier inoxydable sont utilisés).

La tension obtenue avec une cellule élémentaire est inférieure à 1 volt, ce qui est insuffisant pour la majorité des applications. Pour disposer d'une source de tension suffisamment élevée, plusieurs cellules sont assemblées en série pour former la pile à combustible (figure 1-5). Pour assurer l'étanchéité, les cellules sont pressées les unes contres les autres par 2 plaques d'extrémité (« en plates») et des tirants.

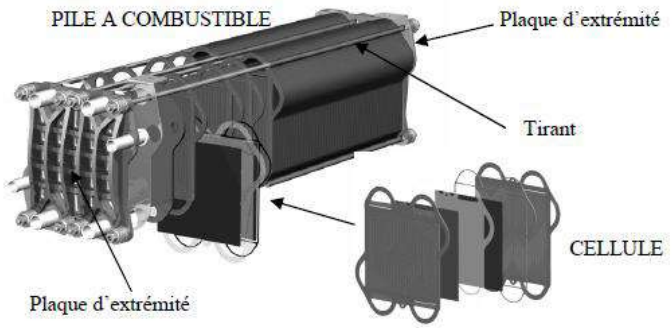


FIGURE1-5 : exemple d'un assemblage de pile à combustible

1.3.3. Caractéristique électrique de la pile à combustible

La tension à vide de la cellule (figure 1-6) est fonction du potentiel électrochimique de la réaction d'oxydoréduction. Idéalement, ce potentiel électrochimique est de 1,23V (potentiel). En pratique, la tension à vide se situe légèrement en dessous de 1 V /Rodatz 2003/. La courbe de polarisation est la caractéristique électrique d'une pile à combustible. Elle représente la tension de la cellule en fonction de la densité de courant (figure 1-6) et dépend
De la température de fonctionnement, de la pression des réactifs et du taux d'humidité de la membrane. La densité courant i_{PAC} (A/cm²) est définie par :

$$Ipac = \frac{\text{i}pac}{A\ cell} \qquad (1.4)$$

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

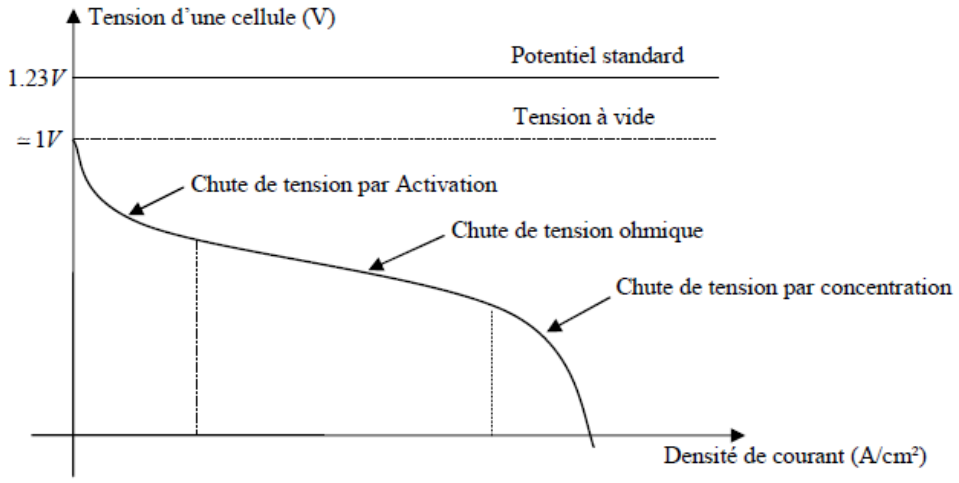


Figure1-6 : courbe de polarisation d'une cellule de pile à combustible PEM

La courbe de polarisation (figure 1-6) peut etre décomposée en 3 zones distinctes,

- **Chute de tension par activation** :

Nanostructures et des nanotubes est également rapporté dans
La littérature, mais la capacité réelle d'absorption La courbe de polarisation (figure 1-6) peut être
La réaction électrochimique droit franchir un seuil d'activation pour s'initier.

Ce seuil est dû à la lenteur de la réaction électrochimique à la surface des électrodes. La couche de catalyseur présente dans les électrodes aide à accélérer la réaction.

- **Chute de tension ohmique :**

Les chutes de tension ohmiques sont causées par la résistance électrique de la
Membrane et par la résistance électrique de l'ensemble électrodes/plaques bipolaires.

- **Chute de tension par concentration :**

Les chutes de tension par concentration résultent d'un manque de réactifs. Lorsque la densité de courant devient élevée la diffusion des gaz dans les électrodes n'est plus assez rapide pour entretenir la réaction.
La courbe de polarisation à la figure 1-6 est donnée pour une cellule élémentaire. De manière classique, en faisant l'hypothèse que toutes les cellules ont un comportement électrique identique, la tension totale de la pile à combustible *Vpac* est donnée pa

$$V_{pac}(I_{pac})=N_{cell}.V_{cell}(I_{pac}) \qquad (1.5)$$

Avec V_{cell} la tension élémentaire d'une cellule et N_{cell} le nombre de cellules.
La puissance brute *PAC P* fournie par la pile à combustible est :

$$P_{PAC}(I_{PAC}) = V_{PAC}(I_{PAC}) \cdot I_{PAC} \qquad (1.6)$$

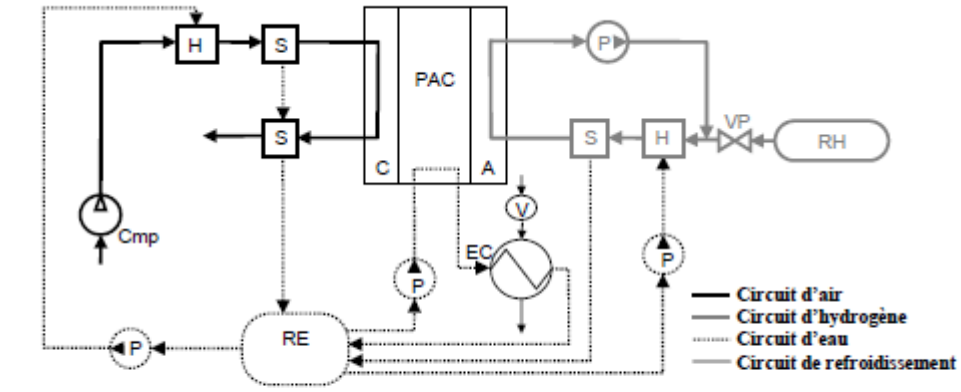
Une pile à combustible est capable de fournir de la puissance électrique tant qu'elle est alimentée en réactifs (oxygène et hydrogène). Ceci implique qu'une pile à combustible ne peut fonctionner seule et a besoin d'un ensemble de composants périphériques pour fonctionner.

1.3.4. Système pile à combustible

La pile à combustible a besoin d'un ensemble de conditions pour produire de l'énergie électrique /Boettner et al. 2002/ : elle doit être alimentée en hydrogène et en air, la membrane doit être en permanence humidifiée, et la chaleur produite doit être évacuée.

Les composants auxiliaires ont pour rôle d'assurer le bon fonctionnement de la pile à combustible. L'ensemble composé de la pile à combustible et de ses composants auxiliaires est appelé *système* pile à
Combustible.

Les *systèmes* de piles à combustibles sont généralement conçus spécifiquement pour une application en particulier. Il existe donc de nombreuses architectures possibles. Une architecture classique est donnée figure 1-7.



PAC	: Pile à combustible	S	: Séparateur d'eau	RH	: Réservoir d'hydrogène
A	: Anode	RE	: Réservoir d'eau	EC	: Échangeur de chaleur
C	: Cathode	P	: Pompe	V	: Ventilateur
Cmp	: Compresseur	VP	: Vanne de pression	H	: Humidificateur

Figure 1-7 : Architecture d'un système à pile à combustible /Boettner et al. 2002/.[3]

Quatre circuits principaux composent un système PAC (figure 1-7):

- **Le circuit d'hydrogène (circuit fermé) :**

Il alimente l'anode en hydrogène gazeux. L'hydrogène non consommé à la sortie de la PAC peut être réinjecté à l'entrée de celle-ci par l'intermédiaire d'une pompe de recirculation.

- **Le circuit d'air (circuit ouvert) :**

Généralement, pour alimenter la pile à combustible en oxygène, un compresseur injecte de l'air à la cathode.

- **Le circuit de refroidissement**

Le circuit de refroidissement est une partie essentielle du système pile à combustible (figure 1-7). La chaleur produite par la PAC peut représenter plus de 50% des pertes de puissances pour des courants élevés. De plus, la différence de température limitée entre la pile à combustible (80 $°C$ environ) et l'air ambiant ne favorise pas les échanges Thermiques et impose l'utilisation de larges échangeurs de chaleurs. Ceci représente une contrainte technique importante dans des applications automobiles.

- **Le circuit d'eau :**

L'humidification des membranes se fait par les gaz entrants (air et hydrogène) via le circuit d'eau (figure 1-7). L'eau contribue également au refroidissement de la pile à combustible lors de son passage dans l'échangeur de chaleur.

Les composants auxiliaires sont donc indispensables au bon fonctionnement de la pile à combustible. Ils consomment une partie de l'énergie produite par la pile à combustible. Le compresseur d'air (figure 1-7) est l'auxiliaire qui absorbe le plus de puissance /Guezennec et al. 2003/, et il influe considérablement sur le rendement global du système pile à combustible. La puissance nette disponible en sortie du système PAC $P_{SYS\,PAC}$ est de la puis

$$P_{SYS\,PAC}(I_{PAC})=P_{PAC}(I_{PAC})-P(I_{PAC}) \qquad (1\text{-}7)$$

Des allures caractéristiques des puissances sont données figure 1-8.

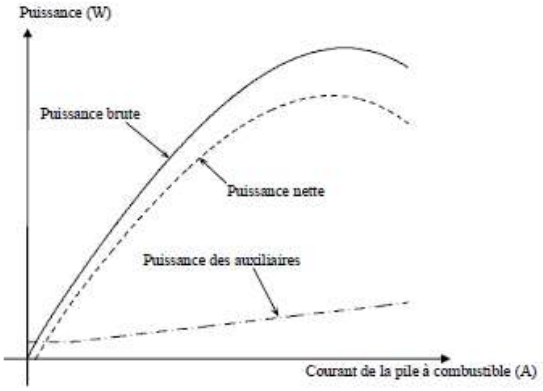


Figure 1-8 : Puissances caractéristiques d'un système PAC (puissances brutes, nette et auxiliaires).

