



**HAL**  
open science

# Conception d'un simulateur pour l'optimisation de la commande d'une plate-forme multi-sources représentant un véhicule électrique à hydrogène

Sébastien Legand

## ► To cite this version:

Sébastien Legand. Conception d'un simulateur pour l'optimisation de la commande d'une plate-forme multi-sources représentant un véhicule électrique à hydrogène. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2013. dumas-01132664

**HAL Id: dumas-01132664**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01132664>**

Submitted on 17 Mar 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS**

*PROVENCE ALPES COTE D'AZUR*

*CENTRE D'ENSEIGNEMENT D'AIX-EN-PROVENCE*

---

**MÉMOIRE**

Présenté en vue d'obtenir

**LE DIPLÔME D'INGENIEUR C.N.A.M**

spécialité

**SYSTEMES AUTOMATISES**

par

Sébastien LEGAND

---

**Conception d'un simulateur pour l'optimisation de la  
commande d'une plate-forme multi-sources  
représentant un véhicule électrique à hydrogène**

---

Soutenu le jeudi 23 Mai 2013

Président : M. Henri Bourlès

Jury : M. Alain Caffard

M. Frédéric Villecroze

M. Jean-Claude Carmona

M. Alain Gautier

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS**

*PROVENCE ALPES COTE D'AZUR*

*CENTRE D'ENSEIGNEMENT D'AIX-EN-PROVENCE*

---

**MÉMOIRE**

Présenté en vue d'obtenir

**LE DIPLÔME D'INGENIEUR C.N.A.M**

spécialité

**SYSTEMES AUTOMATISES**

par

Sébastien LEGAND

**Conception d'un simulateur pour l'optimisation de la  
commande d'une plate-forme multi-sources  
représentant un véhicule électrique à hydrogène**

---

La réalisation de ce mémoire a été effectuée au sein du laboratoire LSIS du CER Arts et Métiers ParisTech d'Aix-en-Provence, sous la direction de Monsieur Jean-Claude CARMONA.

## REMERCIEMENTS

Lors de la rédaction de ce mémoire, j'ai rencontré de nombreuses personnes avec qui j'ai pu travailler, échanger des idées et qui m'ont, d'une manière ou une autre, aidé à mener à bien ce projet.

Je tiens à remercier tout d'abord M. Jean-Claude CARMONA, Professeur des Universités, responsable du projet plate-forme multi-énergie pour m'avoir accueilli dans son équipe du CER Arts et Métiers ParisTech d'Aix-en-Provence.

Je tiens également à remercier tout particulièrement M. Julien GOMAND, Maître de Conférences, pour ses précieux conseils sur la rédaction et ses éclairages sur les systèmes hybrides et la représentation énergétique macroscopique.

Je remercie ensuite M. Philippe GRAS et M. Tino BUSSETA pour m'avoir hébergé au sein du laboratoire d'électrotechnique et de leur aide dans les diverses manipulations de la pile à combustible, sans oublier nos discussions passionnantes sur les énergies renouvelables.

Je remercie également tous les étudiants de l'équipe du LSIS, notamment Aymen SAHNOUN et Amir PIRAYESH pour leur accueil chaleureux et leur bonne humeur.

Enfin, je ne serais conclure cette lettre sans remercier mes anciens camarades de la Royale pour leurs nombreux encouragements ainsi que mon épouse et mes deux enfants pour leur patience et leur indéfectible soutien.

*A la mémoire de Jean-Luc Legand*

# Sommaire

REMERCIEMENTS .....	3
TABLE DES FIGURES.....	8
LISTE DES TABLEAUX.....	11
ABREVIATIONS.....	12
INTRODUCTION.....	13
1. PROBLEMATIQUE DE LA GESTION DE SYSTEMES MULTI-SOURCES.....	15
1.1. PRESENTATION DU CER ENSAM D’AIX-EN-PROVENCE .....	15
1.1.a. <i>Arts et Métiers ParisTech</i> .....	15
1.1.b. <i>Le laboratoire LSIS-INSM</i> .....	16
1.2. LES SYSTEMES ENERGETIQUES HYBRIDES .....	18
1.2.a. <i>Le défi énergétique</i> .....	18
1.2.b. <i>Les énergies nouvelles</i> .....	20
1.2.c. <i>L’hybridation de sources énergétiques</i> .....	21
1.3. LA PROBLEMATIQUE DE GESTION DE L’ENERGIE .....	23
1.3.a. <i>Contrôler les flux d’énergie</i> .....	23
1.3.b. <i>La gestion d’énergie : enjeux pour la recherche</i> .....	24
1.3.c. <i>Le sujet de recherche</i> .....	25
2. LA PLATE-FORME MULTI-SOURCES .....	27
2.1. CONTEXTE DE RECHERCHE AUTOUR DE LA PILE A COMBUSTIBLE .....	27
2.1.a. <i>Le marché mondial des piles à combustibles</i> .....	27
2.1.b. <i>Une politique européenne soutenue</i> .....	29
2.1.c. <i>Une position française fragile</i> .....	31
2.1.d. <i>La recherche française</i> .....	34
2.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	37
2.2.a. <i>Historique</i> .....	37
2.2.b. <i>Principe de fonctionnement</i> .....	37
2.2.c. <i>Caractéristiques électriques à vide</i> .....	40
2.2.d. <i>Caractéristique électrique en charge</i> .....	41
2.3. CONTRAINTES D’UTILISATION DE LA PILE A COMBUSTIBLE A MEMBRANE .....	44

2.3.a.	<i>Les piles à membrane polymère (PEMFC)</i> .....	44
2.3.b.	<i>Composition d'une cellule</i> .....	45
2.3.c.	<i>Le banc BAHIA</i> .....	47
2.3.d.	<i>Les contraintes d'utilisation</i> .....	48
2.3.e.	<i>Conséquences</i> .....	51
2.4.	LES DOMAINES APPLICATIFS PORTEURS .....	51
2.4.a.	<i>Éléments de décision</i> .....	51
2.4.b.	<i>Le domaine stationnaire de faible puissance</i> .....	52
2.4.c.	<i>Le domaine du transport : le véhicule électrique hydrogène VH</i> .....	53
2.4.d.	<i>Le véhicule électrique hybride à prolongateur d'autonomie</i> .....	54
2.4.e.	<i>Vers une application dédiée à l'automobile</i> .....	56
2.5.	STRUCTURE DE LA PLATE-FORME EXPERIMENTALE .....	56
2.5.a.	<i>Problématiques soulevées</i> .....	56
2.5.b.	<i>Les batteries</i> .....	57
2.5.c.	<i>Les supercondensateurs</i> .....	59
2.5.d.	<i>Le bus DC et les convertisseurs associés</i> .....	60
2.5.e.	<i>Structure adoptée pour la plate-forme expérimentale</i> .....	61
3.	MODELISATION ET COMMANDE DU GROUPE MOTOPROPULSEUR .....	62
3.1.	ETUDE MECANIQUE DU VEHICULE ELECTRIQUE HYDROGENE .....	62
3.1.a.	<i>Bilan des forces</i> .....	62
3.1.b.	<i>La chaîne de transmission</i> .....	66
3.1.c.	<i>La motorisation électrique</i> .....	68
3.2.	APPLICATION A UN VEHICULE LEGER URBAIN .....	70
3.2.a.	<i>Choix d'un véhicule</i> .....	70
3.2.b.	<i>Cahier des charges du véhicule</i> .....	72
3.2.c.	<i>Problématique de l'étude dynamique du véhicule</i> .....	73
3.2.d.	<i>Couple et puissance moteur mis en jeu</i> .....	74
3.3.	DE L'ORGANISATION DU MODELE A LA COMMANDE .....	77
3.3.a.	<i>Quel outil de modélisation ?</i> .....	77
3.3.b.	<i>La Représentation Energétique Macroscopique</i> .....	77
3.3.c.	<i>Principe de la commande par inversion</i> .....	80

3.4.	MODELISATION ET REM DU GMP .....	81
3.4.a.	<i>Présentation du problème et hypothèses</i> .....	81
3.4.b.	<i>REM du groupe motopropulseur</i> .....	82
3.5.	LA COMMANDE DU GMP .....	84
3.5.a.	<i>Cas de la commande du véhicule par le conducteur</i> .....	84
3.5.b.	<i>Structure maximale de commande</i> .....	85
4.	SIMULATEUR DU GMP D'UN VEHICULE HYDROGENE .....	90
4.1.	SIMULATION HARDWARE IN THE LOOP .....	90
4.1.a.	<i>Plateforme de test</i> .....	90
4.1.b.	<i>Principe de la simulation Hardware in the Loop (HIL)</i> .....	92
4.1.c.	<i>Mise à l'échelle du banc</i> .....	95
4.2.	STRUCTURE DU SIMULATEUR.....	97
4.2.a.	<i>Le simulateur de plate-forme multi-sources</i> .....	97
4.2.b.	<i>La problématique de l'inertie du véhicule transposée au banc</i> .....	97
4.2.c.	<i>La commande en couple du moteur de charge</i> .....	98
4.2.d.	<i>Structure complète du simulateur</i> .....	98
5.	GESTION DE PROJET .....	100
5.1.	DEFINIR LE PROJET .....	100
5.1.a.	<i>Contexte du projet</i> .....	100
5.1.b.	<i>Le projet initial avec la société Solairemed</i> .....	100
5.1.c.	<i>Crise économique et répercussions</i> .....	102
5.2.	REORIENTER LE PROJET .....	102
5.2.a.	<i>Mesurer l'impact économique de la technologie hydrogène</i> .....	102
5.2.b.	<i>Choisir un support applicatif pérenne pour le projet</i> .....	103
5.3.	ORGANISER LE PROJET .....	104
5.3.a.	<i>L'équipe projet</i> .....	104
5.3.b.	<i>Différentes approches projet</i> .....	105
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	108
	ANNEXE A.....	110
	ANNEXE B. ....	118

ANNEXE C.....	121
BIBLIOGRAPHIE .....	123

## TABLE DES FIGURES

Figure 1 - Pôles et sous-projets associés du LSIS.....	16
Figure 2 - Cotations moyennes annuelles du Brent daté exprimée en dollars et en euros courant.....	18
Figure 3 - Synoptique de la plate-forme Myrte [2].....	22
Figure 4 - Différents régimes de fonctionnement d'un électro-générateur constitué d'une pile à hydrogène et de supercondensateurs .....	23
Figure 5 - Répartition des activités soutenues par le FCH_JU européen (FC&H - JU, 2011).....	30
Figure 6 - Piliers de développement pour la filière hydrogène éditée par l'ADEME dans sa feuille de route stratégique (ADEME – 2011).....	31
Figure 7 - Renault Kangoo Electrique ZE et la pile à combustible conçue par Symbio Fcell (Renault – 2012) .....	33
Figure 8 - plate-forme test de pile à combustible P<1Kw (FC Lab – 2012).....	36
Figure 9 - Schéma de la réaction globale d'une pile à combustible.....	38
Figure 10 - Zone de triple contact.....	39
Figure 11- Caractéristiques tension courant d'une pile à combustibles avec les pertes associées .....	42
Figure 12 - Caractéristique tension courant en fonction de la température et à 1,5b de pression (Technique de l'ingénieur, R. Mosdale 2003).....	43
Figure 13 - Caractéristique tension courant en fonction des pressions de gaz et à T=80°C (Technique de l'ingénieur, R. Mosdale 2003).....	43
Figure 14 - Structure sandwich d'une cellule d'une pile type PEMFC .....	44
Figure 15 - Conductivité d'une membrane Nafion™ N-117 suivant le taux d'humidité (DuPont) .....	45
Figure 16 - plaque bipolaire (g) et membrane MEA avec la couche de diffusion des gaz (d).....	46
Figure 17 - Banc Bahia (société Héliion) et vue du stack.....	47
Figure 18 - Structure de la plate-forme d'essai générateur électrique hybride	53

Figure 19 - Structure potentielle de la plate-forme d'essais véhicule à hydrogène.....	54
Figure 20 - Structure potentielle de la plate-forme d'essais véhicule électrique range extender.....	55
Figure 21 - Principe de fonctionnement d'une cellule de batterie [11].....	57
Figure 22 - principe de fonctionnement d'un supercondensateur (INSA Lyon - 2011).....	59
Figure 23 - Représentation des forces de résistance et de traction exercées sur un véhicule en mouvement.....	63
Figure 24 - Répartition des contraintes sur la zone de contact d'une roue suivant son profil de dureté (a) route asphalte (b) sol mou [12] .....	64
Figure 25 - Liste de valeurs du coefficient de roulement $K_r$ selon le type de véhicule et la nature du terrain [12] .....	64
Figure 26 - Schéma de la transmission d'un véhicule .....	67
Figure 27 - Caractéristique couple vitesse du moteur et la caractéristique couple résistant selon la pente pour le moteur électrique (a) et à combustion interne et sa boîte de vitesse étagée (b). [12] .....	70
Figure 28 - Liste des principaux véhicules à hydrogène développés jusqu'en 2010 .....	72
Figure 29 - Profil de vitesse et d'accélération du cycle ECE-15.....	74
Figure 30 - Courbes de puissance (haut) et de couple (bas) du moteur sur cycle ECE-15.....	76
Figure 31 - Structure de commande par inversion d'un élément d'accumulation [16] .....	80
Figure 32 - Structure de la commande moteur électrique d'un véhicule.....	85
Figure 33 - Structure de commande maximale de commande du groupe motopropulseur .....	89
Figure 34 - Représentation Energétique Macroscopique de la plate-forme multi-sources.....	90

Figure 35 - Synoptique de la future plate-forme d'expérimentation.....	91
Figure 36 - Simulation Hardware In the Loop groupe motopropulseur.....	93
Figure 37 - Synoptique du simulateur HIL pour le groupe GMP .....	94
Figure 38 - graphique comparatif des couples (haut) et puissances (bas) véhicule réel et maquette.....	96
Figure 39 - Représentation REM du couplage moteur - génératrice DC.....	98
Figure 40 - Structure du simulateur HIL pour groupe motopropulseur.....	99
Figure 41 – Synoptique du Hybrid Power Center de la société Solairemed ...	101

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I - Consommation finale d'énergie en Mtep, par secteur (corrigée des variations climatiques).....	19
Tableau II - Production totale brute d'électricité en TWh.....	20
Tableau III - Volume des ventes de PaC en nombre et en puissance (Fuel Cell Today 2012).....	27
Tableau IV - Répartition des livraisons de piles et bilan de puissance par continent (Fuel Cell Today, 2012).....	28
Tableau V - Volume des ventes et de puissance par type de technologie (Fuel Cell Today, 2012) .....	29
Tableau VI - Répartition budgétaire des fonds par application (à g.) et par type d'activité (à d.) (FC&H - JU, 2011).....	30
Tableau VII- Courbe d'évolution de la température sur une montée en puissance.....	49
Tableau VIII - Courbe des effets d'engorgement des membranes suivie d'une purge d'eau - banc Bahia .....	50
Tableau IX - Caractéristiques des différentes technologies de batteries [11] ....	58
Tableau X - Caractéristiques des moteurs courant continu LEM 130 95 et 95S .....	95

## ABREVIATIONS

ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie
AFC	Alkaline Fuel Cell
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
DEFC	Direct Methanol Fuel Cell
ENSAM	Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
FCH-JU	Fuel Cell & Hydrogen Joint Undertaking
GDL	Gas Diffusion Layer
GMP	Groupe Motopropulseur
INSM	Ingénierie Numérique des Systèmes Mécaniques
LITEN	Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles
LSIS	Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes
L2EP	Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PTFE	Polytrétrafluoroéthylène
REM	Représentation Energétique Macroscopique
SOFC	Solid Oxyd Fuel Cell
VEH	Véhicule Electriques Hybride
VH	Véhicule à Hydrogène

## INTRODUCTION

Le contexte actuel de crise économique, ne doit pas occulter le fait qu'il reste encore de vastes champs techniques à explorer, sources de croissance et d'amélioration du niveau de vie de nos sociétés. L'enjeu que représente la diversification des approvisionnements en énergies pour nos sociétés, trop grandes consommatrices d'énergies fossiles, constitue un défi technologique de taille. Des progrès ont été réalisés notamment dans le domaine photovoltaïque mais à l'image de la technologie hydrogène, cela reste marginal. L'hybridation de différentes sources d'énergie pourrait mieux répondre à certaines attentes du monde industriel que l'usage d'un seul mode d'énergie.

Dans ce contexte, le laboratoire LSIS du CER Arts et Métiers ParisTech d'Aix-en-Provence s'est lancé dans l'étude d'un projet visant à l'amélioration des algorithmes en charge de la gestion d'énergie sur une plate-forme multi-sources et dotée d'une pile à combustible. Ce mémoire présente une partie de ces travaux au travers de la problématique des systèmes multi-énergie sur lequel s'appuie ce projet ainsi que la réalisation d'un outil de simulation orienté vers l'automobile.

Dans la première partie, nous nous attacherons à montrer les liens qui unissent le projet de gestion d'énergie multi-source avec les objectifs du laboratoire LSIS dont les thématiques de recherche seront présentées.

La deuxième partie montrera la constitution de la plate-forme multi-énergie, avec une mise en relief particulière de la technologie pile à combustible aussi bien dans un contexte économique que scientifique. Nous montrerons aussi les limites actuelles, rencontrées sur les piles à membranes échangeuses de protons, qui nous amèneront vers un domaine d'application porteur et le choix d'une structure d'hybridation adaptée.

La troisième partie se focalisera sur l'étude du groupe motopropulseur d'un véhicule électrique dont la source sera notre future plate-forme multi-sources. Après un bilan des forces, qui aidera à dimensionner le moteur comme le véhicule, nous réaliserons une modélisation avec l'aide d'un nouvel outil de représentation

systemique appelé Représentation Energétique Macroscopique (REM). Cette modélisation sera complétée par une structure de commande par inversion issue directement du schéma REM du groupe moteur.

La quatrième partie sera centrée sur le principe d'une simulation dite Hardware In the Loop (HIL). Elle permettra, depuis une génératrice attelée au moteur, de générer un profil de couple résistif identique à celui produit par le déplacement du véhicule. Nous mettrons en lumière les problématiques d'inertie et de mise à l'échelle d'un tel montage.

Enfin, la dernière partie abordera le déroulement du projet au cours de ces six mois de stage dans un contexte économique très perturbant et l'obligation de concilier les attendus en matière de recherche au sein d'un projet dont la vocation industrielle reste très importante.

## 1. PROBLEMATIQUE DE LA GESTION DE SYSTEMES MULTI-SOURCES

### 1.1. PRESENTATION DU CER ENSAM D'AIX-EN-PROVENCE

#### 1.1.a. Arts et Métiers ParisTech

J'ai effectué mon stage de fin d'études au sein du CER ENSAM d'Aix-en-Provence dans le cadre d'un dispositif spécifique de reconversion lié à mon statut antérieur de militaire professionnel. L'Ecole National Supérieur d'Arts et Métiers est une grande école d'ingénieur, créée en 1780 par le duc de la Rochefoucauld Liancourt et formant près de 1100 ingénieurs chaque année sur ses différents sites d'implantation. En effet, cette école est répartie sur l'ensemble du territoire français avec 8 Centres d'Enseignement et de Recherche CER (Aix, Bordeaux, Chalons en Champagne, Paris, Cluny, Lille, Anger et Metz) et 3 instituts (Chalon-sur-Saône, Chambéry et Bastia), qui forment depuis 2007, l'ossature de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech, membre fondateur des Pôles de Recherche et d'Enseignement Supérieur (PRES) *ParisTech* et Hautes Etudes Sorbonne Arts et Métiers (*HESAM*).

L'école assure la formation d'ingénieurs généralistes dans les domaines du génie mécanique, du génie industriel et du génie énergétique ainsi que par le biais de la formation continue, dans le cadre du dispositif Fontanet. Elle coopère avec d'autres écoles (grandes écoles, ITII et CNAM) et propose aussi des formations supérieures spécialisées notamment :

- 2 Masters de recherche avec une vingtaine de spécialité,
- 20 Masters spécialisés.

La recherche occupe une grande place au sein d'Arts et Métier ParisTech, avec pas moins de 17 laboratoires et 2 écoles doctorales dans 3 domaines principaux :

- Mécanique, matériaux, procédés M2P ;

- Fluides et systèmes énergétiques FISE ;
- Conception, industrialisation, risque, décision CIRD.

Avec 7 autres laboratoires (Université de Bourgogne, Centrale Lille,...), ils forment le pôle **ARTS** pour **A**ction de **R**echerche pour la **T**echnologie et la **S**ociété, destiné à favoriser la recherche partenariale entre les laboratoires publics et les entreprises. Celui-ci a reçu le label *Institut Carnot* du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche pour une période de cinq ans (2011-2015). Le CER d'Aix-en-Provence abrite ainsi deux laboratoires : le **MSMP** (**M**echanics, **S**urfaces & **M**aterials **P**rocessing) et le **LSIS-INSM** avec lequel je collabore dans le cadre du projet présenté dans ce mémoire.

#### 1.1.b. Le laboratoire LSIS-INSM

Le Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes **LSIS**, a été créé en 2002, en regroupant les différentes équipes de recherche issues des universités d'Aix-Marseille, de l'ENSAM d'Aix-en-Provence et de Lille, du CNRS-INSII ainsi que récemment de l'Université USTV de Toulon. Il fédère aujourd'hui plus de deux cents chercheurs et doctorants, tout en recrutant régulièrement des ingénieurs et des techniciens dans le cadre de ses travaux. Les activités de recherche concernent les domaines de l'informatique, de l'automatique et de l'image, chacun formant un pôle (Figure 1).

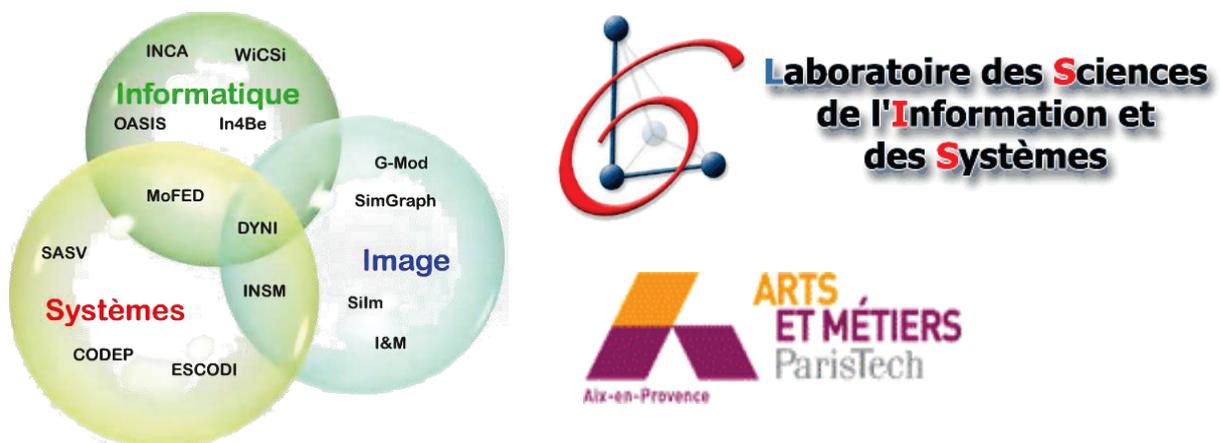


Figure 1 - Pôles et sous-projets associés du LSIS

Le CER ENSAM d'Aix-en-Provence est impliqué dans le projet d'Ingénierie Numérique des Systèmes Mécaniques INSM. Il a pour but de contribuer à la maîtrise des processus de développement de produits et des informations associées tout au long de leurs cycles de vie. Il s'agit d'améliorer in-fine les performances et la compétitivité des produits (ou systèmes) mécaniques (complexes). Trois niveaux de recherche ont été fixés :

- Le niveau « expertise métier » centrée sur l'amélioration des connaissances relatives au cycle de vie d'un produit permettant une approche plus proactive dans la conception ;
- Le niveau « prototypage virtuel et maquette numérique » pour une amélioration dans les choix de la représentation la plus adaptée à la maquette numérique dans un processus de prise de décision ;
- Le niveau « prototypage physique » grâce à l'identification et la validation des modèles proposés et les méthodes d'analyse et de commande associées.