Les pertes de puissances induites par la consommation électrique des composants auxiliaires affectent le rendement global du système (figure 1-9). Alors que la PAC convertit l'énergie chimique en énergie électrique avec un rendement maximal d'environ 70 % pour de faibles charges, le système pile à combustible atteint un rendement maximal d'environ 50 % aux Alentours de 25 % de la puissance nette disponible.

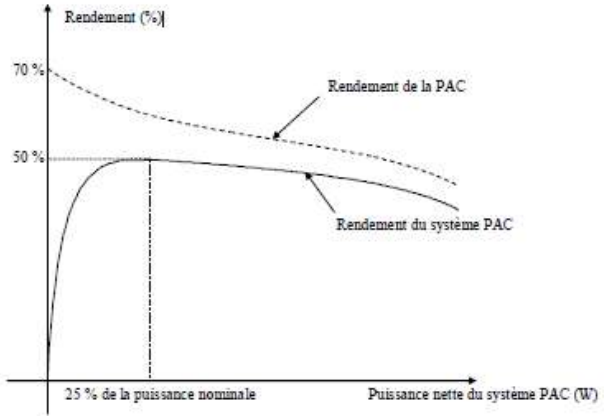


Figure 1-9 : Rendements caractéristiques de la PAC et du système PAC.

1.4. Groupes motopropulseurs à pile à combustible

1.4.1. Contraintes dans les applications automobiles

Un véhicule à pile à combustible est avant tout un véhicule électrique. La motorisation est assurée par une ou plusieurs machines électriques et la puissance est fournie par le système pile à combustible. Comme la production d'énergie électrique est réalisée sans émissions de gaz à effet de serre, un véhicule à pile à combustible est considéré non-polluant (localement).
Le système PAC ayant un rendement élevé (jusqu'à 50 %), son utilisation dans un groupe motopropulseur apparait donc comme une solution intéressante de mobilité
Durable. Une architecture classique d'un groupe motopropulseur utilisant une pile à combustible est donnée figure 1-10.

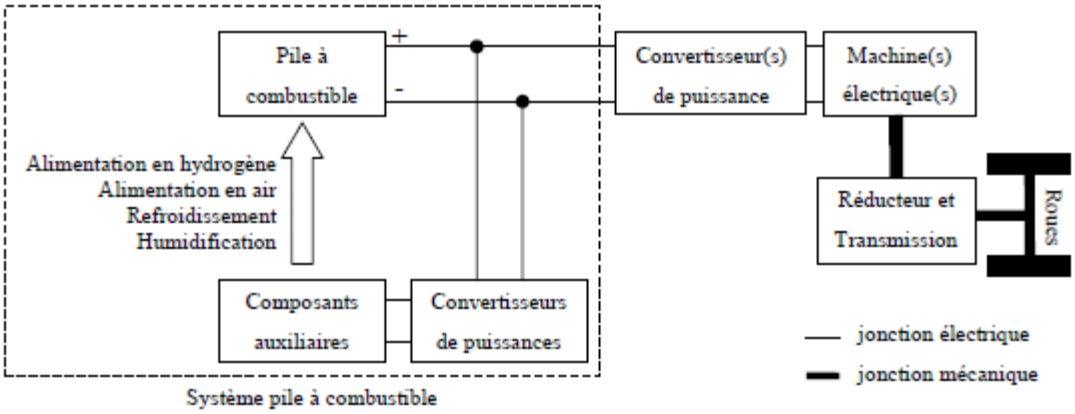


Figure 1-10 : Exemple d'architecture de groupe motopropulseur à pile à combustible.

Cependant certaines contraintes liées à l'utilisation de l'hydrogène et de la pile à combustibles dans un milieu automobile doivent être considérées :

- **Stockage de l'hydrogène :**

Plusieurs technologies de stockage d'hydrogène ont été envisagées pour l'automobile /Züttel 2003/ /Ananthachar et Duffy 2005/ /Zhou 2005/ mais ne permettent pas encore de stocker suffisamment d'hydrogène pour assurer une autonomie similaire à celle d'un véhicule conventionnel :

– Stockage sous forme gazeuse : l'hydrogène est stocké dans des réservoirs métalliques ou en matériaux composites, pressurisés entre 300 bar et 700 bar. C'est la solution la plus simple et la moins couteuse pour stocker de l'hydrogène.

– Stockage sous forme liquide : l'hydrogène est stocké sous forme liquide à très Basse température (-253 °C) dans des réservoirs cryogéniques.

– Reformage : l'hydrogène est produit à bord du véhicule par un reformeur. Un Reformeur est une « mini-raffinerie » qui extrait de l'hydrogène à partir de Carburants liquides hydrogénés (par exemple le méthanol).

– Stockage « solide » : l'hydrogène peut être stocké dans des réservoirs d'hydrure métallique. Un hydrure métallique capture les molécules d'hydrogène lorsqu'il est sous pression et les libère lorsque l'on augmente sa température. Le principal inconvénient de cette solution est la masse importante du réservoir. Le stockage d'hydrogène dans des de l'hydrogène est un sujet Controversé et semble éloignée des besoins de l'automobile /Guay & al. 2004/.

- **Dynamique du système pile à combustible :**

Maximale. Sa dynamique est principalement limitée par celle du compresseur d'air Un système pile à combustible ne peut pas délivrer instantanément sa puissance /Guezennec et al. 2003/. Généralement le temps de réponse du système pile à combustible est de l'ordre de quelques secondes et peut affecter les performances dynamiques du véhicule lors de fortes accélérations.

- **Dimensionnement du système PAC et circuit de refroidissement :**

Dans le cas d'un véhicule à pile à combustible sans autres sources secondaires d'énergie électrique, le système pile à combustible est dimensionné pour satisfaire les pointes de puissance du moteur électrique (lors de fortes accélérations). Pour obtenir des
Performances dynamiques du véhicule satisfaisantes, la puissance nominale du système PAC doit être élevée. Le refroidissement de la pile à combustible peut donc devenir délicat /Rogg et al. 2003/.

- **Démarrage à froid du système PAC :**

Pendant les démarrages à froid, la puissance maximale du système PAC est limitée. La pile à combustible a besoin de quelques minutes pour atteindre sa température de fonctionnement. /Markel & al. 2003/ considère que seulement 50 % de
La puissance nominale est disponible pendant les 2 premières minutes. La limitation de puissance pendant un démarrage à froid sont également décrites par /Boettner et al. 2002/. Les véhicules à pile à combustibles sans autres sources secondaires d'énergie électrique comme le véhicule prototype
Hydrogen3 de General Motors, tableau 1-2, sont donc peu courants car les contraintes liées à l'environnement automobile nécessitent des développements technologiques spécifiques. Dans le cadre d'une utilisation automobile, la
Pile à combustible est donc généralement assistée d'une source secondaire d'énergie
Électrique. Ce type de véhicule est alors appelé « véhicule hybride à pile à combustible ».

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
PSA /PSA/	Partner Taxi-PAC 	5,5 kW	Batteries Ni-MH	Réservoir haute pression (300 bar)	250 km	22 kW
Michelin-PSI /Michelin/ /Büchi et al. 2007/	Hy-Light 	30 kW (PSI)	Super--condensateurs	Réservoir d'hydrogène haute pression (200 bar) + Réservoir d'oxygène haute pression (350 bar)	500 km	2 moteurs-roues de 30 kW à l'avant.

* : fuel cell Hybridé véhiculé

Tableau 1-2 : Exemples de véhicules à pile à combustible

1.4.2. Véhicule hybride à pile à combustible

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 /Markel et al. 2003/ /Jeong et Oh 2002/ :

- **Assister en puissance la pile à combustible** :

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

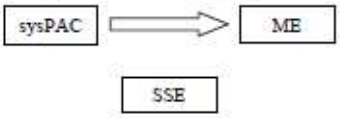
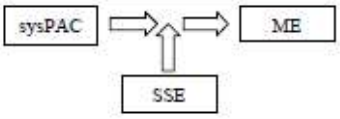
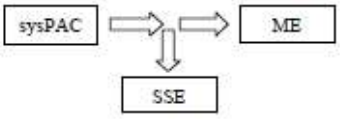
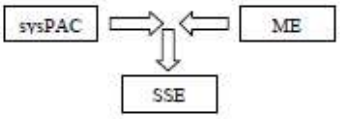
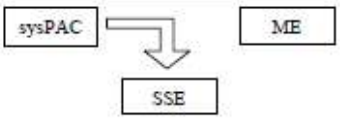
- **récupérer l'énergie cinétique lors des freinages** :

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 système PAC peuvent ainsi être dépla 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 (figure 1-11),plusieurs modes d'opérations peuvent être identifiés. Ces modes d'opérations (traction, freinage, arrêt) induisent des flux énergétiques différents (tableau 1-3).

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.

Sys PAC : système PAC

Ses : source secondaire d'énergies

ME :machine électrique

Tableau 1-3 : Flux énergétiques au sein du groupe motopropulseur

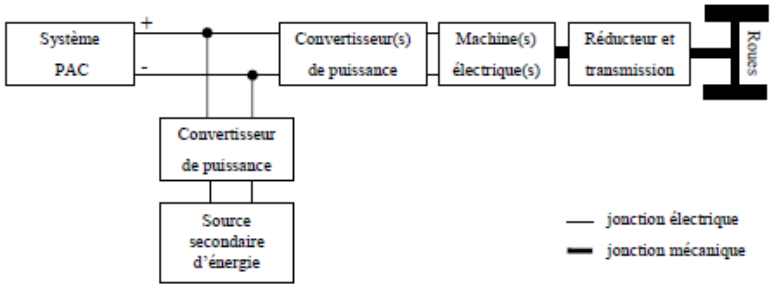


Figure 1-11 : Exemple d'architecture de véhicule à pile à combustible hybride.

1.4.3. La source secondaire d'énergie

La caractéristique principale de la source secondaire d'énergie est qu'elle est réversible en puissance. La source secondaire peut être rechargée par récupération de l'énergie cinétique ou par le système pile à combustible (tableau 1-3)

Dans un véhicule à pile à combustible hybride, deux technologies sont généralement retenues pour constituer la source secondaire d'énergie : les batteries et les super condensateurs.

Une batterie est un convertisseur d'énergie électrochimique qui emmagasine l'énergie de manière chimique. Dans le cadre d'une utilisation pour des véhicules hybrides, les principales technologies retenues sont les batteries au plomb, les batteries Nickel Métal-Hydrure (Ni- MH) et les batteries Lithium-ion (Li-ion) /Spotnitz 2005/. La technologie Ni-MH est la plus répandue car elle offre de bonnes performances en termes de capacité, de durée de vie et de Coût. La technologie Li-ion dispose d'une meilleure puissance spécifique (W/kg) et d'une meilleure capacité spécifique (Wh/kg), mais des améliorations sont toujours nécessaires concernant le coût, la sureté de fonctionnement, la durée de vie et les performances à faibles températures. La technologie au plomb souffre d'une faible capacité spécifique du fait du poids élevée des batteries; toutefois, il s'agit d'une Technologie robuste disponible à faible coût et qui bénéficie toujours de développements /Soria et al. 2006/.

Un super condensateur (ou encore condensateur à doubles couches) stocke l'énergie de manière électrostatique en polarisant une solution électrolytique. Il n'y a pas de réaction chimique mise en jeu, ce qui permet d'obtenir des durées de vie élevées (un super condensateur peut être chargé et déchargé des centaines de milliers de fois). Les super condensateurs ont une capacité spécifique extrêmement faible mais disposent
D'une puissance spécifique importante. De plus, leur rendement en charge et en décharge est élevé. Dans une application hybride, les super condensateurs sont destinés à satisfaire les fortes Pointes de puissances /Barbade et Rafer 2004/.
Une pile à combustible, une batterie et un super condensateur ont des caractéristiques électriques extrêmement différentes. Le plan de Ragone (figure 1-12) illustre les différences en termes de puissances spécifiques et de capacités spécifiques des différentes sources de puissance /Schneuwly et al. 2002/. La pile à combustible et l'hydrogène disposent de la capacité spécifique la plus élevée, suivies des batteries puis des super condensateurs. A l'inverse, les super condensateurs disposent de la puissance spécifique la plus importante,
Suivies des batteries puis de la pile à combustible.

L'un des enjeux dans le dimensionnement d'un véhicule hybride à pile à combustible est de déterminer une combinaison idéale entre le système pile à combustible et la source secondaire d'énergie pour satisfaire les performances dynamiques du véhicule tout en lui assurant une autonomie suffisante.

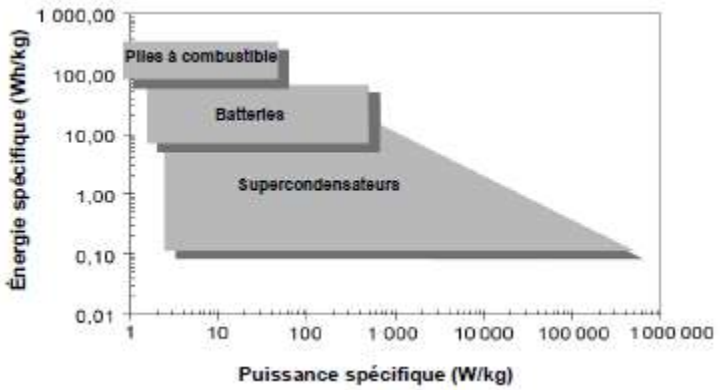


Figure 1-12 : Plan de Ragone /Schneuwly et al. 2002/.[4]

1.5. Dimensionnement et stratégies de commande : état de l'art

1.5.1. Dimensionnement de la source de puissance hybride

Le dimensionnement de la source de puissance (système PAC et source secondaire d'énergie) a un impact essentiel à la fois sur les performances dynamiques du véhicule (agrément de conduite) et sur la consommation d'hydrogène (autonomie du véhicule). C'est un exercice particulièrement difficile qui nécessite plusieurs itérations et qui fait l'objet du chapitre 4 de

- ce mémoire. Il est évidemment fonction d'un cahier des charges lié à l'application. Les solutions obtenues pour ce cahier des charges peuvent être nombreuses et variées (choix de la source secondaire par exemple). Dans ce cas, pour effectuer un choix, il faut être sûr de disposer d'une stratégie de commande qui exploite au mieux les échanges énergétiques. Le choix des composants et la stratégie de commande sont donc intimement liés pour le

Dimensionnement. Le dimensionnement doit tenir compte de plusieurs aspects :

- **Situations de conduite et dimensionnement :**

Il n'est pas envisageable de prendre en compte toutes les situations de conduite possibles. Le cahier des charges impose donc des performances minimales pour des
Conditions de conduites « caractéristiques ». Pour les cas particuliers du roulage à vitesse constante et d'accélération constante du véhicule (figure 1-13) des bornes minimales peuvent être facilement calculées
Pour l'énergie et la puissance de la source d'énergie secondaire :

- Cas de la vitesse constante du véhicule:

Le véhicule doit pouvoir rouler à une vitesse constante V_{const} pendant une durée prolongée (typiquement sur autoroute pendant plusieurs dizaines de minutes), ce qui équivaut à une demande de puissance constante $P_{vitesse_const}$ de la motorisation. La source de puissance secondaire ayant une quantité d'énergie limitée, elle ne peut assurer une assistance en puissance prolongée au système pile à combustible. Le système PAC doit donc avoir une puissance

maximale suffisante $P_{sys\ PAC\ max}$ pour assurer le maintien en vitesse du véhicule /Gao 2005/ /Ahluwalia et al 2005//Boettner et al. 2001/ /Markel et al. 2003/.

- Cas des accélérations du véhicule :

Les accélérations du véhicule se caractérisent par des pointes de puissance P_{accel} de durée limitée de la motorisation (quelques secondes). Le système PAC n'est pas toujours en mesure d'assurer seul les accélérations du véhicule soit parce que sa dynamique est limitée, soit parce que sa puissance maximal $P_{sysPACmax}$ est limitée. Là puissance manquante $P_{accel} - P_{sysPACmax}$ est alors fournie par la source secondaire d'énergie /Markel et al. 2003/ /Ahluwalia et al 2005/. La configuration hybride est d'ailleurs particulièrement intéressante pour pallier la dynamique limite du système PAC /Guezennec et al. 2003/ /Sun et Stephanopoulos 2006/.

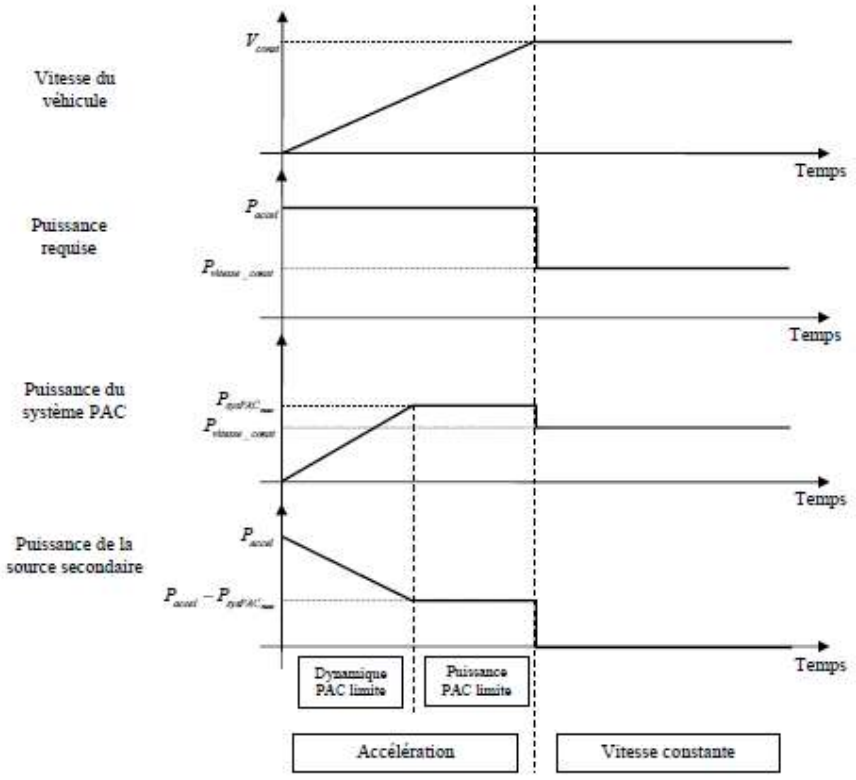


Figure 1-13 : Exemple des puissances mise en jeu en accélération et en maintien de vitesse du véhicule

- **Critères énergétiques et dimensionnement :**

Une part importante d'économie d'hydrogène est obtenue par récupération de l'énergie cinétique /Jeong et Oh 2002/ /Ahluwalia et al 2005/ /Lundstrom et Stephanopoulos 2006b/. Le dimensionnement de la source secondaire doit donc permettre de récupérer au maximum l'énergie de freinage /Zolot et al 2004/ /Gao 2005/ /Kim et Peng 2007/. Cependant, l'énergie cinétique récupérable et la demande de puissance de la motorisation dépendent de l'utilisation envisagée du véhicule du (urbain, périurbain ou autoroutier, mixte,…). De ce fait, le dimensionnement de la source de puissance est spécifique à une application particulière /Wipke et al. 2001/ /Pede & al 2004/ /Ahluwalia et al 2005/.

- **Problème de la masse du véhicule**

La consommation d'hydrogène est influencée par la masse du véhicule. La masse de la source de puissance (système PAC + source secondaire d'énergie) est donc un facteur

Important dans le processus de dimensionnement /Wipke et al. 2001/ /Lundstrom et Stephanopoulos 2006a/ /Lundstrom et Stephanopoulos 2006b/. A la limite, le surpoids introduit peut aller jusqu'à annuler les bénéfices obtenus grâce à la source secondaire. Du fait du poids supplémentaire introduit par la source secondaire d'énergie ainsi que l'augmentation de la complexité du groupe motopropulseur, il peut être envisagé l'utilisation d'une pile à combustible seule qui dispose naturellement d'un rendement élevé sur un large
Plage d'utilisation /Friedmann 1999/.