Le comité de pilotage du projet INSM a ainsi identifié plusieurs verrous techniques et scientifiques dont :

- La maîtrise des phénomènes multi-physiques couplés lors du choix des architectures de produits dans les phases amont de conception ;
- La validation des modèles de comportements multi-physiques et dynamiques par des expérimentations physiques.

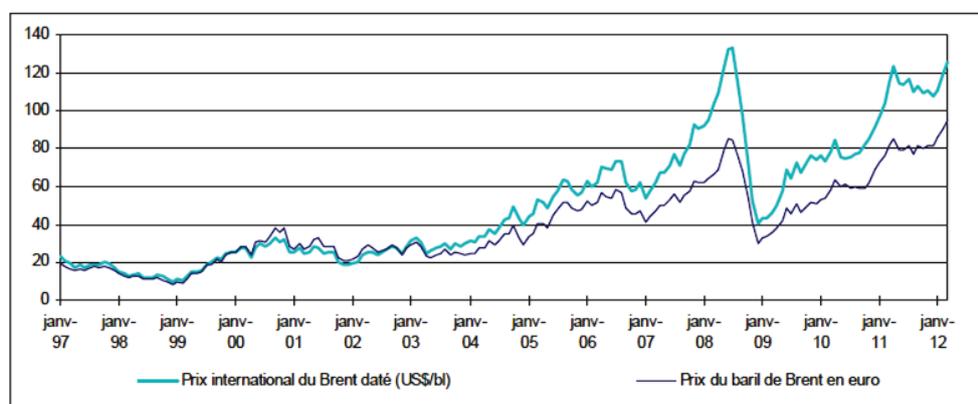
C'est donc en parfaite adéquation avec ces objectifs globaux de recherche que le laboratoire a engagé des travaux sur les systèmes énergétiques hybrides aidé en cela par la création d'une chaire d'enseignement dédiée aux énergies renouvelables (FISE Fluide et Systèmes Energétiques) à l'ENSAM d'Aix-en-Provence.

## 1.2. LES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES HYBRIDES

### 1.2.a. Le défi énergétique

Le défi énergétique s'affiche partout; sur les couvertures des magazines, dans les programmes politiques mais aussi pour les entreprises du secteur ou qui souhaitent simplement alléger leurs factures énergétiques. C'est le grand défi scientifique et technique des prochaines années, car on le sait trop bien, nos sociétés occidentales nécessitent des apports en électricité et en carburant très importants pour fonctionner correctement. Les hausses des prix de l'énergie ou le black-out géant de la Californie en septembre 2011 ont montré l'impact de cette problématique sur notre quotidien.

Le débat avait été lancé, notamment en Europe, à la suite des chocs pétroliers de 1973 et 1979, qui avaient incités les gouvernements occidentaux à lancer des programmes de recherche pour réduire la facture énergétique. La France décida ainsi de se doter d'un important parc de centrales nucléaires pour assurer pleinement sa production nationale d'électricité. Mais la fragilité de nos approvisionnements en pétrole, lors des crises Iran-Irak 1988 puis de la guerre du golfe en 1990-1991, conjugués à la diminution des réserves, ont montré notre dépendance aux ressources pétrolières. Les variations du prix des carburants ont souvent mises à mal les politiques économiques et fragilisées nos industries avec l'alourdissement de leurs factures énergétiques (Figure 2) [1].



Source : Reuters/Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC)

Figure 2 - Cotations moyennes annuelles du Brent daté exprimée en dollars et en euros courant

Ainsi au début des années 2000, le débat reprend avec la prise de conscience des effets des rejets carbonés dans l'atmosphère et le souhait de les voir diminuer dans les prochaines décennies, avec un objectif de -5.2% entre 2008-2012, affirmé lors de la signature du protocole de Kyoto (signé en 1997 et entré en vigueur en 2005). Dès lors, les pays occidentaux avec notamment les européens, décident d'intégrer la problématique énergétique dans l'ensemble des processus industriels et dans leurs politiques de développement (Tableau I). Cela s'est traduit en France par diverses actions, dont les plus notables sont :

- Une réduction de la consommation d'énergie chez les particuliers (campagnes publicitaire) et les professionnels (réductions de la facture énergétique dans les processus de fabrication),
- La mise sur le marché de véhicule moteurs avec des consommations de carburant de plus en plus réduite,
- Une politique de diversification de la production d'électricité via les énergies dites renouvelables, essentiellement d'origine photovoltaïque et éolienne,
- Le développement d'une filière industrielle autour des grands acteurs étatiques et régionaux (Ministère de l'Environnement, Pôles de compétitivité, ...).

*Tableau I - Consommation finale d'énergie en Mtep, par secteur (corrigée des variations climatiques)*

	1973	1990	2002	2009	2010	2011	Variation annuelle moyenne (en %)				
							Entre 1973 et 1990	Entre 1990 et 2002	Entre 2002 et 2009	Entre 2009 et 2010	Entre 2010 et 2011
Consommation finale énergétique											
Résidentiel-tertiaire	56,2	57,7	67,7	69,0	68,0	68,5	0,2	1,3	0,3	-1,5	0,9
<i>dont résidentiel</i>	nd	nd	nd	50,4	49,9	50,2	nd	nd	nd	-1,0	0,6
<i>dont tertiaire</i>	nd	nd	nd	18,6	18,1	18,4	nd	nd	nd	-2,5	1,6
Transports	25,9	40,8	50,0	49,2	49,3	50,0	2,7	1,7	-0,2	0,2	1,5
Industrie	47,9	38,2	38,7	33,0	34,0	32,8	-1,3	0,1	-2,2	2,9	-3,4
<i>dont sidérurgie</i>	12,5	7,0	6,1	4,2	5,1	4,9	-3,4	-1,1	-5,4	21,8	-2,7
Agriculture	3,6	4,0	4,4	4,4	4,3	4,2	0,5	0,9	0,0	-4,2	-1,1
Total consommation finale énergétique	133,6	140,7	160,9	155,6	155,4	155,6	0,3	1,1	-0,5	-0,1	0,1
Consommation finale non énergétique	10,9	12,4	14,3	12,1	12,0	12,6	0,8	1,2	-2,3	-0,8	4,4
Consommation finale	144,6	153,1	175,1	167,7	167,5	168,1	0,3	1,1	-0,6	-0,1	0,4

Source : SOeS, bilan de l'énergie 2011

## 1.2.b. Les énergies nouvelles

Les énergies dites renouvelables prennent, à partir de 2002, une part de plus en plus importante dans la production d'électricité de notre pays (Tableau II). Au côté des centrales hydrauliques qui occupent entre 9 et 12% de la production annuelle (variation du fait des années de sécheresse comme en 2011), la part de l'éolien dans la production annuelle progresse à près de 2.2% en 2011 tandis que le photovoltaïque triple sa part, pour atteindre un seuil plus modeste de 0.4% sur la même période. Cette augmentation est soutenue par les pouvoirs publics alors que l'Union Européenne, s'est donnée comme ambition d'atteindre le seuil de 20% d'énergie renouvelables produite par an, en 2020 [1].

Tableau II - Production totale brute d'électricité en TWh

	1973	1990	2002	2009	2010	2011	Taux de croissance annuel par an (en %)				
							Entre 1973 et 1990	Entre 1990 et 2002	Entre 2002 et 2009	Entre 2009 et 2010	Entre 2010 et 2011
Thermique classique	119,5	48,2	55,7	58,8	62,8	55,1	5,2	1,2	5,6	6,8	- 12,3
Nucléaire	14,8	313,7	436,8	409,7	428,5	442,4	19,7	2,8	- 6,2	4,6	3,2
Hydraulique	48,1	58,3	66,4	62,4	67,7	50,7	1,1	1,1	- 6,0	8,5	25,1
Éolien	-	-	0,3	7,9	9,9	12,2	-	-	2 533,3	25,3	23,2
Photovoltaïque	-	-	-	0,2	0,6	2,0	-	-	-	278,0	225,8
<b>Total</b>	<b>182,4</b>	<b>420,2</b>	<b>558,9</b>	<b>539,0</b>	<b>569,5</b>	<b>562,4</b>	5,0	2,4	- 3,6	5,7	- 1,2
dont électricité primaire	62,9	372,0	503,2	480,2	506,7	507,3	11,0	2,5	- 4,6	5,5	0,1

Source : SOeS, bilan de l'énergie 2011

Néanmoins, la majeure partie de ces nouvelles énergies proviennent des sources photovoltaïques et éoliennes qui sont soumises aux aléas de la météorologie. A la dispersion géographique de ces unités de production, s'ajoute aussi une incertitude sur leurs capacités de production prévisible à moyen terme. La gestion de la production, historiquement déduite de l'analyse de la consommation, année après année et corrigée des aléas climatiques, devient donc plus difficile. Une gestion de proximité, et non centralisée comme aujourd'hui, tend à s'imposer de manière à mieux intégrer les caractéristiques des énergies renouvelables.

Afin d'accroître la part de ces installations dans la production, les acteurs de la filière énergétique ont ainsi misé sur l'amélioration du rendement de ces

équipements. On peut citer les travaux sur l'accroissement des plages de production des éoliennes au regard des vitesses de vents ou bien la composition interne des panneaux solaires et les systèmes appelés Maximum Power Point Tracking MPPT.

Une autre piste fut de disposer de réservoirs tampon pour lisser la production à l'image des systèmes photovoltaïques couplés à un équipement onduleur / batterie. Néanmoins le stockage, à grande échelle de l'énergie électrique, est aujourd'hui hors de portée et la seule solution est de stocker l'énergie primaire servant à sa production comme la régulation des niveaux des lacs aux abords des centrales hydro-électriques.

### 1.2.c. L'hybridation de sources énergétiques

Devant les progrès enregistrés séparément par les divers modes de productions renouvelables ou plus écologiques, des projets de recherche ont été menés dès les années 80 afin d'interconnecter ces entités au sein d'un seul système. Ce fut les débuts de ce que l'on appelle aujourd'hui l'hybridation énergétique et qui a connu ces dernières années une progression importante notamment dans le secteur automobile. L'idée d'interconnecter ces différentes sources permet de palier à une partie des défauts intrinsèques de chacune d'entre elles et parfois d'y ajouter des composants de stockage ou de tampon ce qui rend le système globalement plus efficient.

Si on parle souvent de l'industrie automobile, avec le succès commerciale de la Toyota Prius et aujourd'hui suivi par de nombreux autres modèles, il faut souligner que ces expérimentations ont eu lieu aussi dans divers secteurs (transport maritime, aéronautique) et bien sur dans le domaine de la production électrique. Parmi les nombreux exemples existants, on peut citer les travaux concernant les piles à combustibles comme source de stockage et électro-générateur.

La plate-forme MYRTHE, situé à l'Université de Corse, illustre parfaitement ce nouveau concept (Figure 3). Elle est articulée autour de trois composantes majeures [2] :

- Un champ photovoltaïque d'une puissance de 560 kWc ;
- Un électrolyseur d'une puissance de 200 kW ;
- Une pile à combustible de type et d'une puissance de 200 kW.

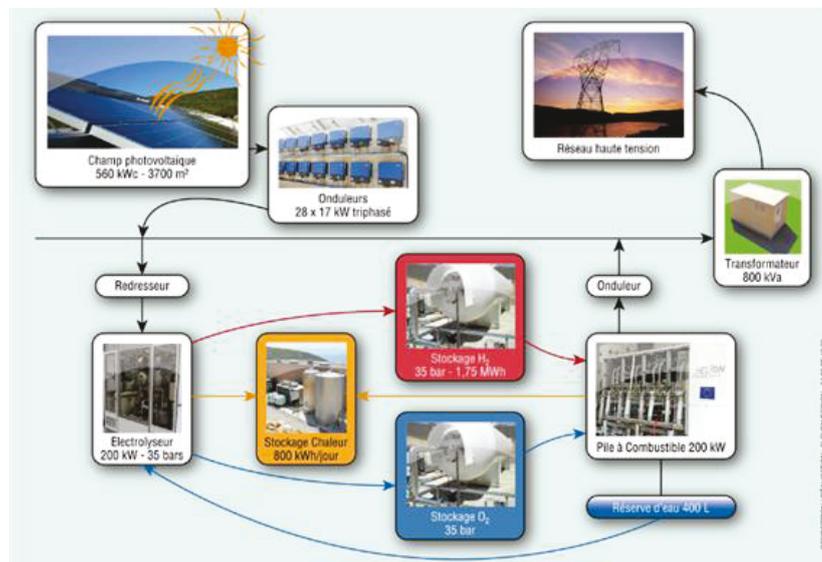


Figure 3 - Synoptique de la plate-forme Myrte [2]

Durant la journée, le champ photovoltaïque produit l'électricité pour alimenter le réseau ainsi que l'électrolyseur qui produit l'oxygène et l'hydrogène stockées dans des réservoirs à une pression de 35b. Lorsque la production solaire devient insuffisante, la pile à combustible prend le relais soit en mode tampon, soit en mode autonome durant la nuit. L'eau produite par la pile est quant à elle réinjecter dans l'électrolyseur, fonctionnant en circuit quasi-fermé tandis que la chaleur produite par la réaction, sert à alimenter un circuit de chauffage. Cette plate-forme expérimentale est destinée à l'étude de l'alimentation électrique en milieu insulaire pour une autonomie partielle ou totale.

### 1.3. LA PROBLEMATIQUE DE GESTION DE L'ENERGIE

#### 1.3.a. Contrôler les flux d'énergie

Dans le cas d'un système hybride, l'interconnexion simple des moyens de production et de stockage ne suffit pas. En effet ces moyens produisent, stockent ou délivrent au réseau de l'énergie et cela constitue des flux qu'il faut contrôler (Figure 4). Un dispositif de répartition de l'énergie doit donc être implanté au niveau du système puis celui-ci transmettra une partie de ces ordres vers les commandes locales de chaque entité. Il s'agit pour ce contrôleur de [3] :

- déterminer, selon une stratégie choisie, la part de la production destinée au réseau et celle destinée au stockage,
- déterminer pour une puissance fournie, la part énergétique de chaque élément selon la configuration choisie à l'instant  $t$  (production, stockage, déstockage) ;
- Contrôler les paramètres de la traverse d'interconnexion électrique (ex la tension d'un bus à courant continu).

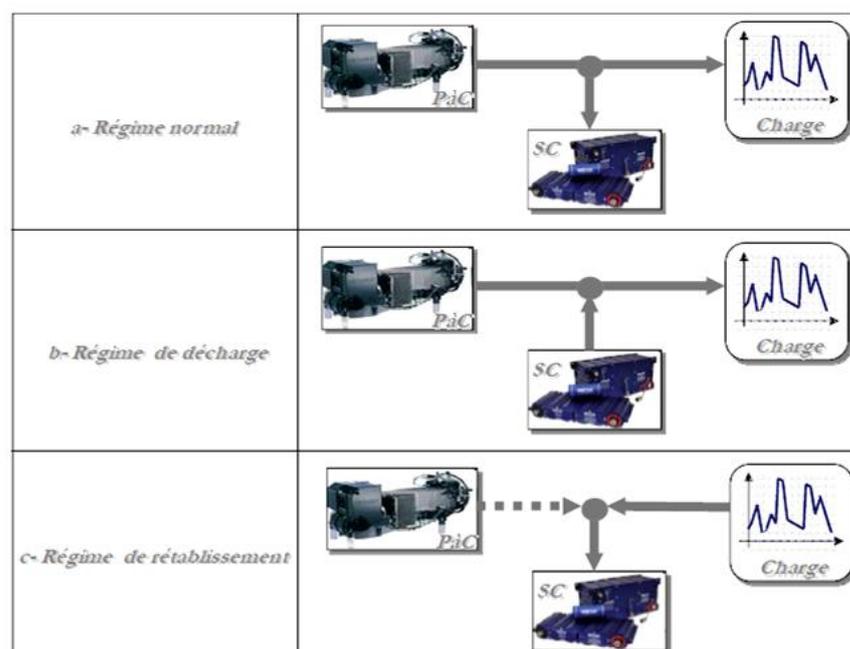


Figure 4 - Différents régimes de fonctionnement d'un électro-générateur constitué d'une pile à hydrogène et de supercondensateurs

La mise au point d'un tel contrôleur n'est pas aisée. En effet bien que l'hybridation offre des degrés de liberté importants en termes de commande, les caractéristiques dynamiques de chaque élément, peuvent rendre le système très instable. Par exemple, on peut mentionner les fortes oscillations de tension sur une traverse d'interconnexion. Afin de rendre ces échanges plus optimaux, il faut à la fois déterminer un critère de minimisation (consommation d'hydrogène, stockage, pertes, ...) mais aussi élaborer une stratégie de répartition tenant compte à la fois des capacités de chaque élément mais aussi des prévisions de consommation du réseau.

### 1.3.b. La gestion d'énergie : enjeux pour la recherche

Du point de vue scientifique, on peut dire que cette problématique de la gestion d'énergie, rentre dans le cadre des objectifs de recherche du laboratoire LSIS énoncé en début de partie. Il constitue un challenge scientifique et technique très intéressant pour le laboratoire, qui en liaison avec l'école Arts et Métiers ParisTech, a lancé une série de travaux sur ce thème.

Il apparaît que la thématique de gestion d'énergie, dépend fortement des éléments hybridés comme du domaine applicatif, et qu'une généralisation des résultats est pour l'instant difficile. Il a donc fallu choisir les technologies, qui serait à la base de la production d'énergie comme de son stockage. C'est à l'occasion de l'acquisition en 2010 d'une pile à combustible Bahia, destinée à un usage didactique et produite par la société Héliion, filiale du groupe AREVA, que la technologie hydrogène a suscité un regain d'intérêt auprès des équipes de recherche du laboratoire.

Cette technologie est encore souvent au stade d'expérimentation dans notre pays mais elle suscite de grands espoirs. Le projet Myrte témoigne de cet intérêt, à la fois pour la recherche mais aussi pour des organes étatiques comme l'ADEME, qui souhaite promouvoir l'énergie hydrogène auprès du grand public. La pile à combustible Bahia a permis de lancer des travaux préliminaires sur la modélisation

des piles à membranes ainsi que sur la conduite particulière que requiert ce type d'appareil. Devant les résultats observés, il fut décidé en 2011, de lancer un projet de recherche sur la base d'une plate-forme multi-sources intégrant la pile à hydrogène comme moyen principal de production et d'étudier son hybridation potentielle avec d'autres sources notamment photovoltaïque et des organes de stockage électriques tels que les supercondensateurs et les batteries.

### 1.3.c. Le sujet de recherche

Sous la direction de Monsieur Jean-Claude Carmona, une équipe d'enseignant-chercheurs et des doctorants se sont penchés sur la problématique de la gestion d'énergie. L'objectif est de réaliser une loi globale de gestion des flux énergétique au sein d'une plate-forme multi-sources avec des capacité de stockage tampon puis de réaliser les asservissements localement sur chaque élément. Ces nouveaux algorithmes doivent pouvoir améliorer le rendement global de l'installation par l'entremise d'une minimisation de critère ainsi que par une robustesse du dispositif de commande en cas de variation des paramètres physiques notamment sur la pile à combustible.

Afin de lancer concrètement ce thème de recherche, une thèse doctorale était lancée sur le sujet dès le mois de mai 2012, tandis qu'en septembre je rejoignais l'équipe afin de renforcer les compétences en matière d'informatique industrielle, d'automatisme ainsi qu'en électrotechnique. Il a donc fallu commencer par améliorer nos connaissances générales sur les piles à combustible notamment avec la technologie des membranes échangeuse de protons et réfléchir à la construction de la plate-forme multi-sources en choisissant les divers éléments de production et de stockage. Cette réflexion globale sur l'hybridation de notre future plate-forme devait s'accompagner d'une connaissance plus fine du poids économique de la technologie hydrogène ainsi qu'une recherche approfondie des acteurs majeurs de la filière tant dans la Recherche que dans le monde industriel. Ces résultats, exposés dans la

prochaine partie, devait permettre d'assoir le projet sur une base solide permettant de le resituer, soit dans un contexte de partenariat industriel, soit dans le cadre des aides au développement des technologies innovantes.

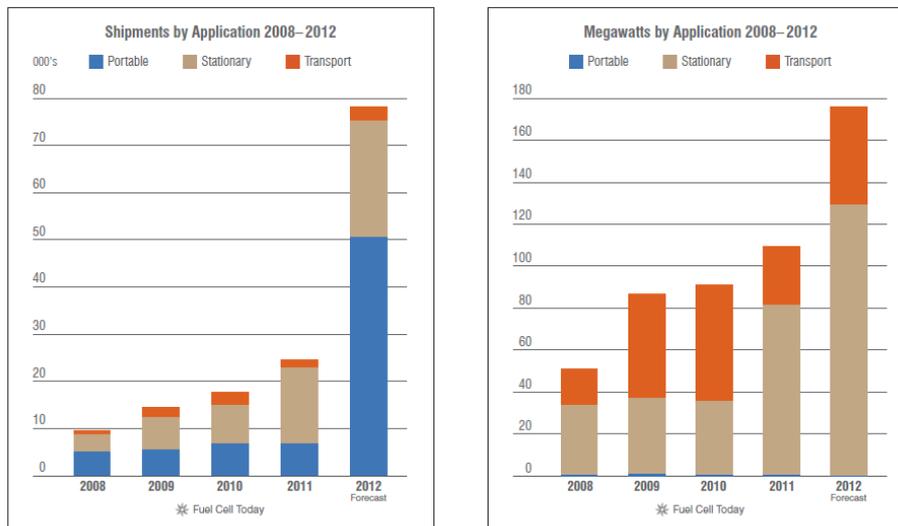
## 2. LA PLATE-FORME MULTI-SOURCES

### 2.1. CONTEXTE DE RECHERCHE AUTOUR DE LA PILE A COMBUSTIBLE

#### 2.1.a. Le marché mondial des piles à combustibles

Du point de vue industriel, la filière pile à combustible - hydrogène continue sa progression et un décollage était même possible pour l'année 2012<sup>1</sup> avec un doublement de la production de piles (Tableau III). Néanmoins, les effets de la crise économique risquent de rendre moins spectaculaire cette augmentation. La production annuelle s'établissait en 2011 à 24600 unités (hors kits pédagogiques et jouets), soit une augmentation de +39% par rapport à 2010. La puissance globale ainsi mise sur le marché représente un peu plus de 100MW après avoir observée une stagnation autour de 85MW en 2009-2010 [4].