- **Énergie vs Puissance : batterie ou super condensateur ?**

Il est difficile de préconiser l'emploi de batterie ou de super condensateur, les deux technologies ayant des caractéristiques très différentes. Certain auteurs privilégient l'emploi de super condensateur /Gao 2005/ /Pede et al. 2004/ en raison de leur efficacité énergétique et de leur puissance spécifique, mais leur faible capacité peut être un handicap. A l'inverse, les batteries sont capables de stocker une grande quantité d'énergie mais sont pénalisées par leur
Uissance spécifique. Une solution consiste à coupler batteries et super condensateurs pour cumuler leurs avantages (puissance et énergie) /Scheffel et al 2005/ /Gao 2005/ /Pede et al 2004/, mais ceci augmente inévitablement la complexité et le coût de la source secondaire
D'énergie.
En résumé, dans le cadre d'une utilisation automobile, s'il existe un consensus quant à l'intérêt d'un système PAC hybride, le choix de la technologie de la source secondaire reste

Ouvert. De plus, il ne semble pas se dégager de tendance chez les constructeurs automobiles visant à utiliser des super condensateurs ou une technologie précise de

Batteries (tableau 1-2). Des contraintes de durée de vie /Sheffield et al. 2005/ ou des critères de coût /Wu et al. 2004/ interviennent également dans le processus de dimensionnement.

1.5.2. Stratégies de commande

Comme il a été mentionné plus avant, les solutions obtenues à partir du cahier des charges seul ne peuvent suffire au dimensionnement. Parmi ces solutions, il faut dégager la (ou les) solution(s) qui répond à un critère voulu (consommation, coût, encombrement, …). Répondre à ce problème d'optimisation nécessite de disposer d'une stratégie de commande qui exploite au mieux les échanges énergétiques.

Cette stratégie doit permettre au groupe motopropulseur de satisfaire la puissance demandée par le conducteur via la pédale d'accélérateur. Connaissant cette consigne, la stratégie de commande répartit la puissance entre le système PAC et la source d'énergie secondaire afin de minimiser un critère, généralement la consommation de carburant.

La source d'énergie secondaire jouant le rôle de « tampon » énergétique (capacité limitée en comparaison de celle disponible dans le réservoir d'hydrogène), un contrôle de son état de charge est indispensable : ni trop faible pour disposer d'une réserve d'énergie suffisante pour assurer par exemple une forte accélération du véhicule, ni trop élevé pour permettre une récupération efficace de l'énergie cinétique.

Les stratégies de commande développées pour les véhicules hybrides « traditionnels » (avec moteur à combustion interne et motorisation électrique) peuvent être adaptées à un véhicule hybride à pile à combustible. Les stratégies de commandes peuvent être classées dans 2 catégories

- **Optimisation globale :**

Lorsque le parcours du véhicule est connu a priori, il est possible d'obtenir, sous certaines hypothèses, la consommation minimale d'hydrogène et la séquence de commande à appliquer au groupe motopropulseur. Ces approches sont évidemment limitées à la simulation (en temps réel le trajet du véhicule est inconnu a priori). Ces approches sont très importantes, car elles Permettent de fournir :

une « expertise » sur les commandes idéales à appliquer au group Motopropulseur ;

- une borne de consommation minimale servant de référence pour l'évaluation des Stratégies temps réel. Des algorithmes basés sur la théorie des graphes /Scordia 2004/ ou sur la commande optimale /Delprat 2002/ permettent de résoudre ces problèmes d'optimisation globale à partir de modèles énergétiques.

➢ **Stratégie temps réel :**

En temps réel, le trajet du véhicule est, au moins partiellement, inconnu, les stratégies de bb commande proposées sont alors nécessairement sous-optimales. Le paramétrage des algorithmes est généralement empirique. Parmi les stratégies temps réel existantes, on peut citer :

- Stratégies basées sur l'évolution de l'état de charge /Candusso 2002/ /Boettner étal. 2001/ : Dans ce type de stratégies, la répartition de puissance est principalement fonction de l'état de charge de la source secondaire d'énergie. Les régulateurs employés sont alors de type relais ou proportionnel (figure 1-14).

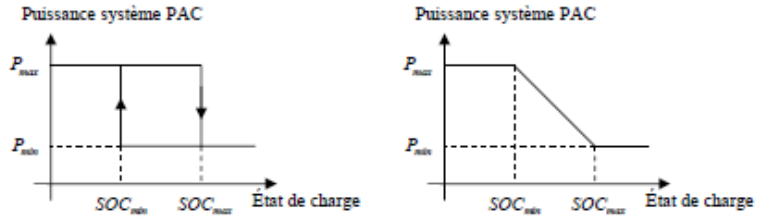


Figure (1.14): stratégies de commende thermostatique et proportionnelle

- **Stratégies basées sur la logique floue /Jeong et al. 2005/ :**

Par le système PAC est fonction de l'état de charge de la source secondaire et de la La répartition de puissance entre le système PAC et la source secondaire d'énergie est assurée par un régulateur flou à base de règles /Sugeno 1985/. La puissance délivrée demande puissance de la motorisation. L'état de charge et de la demande de puissance et de la puissance PAC sont fuzzyfiées en utilisant des fonctions d'appartenances. La régulation de l'état de charge se fait de manière empirique via le paramétrage de la base de règles floues. Les avantages de ce type d'algorithme sont la facilité, la simplicité et la rapidité de mise en œuvre. Les principaux inconvénients sont qu'ils ne reposent que sur la connaissance de l'expert qui a conçu la base de règles et ne qu'ils ne sont valables que
dans le domaine de cette expertise.

- **ECMS (Equivalent Consomption Minimization Strategy) /Paganelli et al. 2002/**

/Rodatz et al. 2003/ :
Des stratégies reposent sur une analyse des échanges énergétiques au sein du groupe motopropulseur. Dans ECMS, une consommation d'hydrogène équivalente est associée à la puissance électrique fournie par la source secondaire d'énergie via l'utilisation d'un facteur d'équivalence. La consommation d'hydrogène de la source de puissance est alors la somme de la consommation réelle de la PAC et de la consommation équivalente de la source secondaire d'énergie. La répartition de puissance choisie est celle qui minimise localement la consommation totale d'hydrogène. Pour garantir un contrôle de l'état de charge, une fonction de sensibilité permet d'ajuster la valeur du facteur d'équivalence. Ce réglage reste empirique.

- **Exploitation temps réel des algorithmes d'optimisation globale :**

Il est possible d'envisager pour une utilisation en temps réel les algorithmes D'optimisation en relâchant certaines hypothèses et en particulier la connaissance a priori du parcours du véhicule. Les caractéristiques du trajet futur peuvent alors être estimées à partir d'observations passées /Schell et al 2005/ /Lin et al. 2006/. De manière évidente, les résultats obtenus ne sont plus optimaux pour le parcours complet. Une autre possibilité consiste à exploiter « l'expertise » fournie par les algorithmes d'optimisation globale pour concevoir des régulateurs par apprentissage. Les réseaux de neurones, de par leurs capacités d'approximation, peuvent être utilisés dans ce contexte /Scordia 2004/. Les régulateurs obtenus n'ayant pas de capacité d'extrapolation, il est nécessaire que la base d'apprentissage recouvre l'ensemble des situations rencontrées en temps réel.

1.6. Conclusion

Ce premier chapitre a introduit l'utilisation de la pile à combustible dans un environnement automobile. La pile à combustible de type PEM (« Proton Exchange Membrane »), dont l'utilisation est privilégiée dans le secteur des transports, a été présentée en détail. Face aux contraintes de fonctionnement des systèmes pile à combustible, l'utilisation d'une source secondaire d'énergie au sein du groupe motopropulseur à PAC a été justifiée. Cette source secondaire d'énergie offre des opportunités d'optimisation dans le dimensionnement des

Composants et dans l'élaboration de stratégies de commande. Afin d'étudier ces deux aspects, un modèle de véhicule à PAC hybride a été développé et est présenté dans le prochain chapitre

Chapitre 2. Modélisation d'un véhicule hybride à pile à combustible

2.1INTRODUCTION…….…..35
2.2 : PRINCIPE DE.MODÉLISATION…….…..35
2.3. LE SYSTÈME PILE À COMBUSTIBLE…….....36
2.4. LA BATTERIE……...……..….37
2.5. LES SUPERCONDENSATEURS ……....…41
2.6. LE VÉHICULE ET SON GROUPE MOTOPROPULSEUR…….....43
2.6.1. Le véhicule…….…….44
.2.6.2. Architecture électrique du véhicule……..…..…46
2.7.MODÈLE DE SIMULATION…….…….……..50
2.8. CONCLUSION71……..54

2.1. Introduction

Ce chapitre présente les modèles utilisés pour la simulation de véhicules hybrides à pile à combustible. Ces modèles serviront à l'élaboration des stratégies
Modéliser consiste toujours à « trahir la réalité ». Dans le cas de la PAC, on peut aller de modèles décrivant les phénomènes électrochimiques /Benbouzid et al. 2004/ à des modèles purement énergétiques /Boettner et al. 2002/. Entre les deux on trouve des modèles avec des niveaux de granularité variés.
Les modèles de granularité fine de PAC, de batteries et de super condensateurs utilisent des équations de la chimie et de la physique /You and Liu 2006/ /Newman et al. 2003/. Les temps de calcul étant généralement très longs, ces modèles servent essentiellement à la compréhension des phénomènes physiques et à l'analyse du dimensionnement structurel des composants /Berning et Djilali 2003/ sur des durées de simulations très courtes.
Dans notre cas, l'estimation de la consommation de carburant est la donnée essentielle. Ce sont donc principalement des modèles quasi-statiques qui seront utilisés /Sciarretta et Guzzella 2007/. Cela revient à dire que les dynamiques considérées rapides sont négligées ; le modèle du véhicule obtenu est dit « énergétique ». En conclusion, seules les dynamiques du véhicule
Et de la source secondaire d'énergie sont prises en compte.

2.2. Principe de modélisation

Sur la base de modèles existants dans la littérature, un modèle de véhicule PAC hybride a été réalisé sous l'environnement logiciel MATLAB/Simulink. Le modèle complet du véhicule est composé d'un ensemble de sous-modèles relatifs aux différents organes du groupe motopropulseur et à la dynamique du véhicule. Les sous-modèles sont basés sur l'expression
Des flux énergétiques (figure 2-1) /Paganelli 1999/. A titre d'exemple, un moteur électrique permet de convertir une puissance électrique (courant et tension) en puissance mécanique (vitesse de rotation et couple).

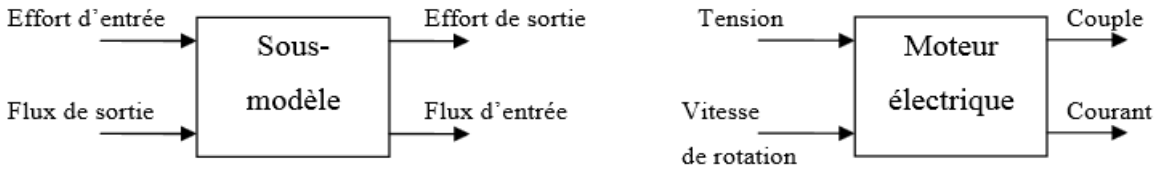


Figure 2-1 : Structure des sous-modèles (gauche) et exemple du moteur électrique (droite)

De manière évidente, les générateurs d'effort (batterie, pile à combustible) ou les récepteurs d'effort (véhicule) ne nécessitent qu'un seul signal en entrée et un seul signal en sortie, figure 2-2.

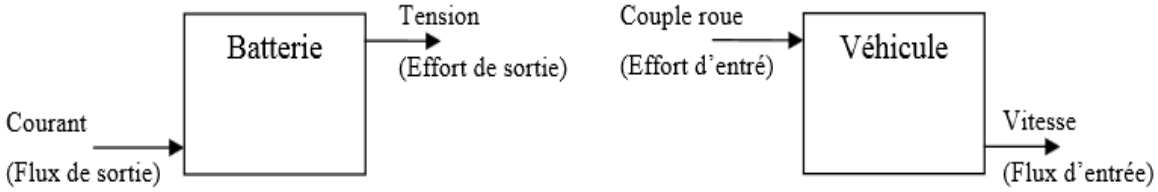


Figure 2-2 : Exemples de modèles à flux unique (batterie, à gauche, et véhicule, à droite)

2.3. Le système pile à combustible

On rappelle que les auxiliaires consomment une partie de la puissance électrique brute produite pour leur propre fonctionnement; ils induisent donc des Pertes de puissance qui affectent le rendement du système pile à combustible.

Les relations du modèle sont dans un premier temps exprimées en fonction de la densité de courant *i PAC* (A/cm²) pour une seule cellule ($N_{cell}=1$). De ce fait, les puissances et les consommations des réactifs (oxygène et hydrogène) sont calculés par unité de surface de membrane d'une cellule A_{cell} (cm²), et se réfèrent donc à des densités (densité de puissance, densité de consommation). Ceci permet une mise à l'échelle aisée afin de simuler des systèmes Pile à combustible de différentes puissances.

Les caractéristiques électriques d'un système pile à combustible dépendant des conditions d'utilisation (pression, température…), les conditions de fonctionnement retenues pour la simulation du modèle sont récapitulées dans le tableau 2-1.

Densité de courant maximale	$i_{PAC_{max}} = 1 A/cm^2$
Pression de fonctionnement	$2\,atm$
Température de fonctionnement	$80\,°C$
Humidité de la membrane	100%
Stoechiométrie de l'air	$\lambda_{air} = 2$
Consommation des auxiliaires	$p_{aux} = 1,05 \cdot p_{cmp}$, avec p_{cmp} la puissance du compresseur

Tableau 2-1 : Conditions de fonctionnement du système pile à combustible.

2.4. La batterie

Les phénomènes électrochimiques complexes intervenant dans une batterie rendent leur modélisation délicate. Des modèles détaillés existent /Newman et al. 2003/ et considèrent par exemple la concentration des réactifs ou encore l'influence de la température. Ces modèles très détaillés sont difficilement exploitables dans le contexte énergétique qui nous intéresse ici. D'autres types de modèles basés sur des schémas électriques équivalents (à base de générateurs de tension idéaux, de résistances, de condensateurs…) permettent de rendre compte plus ou moins fidèlement du comportement électrique de la batterie /Dürr et al. 2006/.
Des modèles basés sur les systèmes d'ordre fractionnaire existe également /Sabatier et al. 2006/.

Schéma électrique équivalent retenu ici est présenté à la figure 2-8. Il est composé d'un générateur de tension et d'une résistance en série /Johnson 2002/ /Mierlo et al. 2003/. La tension à vide *Ebatt* et la résistance interne en charge et en décharge de la batterie R_{batt} dépendent de l'état de charge *SOC* (« State Of Charge »).

L'état de charge *SOC* (State Of Charge) est estimé par intégration du courant :

$$C_{batt}(t) = C_{batt}(0) - \int_0^t \eta_f \left(SOC(u), sign\left(I_{batt}(u)\right)\right) \cdot I_{batt}(u) \cdot du \qquad (2.1)$$

$$SOC(t) = \frac{C_{batt}(t)}{C_{batt_{max}}} \qquad (2.2)$$

Par convention, une courante batterie positive contribue à la décharge de celle-ci, et un courant négatif contribue à sa recharge. Le rendement faradique *f*

η dans (2.1) traduit la quantité réelle de courant participant à la charge et à la décharge de la batterie. On admet ici que le rendement faradique vaut 1 en décharge ; en charge, ce rendement est inférieur à 1 et peut être considéré comme dépendant de l'état de charge /Paganelli 1999

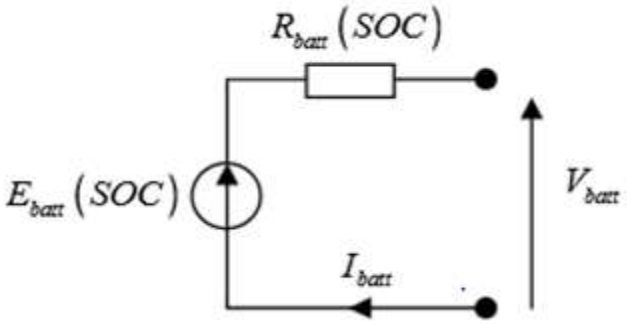


Figure 2-3 schémas électriques équivalents d'un élément de batterie

La tension de la batterie V_{batt} dépend de son état de charge *SOC* et du courant I_{batt} qui la traverse :

$$V_{batt}\left(SOC, I_{batt}\right) = E_{batt}\left(SOC\right) - R_{batt}\left(SOC, sign\left(I_{batt}\right)\right) \cdot I_{batt} \qquad (2.3)$$

$$R_{batt}\left(SOC, sign\left(I_{batt}\right)\right) = \begin{cases} R_{charge}(SOC) & si\ I_{batt} \le 0 \quad (Résistance\ en\ charge) \\ R_{décharge}(SOC) & si\ I_{batt} > 0 \quad (Résistance\ en\ décharge) \end{cases} \qquad (2.4)$$

L'équation (2.3) fournit la tension d'un élément de batterie. Pour un pack de batteries composé de N_{batt} éléments connectés en série, la tension totale est :

$$U_{batt}(SOC, I_{batt}) = V_{batt}(SOC, I_{batt}) \cdot N_{batt} \tag{2.5}$$

Dans le cadre des simulations réalisées, des batteries de type Ni-MH ont été retenues car il s'agit actuellement de la technologie la plus mature et la plus répandue dans le cadre d'utilisation aux véhicules électriques et hybrides /Beretta et Porcelatto 2003/ /Spotnitz 2005/. Les cartographies de tension à vide *batt*) et de résistance interne R_{batt} sont issues du logiciel Advisor /Advisor/ et correspondent à une cellule Ni-MH Ovonic de capacité nominale 28 $C_{battmax} = Ah$, de rendement faradique moyen

ηf =0.95 et de masse $M_{batt} = 0.72\ kg$. Le courant en charge et en décharge est limité à 250 A.

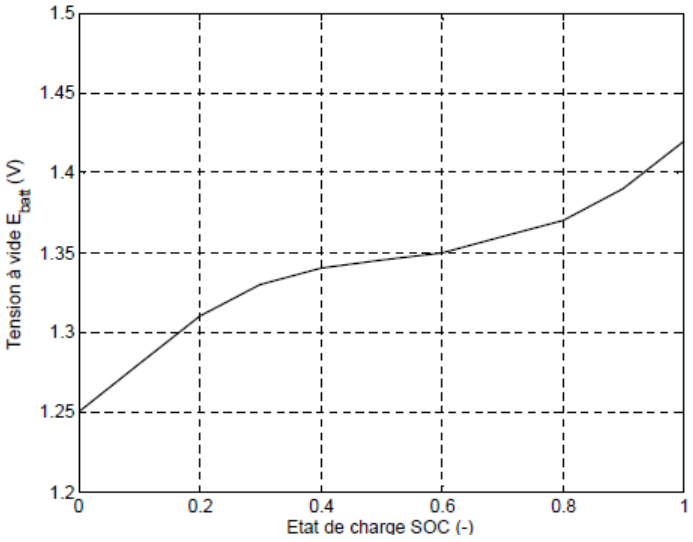


Figure 2-4 tension a vide d'un élément de battrie

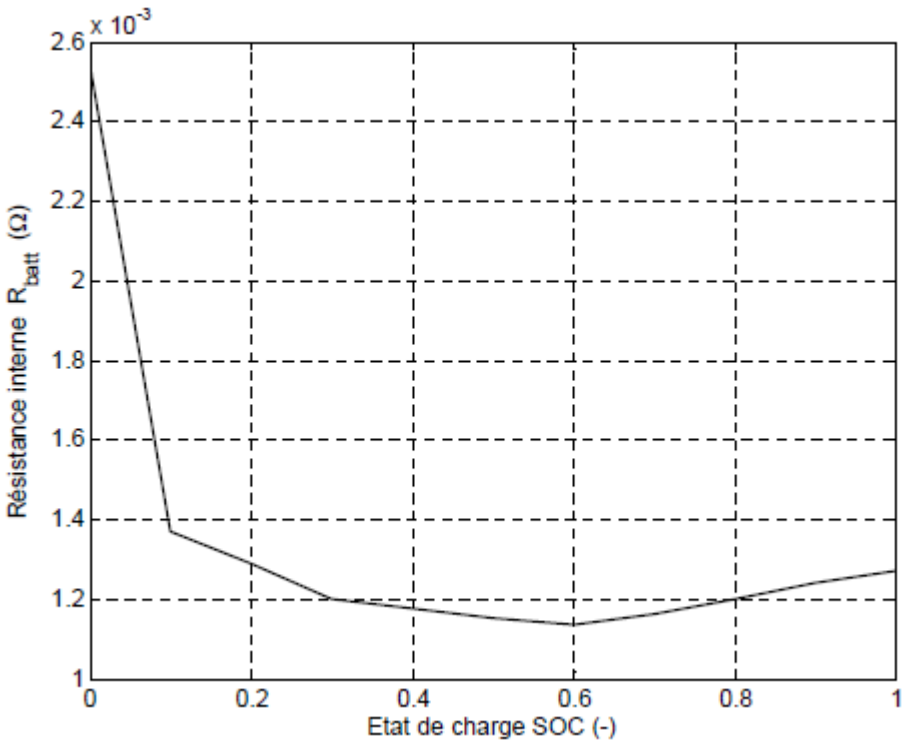


Figure 2-5 résistances internes d'un élément de batterie

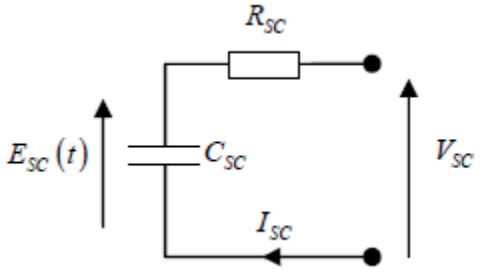
En fonction du taux d'hybridation voulu pour les véhicules hybrides (« Small hybrid » de type alterno-démarreur à « full hybrid »), des utilisations différentes de la batterie soconsidérer. Par exemple, lorsque le véhicule dispose d'une batterie de grande capacité (« full hybrid »), la stratégie de commande peut favoriser une décharge importante des batteries (on parle alors de stratégies à « charge depleting »). Pour des applications de type « Small ou mild hybrid » la capacité des batteries est généralement limitée. Les batteries sont alors considérées comme des tampons énergétiques. Dans ce cas, leur état de charge doit rester sensiblement constant autour d'une valeur donnée (stratégies à « charge sustaining »).