*Tableau III - Volume des ventes de PaC en nombre et en puissance (Fuel Cell Today 2012).*



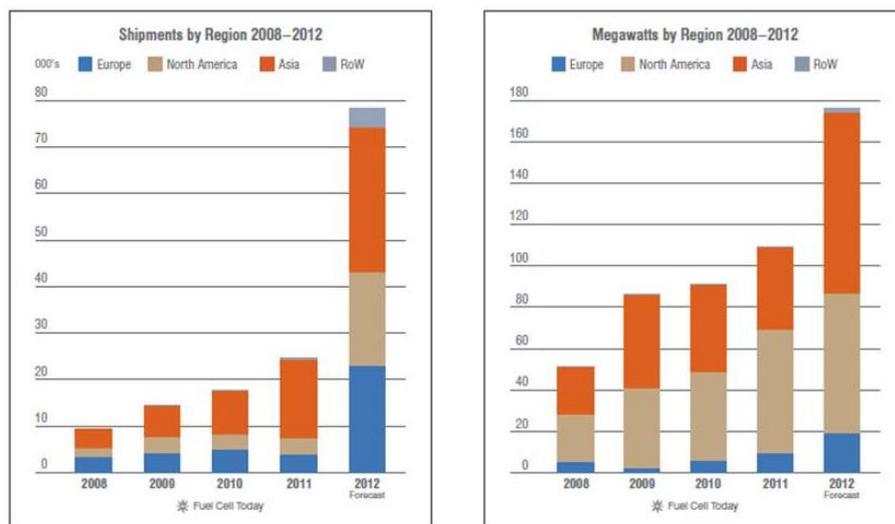
Du point de vue applicatif, c'est les systèmes stationnaires qui portent cette hausse avec un équivalent énergétique global d'environ 81MW pour 16000 unités produites. Les applications portables progressent légèrement de +1,5% mais enregistrent une chute significative en Europe sur les ventes d'alimentations

<sup>1</sup> Pour l'année 2012, il s'agit d'une prévision car le document est paru en mai 2012

auxiliaires dite APU (Auxiliary Portable Unit). Enfin le secteur des transports a enregistré une chute de 40% en volume de vente (1600 unités) surtout du fait du recul des programmes automobiles soumis une conjoncture mondiale morose.

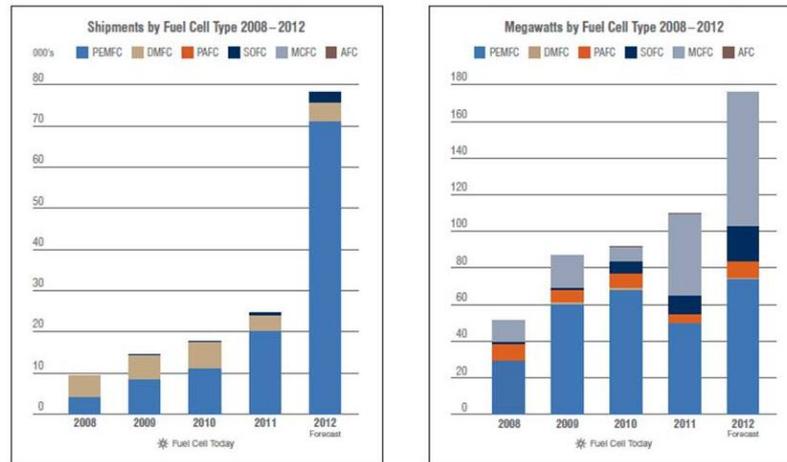
En termes de volume de vente (Tableau IV), l'Asie domine le marché mondial avec près de 17000 unités, soit 69% de parts de marché alors que le marché nord-américain représente à lui seul, plus de 50% de la puissance annuelle avec 59,6MW. L'Europe se classe troisième avec moins de 5000 unités acquises pour un total d'un peu moins de 10MW, en raison de la conjoncture économique peu propice à de forts investissements ainsi qu'à une filière hydrogène-PaC pas assez structurée.

*Tableau IV - Répartition des livraisons de piles et bilan de puissance par continent (Fuel Cell Today, 2012)*



Enfin sur le plan technologique, la domination des piles à membrane dites PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells) s'accroît en 2011 avec 83% de part de marché tandis que les MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells) sont confortés dans les applications stationnaires de fortes puissances. Les SOFC (Solid Oxid Fuel Cells) pourraient connaître prochainement un rebond notamment du fait d'une poussée de cette technologie pour les applications stationnaires de faible puissance en Europe et les fermes énergétiques au Japon (Tableau V).

Tableau V - Volume des ventes et de puissance par type de technologie (Fuel Cell Today, 2012)



### 2.1.b. Une politique européenne soutenue

L'Europe a engagé depuis plusieurs années, une politique ambitieuse sur les orientations énergétiques avec pour objectif d'introduire 20% d'énergie renouvelable d'ici à 2020. Les instances européennes, qui disposent de vastes fonds d'investissement pour la recherche, ont décidé en 2008, d'unifier leurs efforts pour le développement d'une filière hydrogène-PaC sous l'égide du « **Fuel Cell & Hydrogen Joint Undertaking** » (FCH-JU).

Ce bureau, composé de représentants de la Commission Européenne, des filières industrielles et de chercheurs, débuta en 2008 avec un budget de 27,2M€, destiné à financer des projets de recherche et développement selon plusieurs axes arrêtés (Figure 5). En 2012 ce budget s'élevait à près de 77,5M€ pour une trentaine de projets suivant un schéma directeur de développement, arrêté pour cinq ans et qui sera renouvelé en 2013 [5].

L'Allemagne est la nation leader en la matière, avec plusieurs programmes importants dont la mise en place de piles pour l'alimentation électrique dans des éco quartier ainsi qu'une vaste opération, portée par Air Liquide et Mercedes, d'implantation de stations de recharge hydrogène pour véhicules. Plus récemment, le Royaume-Uni et l'Italie ont bénéficié d'aides européennes sur des programmes concernant les technologies de piles tandis que le CEA et Air Liquide se partagent

l'essentiel des fonds au profit de programmes internationaux. Ces fonds sont destinés à soutenir toute sortes d'actions tant au niveau de la recherche que de l'émergence de filières ou de campagne de sensibilisation au profit d'acteurs économiques ou de la population européenne (Figure 5).

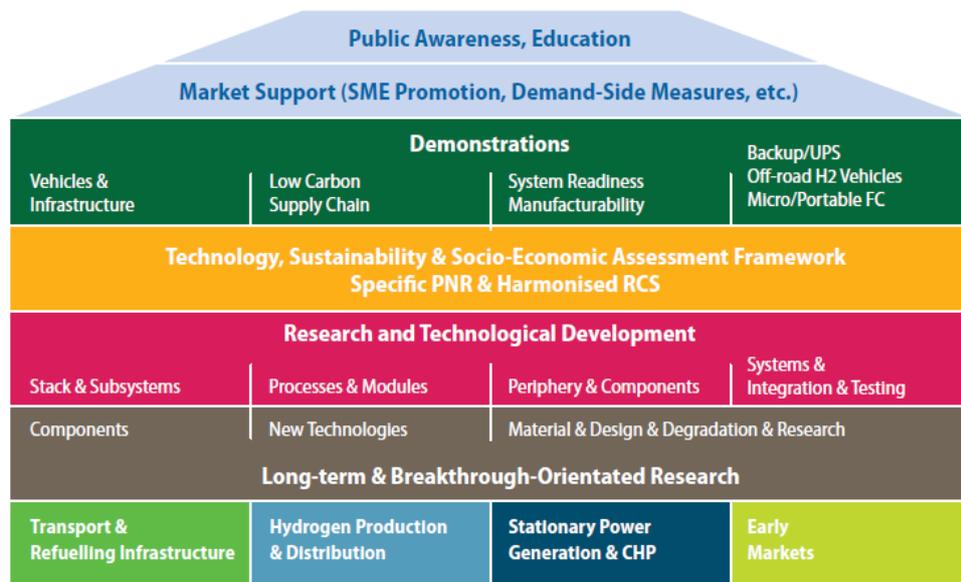
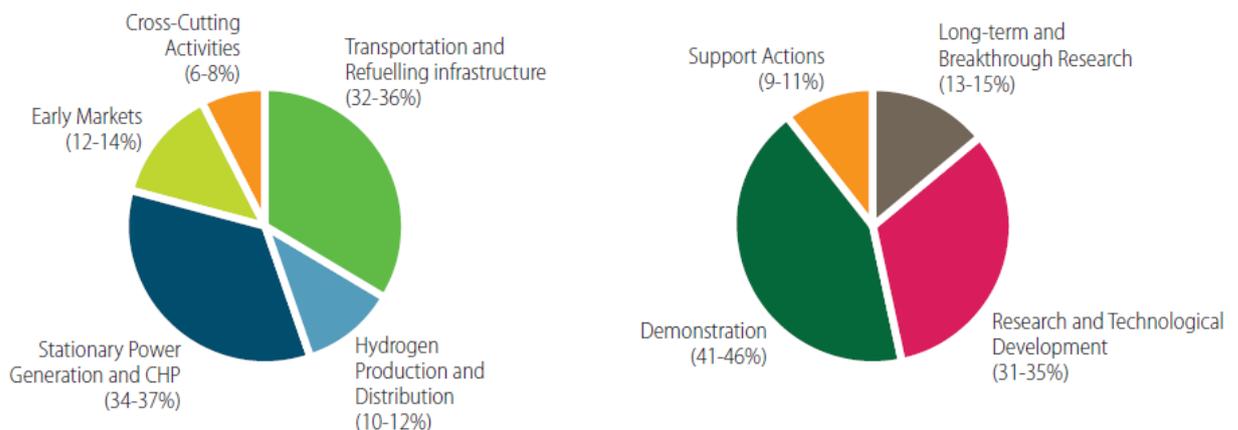


Figure 5 - Répartition des activités soutenues par le FCH\_JU européen (FC&H - JU, 2011)

Tableau VI - Répartition budgétaire des fonds par application (à g.) et par type d'activité (à d.) (FC&H - JU, 2011)



L'Europe vise donc en priorité les domaines du transport ainsi que les électro-générateurs destinés à l'habitat, qui monopolisent à eux deux, les deux tiers des fonds. Le démarrage industriel est encore fébrile tandis que nombre de spécialistes

pointent du doigt la fabrication de l'hydrogène encore très émettrice de rejets carbonés. Le prochain plan quinquennal devrait traduire cette priorité tandis que des programmes de démonstration, nécessaires à l'acceptation sociale de la filière hydrogène comme solution énergétique d'avenir, seront davantage financés (Tableau VI).

### 2.1.c. Une position française fragile

Conscient de l'enjeu économique que représente la filière hydrogène, l'état français s'est saisi du dossier dès 2007. Mais la dispersion des moyens de recherche et la fragilité des acteurs industriels, était pointé dès 2011, dans son rapport « *Les technologies clés pour 2015* » [6] :

« *La filière industrielle française des piles à combustibles est encore émergente. Elle comprend pour l'essentiel deux filiales de grands groupes positionnés ou souhaitant se positionner sur l'hydrogène. Au niveau international, les principaux acteurs sont nord-américains (États-Unis et Canada), lesquels bénéficient d'un cumul d'expérience de plus de vingt ans et sont donc technologiquement plus avancés, et, dans une moindre mesure, japonais et européens* ».

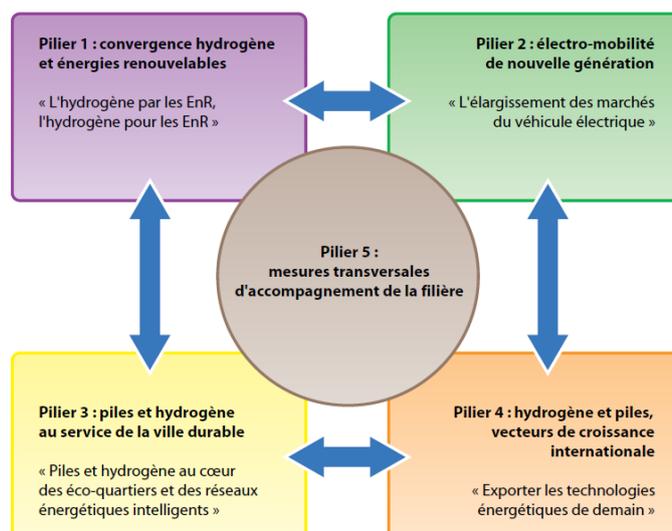


Figure 6 - Piliers de développement pour la filière hydrogène éditée par l'ADEME dans sa feuille de route stratégique (ADEME – 2011)

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) s'est vu ainsi confier le dossier et a mis en place, une politique globale de développement de la filière, avec le concours de divers acteurs de la recherche, de l'industrie et des organismes de soutien financier. Basé sur 5 piliers (Figure 6), cette stratégie à la fois en matière de recherche mais aussi d'industrialisation, doit permettre de structurer la filière hydrogène en France à l'horizon 2015 autour des pôles de développement les plus prometteurs [7].

Pour soutenir cette politique ambitieuse, l'ADEME édite régulièrement des appels à manifestation d'intérêt AMI qui fixent les conditions d'obtentions d'aides financières importantes portant sur la réalisation d'un projet industriel. Ces projets associe le monde de la recherche et privilégie les coopérations industrielles. Parmi les thématiques prioritaires selon l'ADEME (qui reprend aussi celle de l'Union Européenne) figure la mise au point **de plateformes de simulation** ou **de démonstration** notamment dans **les domaines du transport et de micro-cogénération**.

Outre les projets de l'ADEME, on note que plusieurs associations pour la promotion de cette technologie, ont joués un rôle moteur ces dernières années. On pourra souligner au niveau régional des associations comme PHyRENEES ou ERH2-Bretagne et la très active **AFHYPAC**<sup>2</sup>, dont les membres représentent l'ensemble des professionnels et des collectivités impliqués. Elles ont souvent pour objet de promouvoir les technologies de l'hydrogène énergie et des piles à combustible, notamment dans l'achat de petits véhicules démonstratifs ou des campagnes de sensibilisation auprès du grand public.

Dans un registre plus industriel, un pôle de compétence sur l'Hydrogène et ses applications, dénommé **ALPHEA**<sup>3</sup>, s'est créé en Moselle sous l'impulsion du député-maire de Forbach (Moselle) mais il reste encore très embryonnaire (car non

---

<sup>2</sup> <http://www.afh2.org/fr/accueil>

<sup>3</sup> <http://www.alphea.com>

reconnu comme pôle de compétitivité). Tous ces acteurs, conscients de la nécessité de collecter et de diffuser l'information sur les avancées de la filière hydrogène, ont créés l'**Observatoire français de l'hydrogène et des piles à combustible**<sup>4</sup> avec une newsletter mensuelle baptisée « *la gazette de l'hydrogène* ».

L'implication des acteurs industriels est encore faible en France comme l'ont montré les divers rapports gouvernementaux. Certes quelques entreprises possèdent une activité pérenne notamment Air Liquide (dans la fabrication et la distribution de l'hydrogène), sa filiale AXANE qui gère les piles à combustibles pour les systèmes stationnaires de même qu'Héliion du groupe AREVA. Mais dans l'ensemble les acteurs sont encore très disséminés et le marché intérieur est uniquement un marché de niches, difficilement rentable à court termes pour les PME-PMI.



*Figure 7 - Renault Kangoo Electrique ZE et la pile à combustible conçue par Symbio Fcell (Renault – 2012)*

Néanmoins, la situation pourrait se débloquer dans le domaine du transport, grâce à l'implication de Michelin dans la fabrication d'une pile PEMFC pour le véhicule F-City H<sup>2</sup> et la société Symbio FCell, qui vient de signer un partenariat, pour équiper d'un prolongateur d'autonomie à base de pile à combustible, la Renault électrique Kangoo (Figure 7). Les entreprises françaises pourront compter sur une recherche française très active grâce aux nombreux laboratoires qui travaillent sur le

<sup>4</sup> <http://www.observ-h2.fr>

sujet et qui permettrait à la France, de mettre au point des produits à forte valeur ajoutée.

#### 2.1.d. La recherche française

##### i. Le CEA-LITEN

Fort de sa position auprès du FCH-JU ainsi que des puissants moyens techniques mis à sa disposition, le CEA est à la tête d'un grand nombre de projets de recherche concernant la filière hydrogène et les piles à combustible. Regroupé au sein du Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles (LITEN), implanté principalement à Grenoble et Chambéry, c'est un des principaux centres européens de recherche sur les nouvelles technologies liées à l'énergie hydrogène. Deux grands axes de R&D sont particulièrement étudiés :

##### Les technologies de l'hydrogène :

- Production massive d'H<sub>2</sub> par Electrolyse Haute Température EHT
- Elaboration de cellules d'électrolyse en céramiques pour application SOFC et EvHT
- Modélisation et dimensionnement
- Equipements pour tests Electrolyse Haute Température (EHT)
- Piles PEMFC : Composants et assemblage
- Stockage Hydrogène par hydrures
- Ultra barrières et isolation thermique
- Tests mécaniques HT et sous H<sub>2</sub>

##### Les technologies pour le transport :

- Production d'hydrogène
- Stockage d'hydrogène
- Piles à combustible PEMFC
- Piles à combustible SOFC

- Economie de l'hydrogène
- Batteries
- Gestion d'énergie

Parmi les projets phares, on peut distinguer le projet **d'électrolyse à haute température**, sur lequel le CEA-LITEN fonde de grands espoirs pour une production d'hydrogène moins polluante que la technique de reformage.

ii. Le laboratoire FCLAB-FEMTO ST

Sous la houlette des docteurs Daniel Hissel et Marie-Cécile Perra, une fédération de recherche, baptisée Fuel Cell Lab (FC-Lab), a été créée à Belfort pour coordonner les activités de recherche de la communauté scientifique de Franche-Comté (FEMTO, Université de Franche-Comté UFC, Université Technologique de Belfort-Montbéliard UTBM) très impliquée dans la thématique des piles à combustibles et dans le pôle véhicule du futur. Les équipes proviennent de quatre laboratoires [8] :

- l'Institut **FEMTO-ST Energie** (Franche-Comté Electronique, Mécanique, Thermique, Optique), UMR CNRS 6174 associée à l'UFC, au CNRS, à l'ENSMM et à l'UTBM,
- l'Institut **IRTES SeT** (Institut de Recherche sur les Transports, l'Energie et la Société), EA 7274 UTBM
- le laboratoire **LTE** (Laboratoire Transport et Environnement) de l'IFSTTAR (Bron, 69),
- l'équipe de recherche sur les technologies nouvelles (**LTN**) de l'IFSTTAR (Satory, 78).

Sept axes de recherche ont été définis dont l'un porte sur l'expérimentation, la modélisation et l'émulation de systèmes à piles à combustible, en conditions extrêmes de fonctionnement (Figure 8) et un autre sur l'hybridation, le contrôle et l'optimisation de systèmes PAC.

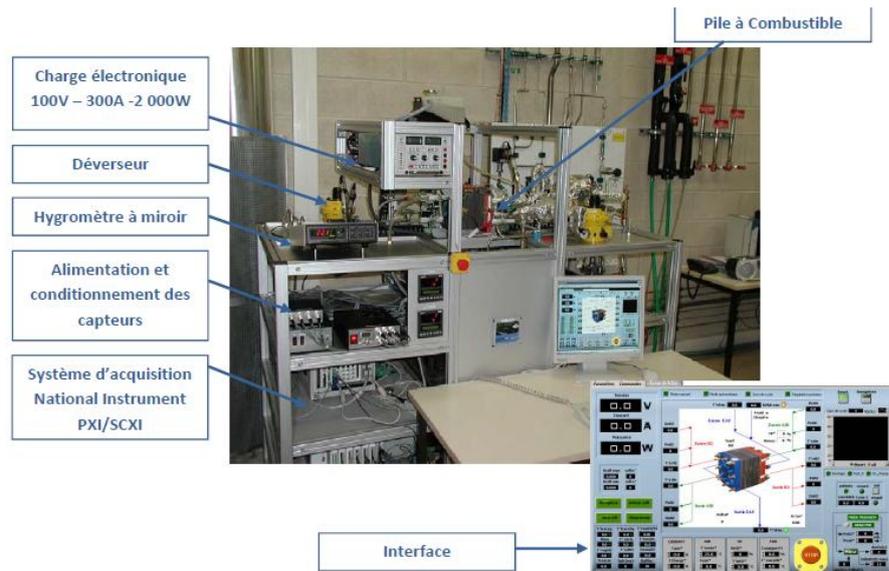


Figure 8 - plate-forme test de pile à combustible  $P < 1\text{Kw}$  (FC Lab – 2012)

### iii. Les autres laboratoires

Dans le cadre de la thématique système pile à combustible, on peut mentionner les laboratoires suivants (autre que LSIS):

- Le laboratoire **GREEN** de Nancy (Resp. Bernard Davat et Stéphane Rael) a travaillé sur les piles à combustibles tant sur la modélisation que sur des algorithmes de commande. Il est partenaire du pôle ALPHEA et collabore régulièrement avec le FC-Lab de Belfort,
- Le laboratoire **L2EP** situé à Lille, qui travaille notamment sur la Représentation Energétique Macroscopique REM développé par Alain Bouscayrol et sur les véhicules hybrides,
- Le laboratoire **LEG** de Grenoble qui a mis l'accent sur les convertisseurs électriques associés aux piles à combustibles,
- Un regain d'intérêt pour la thématique pile à combustible semble voir le jour à l'université de Paris Sud et à l'UTC de Compiègne. L'école Mines ParisTech avait ouvert la voie avec plusieurs travaux entre 2000 et 2005.

## 2.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

### 2.2.a. Historique

C'est en 1838, que le professeur suisse Christian Schönbein découvre la circulation d'un courant opposé à celui qui traverse un tube en U servant à un processus d'électrolyse de l'eau ayant été stoppé. Un an plus tard, l'anglais William Robert Grove annonce la possibilité de fabriquer de l'électricité, en faisant réagir l'hydrogène et l'oxygène. Il met au point en 1843 la première pile à combustible. Puis s'ensuit une longue période de recherche, qui voit plusieurs travaux améliorer les connaissances sur ce phénomène. On peut citer ceux de Ludwig Mond et Charles Langer (1889), qui mettent au point une pile de 6A/ft<sup>2</sup> (et au passage lui donne le nom de Fuel Cell), les bases théoriques posées autour de 1890, par Friedrich Wilhelm Ostwald (prix Nobel en 1909) et Walther Hermann Nernst (prix Nobel en 1920), qui donne son nom à l'équation de tension d'une pile en fonction de la température.

En 1932, l'anglais Francis Thomas Bacon reprend les travaux de Mond & Langer, pour aboutir à la première pile alcaline (Alkaline Fuel Cell, AFC) en remplaçant l'acide phosphorique de l'électrolyte par de l'hydroxyde de sodium (AFC 5 kW – 1959). Cette découverte relance l'intérêt industriel pour cette technologie avec en pointe, la nouvelle agence spatiale américaine NASA<sup>5</sup> pour son programme Apollo. Malgré ce succès, il faudra attendre les années 90 pour voir la pile à combustible faire une percée notable dans le domaine industriel, du fait de la problématique énergétique et de la prise de conscience de se tourner vers de nouvelles formes d'énergie.

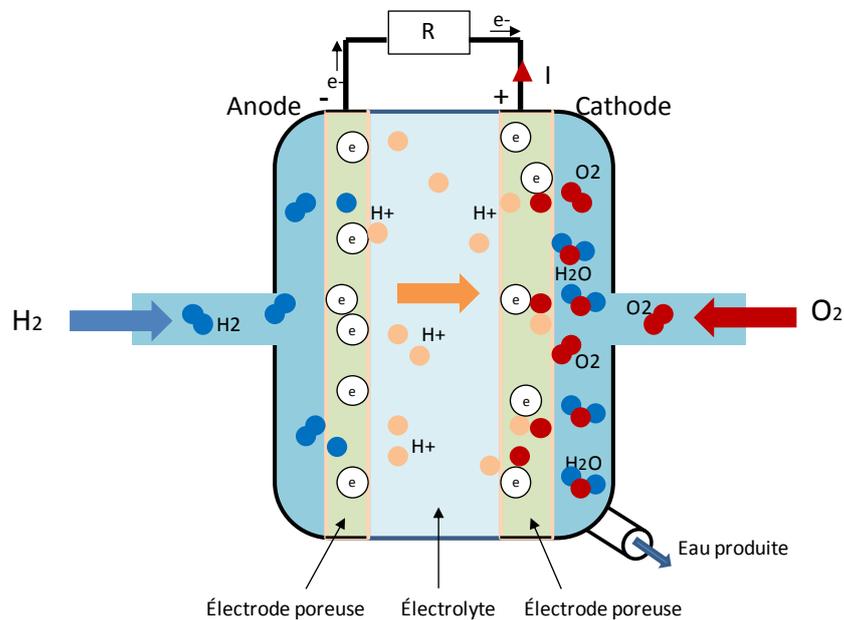
### 2.2.b. Principe de fonctionnement

Le dispositif est composé de deux électrodes poreuses séparées par un électrolyte qui laisse passer les ions issus de l'oxydation des molécules d'hydrogène. Les électrons libérés par la réaction anodique circulent vers la cathode via le circuit

---

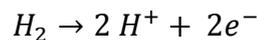
<sup>5</sup> National Aeronautics and Space Administration

électrique (Figure 9). Les ions, qui se propagent dans l'électrolyte vers la cathode où en contact avec l'oxygène et les électrons, forment des molécules d'eau.