Dans la suite de nos travaux, c'est plutôt le deuxième cas qui sera considéré (stratégies à « charge sustaining »). Dans ce cas, il est évidemment capital de savoir, en fonction de la technologie de batterie utilisée, la plage d'état de charge présentant le meilleur compromis entre puissance disponible, rendement et durée de vie. Dans le cas de batteries Ni-MH, les consignes d'état de charge retenues dans la littérature se situent entre 50 % et 70 % /Pisu et

Rizzoni& 2005/ /Serrao et al. 2005/ /He et Yang 2006/ /Kuhn et al. 2004/. Un état de charge Moyen visé de 60 % a donc été retenu mais, dans le cadre d'une application réelle, l'utilisation Possible et souhaitable des batteries doit être déterminée avec le constructeur.

2.5. Les super condensateurs

Le modèle des super condensateurs est issu de /Barrade et Rufer 2004/ et se compose d'un condensateur idéal connecté en série avec une résistance (Figure 2-11). Un modèle similaire est proposé dans /Mierlo et al. 2003/. Les valeurs de la capacité du condensateur C_{SC} et de la résistance R_{SC} interne sont supposées constantes. La tension à vide E_{SC} du super condensateur Est l'image de son état de charge C_{SO}. Des modèles avec plusieurs « branches *RC* » et des valeurs de capacité fonction de la tension du super condensateur sont aussi proposés dans la littérature /Marie-Françoise et al. 2005/. Néanmoins, la précision supplémentaire apportée étant faible, leur utilisation n'est pas justifiée dans notre cas



2-6 : Schéma éléctrique équivalent d'un supercondonsateur

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

$$V_{SC}(E_{SC}, I_{SC}) = E_{SC} - R_{SC} \cdot I_{SC} \qquad (2.7)$$

Comme la batterie, le condensateur se comporte comme un intégrateur de courant. La tension à vide E_{SC} est calculée de la manière suivante :

$$E_{SC}(t) = E_{SC}(0) - \frac{1}{C_{SC}} \cdot \int_0^t I_{SC}(u) \cdot du \qquad (2.8)$$

L'énergie contenue dans le super condensateur X_{SC} est fonction de sa tension à vide E_{SC} . De ce fait, l'énergie maximale X_{SCmax} est obtenue pour la tension à vide maximale

$$X_{SC}(E_{SC}) = \frac{1}{2} \cdot C_{SC} \cdot {E_{SC}}^2 \tag{2.9}$$

Par définition, l'état de charge C_{SO} correspond au rapport entre l'énergie contenue dans le super condensateur et l'énergie maximale admissible :

$$SOC(t) = \frac{X_{SC}(t)}{X_{SC_{max}}} \tag{2.10}$$

Nb : Dans le cadre d'une application réelle, la tension à vide E_{SC} étant mesurable de manière fiable, il est relativement simple d'estimer $C_{SO}(t)$ à partir de (2.9).

Les constructeurs préconisent généralement d'utiliser les super condensateurs sur la moitié de leur plage de tension (entre 2 E_{SCmax} et E_{SCmax}), ce qui correspond à une utilisation de 75 % de l'énergie totale :

$$\Delta SOC_{max} = \frac{X_{SC_{max}} - X_{SC}\left(\frac{E_{SC_{max}}}{2}\right)}{X_{SC_{max}}} = \frac{X_{SC_{max}} - \frac{1}{2} \cdot C_{SC} \cdot \frac{{E_{SC_{max}}}^2}{4}}{X_{SC_{max}}} = \frac{X_{SC_{max}} - \frac{1}{4} \cdot X_{SC_{max}}}{X_{SC_{max}}} = 0,75 \tag{2.11}$$

De ce fait, lors de l'utilisation de super condensateur, il est souhaitable de veiller à limiter l'évolution de l'état de charge C_{SO} entre 25% et 100%.

Pour satisfaire aux besoins en puissance et en énergie d'une application donnée, un assemblage de plusieurs super condensateurs est utilisé. Lorsque N_{SC} super condensateurs sont connectés en série, la tension du pack U_{SC} et la capacité équivalente sont données par :

$$U_{SC}(E_{SC}, I_{SC}) = V_{SC}(E_{SC}, I_{SC}) \cdot N_{SC} \tag{2.12}$$

$$C_{SC}^{eq} = \frac{C_{SC}}{N_{SC}} \tag{2.13}$$

..4.4..Pour les simulations réalisées, des éléments de capacité 2600 $C_{SC} = F$, de tension maximale

$E_{SCmax} = 2.5V$, de résistance interne de $R_{SC} = 0.7m\Omega$ et de masse de M_{SC}=500 g ont été Utilisés ; le courant maximal (charge et décharge) est limité à 320A pour garantir un rendement énergétique minimal de 90% /Barrade et Rufer 2004/.

Le tableau 2-3 résume les caractéristiques principales des éléments de batterie et de supe condensateur.

2.6. Le véhicule et son groupe motopropulseur

La chaine de traction est décomposée en 4 sous-modèles : la machine électrique, l'ensemble réducteur/transmission, les roues et le véhicule (figure 2-6). L'ensemble des paramètres du véhicule retenu sont donnés dans le tableau 2-4.

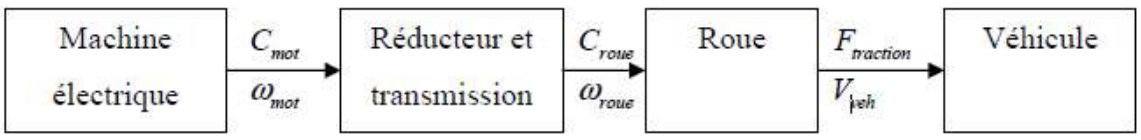


Figure 2-7:schéma de la chaine de traction

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

2.6.1. Le véhicule

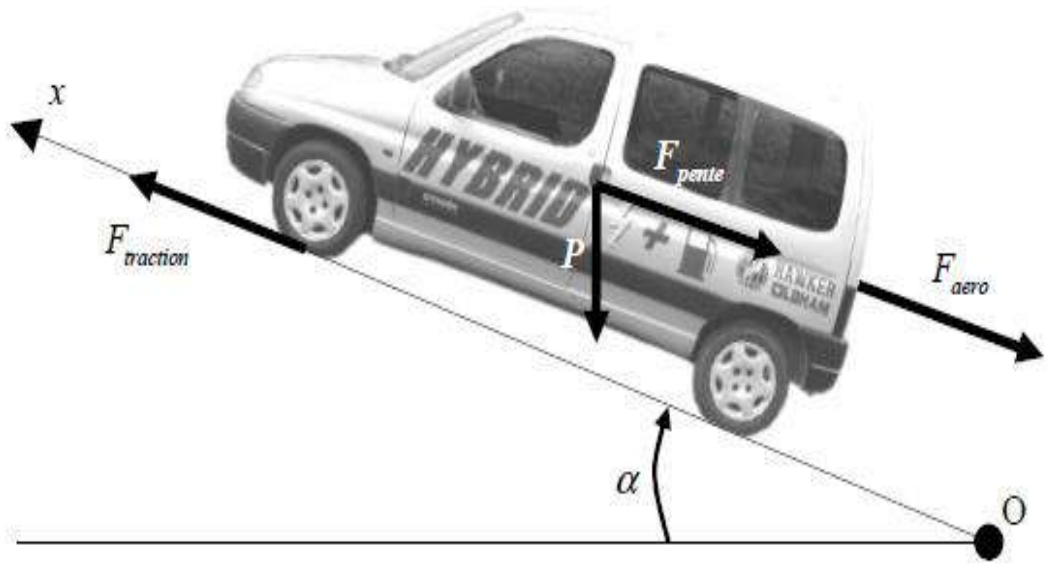


Figure 2-8 :Bilan des forces s'excrçant sur le véhicule

Le véhicule est considéré comme un solide ponctuel en déplacement soumis à 3 efforts selon l'axe longitudinal (*Ox*) , figure 2-7 :

1. L'effort de traction F résulte de l'action des roues motrices sur la chaussée ;
2. L'effort de résistance aérodynamique F_{aero} provient des frottements de l'air sur la Caisse :

$$F_{aero}(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot A_f \cdot C_x \cdot V_{veh}(t)^2 \qquad (2\text{–}14)$$

Avec *air* ρ la densité de l'air (kg/m3), *f A* la surface frontale (m²) et *x C* le coefficient de résistance aérodynamique (-).