*Figure 9 - Schéma de la réaction globale d'une pile à combustible*

L'anode négative reçoit l'hydrogène sous forme gazeuse qui est soumis à une oxydation selon la réaction connue suivante :



En réalité, cette oxydation est une opération plus complexe se déroulant dans une région nommée zone de triple contact où intervient le platine utilisé comme catalyseur (Figure 10). Les molécules d'hydrogène sont transportées dans la membrane poreuse puis à la surface de l'électrode. La liaison de la molécule d' $H_2$  est ensuite rompue (phénomène de dissociation) et les atomes entrent en contact avec le catalyseur où se produit la réaction d'ionisation (séparation de l'électron). Les ions sont ensuite transportés par l'électrolyte. Le platine, déjà fortement sollicité par l'industrie automobile (pot catalytique) et l'industrie chimique, est une des origines de la difficulté d'industrialisation des piles à combustible même si d'autres catalyseurs moins onéreux sont à l'essai mais avec une durée d'activité pour l'instant trop faible. [9]

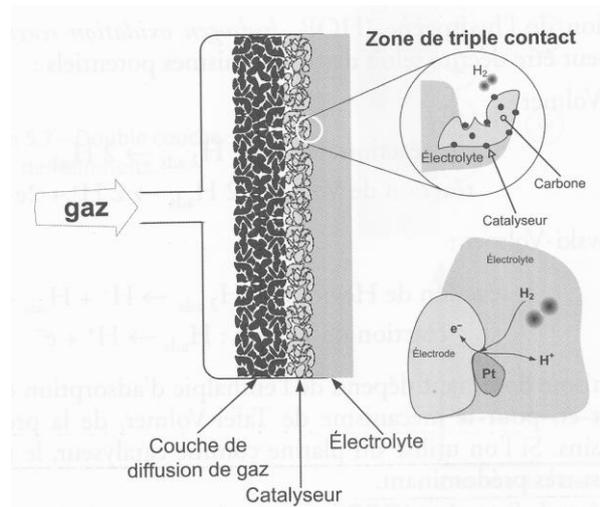
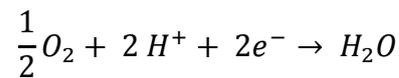
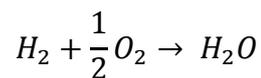


Figure 10 - Zone de triple contact

Du côté de la cathode positive, l'oxygène entrent en réaction avec les électrons et les ions, suivant l'équation réductrice suivante :



En conditions normales de pression et de température, l'eau formée par la réaction est sous forme liquide, d'où un bilan très positif car la réaction produit aussi de la chaleur qui peut être récupérée. On établit la formule de la réaction globale comme suit :



Du point de vue de la stœchiométrie, on place toujours plus d'oxygène (coefficient à 2,5 pour le système Bahia) du fait de la lenteur de la réduction de l'oxygène relativement à l'oxydation de l'hydrogène. De fait, le combustible n'est pas toujours consommé dans la pile, il faut donc procéder à son renouvellement ainsi que gérer l'évacuation de l'eau produite.

Parmi les paramètres influençant grandement la réaction, il faut souligner l'importance de la zone de contact entre l'électrolyte, l'électrode (souvent en carbone) et le catalyseur (platine) mais aussi la température de fonctionnement, la pression des gaz et l'humidification des membranes [10].

## 2.2.c. Caractéristiques électriques à vide

Dans les conditions normales de température et de pression, l'énergie fournie par la pile est donnée par l'équation de Faraday :

$$W_e = n_e F E^0 = -\Delta G^0$$

Où  $\Delta G^0$  désigne la variation d'enthalpie libre,  $n_e$  le nombre d'électrons mis en jeu (ici 2),  $F$  étant la constante de Faraday (96 485 C/mol) et  $E^0$  la tension à vide de la f.é.m. de la pile. La variation d'enthalpie libre (appelée aussi variation d'énergie de Gibbs) représente la transformation d'état d'un corps en l'absence de forces de pressions. Ainsi pour la formation de l'eau à partir de l'oxygène et de l'hydrogène avec une température de  $T$  de 25°C et une pression de 1b, elle vaut :

$$\Delta G^0 = -237.2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ pour l'eau liquide}$$

$$\Delta G^0 = -225.2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ pour la vapeur d'eau}$$

A partir de ces valeurs, on calcule les valeurs de f.é.m. suivantes :

$$E^0 = 1.229 \text{ V avec formation d'eau liquide}$$

$$E^0 = 1.166 \text{ V avec formation de vapeur d'eau}$$

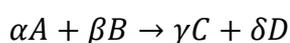
Influence de la température :

Une augmentation de la température ayant pour conséquence d'augmenter l'entropie  $S$  du système, la f.é.m. chute de -0,85mV/K pour de l'eau liquide et de -0,23mV/K pour de la vapeur d'eau. On donne alors la f.é.m. à vide pour une température  $T$  avec formation de  $\text{H}_2\text{O}$  liquide :

$$E_T^0 = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15)$$

Influence de la pression :

Déduite des lois de thermodynamique et des gaz parfaits, l'équation de Nernst donne l'influence des pressions partielles des gaz dans une réaction chimique de la manière suivante :



$$E_T = E_T^0 - \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{P_C^\gamma P_D^\delta}{P_A^\alpha P_B^\beta} \right)$$

Les pressions partielles sont élevées à la puissance du coefficient stœchiométrique. Ceci nous donne pour le cas de la pile à combustible, à une température T et deux pressions partielles des gaz hydrogène et oxygène, la f.é.m. à vide suivante :

$$E_T = E_T^0 - \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{1}{P_{O_2}^{\frac{1}{2}} P_{H_2}} \right)$$

Cela démontre que l'on peut augmenter substantiellement la tension à vide d'une pile en augmentant la pression des gaz. On peut aussi constater qu'en remplaçant l'oxygène par de l'air, on passe alors à  $E_T = 1,219V$  pour 1b d'air de pression.

Dans le cadre d'une modélisation statique, on donne l'équation finale de la f.é.m. à vide, fonction de la température et des pressions de gaz :

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) - 4.3085 \times 10^{-5} T \ln \left( \frac{1}{P_{O_2}^{\frac{1}{2}} P_{H_2}} \right)$$

Au final, alors qu'une pression des gaz plus élevée permet d'augmenter la tension, une température plus élevée permet :

- d'améliorer la cinétique de la réaction en baissant la tension d'activation ;
- d'améliorer la diffusion des gaz en augmentant la densité de courant limite  $j_l$  ;
- de diminuer les pertes ohmiques en améliorant la conductivité ionique.

#### 2.2.d. Caractéristique électrique en charge

Lorsque la pile se met à débiter dans une charge, elle subit des pertes de diverses natures. La caractéristique courant tension montre trois zones distinctes qui correspondent à des pertes prépondérantes (Figure 11):

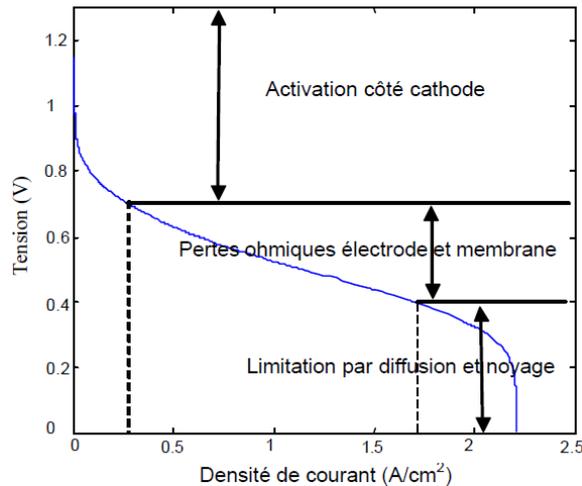


Figure 11- Caractéristiques tension courant d'une pile à combustibles avec les pertes associées

- A gauche, pour de faible courant, il s'agit des pertes par activation dues à la diffusion des ions à l'interface électrolyte-électrode. Elles sont souvent estimées à partir de la droite de Tafel et vaut à partir d'une densité de courant  $j$  donné :

$$\Delta V_{act} = A \ln\left(\frac{j}{b}\right)$$

On considère que l'essentiel des pertes sont du côté cathodique (facteur  $10^5$ );

- Au milieu de la courbe, on retrouve une portion linéaire qui montre la prédominance des pertes ohmiques liées aux diverses résistances électriques internes de la pile. Il s'agit essentiellement de la résistance de l'électrolyte dont un des paramètres est la teneur en eau issue de l'humidification des gaz. On donne alors la résistance par unité de surface  $R_{pac}$  et la formule suivante :

$$\Delta V_R = R_{pac} j$$

- Enfin, à fort courant de décharge, les réactifs chimiques sont très sollicités entraînant des pertes par concentration. Il s'agit de la baisse de concentration des réactifs  $H_2$  et  $O_2$  autour des électrodes, donnée par une formule empirique mais donnant d'assez bons résultats :

$$\Delta V_{conc} = m e^{(nj)}$$

où m et n sont des constantes à déterminer expérimentalement. Il existe une densité de courant limite  $j_l$  pour laquelle la pile s'effondre jusqu'à une tension nulle.

Au final, la caractéristique en tension de la pile est donnée par la formule suivante et représentée

$$V(j) = E - A \ln \frac{j}{j_l} - R_{pac} j - m e^{(nj)}$$

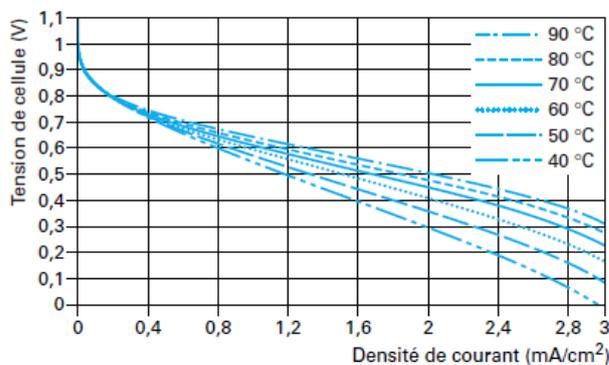


Figure 12 - Caractéristique tension courant en fonction de la température et à 1,5 bar (Technique de l'ingénieur, R. Mosdale 2003)

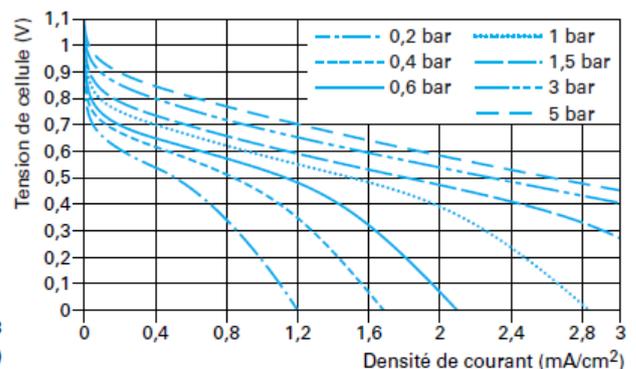


Figure 13 - Caractéristique tension courant en fonction des pressions de gaz et à  $T=80^{\circ}\text{C}$  (Technique de l'ingénieur, R. Mosdale 2003)

Comme on peut le constater, cette caractéristique n'est pas linéaire, sauf à la considérée comme telle sur une faible plage de courant débité. L'origine électrochimique de l'électricité ne doit pas être perdue de vue car le développement d'un modèle dynamique, se heurte aux multiples réactions mises en jeu ainsi qu'à l'incertitude de la survenue d'un événement chimique à un instant  $t_0$ . D'importants travaux de recherche sont donc engagés dans ce sens, notamment en utilisant l'identification par spectrométrie d'impédance.

## 2.3. CONTRAINTES D'UTILISATION DE LA PILE A COMBUSTIBLE A MEMBRANE

### 2.3.a. Les piles à membrane polymère (PEMFC)

La première pile à combustible à membrane échangeuse de proton ( Protonic Exchange Membrane PEM) , a vu le jour vers 1955 (General Electric) puis elle s'est imposée, comme technologie utilisée par la NASA, à partir de 1965 avec les missions Gemini. Depuis, elle constitue l'essentiel des piles à combustible fabriquées dans le monde (cf. chap2.1). La cellule est la structure élémentaire d'une pile PEMFC et l'on nomme stack un empilement de cellules qui compose le cœur de la pile. Une cellule se compose d'une membrane (Membrane Electrode Assembly MEA) prise en sandwich entre le deux plaques bipolaires et qui intègre les éléments fondamentaux de la réaction (Figure 14) :

- L'électrolyte ;
- Le catalyseur ;
- Les électrodes avec les couches de diffusion de gaz (Gas Diffusion Layer GDL).

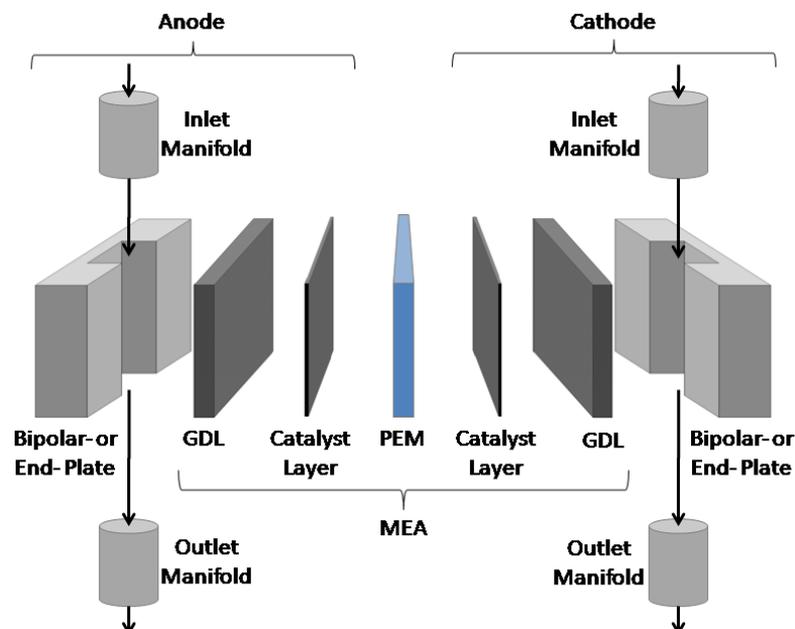
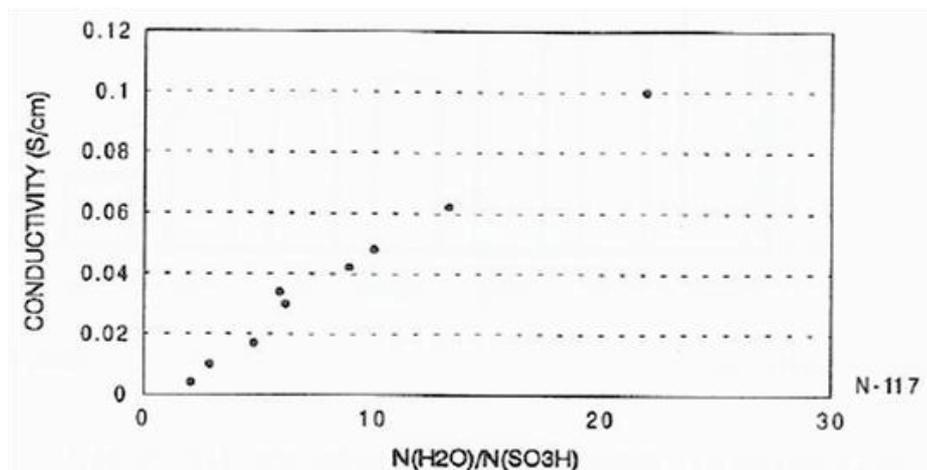


Figure 14 - Structure sandwich d'une cellule d'une pile type PEMFC

## 2.3.b. Composition d'une cellule

L'électrolyte :

Le nom donné à ce type de technologie de pile, vient de l'utilisation d'une membrane polymère du type PTFE (polytétrafluoroéthylène) sur laquelle on ajoute un composé sulfonique hydrophile ( $\text{SO}_3^-$ ) qui transportera les protons  $\text{H}^+$  de l'anode vers la cathode. Parmi les diverses références industrielles, la membrane Nafion<sup>TM</sup> de la firme DuPont, est l'une des plus utilisée dans les PEMFC [9], [10]. On note, que la conductivité de ces membranes dépend fortement de l'hygrométrie, qui trop faible, augmente la résistance interne de la pile et lorsqu'elle devient trop forte, entraîne la saturation des zone de contact (Figure 15).



*Figure 15 - Conductivité d'une membrane Nafion<sup>TM</sup> N-117 suivant le taux d'humidité (DuPont)*

Le catalyseur :

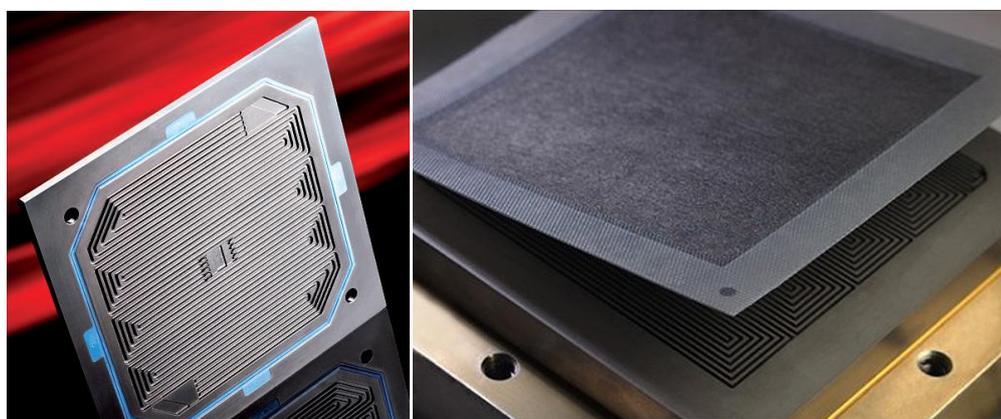
On emploie le platine ou un mélange platine/ruthénium pour favoriser les réactions d'oxydation anodique et de réduction cathodique. Le catalyseur est déposé suivant divers procédés, en fines particules disséminées sur l'électrode pour former la zone de triple contact. Un liant chimique permettra d'obtenir un comportement hydrophobe à l'anode tandis que du côté de la cathode, on recherchera un comportement hydrophile. Le catalyseur est particulièrement sensible à la présence

de monoxyde de carbone, qui accapare les sites notamment lorsqu'on utilise de l'air ambiant pollué (gaz d'échappement dans les villes).

#### L'électrode et couche de diffusion des gaz

Réalisé avec un composé carboné, l'électrode peut être distincte ou intégrée dans une couche de diffusion des gaz. Cette couche (appelée Gas Diffusion Layer GDL) doit permettre le transfert des molécules de gaz vers la zone de contact, assurer le transfert de chaleur liée à la réaction et adoptée un comportement hydrophile ou hydrophobe selon le cas recherché. Très poreuse, elle est construite à partir de fibres de carbone tissées ou pressées.

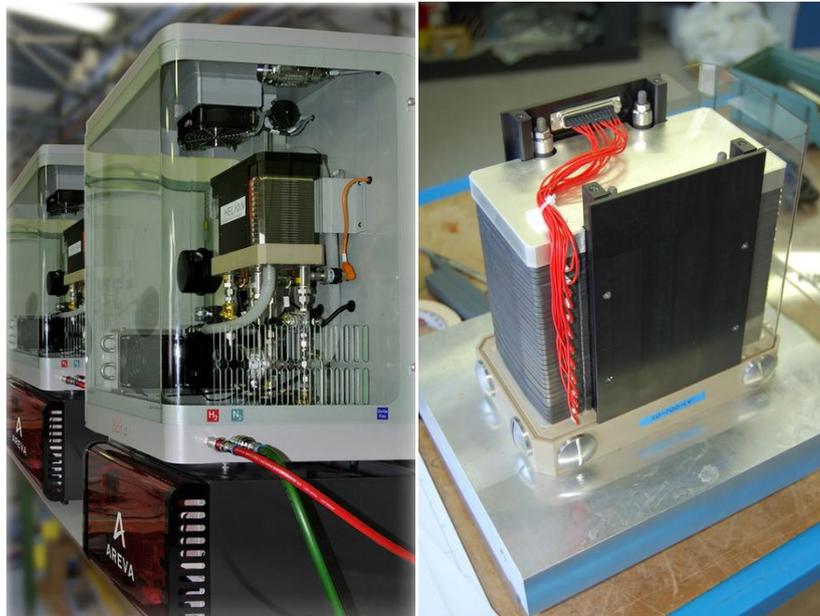
Une cellule est donc constituée par un assemblage subtil de différentes couches qui vont former la membrane MEA dont les propriétés physico-chimiques favorisent ou inhibent certaines réactions chimiques. Cette membrane est insérée entre deux plaques bipolaires dans lesquelles sont usinées les canaux d'arrivée de gaz et d'évacuation d'eau ainsi que le dispositif de refroidissement (Figure 16). C'est l'empilement des cellules élémentaires qui détermine la tension finale obtenue tandis que la surface d'une plaque permet de dimensionner la densité de courant. Une forte maîtrise technologique des matériaux et de l'usinage sont nécessaires à la fabrication des PEMFC. Des études sont toujours en cours pour améliorer leurs performances et leurs robustesses [9].



*Figure 16 - plaque bipolaire (g) et membrane MEA avec la couche de diffusion des gaz (d)*

## 2.3.c. Le banc BAHIA

Le système BAHIA est un banc didactique complet, muni d'une pile à combustible PEMFC d'une puissance nominale de 1kW et destiné aux activités d'enseignement et à la recherche. Il est commercialisé par la société Héliion (aujourd'hui AREVA Stockage d'Energie) basée à Aix-en-Provence. La pile est alimentée avec une bouteille d'hydrogène sous pression et une arrivée d'azote pour les phases d'inertage de la pile. L'air est aspiré par un ventilateur puis humidifié et injecté dans le stack. L'eau produite par la réaction est extraite par gravité et purgée vers l'extérieur. Une description plus détaillée est donnée en annexe A.



*Figure 17 - Banc Bahia (société Héliion) et vue du stack*

Un module électronique de charge permet d'effectuer des expérimentations en tension, en courant ou en puissance via une interface IHM développée sous Labview™. L'ensemble des paramètres issus des capteurs sont affichés et enregistrés dans des journaux spécifiques. Ce logiciel a fait l'objet de plusieurs modifications par Héliion pour en améliorer l'ergonomie et les fonctionnalités. Néanmoins il souffre d'un temps d'acquisition des mesures de l'ordre de 10 ms alors que la restitution des

données sur les journaux est de l'ordre de la seconde. Une coopération avec la société est envisagée pour permettre de récupérer les mesures à une fréquence plus élevée, dans le cadre de la modélisation de la pile.

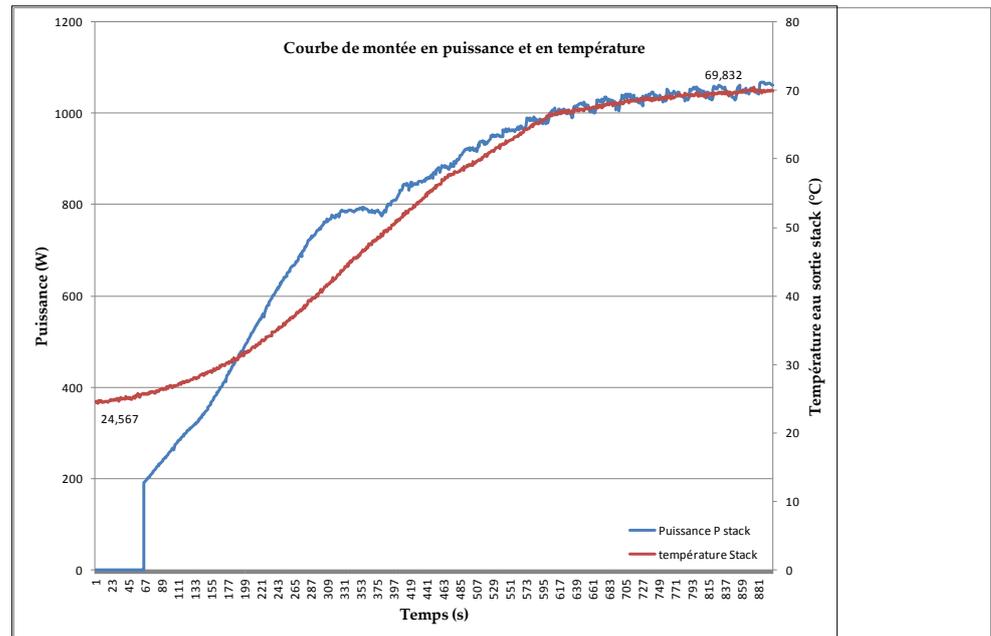
La partie contrôle-commande est assurée par un PC embarqué temps réel situé sous la pile. Un haut niveau de sécurité permet de désactiver automatiquement la pile en cas d'anomalie tandis qu'un balayage à l'azote de l'anode permet d'évacuer l'hydrogène non consommé et d'arrêter la réaction chimique. Le contrôle de la pile est effectué via un asservissement de vitesse du ventilateur, qui permet d'injecter l'oxygène suivant le profil de charge exigé. La pression de détente du gaz hydrogène est fixé à 1.35b, tandis qu'une régulation de température sur le circuit de refroidissement est réalisée pour maintenir la température interne du stack autour de 70°C.

#### 2.3.d. Les contraintes d'utilisation

Les piles à combustible du type PEMFC sont souvent décrites comme ayant un temps de démarrage très court. Il faut néanmoins nuancer ce propos pour le banc Bahia car si le système peut démarrer en une minute, il n'est pas recommandé de le faire débiter à pleine puissance si rapidement. A ce stade, deux paramètres importants, que sont la température et l'hygrométrie, ne sont pas à leurs optimums. Ceci peut entraîner des altérations irréversibles au niveau des membranes. La montée en température est effectuée via une rampe décroissante de tension sur 600s (de 22V à 15V) ce qui permet au système d'atteindre les 50°C pour un courant débité de 40A.

Malheureusement, le banc Bahia a subi un arrêt technique pendant près de deux mois suite à l'altération de deux membranes soumises à un phénomène d'engorgement d'eau. La société HELION a du intervenir et remplacée les membranes défectueuses et le banc fut réintégré à l'ENSAM début janvier, entraînant un retard notable dans le déroulement des opérations.

Tableau VII- Courbe d'évolution de la température sur une montée en puissance



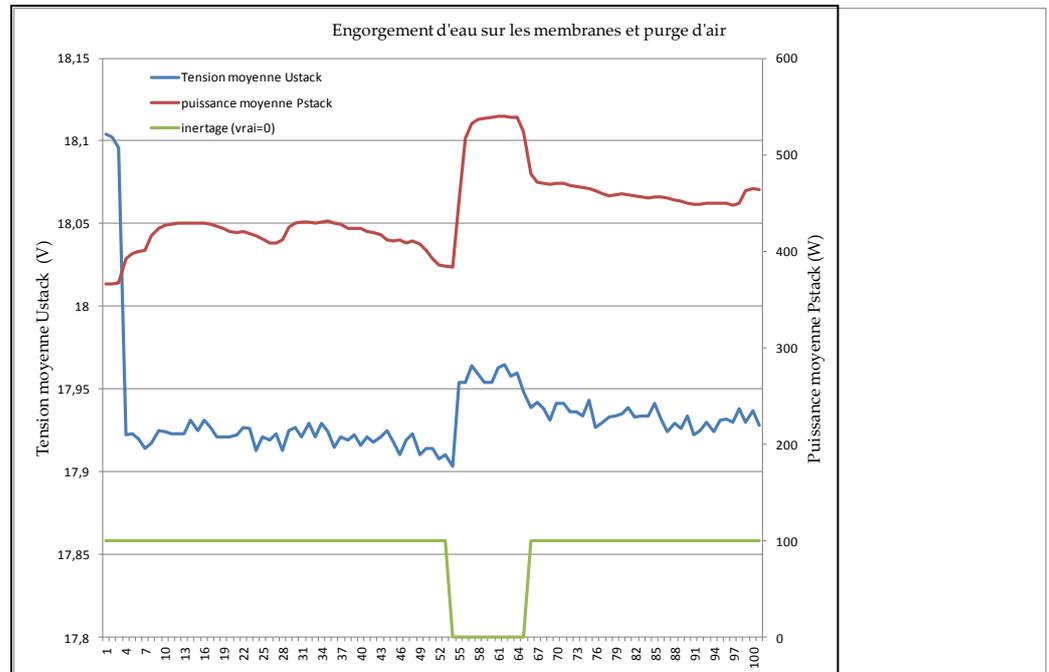
Il faut aussi mentionner que l'hygrométrie joue un rôle important dans les PEMFC. Il faut, dans le cas d'une membrane Nafion™, 5 molécules d'eau pour transporter un ion H<sup>+</sup>. Or l'accumulation d'eau du côté cathodique est encore faible et cette eau avant d'être évacuée du système doit aussi ré humidifier l'hydrogène. On comprend donc toute l'importance de la gestion de l'eau dans le processus chimique.

#### Le phénomène d'engorgement d'eau

Par ailleurs, dans le cas du banc Bahia, nous avons constaté un phénomène d'engorgement d'eau au niveau des membranes lors de fortes réduction de puissance (08 Pn à 0,3 Pn par exemple). Ce phénomène, dit de noyage, provient du fait qu'à forte puissance, la production d'eau est importante et celle-ci est évacuée grâce à la rotation à vitesse maximale du ventilateur d'air (débit air au maximum). Mais lorsqu'on réduit trop brusquement la puissance, la réduction de vitesse (via les lois de contrôle) ne permet plus l'évacuation correcte de l'eau. L'obturation des sites catalytiques par l'eau, entraîne une chute graduelle de la tension observée sur les

cellules. Une séquence dite de purge (débit maximal d'air pulsé pendant 6 à 10s) permet de retrouver une situation nominale.

*Tableau VIII - Courbe des effets d'engorgement des membranes suivie d'une purge d'eau - banc Bahia*



Voici une séquence du banc Bahia qui montre l'importance du phénomène. Après avoir été maintenu pendant plusieurs minutes à pleine puissance ( $P_{moy}=1050W$ ), nous effectuons une régulation de tension autour de 18V. Au bout de quelques minutes, nous observons que la ligne  $H_2$  émet de l'eau par la purge PG400. La tension moyenne  $U_{stack}$  baisse sensiblement, tandis que l'on observe une baisse progressive de la puissance associée à la tension de régulation. Le déclenchement de la purge manuellement, c'est à dire le soufflage maximale du ventilateur VNT100, permet de voir une remontée sensible de la tension mais plus encore du courant donc de la puissance associée.

### 2.3.e. Conséquences

On constate donc, que dans le cas du système Bahia, la pile PEMFC ne doit pas être assimilé à un générateur de courant parfait mais un électro-générateur dont la dynamique dépend fortement des phénomènes électrochimiques naissant à l'intérieur du stack. Ces contraintes devront être pris en compte lors de l'élaboration des lois de commandes locales et globale de la plate-forme multi-sources. Il apparait notamment qu'une problématique importante sera posée pour la fourniture de courant dans un contexte de dynamique rapide.

La solution d'hybridation parait cohérente mais ne peut être résolu directement sans s'être posée la question de la nature de la charge et donc du profil dynamique de celle-ci. Cela revient donc à poser la question différemment, en orientant d'abord nos choix vers un domaine applicatif, qui permettra ensuite de mieux définir la dynamique de charge et donc de choisir les éléments d'hybridation en connaissance de cause.

## 2.4. LES DOMAINES APPLICATIFS PORTEURS

### 2.4.a. Eléments de décision

L'étude de marché des piles à combustible a montré que cette technologie pouvait correspondre aux attentes de certains industriels, notamment dans le domaine du transport et de l'énergétique stationnaire. Par ailleurs, nous avons pu constater que la gestion globale d'énergie pour des systèmes hybrides restait un chantier ouvert dans lequel notre laboratoire avait une carte à jouer. Il fallait cependant admettre que le **choix d'un domaine applicatif devait être antérieur à la prise de décision concernant le dimensionnement des éléments** et le choix des technologies utilisées. A ce stade, il a fallu choisir parmi trois options qui correspondaient le mieux à nos attentes en matière de projet ainsi que la possible

valorisation de nos travaux auprès d'acteurs industriels et d'organismes de soutien à l'innovation comme le pôle de compétitivité Cap Energie.

#### 2.4.b. Le domaine stationnaire de faible puissance

Il s'agit d'un générateur électrique fabriqué à partir d'une pile à combustibles dans le cadre d'une alimentation principale (comme par exemple un site isolée du réseau EDF) ou auxiliaire (Auxiliaries Power Unit APU). Il peut aussi être utilisé en complément d'une source principale insuffisante ou pour une reprise en secours du réseau. Dans le cadre du projet, la charge serait essentiellement du type domotique/bureautique et la puissance mise en jeu serait celle de la PaC à Pn, soit 1000W. La structure adoptée serait la suivante :

- Une source principale pile à combustible permettant l'alimentation d'un réseau électrique jusqu'à concurrence de 1000W. La PaC serait interfacé avec le bus DC via un hacheur survolteur,
- Une source tampon constituée de batterie acide-plomb longue durée permettant l'alimentation à faible puissance ( $P < 300W$ ) ou lors des surcharges ( $P = 1,1 P_n$  unihoriare). Les batteries seraient interfacées avec le bus DC via un hacheur bidirectionnel,
- Un bus DC fixé à 48V.
- Une charge résistive variant de 0 à 1100W.

**Remarque 1:** Une option ultérieure d'évolution serait de raccorder au bus DC, un équipement de production d'électricité photovoltaïque afin de recharger les batteries et/ou d'alimenter l'installation avec ou sans l'aide simultanée de la PaC. Il s'agit d'ailleurs de la base du projet avec la société SOLAIREMED, initié au début de l'année 2012 et abandonné à l'automne dernier (cf 5.1.b).

**Remarque 2:** L'option 2 qui viserait à échanger les batteries par des super condensateurs ne trouve pas un grand intérêt commercial du fait de la faible densité énergétique des super condensateurs dans une optique de plus grande autonomie.

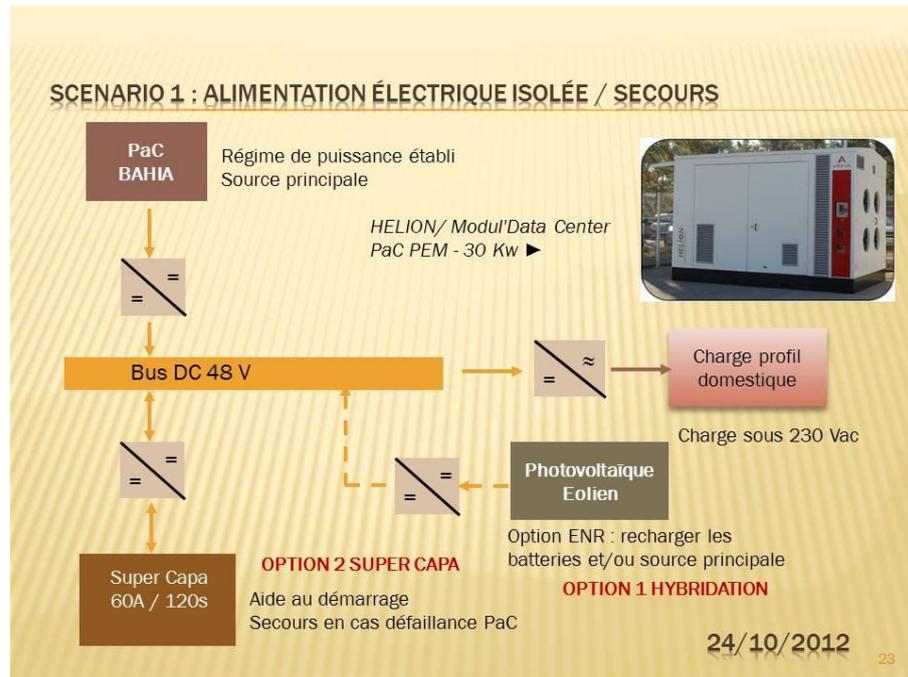


Figure 18 - Structure de la plate-forme d'essai générateur électrique hybride

#### 2.4.c. Le domaine du transport : le véhicule électrique hydrogène VH

Le domaine des transports est devenu incontournable surtout grâce aux investissements dans la recherche et l'élaboration de prototypes par divers laboratoires (dont notamment le FC-Lab avec le véhicule ECCE) ou bien des industriels comme Michelin et la F-City. Il faut y ajouter la forte incitation des pouvoirs publics comme l'ADEME ou le FCH-JU européen. Le laboratoire LSIS aurait donc un intérêt à présenter ces travaux dans cette optique, lui permettant de susciter un regain d'intérêt parmi les industriels locaux.

La structure doit donc se rapprocher d'un système embarqué et utiliser au maximum le retour d'expérience des laboratoires ayant traités cette problématique. L'équipe peut s'appuyer sur un nombre conséquent de publications dont plusieurs thèses issues des travaux de la F-City ou du camion 4x4 ECCE. Néanmoins de nombreuses problématiques restent posées et la réalisation même d'un banc d'essais, même à échelle réduite, reste un exercice difficile. Peu de laboratoires ont pu investir dans l'achat d'une pile à combustible, ce qui limite la portée de leurs travaux. Le banc

Bahia, bien que de puissance moindre par rapport au besoin d'un véhicule, peut constituer un plus dans le projet. Une étude approfondie devra alors être menée afin de dimensionner au mieux les sources de stockage avec un rapport de réduction par rapport à un ensemble conçu pour un véhicule routier.

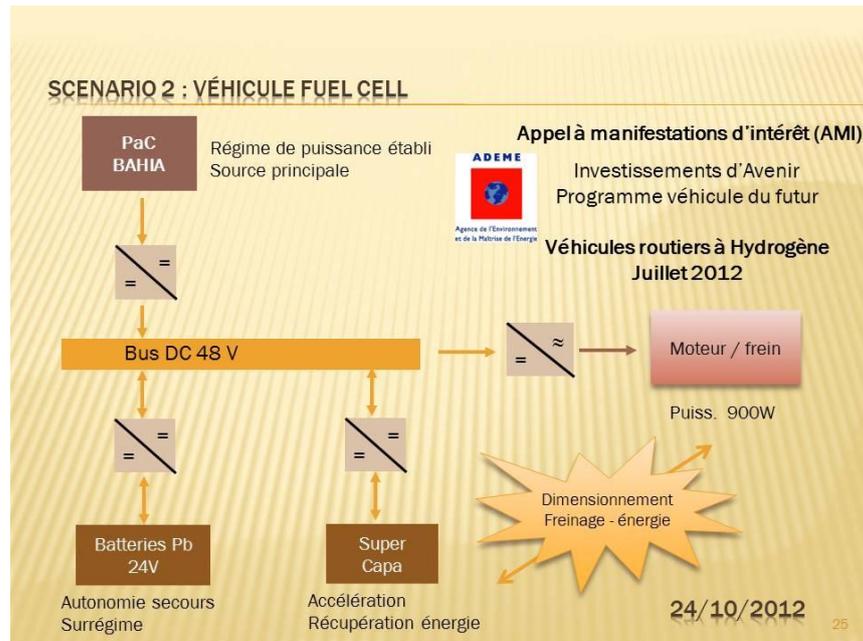


Figure 19 - Structure potentielle de la plate-forme d'essais véhicule à hydrogène

D'après les premiers comptes rendus, la structure doit offrir un maximum de degrés de liberté, aussi chaque source électrique devra être pourvue d'un dispositif approprié de conversion de puissance. En plus d'un éventuel couplage PaC – batteries, on ajouterait un module de supercondensateurs pour gérer les demandes de puissance lors des phases d'accélération. Un processus de récupération d'énergie au freinage est possible, même si techniquement ce procédé reste difficile à maîtriser, nécessitant une étude de réalisation sur le sujet.

#### 2.4.d. Le véhicule électrique hybride à prolongateur d'autonomie

Un autre axe de recherche pour l'emploi des piles à combustibles dans les véhicules routiers, consiste à insérer une pile à hydrogène sur un véhicule électrique à batterie afin de prolonger son autonomie. En effet, la faible autonomie des

véhicules à batterie constitue aujourd'hui le principal frein au développement des ventes de ce type de véhicule. La mise en place d'une pile type PEMFC, avec un réservoir d'hydrogène sous pression et rechargeable en station, semble un procédé d'hybridation réalisable avec l'état actuel des recherches. La société MICHELIN a ainsi collaboré avec le constructeur de véhicules électriques FRAM sur le projet F-City tandis que RENAULT veut développer une Kangoo électrique- Fuel Cell Range Extender, en partenariat avec la société Symbio Fuel Cell.

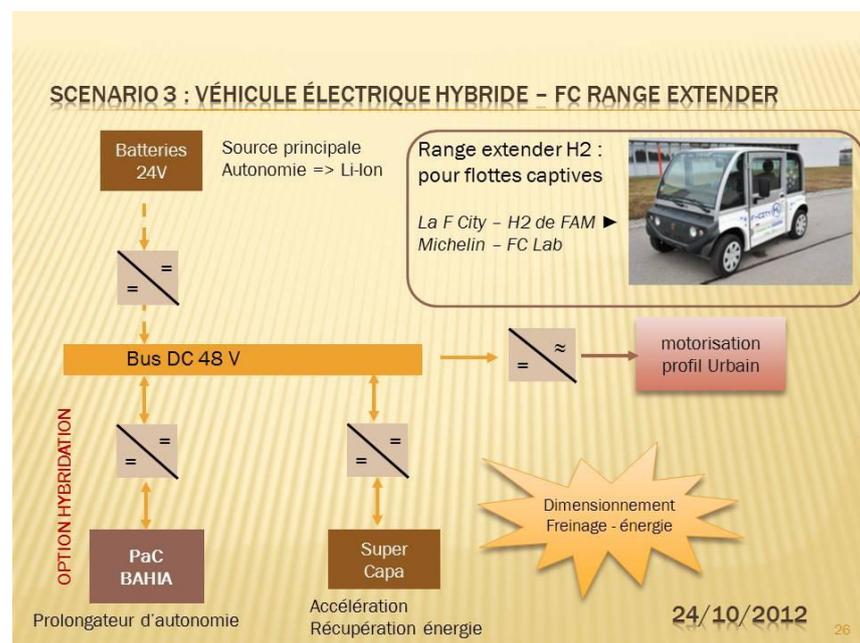


Figure 20 - Structure potentielle de la plate-forme d'essais véhicule électrique range extender

La structure adoptée serait très proche de la précédente mais avec des caractéristiques de dimensionnement différentes du fait que les batteries seraient la source principale d'énergie. L'usage de batteries lithium-ion ou polymères semble incontournable en termes de choix technologique, impliquant un surcoût non négligeable pour notre projet. Les éléments devront donc être dimensionnés selon un schéma différent de celui adopté pour le véhicule hydrogène. Le freinage récupératif pourra être associé aux supercondensateurs tandis que la recharge complète des

batteries devra utiliser le concept industriel dit « Plug-in » (recharge via une alimentation externe).

#### 2.4.e. Vers une application dédiée à l'automobile

Le choix s'est donc porté vers le véhicule électrique hydrogène. Notre positionnement s'est fait dans le domaine des transports afin de bénéficier d'éventuelles aides de la part d'organisations tierces (AFHYPAC, ALPHEA) mais aussi sur un secteur où très peu de laboratoires sont engagés au regard du vaste champ d'étude qu'il reste à explorer. Cela constitue une approche embarquée du système multi-énergie et une transposition vers les systèmes stationnaires ne devrait pas nous obliger à reconsidérer l'ensemble du problème mais à adapter le simulateur à ce type d'environnement. D'autre part, faisant suite au désistement de l'entreprise SOLAIREMED, il apparaissait clairement que la structure d'hybridation devait être la plus simple possible de manière à garantir la viabilité du projet au regard des moyens financiers et humains que l'on pouvait y consacrer.

Néanmoins, en décidant d'aborder les véhicules électriques et hybrides, il apparaît que la mise au point d'une plate-forme à échelle réduite constituera une étape clé et nécessitera un fort investissement en matériel. Le projet principal restant l'élaboration de lois de commande, nous avons émis l'hypothèse qu'une réduction des puissances mises en jeu ne compromettrait pas les résultats. Ceci m'amena naturellement à définir plus précisément, notre future plate-forme d'expérimentation.

## 2.5. STRUCTURE DE LA PLATE-FORME EXPERIMENTALE

### 2.5.a. Problématiques soulevées

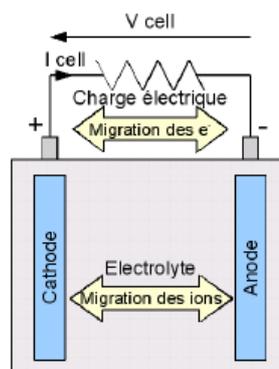
La pile à combustible constituera le cœur du système mais elle ne sera pas en mesure de supporter à longue échéance les à-coups de puissance qu'exige une motorisation automobile. Il faut donc insérer à l'intérieur de la plate-forme, un ou

plusieurs dispositifs, capable de prendre en charge les dynamiques rapides de changement de puissance. Et ce, de manière à faire travailler la pile sur des profils plus doux. Différentes solutions s'offrent à nous mais deux d'entre elles ont fait l'objet d'une étude plus poussée : les batteries et les supercondensateurs.

D'autre part il faut aussi régler la question du seuil de tension de la traverse d'interconnexion appelé bus DC, car le domaine automobile travaille essentiellement aujourd'hui avec des niveaux de tension élevée (autour de 300Vcc) liée aux spécificités des véhicules électriques à batteries rechargeables. Il est possible de constituer une pile PEMFC pouvant atteindre cet ordre de grandeur mais cela reste une solution trop onéreuse. Comme notre banc Bahia affiche une tension à vide de l'ordre de 27Vcc, il faudra rechercher un équilibre entre puissance mis en jeu et tension du bus DC. Enfin l'insertion de dispositif d'électronique de puissance aura une incidence directe sur le degré de liberté du système et donc de nos possibilités d'agir avec la commande globale sur les commandes locales des différents sous-systèmes.

#### 2.5.b. Les batteries

Les batteries produisent l'électricité par l'intermédiaire d'une réaction chimique réversible. Basé sur le principe d'oxydoréduction, les électrodes sont soumises à une différence de potentiel et plongées dans un bain d'électrolyte qui autorise la migration des ions pour refermer le circuit électrique ainsi formé (Figure 21).