3. La résistance de montée en F_{cote} pent est :

$$F_{pente}(t) = M_{veh} \cdot g \cdot \sin(\alpha(t)) \qquad (2\text{–}15)$$

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

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

$$M_{veh} \cdot \dot{V}_{veh}(t) = F_{traction}(t) - F_{aero}(t) - F_{pente}(t) \qquad (2\text{-}16)$$

La vitesse du véhicule s'obtient par intégration de (2.31):

$$M_{veh} \cdot \dot{V}_{veh}(t) = F_{traction}(t) - F_{aero}(t) - F_{pente}(t) \qquad (2\text{–}17)$$

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

$$V_{veh}(t) = \frac{1}{M_{veh}} \cdot \int_0^t \left(F_{traction}(u) - F_{aero}(u) - F_{pente}(u) \right) \cdot du \qquad \textbf{(2-18)}$$

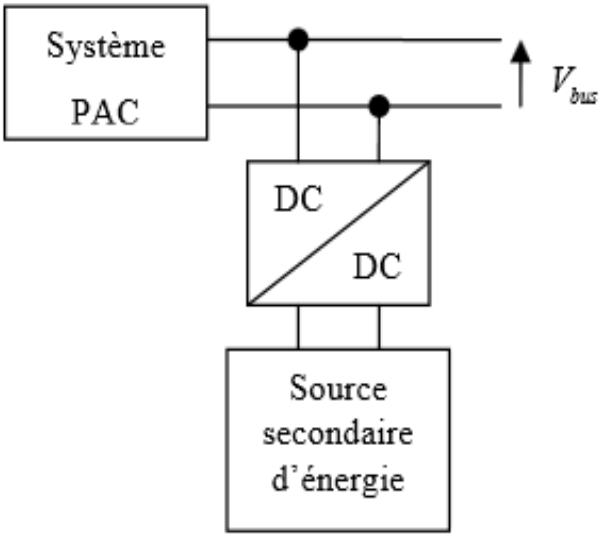
2.6.2. Architecture électrique du véhicule

Le véhicule comporte trois principaux organes électriques de puissance: La machine électrique, la source d'énergie secondaire et le système pile à combustible. Afin de connecter ces éléments sur un (ou plusieurs) bus, il est nécessaire de définir une architecture électrique.

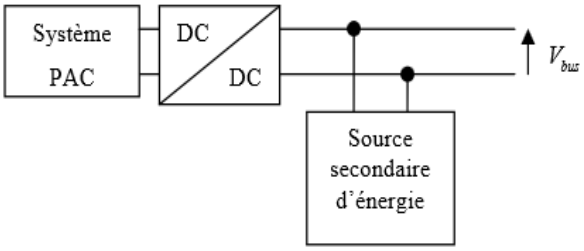
La machine électrique est systématiquement équipée d'un convertisseur pour permettre une commande en couple de celle-ci. Le convertisseur est réversible en puissance pour permettre de fournir l'énergie nécessaire lors des phases de traction et restituer l'énergie produite par la machine électrique lors des phases de freinage du véhicule.

Au niveau de la source de puissance, l'un des rôles principaux du ou des convertisseurs de Puissance est de contrôler la répartition de puissance entre le système PAC et la source secondaire d'énergie. De plus sa commande locale permet généralement de limiter le courant, la tension et/ou la puissance transmise de manière à assurer la sécurité des organes auquel il est relié. Principalement, trois architectures électriques hybrides sont considérées /Saisset et al. 2004/ :

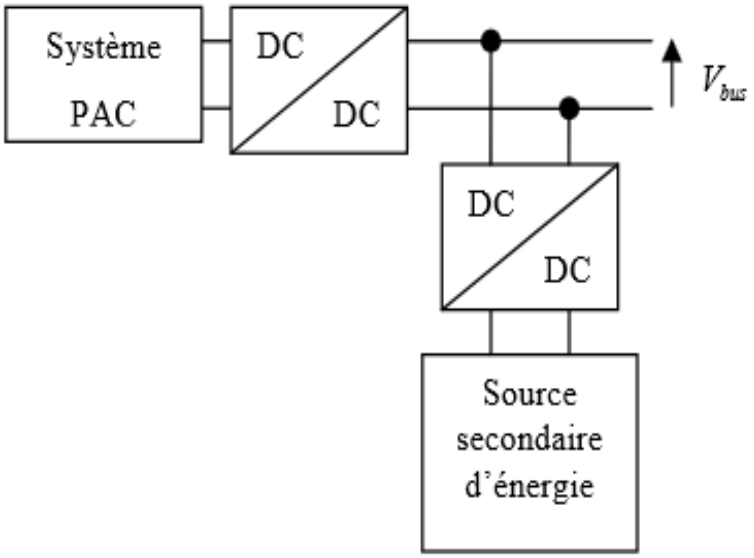
1. Le système PAC est connecté directement au bus électrique et lui impose sa tension. Un convertisseur DC/DC réversible en puissance est utilisé entre la source secondaire et le bus :



2. La source secondaire est connectée directement et impose sa tension au bus électrique. Un convertisseur DC/DC non-réversible en puissance est utilisé entre le système PAC et le bus :



3. le système PAC et la source secondaire sont connectées tout deux via des Convertisseurs DC/DC. Dans ce cas, la tension du bus peut être choisie librement (dans la plage de fonctionnements possibles des convertisseurs utilisés) :



L'utilisation d'un seul convertisseur au niveau de la source de puissance hybride (architectures n°1 et n°2 ci-dessus) présente des avantages et des inconvénients /Saisset et al. 2004/ :

- **Avantages :**
  - Les pertes sont réduites ;
  - L'architecture est simple à commander car il n'y a qu'un seul degré de liberté
  - Le coût de l'installation est réduit.

- **Inconvénient :**
  - Le composant connecté directement sur le bus de puissance ne possède pas de limitation en courant ce qui peut affecter la sécurité de l'installation.

L'utilisation d'un second convertisseur permet évidemment de remédier à ce problème.

Dans le cadre des simulations réalisées, une multitude de dimensionnements de la source de puissance hybride ont été considérés. L'architecture n°3 a été retenue car elle permet de s'adapter à tous les niveaux de tension et de courant (figure 2-16).

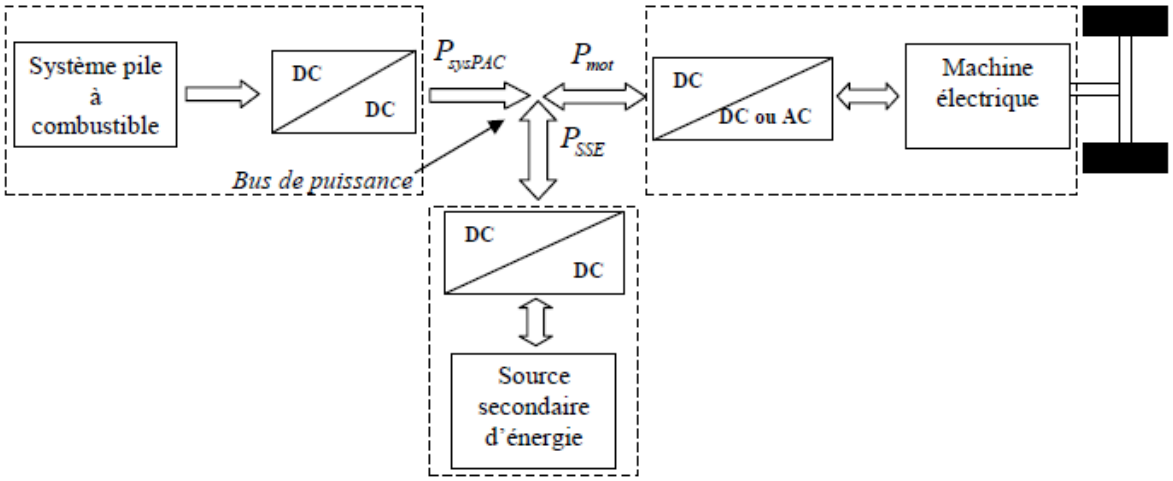


Figure2-9 : schéma de puissance du groupe motopropulseur

Pour des raisons de lisibilité et de commodité, les puissances P_{sysPAC} , P_{SSE} et P_{mot} se réfèrent aux flux énergétiques échangés au niveau du noud électrique (figure 2-9). La relation liant les trois puissances est donc :

$$P_{mot}(t) = P_{sysPAC}(t) + P_{SSE}(t) \qquad (2\text{–}19)$$

2.9. Conclusion

Un modèle de véhicule à pile à combustible hybride a été présenté. L'objectif était de disposer d'un modèle modulaire permettant de tester facilement différents dimensionnements de système pile à combustible et de source secondaire d'énergie. De plus, sa modularité permet de modéliser simple ment une architecture hybride comprenant des batteries ou des super condensateurs.
La source de puissance étant hybride, pour fournir une puissance donnée à la machine électrique, il est nécessaire de déterminer la répartition de puissance entre le système PAC et la source secondaire d'énergie. Les algorithmes utilisés s'appellent « stratégies de commande » et sont l'objet du prochain chapitre.

conclusion général :

Les travaux présentés dans ce mémoire ont porté sur l'utilisation de la pile à combustible dans le domaine de la traction automobile. Après un état de l'art dans le domaine des véhicules à PAC, il est apparu que l'hybridation du système pile à combustible était largement adoptée. En effet l'utilisation de batteries ou de suppercondensateur permet de relacher les contraintes imposées au système PAC et offre la possibilité de réduire la consommation d'hydrogéne.a partir de ces observation, la ligne directrice de cette thèse a reposé sur trois aspects étroitement liés avec une volonté permanente de confronter autant que possible les résultats théoriques à des exemples pratiques :

•la problématique du dimensionnement du système PAC et de la source secondaire d'énergie ;

•l'utilisation de batteries ou de super condensateurs en tant que source secondaire d'énergie.

References

/Ahluwalia et al. 2005/

R.K. Ahluwalia, X. Wang, A. Rousseau, *Fuel economy of hybrid fuel-cell vehicles*, Journal of Power Sources, Vol. 152, pp. 233-244, 2005.

/Ananthachar et Duffy 2005/

V. Ananthachar, J.J. Duffy, *Efficiencies of hydrogen storage systems onboard fuel cell Vehicles*, Journal of Solar Energy, Vol. 78 (5), pp. 687-694, Mai 2005.

/Barrade et Rufer 2004/

P. Barrade, A. Rufer, *The use of supercapacitors for energy storage in traction systems*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Paris, Octobre 2004.

/Benbouzid et al. 2004/

S. Benbouzid, G. Dauphin-Tanguy, F. Guillemard, C. Nouillant, *Electrochemical Phenomena Modelling in PEM Fuel Cell with Bond Graph Approach*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Paris, Octobre 2004.

/Beretta et Porcelatto 2003/

J. Beretta, D. Porcelatto, *Is the future of traction batteries will be the future of E*lectric Vehicle symposium (EVS20), Long Beach, Novembre 2003.