*Figure 21 - Principe de fonctionnement d'une cellule de batterie [11]*

Cette cellule élémentaire est placée en série avec d'autres, afin de former une batterie. Selon la technologie utilisée et le nombre de cellules connectées, on obtient le niveau de tension désiré et une capacité à emmagasiner une certaine quantité d'énergie. Les plus courantes sont les batteries au plomb, encore appelée batterie acide-plomb, avec une anode à base de plomb métal et une cathode en dioxyde de plomb. L'électrolyte contient de l'acide sulfurique. Ces batteries sont communément utilisées dans les véhicules pour le démarrage car elles acceptent de forts courants de décharge et endurent de nombreux cycles de décharge-recharge.

La technologie Nickel Cadmium (Ni-Cd) offre une puissance plus importante mais la toxicité du cadmium utilisé sur l'électrode négative limite grandement son usage dans un véhicule. Sa tension est assez faible pour un prix supérieur à celle au plomb. La technologie Nickel Metal hydrure (Ni-MH) a permis plus récemment de remplacer le cadmium par de l'hydrogène adsorbé dans du métal, donc moins toxique. La densité énergétique importante, du fait de son plus faible poids, la destine particulièrement à la traction électrique des véhicules mais son prix de revient est encore élevée. Enfin, la majorité des constructeurs ont recours aux batteries Lithium-Ion (Li-Ion) qui combinent une densité énergétique et une densité de puissance importante. Le tableau (Tableau IX) récapitule l'ensemble des performances selon les technologies utilisées.

*Tableau IX - Caractéristiques des différentes technologies de batteries [11]*

Technologie	Energie spécifique (Wh.kg <sup>-1</sup> )	Puissance spécifique (W.kg <sup>-1</sup> )	Rendement énergétique (%)	Nombre de cycle	Coût (\$.kWh <sup>-1</sup> )
Plomb	35-50	80-150	>80	500-1000	120-150
Ni-Cd	50-60	150-400	75	800	250-350
Ni-MH	70-95	200-1000	70	750-1200	200-350
Li-Ion	60-130	500-4000	>95	1000	200

## 2.5.c. Les supercondensateurs

les supercondensateurs (appelés supercapacitor en anglais et notés SCs) ont été développés au Japon durant les années 70, avant d'être utilisés dans des programmes militaires où leurs capacités à emmagasiner de l'énergie étaient prometteuses. Associés avec des dispositifs d'électronique de puissance, ils se sont récemment imposés dans des applications civiles notamment dans le domaine énergétique conjugué à une baisse sensible du coût de possession.

Le principe des supercondensateurs repose sur une capacité  $C$  importante qui reliée à la tension d'utilisation  $U$  autorise une accumulation d'énergie  $E$  égale à :

$$E = \frac{1}{2} C U^2$$

La différence avec les condensateurs standards, réside dans la valeur importante de  $C$ , notamment grâce à l'accroissement de la surface  $S$  de contact avec l'emploi d'une membrane poreuse et la faible valeur de l'épaisseur  $d$  du diélectrique, suivant ainsi la formule :

$$C = \epsilon_o \epsilon_r \frac{S}{d}$$

Les charges apparaissent sur deux zones distinctes, cloisonnées par un séparateur pour éviter les courts-circuits. C'est donc une double couche électrique qui va remplir le même rôle que celui d'un diélectrique classique, avec des matériaux relativement peu onéreux et une plus grande surface d'accumulation de charges.

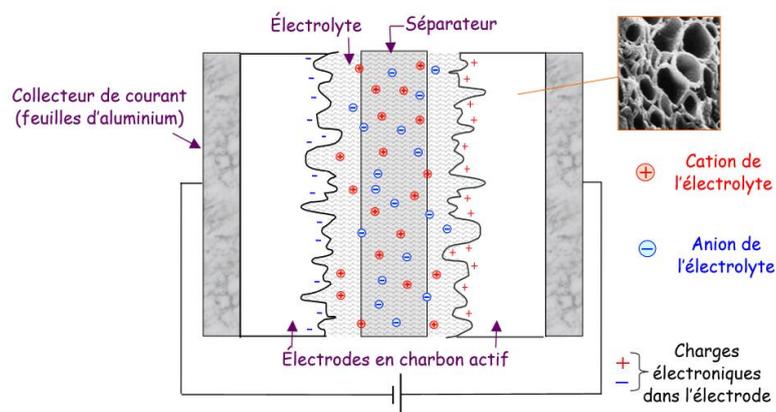


Figure 22 - principe de fonctionnement d'un supercondensateur (INSA Lyon - 2011)

Grâce à ses qualités, le supercondensateur s'est imposé comme la solution pour la délivrance d'énergie sur de courtes périodes. C'est le cas des phases d'accélération d'un véhicule et ils peuvent être rechargés pendant les phases de freinage, un grand nombre de fois (autour du million de cycle). Les principaux fabricants sont les firmes Maxwell, Batscap, Epcos, ... Un dispositif d'équilibrage actif des charges est prévu, puisque l'unité simple voisine autour des 2.5V et que c'est l'assemblage en série et en parallèle de ces unités, qui concoure au dimensionnement définitif du pack de supercondensateurs.

#### 2.5.d. Le bus DC et les convertisseurs associés

Le choix du voltage du bus DC dépend d'un certain nombre de facteurs qu'il faut concilier :

- Le rendement d'un hacheur reste correct pour autant que le rapport d'élévation reste compris autour de 1 à 4,
- Plus la tension est élevée, plus à puissance égale, on diminue la valeur de courant donc le dimensionnement des câbles, des protections et des radiateurs de dissipation thermique,
- En courant continu, les gammes commerciales des fabricants de moteurs ne couvrent pas l'ensemble des tensions. Ces gammes sont concentrées sur des tensions de référence (6V, 12V, 24V, 48V, 300V).

Compte tenu de la plage du banc Bahia ( $13V < U_{pac} < 27V$ ) et de ces critères, notre choix s'est porté vers un bus fixé à 48V. Cette tension souvent rencontrée au niveau industriel, nous permettra de bénéficier de produits de série et donc de réduire la facture du banc d'expertise.

### 2.5.e. Structure adoptée pour la plate-forme expérimentale

Enfin, la plate-forme expérimentale sera articulée autour d'une pile PEMFC Bahia associée à un jeu de supercondensateurs, l'idée de rajouter des batteries ayant été supprimée. En effet, on considère que pour la question d'autonomie, les réservoirs d'hydrogène satisferont un rayon d'action de 100km, adapté à un usage plutôt urbain. De surcroit, la plate-forme disposera de convertisseurs type hacheur, pour la pile comme pour les supercondensateurs. Ceci nous autorisera à gérer les phases de recharge de ces derniers.

Du côté de la charge, un hacheur assurera l'alimentation du moteur électrique à courant continu qui sera choisi pour assurer la propulsion du système. La tension du bus de 48V va nous permettre de choisir une motorisation, en s'appuyant sur la gamme commerciale développée pour le karting électrique et qui correspond parfaitement à notre projet de véhicule. Sur le plan financier, ces choix permettent de garantir une plate-forme utilisant le banc Bahia et ne nécessitant qu'un investissement modéré à hauteur de 8000 € dans un premier temps.

### 3. MODELISATION ET COMMANDE DU GROUPE MOTOPROPULSEUR

L'orientation de notre projet vers une application automobile a été motivée par le fort potentiel économique que représente l'intégration de la motorisation électrique hybride dans le parc automobile français. De plus, les pouvoirs publics soutiennent la recherche qui y est associée. Cependant, dans le cadre de notre projet de gestion d'énergie, une connaissance plus fine de la charge électrique raccordée à cette plateforme est nécessaire afin de répartir les flux énergétiques suivant des critères qui restent à définir.

Dans un premier temps, une étude des forces mécaniques appliquées à un véhicule automobile, permettra de déterminer les caractéristiques du moteur de propulsion en fonction des performances souhaitées selon un cahier des charges prédéfini. Nous entamerons ensuite une modélisation du groupe motopropulseur GMP, en explicitant le choix de la Représentation Energétique Macroscopique comme support de représentation. Enfin la commande du groupe GMP sera d'abord abordée dans le cadre de l'interaction conducteur-véhicule, puis dans le cadre plus spécifique de notre étude.

#### 3.1. ETUDE MECANIQUE DU VEHICULE ELECTRIQUE HYDROGENE

##### 3.1.a. Bilan des forces

Dans un premier temps, nous devons identifier les différentes forces de résistances, qui s'opposent au déplacement du véhicule dotée d'une vitesse  $v$ . Ces forces induisent un couple résistant par rapport à celui développé par le moteur électrique. Selon le principe fondamental de la dynamique, on peut écrire :

$$M \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F}_t - \sum \vec{F}_r \quad (3-1)$$

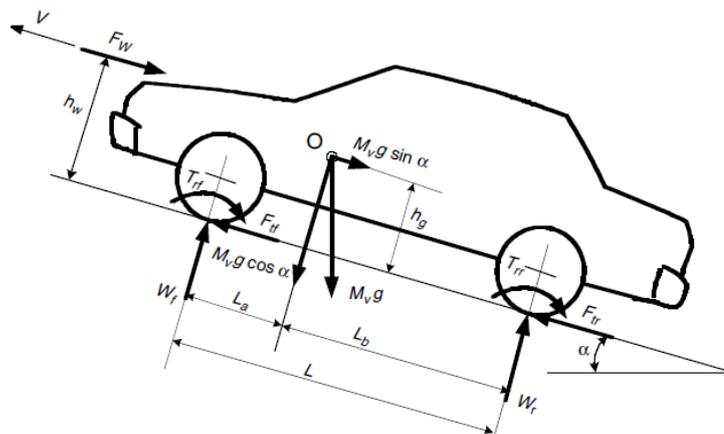
$F_t$  représente les forces de traction,

$F_r$  représente les forces de résistances,

$M$  est la masse du véhicule.

Les études sur les véhicules ont démontré que l'on pouvait assimiler les forces de résistances en trois forces distinctes, lorsque le véhicule se déplace à une vitesse  $v$  :

- Les forces de résistance au roulement  $F_{tf}$  et  $F_{tr}$  induites par la réaction des pneus sur le revêtement routier,
- La force de résistance à l'avancement  $F_w$  produite par le frottement de l'air sur la carrosserie,
- La force de gravité liée à la masse  $M_v$  du véhicule et à l'inclinaison  $\alpha$  de la route.



*Figure 23 - Représentation des forces de résistance et de traction exercées sur un véhicule en mouvement*

#### iv. Les forces de résistance au roulement

Ces forces sont créées par la réaction de contact entre le pneu et la chaussée. Cette force n'est pas constante et sa distribution spatiale diffère selon la dureté du revêtement. Ainsi, sur de l'asphalte, le pneu se déforme entraînant sur la partie avant du contact roue-sol plus d'effort que sur la partie arrière comme le montre la figure 2(a) ci-dessous. A l'inverse, sur un sol meuble qui se déforme 2(b), l'ensemble des forces s'exerce sur la partie avant du pneu.

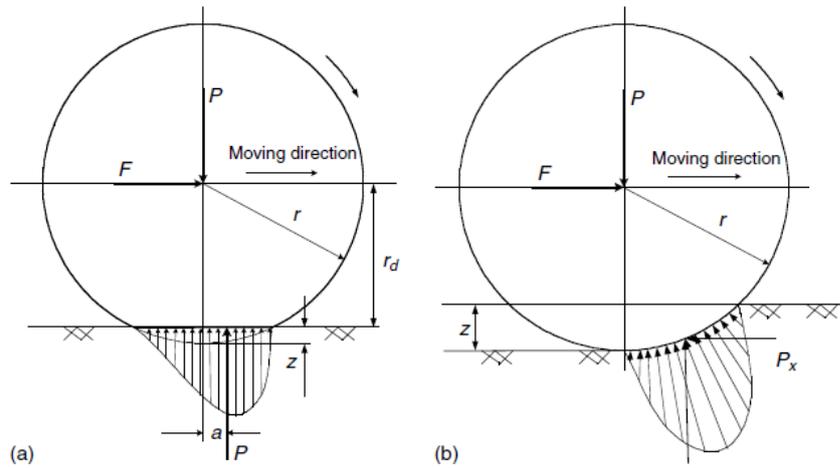


Figure 24 - Répartition des contraintes sur la zone de contact d'une roue suivant son profil de dureté  
(a) route asphalté (b) sol mou [12]

Si P représente la normale du poids ramené au centre de la roue, ces forces de contact créées un couple résistant au roulement égale à :

$$T_r = P \cdot a \quad (3-2)$$

Pour contrer ce couple, il faut donc un couple opposé :

$$F_r = \frac{P \cdot a}{r_d} = K_r P \quad (3-3)$$

Où  $r_d$  désigne le pseudo-diamètre et  $K_r$  représente le coefficient de roulement qui diffère selon le type de pneu, le revêtement et la vitesse du véhicule. Le tableau suivant donne quelques indications sur sa valeur selon différents revêtements et types de véhicule.

### Rolling Resistance Coefficients

Conditions	Rolling resistance coefficient
Car tires on concrete or asphalt	0.013
Car tires on rolled gravel	0.02
Tar macadam	0.025
Unpaved road	0.05
Field	0.1–0.35
Truck tires on concrete or asphalt	0.006–0.01
Wheels on rail	0.001–0.002

Figure 25 - Liste de valeurs du coefficient de roulement  $K_r$ , selon le type de véhicule et la nature du terrain [12]

On approxime la force de roulement à une droite dépendant de la vitesse  $v$  et dont l'erreur reste acceptable, pour des vitesses inférieures à 128km/h, ce qui sera notre cas. On donne donc la formule suivante pour le coefficient  $K_r$  :

$$K_r = 0.01 \left( 1 + \frac{v}{100} \right) \quad (3-4)$$

Du fait de l'inclinaison de la route, il faut utiliser la projection verticale du poids  $P$ , la force de résistance au roulement devient donc :

$$F_r = K_r(v) M g \cos \alpha \quad (3-5)$$

v. La force de résistance de l'air

Le déplacement du véhicule entraîne, du point de vue de l'écoulement de l'air, la création d'une zone de haute pression sur l'avant du véhicule tandis qu'une zone de basse pression se manifeste sur l'arrière. On assimile cette résistance à l'écoulement, à une force  $F_w$  donnée par la formule suivante :

$$F_w = \frac{1}{2} \rho S C_x (V + V_w)^2 \quad (3-6)$$

$\rho$  désigne la densité de l'air,  $S$  la surface frontale du véhicule,  $C_x$  le coefficient aérodynamique du véhicule et  $V_w$  la vitesse du vent compté négativement si sa direction coïncide avec celle du véhicule. Dans la suite de notre étude, la densité volumique de l'air sera fixée à  $T_{20} = 293,15$  K (20 °C), où  $\rho_{20} = 1,204$  kg/m<sup>3</sup>. A titre indicatif, le tableau suivant donne quelques valeurs de  $SC_x$  pour des véhicules électriques :

Véhicule	Constructeur	S.Cx
Twizy	Renault	0.64
Prius	Toyota	0.77

vi. La force de gravité

Selon l'inclinaison de la route, la masse du véhicule produit une résultante non nulle et opposée au déplacement dans le cas d'une côte et dans le même sens en descente. On note  $F_p$  cette composante égale à :

$$\boxed{F_p = M g \sin\alpha} \quad (3-7)$$

Nota : On approxime parfois le sinus à la pente de la route pour de faibles valeurs de  $\alpha$ .

vii. La force de traction

On note, comme indiqué sur la figure 5, la force de traction de l'essieu avant  $F_{tr}$  et  $F_{tr}$  celle de l'essieu arrière. Considérant que dans notre cas, le véhicule étudié sera à traction ou à propulsion (et non pas 4x4), il est possible de supprimer une des deux forces suivant le mode utilisé et de noter la force totale de traction  $F_t$ .

En reprenant le principe fondamental de la dynamique, on peut écrire que :

$$\boxed{\vec{F}_t = M \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{F}_r + \vec{F}_w + \vec{F}_p} \quad (3-8)$$

Cette force de traction sert donc à vaincre l'inertie du véhicule ainsi que les forces de résistances et elle sera produite par les roues motrices. Le couple mis en jeu par ces dernières, provient du moteur électrique via une **chaîne de transmission mécanique**, dont le principal objectif sera l'adaptation de la vitesse moteur à celle, moindre, des roues.

## 3.1.b. La chaîne de transmission

La roue n'est pas directement reliée au moteur, car il faut adapter la vitesse de rotation du moteur à celle des roues, plus faible, tout en considérant les couples mis en jeu. La transmission du mouvement dans une voiture est architecturée de manière générale avec :

- Un **groupe motopropulseur GMP** qui comprend :

- Un moteur thermique ou électrique
- Un embrayage qui permet de désolidariser la rotation du moteur du reste de la transmission (uniquement sur les véhicule à moteur à combustion)
- Une boîte de vitesse reliée à l'embrayage par l'arbre primaire. Elle permet de réduire ou d'augmenter (overdrive) la vitesse d'entraînement de l'arbre de transmission suivant un rapport variable (multi-vitesses) noté  $n_g$ .
- Un **boitier différentiel** qui fait l'interface entre l'arbre de transmission et les arbres de roues. Le différentiel applique un rapport de réduction, noté  $n_d$ , ainsi que l'adaptation de la vitesse de la roue intérieure dans un virage par rapport à celle considérée à l'extérieure.
- Des **roues motrices** dont le pseudo-diamètre  $r_d$  peut être assimilé au diamètre nominal  $R$  du pneu malgré l'écrasement de ce dernier. Les pneus sont généralement dénommés de la façon suivante AAA / BB R PP (ex. 145 / 80 R15). Une formule empirique permet de trouver le rayon  $R$  en cm à partir de ces informations :

$$R = \frac{(PP \times 2.54)}{2} + \left( \frac{AAA}{10} \times 0. BB \right) \quad (3-9)$$

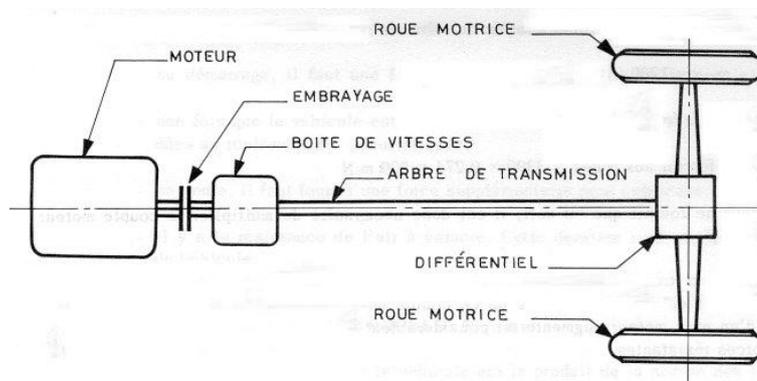


Figure 26 - Schéma de la transmission d'un véhicule

On adopte les notations suivantes :

- $F_t$  : force de traction
- $R$  : rayon de la roue
- $T_m$  : couple moteur ;  $N_m$  : la vitesse de rotation moteur en tr/min
- $T_w$  : couple de la roue ;  $N_w$  : la vitesse de rotation de la roue en tr/min
- $n_g$  : rapport de la boite de transmission  $V_{mot}/V_{arbre}$  (vitesse moteur sur vitesse arbre de transmission)
- $n_d$  : rapport du différentiel  $V_{arbre}/V_{roue}$  (vitesse arbre de transmission sur vitesse roue)
- $n_t$  : le rapport total  $V_{mot}/V_{roue}$  tel que  $n_t = n_g \cdot n_d$
- $\mu_t$  = rendement de la transmission (compris entre 0.90 et 0.98)

A ce stade, il est nécessaire de tenir compte du rendement global de la chaîne de transmission. En effet la chaîne de transmission comporte une série de convertisseur d'énergie mécanique non parfait aussi donne-t-on quelques valeurs de rendement de divers composants :

- Embrayage : 99%,
- Paire d'engrenages : 95-97%,
- Roulement, joint : 98-99%,
- Boite de vitesse rapport directe : 90%,
- Boite de vitesse autres rapports : 85%.

Il est donc prudent de prendre, pour un véhicule électrique à forte démultiplication, une valeur de rendement global de transmission  $\mu_t$  :

$$0.82 \leq \mu_t \leq 0.92$$

### 3.1.c. La motorisation électrique

Pour terminer cette partie sur l'étude du GMP, il faut déterminer les caractéristiques du moteur de propulsion du véhicule. A partir des forces exercées

sur les pneumatiques et des conversions de la chaîne de transmission, on peut déterminer son couple et sa vitesse de rotation.

On considère l'ensemble des forces résistantes  $F_t$ , on peut alors calculer le couple moteur nécessaire. Le couple de la roue  $T_w$  nécessaire à l'avancement de la voiture devient :

$$T_w = R F_t \quad (3-10)$$

Mais on peut aussi écrire que le couple de traction des roues est proportionnel au couple moteur  $T_m$  :

$$T_w = T_m n_t \mu_t \quad (3-11)$$

En égalisant les seconds membres des deux équations ci dessus, il vient alors une expression du couple moteur  $T_m$  fonction de  $F_t$  donc fonction de l'accélération, de la masse  $M$  et de la vitesse  $V$  du véhicule :

$$T_m = \frac{R F_t}{n_t \mu_t} \quad (3-12)$$

$$\boxed{T_m = \frac{R \left( M \frac{dV}{dt} + F_r + F_w + F_p \right)}{n_t \mu_t}} \quad (3-13)$$

La caractéristique en couple d'un moteur électrique est bien mieux adaptée que celle d'un moteur à combustion interne comme le montre l'illustration ci-dessous (Figure 27). Le moteur à combustion ne permettant pas un réglage de couple sur l'ensemble de la plage de vitesse, il est donc nécessaire d'utiliser une boîte de vitesse. Les 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> rapports permettent une remontée du couple de démarrage à basse vitesse alors que le dernier rapport permet de maintenir un couple quasi constant sur une plage de vitesse élevée. De son côté le moteur électrique démarre à couple maximal puis celui-ci décroît à partir d'une vitesse de rotation appelée vitesse base du fait de la limitation en puissance du moteur électrique.

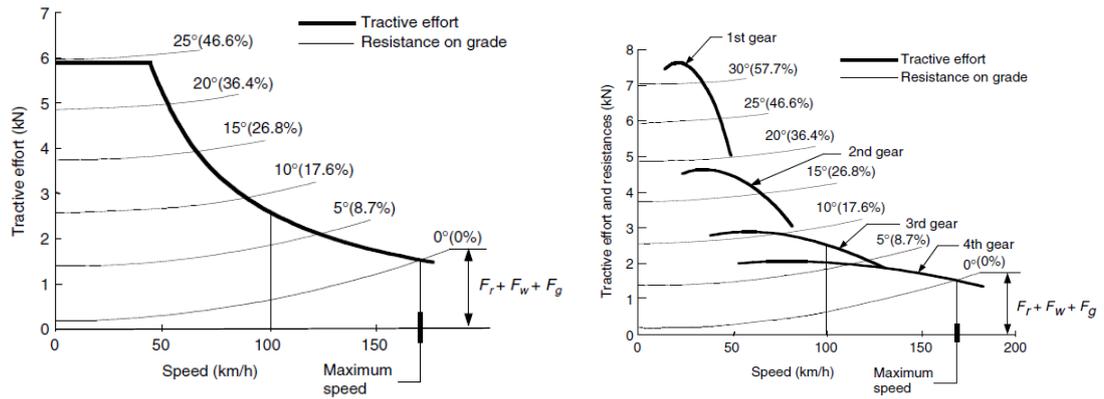


Figure 27 - Caractéristique couple vitesse du moteur et la caractéristique couple résistant selon la pente pour le moteur électrique (a) et à combustion interne et sa boîte de vitesse étagée (b). [12]

La vitesse maximale de rotation du moteur est atteinte lorsque le véhicule atteint sa vitesse de croisière maximale, donc pour une accélération et une pente nulle.

$$V = \frac{N_w \pi R}{30} = \frac{N_m \pi R}{n_t 30} \quad (3-14)$$

De cette formule, en fonction d'une vitesse maximale  $V_{max}$  désirée pour le véhicule, on calcule la vitesse de rotation maximale du moteur électrique  $N_{m max}$  :

$$N_{m max} = \frac{V_{max} n_t 30}{\pi R} \quad (3-15)$$

On peut aussi obtenir le couple moteur correspondant, soit d'après l'équation précédente :

$$T_m \text{ à } v_{max} = \frac{R (F_r + F_w)}{n_t \mu_t} \quad (3-16)$$

$$T_m \text{ à } v_{max} = \frac{R (K_r M g + \frac{1}{2} \rho S C_x V_{max}^2)}{n_t \mu_t} \quad (3-17)$$

### 3.2. APPLICATION A UN VEHICULE LEGER URBAIN

#### 3.2.a. Choix d'un véhicule

Dans le cadre de notre projet, il est nécessaire de cibler un véhicule qui sera émuler sur le simulateur afin de garantir une portabilité des résultats trouvés sur la

gestion d'énergie vers des prototypes réels. A ce stade, il paraît intéressant de voir comment l'industrie automobile envisage l'intégration de la pile à combustible dans le parc automobile. Un tour d'horizon des constructeurs européens a permis de relever un certain nombre de conclusions destinées à nous aider dans notre choix.

En premier lieu, le nombre de constructeurs qui ont lancé effectivement des recherches et réalisé des prototypes ou des préséries de véhicules hydrogènes est encore faible comme le soulignait le rapport européen du FCH-JU ou l'ADEME. Actuellement l'essentiel des véhicules utilisent les batteries ou une hybridation avec un moteur thermique pour réaliser la motricité. On remarque que la majorité des constructeurs cible des véhicules légers avec notamment, des véhicules urbains 100% électriques rechargeables. Ceci est lié au principe de la recharge des batteries auprès de bornes fixes, qui favorisent les flottes captives c'est à dire qui reviennent vers un dépôt (bus, parking de sociétés, habitat) ou reste en zone urbaine donc à proximité de celles-ci.

Dans le domaine de l'hydrogène, la recharge en gaz passe par des stations dédiées à l'inverse de la possibilité donnée aux particuliers de recharger sur le réseau domestique leurs véhicules. Ces stations devront être implantées suivant un réseau capable de couvrir un territoire, avec une distance entre chaque point inférieure à l'autonomie actuelle des véhicules (autour de 150km). L'exemple du projet allemand, mené conjointement par Air Liquide et Mercedes, montre que les constructeurs misent d'abord sur une implantation urbaine avant de passer à une extension des implantations pour former un réseau homogène. Le tableau suivant donne les principaux modèles de véhicules hydrogène développés sur le marché (Figure 28).

Enfin, le prix d'achat des véhicules électriques et aussi hydrogène sera plus élevé que celui des véhicules à combustion, même en favorisant par des aides ou des primes leurs acquisitions. Une clientèle citadine sera donc privilégiée et c'est donc sur la base d'un véhicule léger urbain que nous avons orientées nos recherches

PILE À COMBUSTIBLE À HYDROGÈNE GAZEUX						
Fabricant automobile	Nom du véhicule	Type de véhicule	Stockage de l'énergie	Puissance	Autonomie	Vitesse
Daimler Chrysler	Necar 4	Passenger car	2.5 kg 35 Mpa	75 kW	200 km	145 km/h
Toyota	FCHV5	Passenger car	35 l 50 Mpa	90 kW	500 km	
Ford	THINK FC5	Passenger car	35 Mpa	75 kW		128 km/h
Honda	FCX V4	Passenger car	130 l 35 Mpa	60 kW	300 km	140 km/h
Daimler Chrysler	Sprinter	Light duty vehicle	35 Mpa	55 kW	150 km	120 km/h
Toyota	Hino Bus	Bus	25 Mpa	180 kW	300 km	80 km/h
Daimler Chrysler	Citaro Bus	Bus	35 Mpa	250 kW	300 km	80 km/h
PILE À COMBUSTIBLE À HYDROGÈNE LIQUIDE						
Opel	Hydro-Gen3	Passenger car	4.8 kg	75 kW	650 km	180 km/h
Renault	Laguna	Passenger car		30 kW	300 km	
MAN / Linde	SL 202	Bus	600 l	140 kW	300 km	75 km/h

Source : Altermotive 2010

Figure 28 - Liste des principaux véhicules à hydrogène développés jusqu'en 2010

### 3.2.b. Cahier des charges du véhicule

N'étant pas familier avec l'ingénierie automobile, nous n'étions pas en mesure de construire un prototype complet de véhicule et ce qui nous aurait éloigné de nos objectifs de projet. Les considérations énergétiques et électriques portent l'essentiel de notre attention. Nous nous sommes donc inspirés de véhicules électriques urbains existants, pour déterminer les performances attendues du moteur et donc les variations de puissance qui seraient mises en jeu lors de son utilisation. Le véhicule type retenu aura donc les caractéristiques suivantes :

- Autonomie :  $A = 120\text{km} \pm 10\%$ ,
- Vitesse maximale : 50 km/h (limite absolue pour voiture sans permis), soit 13.89 m/s,
- Accélération : 0 – 50 km/h en 10 s,
- Masse (Masse total roulant MTR):  $M = 650\text{ kg}$ ,

- Charge ou masse utile : 100 kg,
- Type de pile à combustible : pile à membrane échangeuse de proton PEMFC,
- On souhaite que le véhicule puisse démarrer dans une pente de 20%,
- On impose des pneumatiques type 165 / 65 R 14,
- Le design du véhicule entraîne un SCx (assez moyen) de 0.64,
- Rapport de transmission globale de 8.6 et un rendement global moyen de 0.90,
- La constante de gravité utilisée dans les calculs sera prise à  $g = 9,81\text{ms}^{-2}$ .

### 3.2.c. Problématique de l'étude dynamique du véhicule

Les caractéristiques du véhicule données ci-dessus permettent de déterminer les valeurs maximales de vitesse et de couple mis en jeu. Mais dans le cas du véhicule automobile, le conducteur joue un rôle central dans les variations de puissance. C'est lui qui règle la vitesse du véhicule en dosant l'accélération du moteur, en tenant compte de facteurs réglementaires (limitation de vitesse, panneaux, feux), environnementaux (les autres véhicules, obstacles) et aussi personnels (conduite souple, sportive, fatigue). Or tous ces éléments vont infléchir sur la consommation d'énergie d'un véhicule pour aller d'un point A vers un point B.

Ayant privilégié, comme beaucoup d'autres études, une approche par simulation, il est nécessaire de recourir à un profil type. Ils en existent plusieurs, même si pour des raisons d'harmonisation et de comparaison des travaux, des profils standards internationaux ont été créés. On peut citer pour les Etats-Unis, l'Urban Dynamometer Driving Schedule UDDS tandis qu'en Europe on utilise le cycle NEDC (New European Driving Cycle), mélangeant utilisation urbaine et autoroutier léger. Le cycle ECE-15, que nous avons retenu, est plus urbain avec une vitesse limitée à 50km/h. Ces profils sont utilisés lors des test de pollutions, de mise en service des véhicules et bien sur dans les études des véhicules hybrides.

Le profil ECE-15 est un profil urbain avec trois phases de conduite entrecoupées d'arrêts, comme lors d'une conduite en ville (Figure 29). Le cycle complet dure 195s et peut-être répété pour obtenir un cycle de test plus long (notamment dans le cas de l'étude de l'autonomie). Chaque cycle comprend une montée en allure, un palier à vitesse constante et une décélération constante. Il est décrit plus précisément en annexe B.

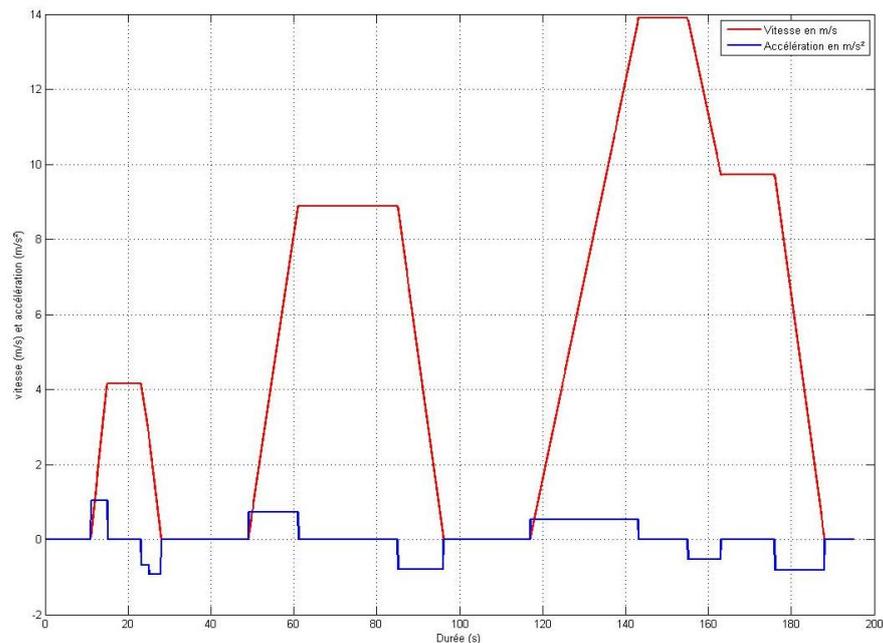


Figure 29 - Profil de vitesse et d'accélération du cycle ECE-15

### 3.2.d. Couple et puissance moteur mis en jeu

En prenant les données issues du cahier des charges, il est possible de dresser les valeurs maximales du couple moteur et de la vitesse. Le bilan des forces de résistance s'établit comme suit, à  $V_{\max}$  fixée à 50km/h :

- Force de roulement avec  $k_r = 0.0112$  et à pente nulle :

$$F_r = 71,42 \text{ N}$$

- Force aérodynamique maximale à 50km/h, vent nul :

$$F_w = 74,33 \text{ N}$$

- Force de gravité liée à la masse théorique du véhicule de 650 kg avec une pente de 20% :

$$F_p = 1250,53 \text{ N}$$

- Calcul du rayon de la roue :

$$R = \frac{(14 \times 2,54)}{2} + \left( \frac{145}{10} \times 0,80 \right)$$

$$R = 28,5 \text{ cm}$$

A partir de ces données, on calcule la vitesse de rotation maximale du moteur et la puissance associée pour une vitesse de 50 km/h, soit d'après l'équation (3.15) :

$$N_{m \max} = \frac{13,89 \times 8,6 \times 30}{\pi \times 0,285}$$

$$N_{m \max} = 4002,4 \text{ tr min}^{-1}$$

A cette vitesse, les forces s'opposant au déplacement valent :

$$F_t = 71,42 + 74,33 = 145,7 \text{ N}$$

Donc la puissance demandée par les roues vaut

$$P_{roue} = F_t \times V_{\max}$$

$$P_{roue} = 2024 \text{ W}$$

Ce qui nous donne une puissance moteur à  $V_{\max}$  de :

$$P_{moteur \text{ à } v_{\max}} = 2249 \text{ W}$$

Ensuite on calcule le couple de démarrage dans le cas d'une pente de 20% :

A force totale s'opposant au démarrage vaut

$$F_t = 71,42 + 1250,53 = 1321,95 \text{ N}$$

Le couple développé par les roues équivaut à :

$$T_{w \text{ dem}} = 376,76 \text{ Nm}$$

Soit un couple de démarrage moteur de :

$$T_{m \text{ dem}} = \frac{T_{w \text{ dem}}}{n_t \mu_t} = \frac{376,76}{8,6 \times 0,90}$$

$$T_{m \text{ dem}} = 48,67 \text{ Nm}$$

On donne sur les figures suivantes, les valeurs de couples et de puissance développés par le moteur électrique suivant une vitesse véhicule imposée  $V_{veh}$  épousant le profil ECE-15 vu précédemment. On remarquera les pics de puissance lors des phases d'accélération et la possibilité de récupérer de l'énergie lors des phases de décélération (puissance négative).

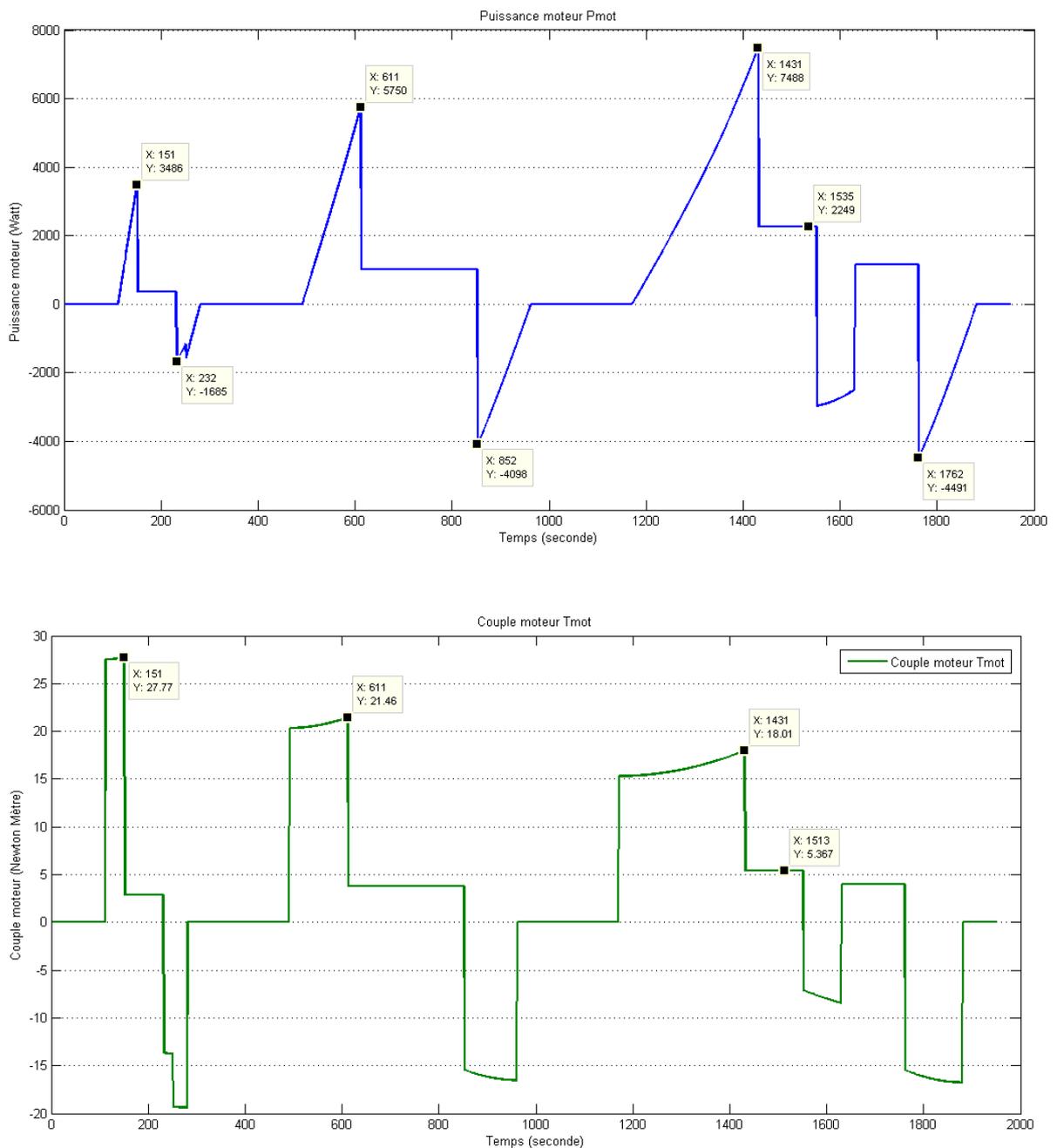


Figure 30 - Courbes de puissance (haut) et de couple (bas) du moteur sur cycle ECE-15

### 3.3. DE L'ORGANISATION DU MODELE A LA COMMANDE

#### 3.3.a. Quel outil de modélisation ?

Le choix d'un formalisme de représentation est toujours une étape délicate car il doit permettre une représentation aussi complète que possible du système sans toutefois être trop difficile à manipuler dans la suite des travaux. Les modèles élémentaires, tirés des expressions analytiques, permettent de caractériser chaque élément du puzzle énergétique que représente le véhicule. Néanmoins, le succès du projet repose sur la mise au point d'un modèle global, qui puisse rendre compte des échanges entre les éléments. Ceci est particulièrement vrai pour les systèmes électromécaniques dont l'industrie regorge et qui ont connu de profondes améliorations par le biais de l'électronique de puissance, de l'instrumentation et du contrôle-commande associé à des calculateurs toujours plus puissants.

Dans le cadre de notre projet, plusieurs formalismes étaient disponibles comme les schémas blocs, les bond graph ou le Graphe Informel Causal GIC. Les schémas blocs sont souvent utilisés en automatisme mais lorsque le système devient complexe, cette représentation perd en lisibilité et ne permet pas de visualiser correctement les échanges énergétiques.

#### 3.3.b. La Représentation Energétique Macroscopique

Dans le but de trouver un formalisme adapté, le groupement de recherche GdR SDSE a engagé d'importants travaux, en 1998, sur l'étude des systèmes multi machines multi convertisseurs (SMM). Le laboratoire de Lille L2EP (rattaché à Arts et Métiers ParisTech de Lille), ayant notamment travaillé sur le Graphe Informel Causal [13], a présenté en 2003 un nouveau formalisme avec une approche systémique du problème.

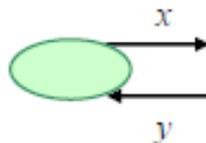
S'appuyant sur le GIC et la causalité intégrale, la Représentation Energétique Macroscopique (REM) [14] [15] illustre graphiquement les transferts énergétiques

entre sources émettrices et à l'autre bout les sources réceptrices du systèmes. Entre ces deux points, des éléments effectuent des conversions ou des accumulations d'énergie. Ce formalisme est aujourd'hui employé dans de nombreuses études sur les systèmes hybrides, où la valorisation des échanges énergétiques mis en lumière par la REM, est appréciée. Le professeur A. Bouscayrol fédère l'essentiel des publications de mises à jour sur un site dédié et celui du L2EP.<sup>6</sup>

Pour relier les différents éléments entre eux, on utilise la notion d'action-réaction d'un élément A avec un élément B par exemple. Ainsi, on matérialisera un effort exercé de A vers B par une flèche dans ce sens et inversement la réaction de B vers A par une grandeur de flux (réaction) en sens inverse. L'exemple d'un générateur parfait de tension imposant une tension  $U_s$  à une charge résistive  $R$ , qui en réponse à cette sollicitation, fait circuler un courant  $I$ . Le produit mathématique du vecteur d'effort par le vecteur de flux donne la puissance instantanée de l'élément à l'une de ses bornes.

Comme tout formalisme de représentation, des pictogrammes ont été mis en place pour décrire visuellement, les fonctionnalités remplies par les éléments. On en compte principalement quatre : les sources, les convertisseurs mono-domaine et multi-domaine et les éléments d'accumulation.

**Les sources** constituent les terminaisons du schéma de représentation REM et sont génératrices ou réceptrices d'énergie. Elles sont représentées par un ovale vert avec un seul vecteur d'entrée et un seul vecteur de sortie comme montré ci-dessous.

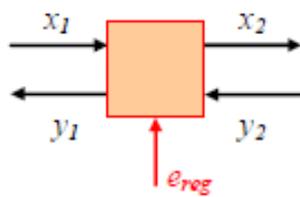


Source

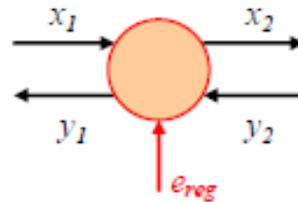
---

<sup>6</sup> <http://www.emrwebsite.org/>  
<http://l2ep.univ-lille1.fr/>

Les **convertisseurs mono-domaine** effectuent une conversion d'énergie immédiate et sans changement de la variable d'état associée. Un coefficient de réglage peut intervenir sous la forme d'une flèche rouge comme montré ci dessous. Les **convertisseurs multi-domaines** autorisent eux un changement de la variable d'état à l'instar de l'induit d'un moteur à courant continu (conversion électromécanique). Un carré orange sera utilisé dans le premier cas alors qu'un rond de même couleur le sera pour le deuxième.



Convertisseur mono-domaine

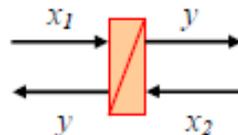


Convertisseur multi-domaine

La **notion d'accumulateur** repose sur la causalité intégrale qui existe dans la nature. Ainsi un élément inductif soumis à une variation d'effort  $U_2-U_1$  produit une accumulation d'énergie électrique suivant la formule :

$$I(t) = \frac{1}{L} \int U_2 - U_1 dt$$

Un rectangle orange barré montre la rupture instantanée de la conversion énergétique et chaque côté en relation avec les éléments, reçoit un vecteur entrée et un vecteur de sortie commun (même variable).



Elément d'accumulation

Pour plus d'informations sur la Représentation Energétique Macroscopique et son utilisation, l'on pourra se référer aux thèses suivantes [16] [11].

## 3.3.c. Principe de la commande par inversion

L'un des intérêts de la REM est la possibilité d'obtenir un schéma de commande du système par inversion des éléments. Les convertisseurs effectuant une opération immédiate, donc non dépendante du temps, on peut inverser la relation mathématique liant l'entrée et la sortie. La commande par inversion consiste donc à injecter une entrée spécifique afin d'obtenir la sortie désirée.

Néanmoins, une difficulté survient lorsqu'on doit effectuer l'opération d'inversion sur un élément d'accumulation. En effet le lien causal, représenté par l'intégrale, entrainerait l'apparition d'une dérivée dans la structure de commande associée. Cela est contraire à la philosophie de la REM, aussi utilise-t-on une boucle d'asservissement avec un correcteur comme l'illustre l'exemple de l'inductance. Dans cet exemple, le correcteur va diminuer l'écart entre la valeur mesurée du courant et celle désirée en consigne pour élaborer la tension  $U_2$  à appliquer au système. La tension  $U_1$  sera éventuellement compensée, soit en la mesurant, soit en l'estimant par le calcul.

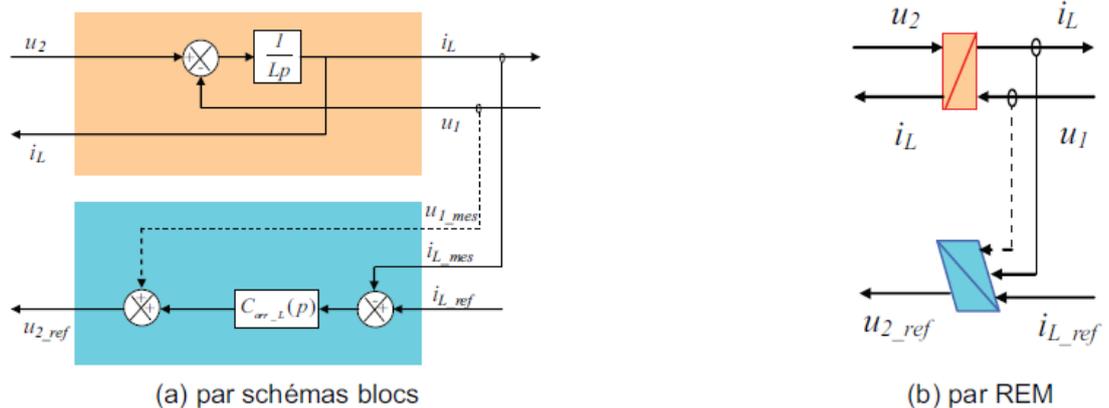


Figure 31 - Structure de commande par inversion d'un élément d'accumulation [16]

Au niveau du formalisme, on utilise des parallélogrammes de couleur bleu pour représenter les structures de commande tandis que des ronds insérés sur les vecteurs d'entrée ou de sortie symbolisent l'instrumentation mesurant cette

grandeur. Cette démarche donne naissance à une structure de commande complète dite maximale car on ne se préoccupe pas encore de la faisabilité des mesures ainsi que du réglage des différents correcteurs.