/Berning et Djilali 2003/

T. Berning, N. Djilali, *Three-dimensional computational analysis of transport phenomena in A PEM fuel cell-a parametric study*, Journal of Power Sources, Vol. 124, pages 440-452, 2003.

/Boettner et al. 2001/

D.D. Boettner, G. Paganelli, Y.G. Guezennec, G. Rizzoni, M.J. Moran, *Component power Sizing and limits of operation for proton exchange membrane (PEM) fuel cell/battery hybrid Automotive applications*, Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition , New York, November 2001.

[3]/Boettner et al. 2002/

D.D. Boettner, G. Paganelli, Y.G. Guezennec, G. Rizzoni, M.J. Moran, *Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell system for automotive vehicle simulation and control*, Journal of Energy Resources Technology (Transactions of the ASME), Vol. 124 (1), pp. 20-27, Mars 2002.

/Candusso 2002/

D. Candissons, *Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation D'un véhicule électrique,* Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.

/CEA 2004/

CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique), *L'hydrogène-Les nouvelles technologies de L'énergie,* Clefs CEA, Magazine numéros 50/51, hiver 2004/2005.

/Delprat 2002/

S. Delprat, *Évaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèle,* Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2002.

/Emadi et al. 2005/

A. Emadi, K. Rajashekara, S. Williamson, S. Lukic, *Topological Overview of Hybrid Electric And Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations*, IEEE Transaction On Vehicular Technology, Vol.54 (3), Mai 2005.

/Friedman et al. 1999/

D.J. Friedman, *Maximizing direct-hydrogen fuel cell vehicle efficiency - Is hybridization Necessary*, SAE Paper Numéro. 1999-01-0539, Society of Automotive Engineers, 1999.
1

/GAO 2005/

W. Gao, *Performance Comparison of a fuel cell battery hybrid powertrain and a fuel cell Ultracapacitor hybrid powertrain*, Transaction on Vehicular Technology, Vol. 54 (3), Mai 2005.

/Guezennec et al. 2003/

Y. Guezennec, T.Y Choi, G. Paganelli, G. Rizzoni, *Supervisory control of fuel cell vehicles And its link to overall system efficiency and low-level control requirements*, Proceedings of The American Control Conference 2003, Vol. 3, pages 2055-206 *mots* 1, Juin 2003.

/He et Yang 2006/

B. He, M. Yang, *Optimization-based energy management of series hybrid vehicles Considering transient behavior*, International Journal of Alternative Propulsion, Vol. 1 (1), 2006.

/Jeong et Oh 2002/

K.S. Jeong, B.S. Oh, *Fuel economy and life-cost analysis of a fuel cell hybrid vehicle*, Journal Of Power <Source, Vol. 105, pp. 58-65, 2002.

/Kim et Peng 2007/

M.J. Kim, H. Peng, *Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles*, Journal of Power Source, Vol. 165, pp. 819-832, 2007.

Lachaize 2004/

J. Lachaize , *Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction*, Thèse de doctorat, Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle, Institut National Polytechnique De Toulouse, 2004.

/Lin et al 2006/

C.C Lin, M.J Kim, H. Peng, *System-Level Model and Stochastic Optimal Control for a PEM Fuel Cell Hybrid Vehicle*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 128 (4), pp.878-890, Décembre 2006.

/Marie-Françoise et al. 2005/

J.N. Marie-Francoise, H. Gualous, R. Outbid, A. Berthon, *42 V Power Net with Super capacitor and battery for automotive application*, Journal of Power Sources, Vol. 143, Pages 275-283, 2005.

/Markel et al. 2003/

T. Markel, M. Zoloft , K.B. Wipke, A.A. Pesaram, *Energy storage requirements for hybrid Fuel cell vehicles*, Advanced Automotive Battery Conference, Nice, France, Juin 2003.

/Mierlo et al. 2003/

J. Van Mierlo, P. Van den Bossche, G. Maggetto, *Models of energy sources for EV and HEV: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators*, Journal of Power Sources, Vol. 128, pp. 76-89, 2004.

/Newman et al. 2003/

J. Newman, K.E. Thomas, H. Hafezi, D.R. Wheeler, *Modeling of lithium-ion batteries*, Journal of Power Sources, Vol. 119-121, pp. 838-843, 2003.

/Paganelli 1999/

G. Paganelli, *Conception et commande d'une chaine de traction pour véhicule hybride Parallèle thermique et électrique*, thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 1999.

/Pede et al. 2004/

G. Pede, A. Iacobazzi, S. Passerini, A. Bobbio, G. Botto, *FC vehicle hybridisation: an Affordable solution for an energy-efficient FC powered drive train*, Journal of Power Sources, Vol. 125, pp. 280-291, 2004.

/Pinard 2007/

M. Pinard, *Convertisseurs et Electronique de puissance-Commande, description et mise en Œuvre*, Édition Dunod, Collection L'Usine Nouvelle, ISBN 978-2-10-049674-7, 2007.

[2]./**Rodatz 2003/**

P. Rodatz, *Dynamics of the Polymer Electrolyte Fuel Cell: experiments and model-based Analysis*, thèse de doctorat, ETH Zürich, 2003.

/Rodatz et al. 2003/

P. Rodatz, G. Paganelli, A. Sciarretta, L. Guzzella, *Optimal power management of an Experimental fuel cell/super capacitor-powered hybrid vehicle*, Control Engineering Practice, Vol. 13, pp. 41-53, 2005.

/Rogg et al. 2003/

S. Rogg, M. Höglinger, E. Zwittig, C. Pfender, W. Kaiser, T. Heckenberger, *Cooling Modules for Vehicles with a Fuel Cell Drive*, Fuel Cells, Willey Interscience, Vol. 3 (3) , pp. 153-158, 2003.

/Ruge 2003/

M.D. Ruge, *Entwicklung eines flüssigkeitsgekühlten Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellenstapels mit einer Leistung Von 6,5 kW*, Thèse de doctorat, ETH Zürich, 2003.

/Sabatier et al. 2006/

J. Sabatier, M. Aoun, A. Oustaloup, G. Grégoire, F. Ragot, P. Roy, *Fractional system Identification for lead acid battery state of charge estimation*, Signal Processing, Vol. 86, pp. 2645-2657, 2006.

/Saïsset et al. 2004/

R. Saïsset, C. Turpin, S. Astier, J.M. Blaquière, *Electricity generation starting from a fuel Cell hybridised with a storage device*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Paris, Octobre 2004.

/Schell et al. 2005/

A. Schell, H. Peng , D. Tran, E. Samos, C.C Lin , M.J. Kim, *Modeling and control strategy*

Development for fuel cell electric vehicles, Annual Reviews in Control, Vol. 29, pp. 159-168, 2005.

[4]/Schneuwly et al. 2002/

A. Schneuwly, M. Bärtschi, V. Hermann, G. Sartorelli, R. Gallay, R. Koetz, *BOOSTCAP Double-Layer Capacitors for Peak Power Automotive Applications*, International Advance Automotive battery conference (AABC), Las Vegas , Février 2002.

/Sheffield et al. 2005/

N. Sheffield, H.T. Yap, C.M. Bingham, *Hybrid energy sources for electric and fuel cell Vehicle propulsion*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, September 2005.

/Sciarretta ET Guzzella 2007/

A. Sciarretta, L. Guzzella, *Control of Hybrid Electric Vehicles - A Survey of Optimal Energy-Management Strategies*, IEEE Control Systems Magazine, Vol. 27 (2), pp 60-70, 2007.

/Scordia 2004/

J. Scordia, *Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de mot lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides*, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2004.

/Serrao et al. 2005/

L. Serrao, Z. Chehab,Y. Guezennec, G. Rizzoni, *An Aging Model of Ni-MH Batteries for Hybrid Electric Vehicles*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, 2005.

/Soria et al. 2006/

M.L. Soria, F. Trinidada, J.M. Lacadenaa, A. Sáncheza, J. Valencianoa, *Advanced valve regulated*

Lead-acid batteries for hybrid vehicle applications, Journal of Power Sources, Vol. 168 (1), pp. 12-21 Mai 2007.

/Spotnitz 2005/

R. Spotnitz, *Advanced EV and HEV Batteries*, IEEE Vehicle and Power Propulsion Conference, Chicago, September 2005.

/Sugeno 1985/

M. Sugeno, *Industrial applications of fuzzy control*, Edition North-Holland, ISBN 0-444-87829-7, 1985.

/Suh et Stefanopoulou 2006/

K.W. Suh, A.G. Stefanopoulou, *Effects of Control Strategy and Calibration on Hybridization*

Level and Fuel Economy in Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle, SAE World Congress & Exhibition, Detroit, Avril 2006.

/Wipke et al. 2001/

K.B Wipke, T. Markel, D. Nelson, *Optimizing energy management strategy and degree of Hybridization for a hydrogen fuel cell SUV*, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, 2001.

/Wu et al. 2004/

Y. Wu, H. Gao, R. Sharma, *Optimal design for fuel cell and super capacitor hybrid electric Vehicle*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Paris, October 2004.

/You and Liu 2006/

L. You, H. Liu, *A two-phase flow and transport model for PEM fuel cells*, Journal of Power Sources, Vol. 155, pages 219–230, 2006.

/Zhou 2005/

L. Zhou, *Progress and problems in hydrogen storage methods*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 9 (4), pp. 395-408, Août 2005.

/Zolot et al. 2004/

M. Zolot, T. Markel, A.A. Pesaran, *Analysis of fuel cell vehicle hybridization and Implications for energy storage devices*, Advanced Automotive Battery Conference, San Fransisco, Juin 2004.

/Züttel 2003/

A. Züttel, *Materials for hydrogen storage*, Materials Today, Vol. 6 (9), pages 24-33, Septembre 2003.

Sites Internet

/Advisor/

Logiciel Advisor, *Advanced Vehicle Simulator*, logiciel de simulation de véhicule hybride du National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S Department of Energy, http://www.nrel.gov/.

/Axane/

Société Axane, *Typologie des piles à combustible*, 2005, http://www.axane.net/.

/Fuel Cell Today/

Fuel Cell Today, site d'actualité sur la pile à combustible, http://www.fuelcelltoday.com/.

PSA, *La pile à combustible - une énergie d'avenir*, Communiqué de presse 2006,

http://www.psa-peugeot-citroen.com/.

/SAE/

SAE (Society of automotive Engineer), *History of Fuel Cells*,

http://www.sae.org/technology/.