Dans un deuxième temps, une opération visant à diminuer le nombre des capteurs ainsi qu'une réflexion sur l'implantation de ceux-ci doit permettre la mise au point d'une chaîne complète de commande avec les réglages adéquates des correcteurs pour satisfaire le cahier des charge. On se propose d'étudier la modélisation du groupe motopropulseur en utilisant la représentation énergétique macroscopique dans le paragraphe suivant.

### 3.4. MODELISATION ET REM DU GMP

#### 3.4.a. Présentation du problème et hypothèses

L'objectif de cette troisième partie est de constituer un modèle du groupe motopropulseur qui sera utilisé dans le simulateur et implémenté sous Matlab. Ayant traité les diverses relations mécaniques qui modélisent la transmission d'une voiture et choisi un mode de représentation, nous pouvons concevoir un modèle global du GMP. Il devra néanmoins répondre à un cahier des charges.

Le modèle a pour finalité **de déterminer le courant appelé par le moteur électrique de propulsion en fonction d'une vitesse de référence imposée** (par le conducteur dans le cas réel ou suivant le profil ECE-15). Il doit intégrer les différents étages de conversion d'énergie utilisés dans le cadre de la traction automobile. Ce modèle, réalisé avec la représentation REM, devra s'interconnecter avec les autres modèles développés suivant le schéma de structure de la plate-forme (pile à combustible, supercondensateurs, bus DC).

Dans le cadre de l'étude, les paramètres du véhicule test sont repris et les hypothèses simplificatrices suivantes ont été retenues :

- transmission rigide,

- rendement global de la transmission mécanique nt fixé à 95%,
- Dans un soucis de simplification, vue de la plate-forme, la différentiation des vitesses des roues motrices ne sera pas abordée.
- la motorisation du GMP reposera sur un moteur courant continu à aimants permanents (économique par rapport à un moteur synchrone type brushless)
- la commande moteur est piloté depuis un hacheur dont le rapport cyclique  $m\_H_{mot}$  est commandable.

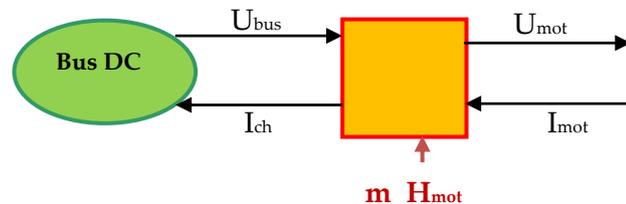
### 3.4.b. REM du groupe motopropulseur

On se propose de donner pour chaque élément, le modèle de connaissance qui lui est associé puis de montrer le schéma REM de l'ensemble du groupe motopropulseur.

#### Hacheur :

$$U_{mot} = m\_H_{mot} \times U_{bus}$$

$$I_{bus} = m\_H_{mot} \times I_{mot}$$

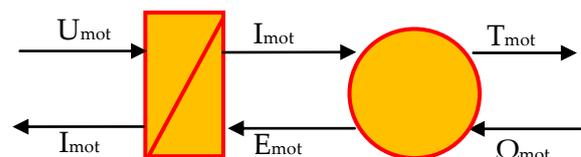


#### Moteur courant continu :

$$U_{mot} - E_{mot} = L_{mot} \frac{dI_{mot}}{dt} + R_{mot} \times I_{mot}$$

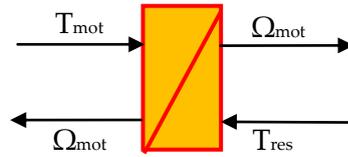
$$T_{mot} = k I_{mot}$$

$$\Omega_{mot} = k E_{mot}$$



Arbre moteur :

$$T_{mot} - T_{res} = J_{mot} \frac{d\Omega_{mot}}{dt}$$



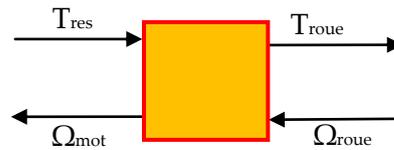
Transmission & différentiel :

$$T_{boite} = \mu_t^p \times n_t \times T_{res}$$

si  $T_{boite} \Omega_{boite} \geq 0$  alors  $p = 1$

si  $T_{boite} \Omega_{boite} < 0$  alors  $p = -1$

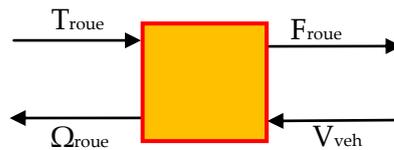
$$\Omega_{boite} = n_t \times \Omega_{mot}$$



Roue :

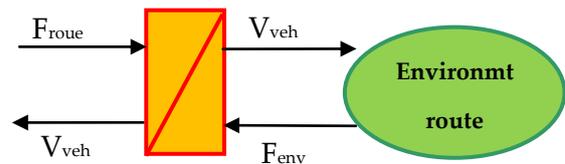
$$T_{roue} = R_{roue} \times F_{roue}$$

$$\Omega_{roue} = \frac{V_{veh}}{R_{roue}}$$

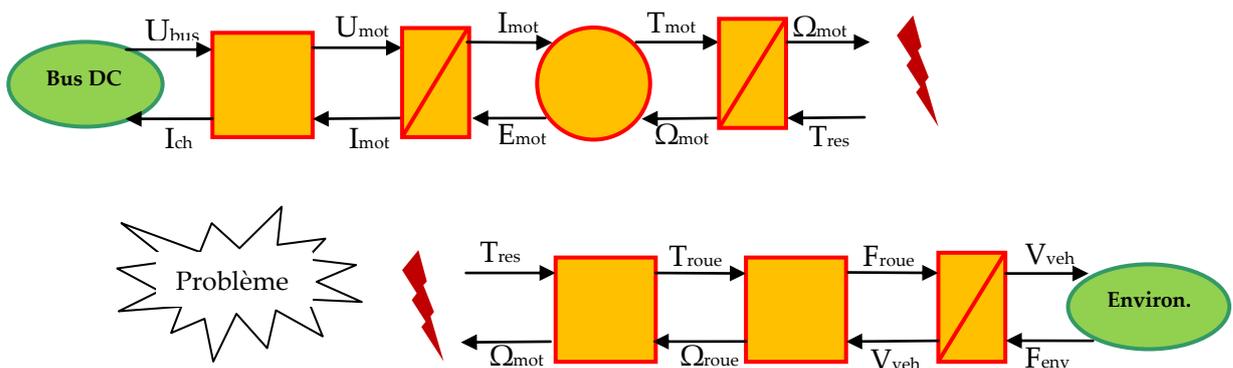


Dynamique du véhicule :

$$M_{veh} \frac{dV_{veh}}{dt} = F_{veh} - F_{env}$$



On en déduit le schéma REM complet page suivante :

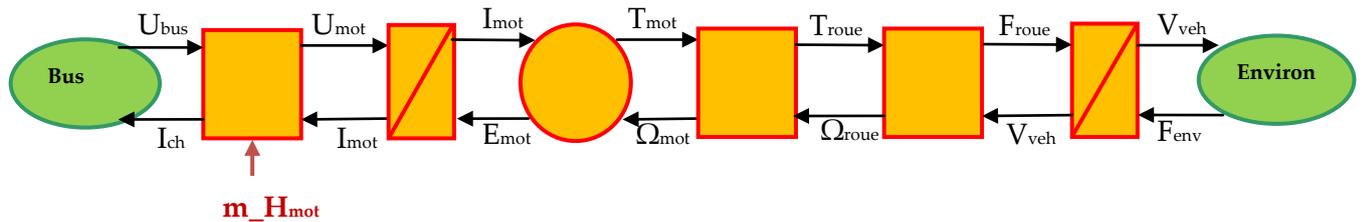


Il apparait clairement que l'élément d'accumulation, concernant les parties tournantes du moteur et caractérisé par un moment d'inertie ramené au moteur  $J_{mot}$ , ne peut s'accoupler à la partie traitant de la transmission. Le choix d'une variable d'état commune aux deux parties s'impose.

Les règles de concaténation et absorption [14], nous permettent de transférer l'accumulation d'énergie des arbres de transmission, en les assimilant à une masse équivalente pour le véhicule considéré, selon la formule suivante :

$$M_{eq} = M_{veh} + J_{eq} \mu_t^p \frac{n_t^2}{R_{roue}^2}$$

Cette masse équivalente est ensuite reportée dans l'équation fondamentale de la dynamique tandis que l'inertie propre de chaque roue est négligée. Cela donne en définitive la représentation suivante :



La REM du groupe motopropulseur permet d'observer les flux énergétiques ainsi que la vision systémique apportée par cette représentation. Il sera aisé de raccorder ce bloc REM GMP au bus DC avec du côté source le bloc REM de la pile à combustible ainsi que celui des supercondensateurs, chacun raccordé au bus DC via un convertisseur d'électronique de puissance.

### 3.5. LA COMMANDE DU GMP

#### 3.5.a. Cas de la commande du véhicule par le conducteur

Avant de procéder à l'élaboration de la commande par inversion, il est utile de se poser la question de la réalisation de la commande de la puissance fournie par le

moteur dans un véhicule. Le conducteur n'utilise qu'un seul actionneur, à savoir la pédale dite d'accélération. Il s'agit donc d'une commande en couple, qui selon les forces de résistance s'opposant au déplacement du véhicule et la position de la pédale d'accélérer, de maintenir ou de décélérer sa vitesse (Figure 32).

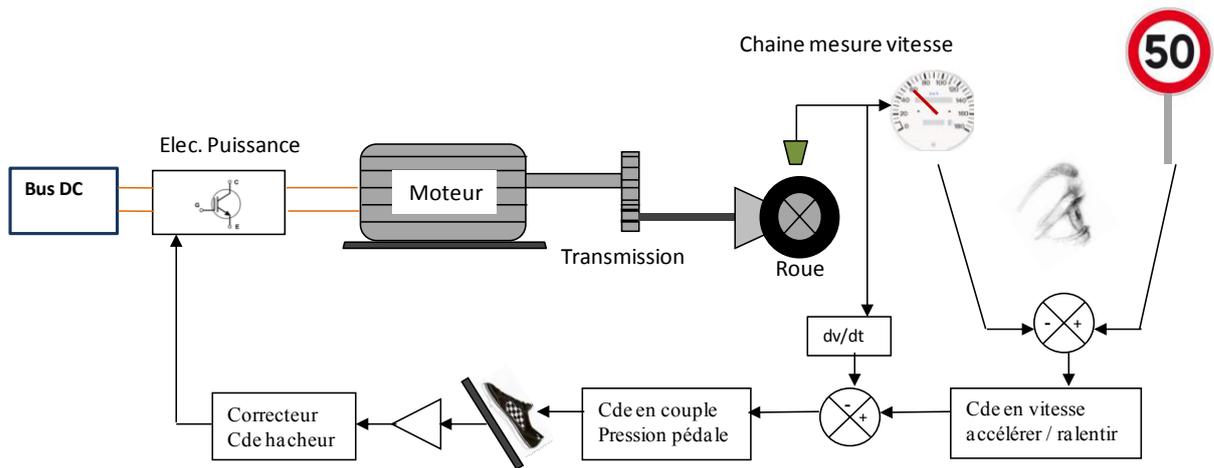


Figure 32 - Structure de la commande moteur électrique d'un véhicule

Néanmoins, le conducteur superpose au dessus de cette commande localisée, un boucle d'asservissement de vitesse (ralliement à une consigne ou régulation de vitesse) par le biais d'un contrôle par la vue entre la vitesse autorisée (ou désirée) et celle lue sur le compteur. C'est donc le conducteur qui assume le contrôle de cette boucle, qui peut être remplacée par un régulateur électronique de vitesse. Par contre la commande en couple est gérée en grande partie par l'électronique de bord (par exemple l'injection ou l'allumage commandée pour un moteur thermique) et le rapport de la boîte de vitesse.

### 3.5.b. Structure maximale de commande

Pour concevoir la structure maximale de commande, on inverse chaque bloc REM issue de la représentation. On donne pour chaque élément, le bloc commande associé avec les équations correspondantes. S'il s'agit d'un élément de conversion

alors deux cas sont à distinguer : élément commandable ou non. Dans le cas d'un convertisseur électromécanique, on effectue l'opération inverse comme par exemple la division par la constante électromécanique  $k$ . Dans le cas du hacheur, qui est commandable, on joue sur la grandeur de réglage (ici  $m_{H_{mot}}$ ) qui agira sur le système par rapport à une référence de tension (celle du bus DC).

Lorsqu'il s'agit d'un élément d'accumulation, le lien causal ne permet pas d'effectuer l'opération dérivée. Pour cela, on introduit un correcteur qui minimise l'écart entre la grandeur à commandée et celle de référence, on intégrant parfois la compensation d'une deuxième grandeur perturbatrice.

Hacheur :

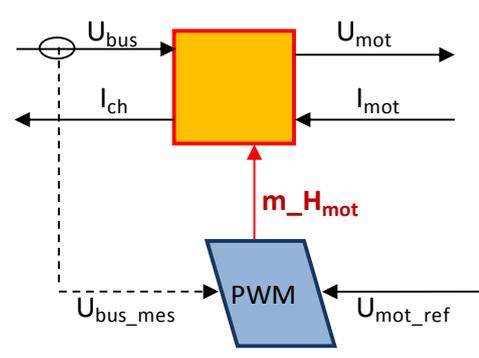
Modèle

$$U_{mot} = m_{H_{mot}} \times U_{bus}$$

$$I_{bus} = m_{H_{mot}} \times I_{mot}$$

Commande

$$m_{H_{mot}} = \frac{U_{mot\_ref}}{U_{bus\_mes}}$$

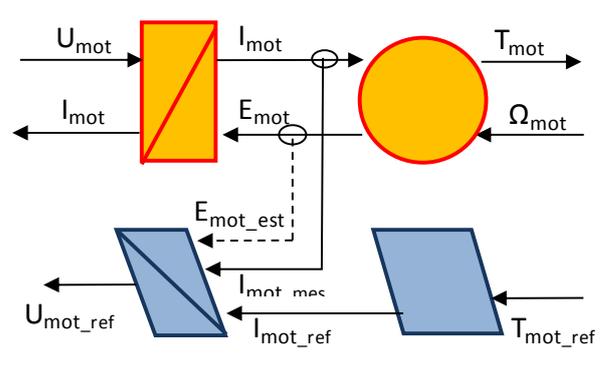


Moteur courant continu :

$$U_{mot} - E_{mot} = L_{mot} \frac{dI_{mot}}{dt} + R_{mot} \times I_{mot}$$

$$U_{mot\_ref} = (I_{mot\_ref} - I_{mot\_mes}) \times C_{PI} + E_{mot\_est}$$

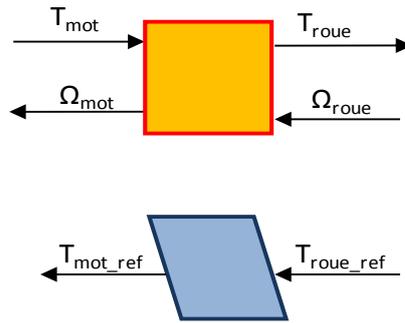
$$I_{mot\_ref} = \frac{1}{k} T_{mot\_ref}$$



Transmission & différentiel :

$$T_{boite} = \mu_t^p \times n_t \times T_{res}$$

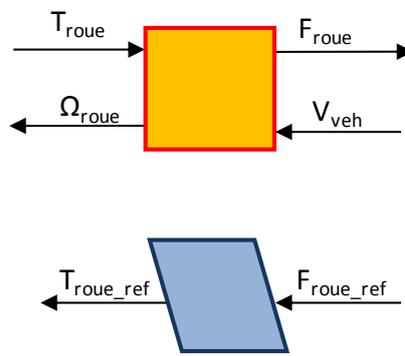
$$T_{mot\_ref} = \frac{T_{roue\_ref}}{\mu_t^p \times n_t}$$



Roue :

$$T_{roue} = R_{roue} \times F_{roue}$$

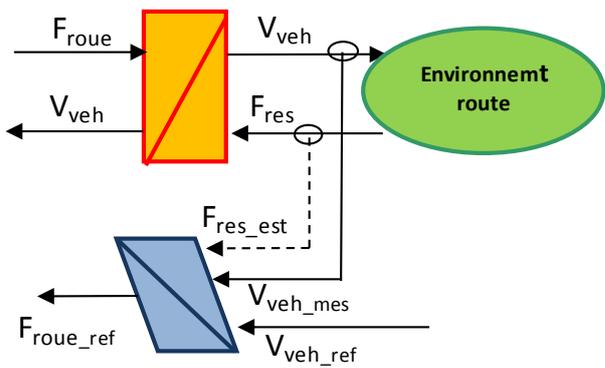
$$T_{roue\_ref} = R_{roue} \times F_{roue\_ref}$$



Dynamique du véhicule :

$$M_{veh} \frac{dV_{veh}}{dt} = F_{veh} - F_{env}$$

$$F_{roue\_ref} = (V_{veh\_ref} - V_{veh\_mes}) \times C_{PI} + F_{res\_est}$$



Le schéma global (Figure 33) se déduit comme suit. On entre dans la structure de commande par une référence de vitesse (boucle lente). Cette vitesse de référence est dans notre cas un profil de vitesse ECE-15. Celle-ci est comparée à la mesure de vitesse du véhicule  $V_{veh}$  et corrigée par le premier correcteur PI. On récupère divers

référence de grandeur jusqu'à attaquer la boucle rapide concernant le courant (donc le couple) du moteur DC. La référence de courant  $I_{\text{mot\_ref}}$  est en amont passer dans un limiteur fixé à  $I_{\text{max}}=90\text{A}$ . Le deuxième correcteur PI agit sur la partie électrique du moteur et donne en sortie la tension  $U_{\text{mot\_ref}}$  qui divisée par  $U_{\text{bus}}$  donne la valeur du rapport cyclique du hacheur  $m_{\text{Hmot}}$ .

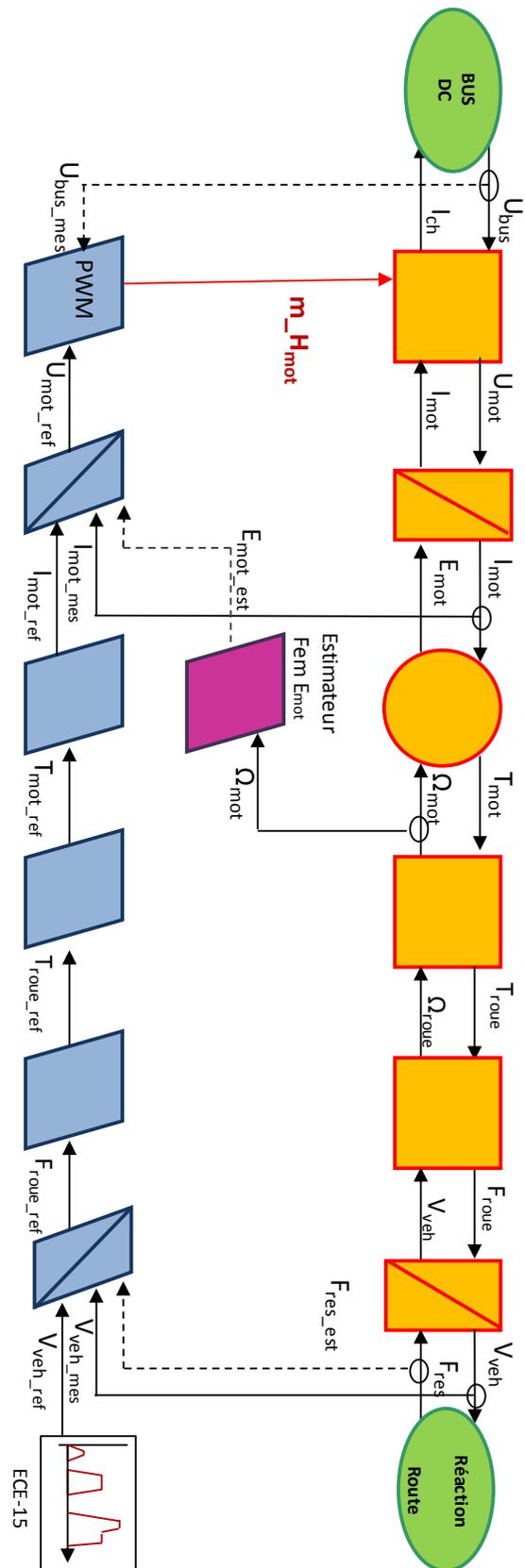


Figure 33 - Structure de commande maximale de commande du groupe motopropulseur

## 4. SIMULATEUR DU GMP D'UN VEHICULE HYDROGENE

### 4.1. SIMULATION HARDWARE IN THE LOOP

#### 4.1.a. Plateforme de test

La partie précédente a permis de modéliser le groupe motopropulseur pour le raccorder avec les autres composants du futur système. Le choix de la Représentation Energétique Macroscopique garantit leurs interconnexions, de manière à obtenir un ensemble homogène comme le montre la Figure 34. Chacune des sources contient une modélisation propre sous forme de schémas REM.

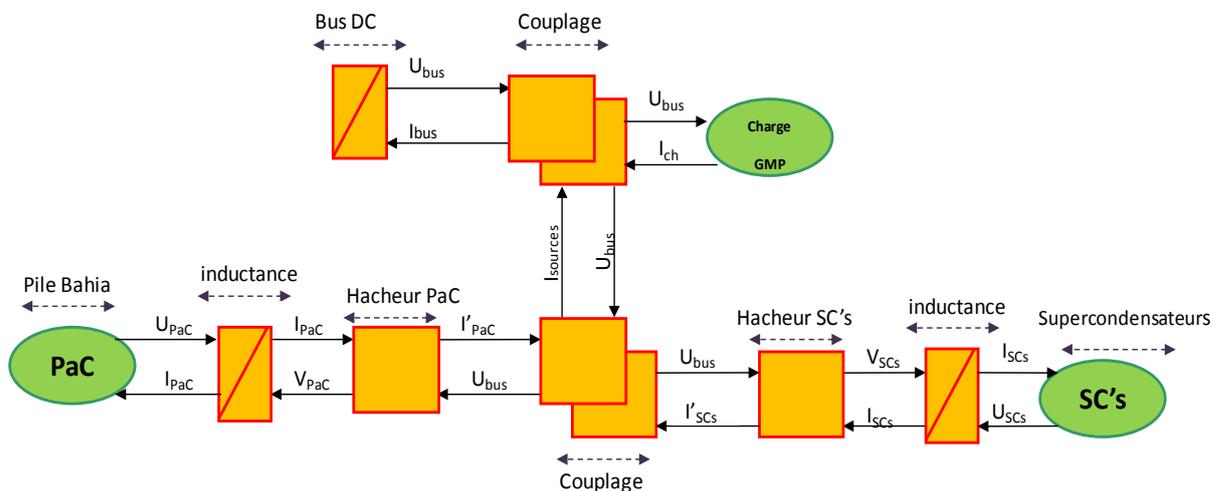


Figure 34 - Représentation Energétique Macroscopique de la plate-forme multi-sources

Néanmoins, nous souhaitons établir une maquette à échelle réduite de ce que sera la plateforme multi-sources appliquée à un véhicule, notamment pour effectuer des expérimentations afin de valider les lois de gestion d'énergie. Nous disposons déjà d'une pile Bahia d'une puissance maximale de 1000W et de la possibilité de choisir des supercondensateurs selon un dimensionnement qui reste à définir.

Dans notre cas, nous piloterons la plateforme multi-sources depuis une interface numérique (probablement avec un PC doté de cartes DSpace) dans laquelle seront implémentées les lois de gestion globale et les structures locales de commande

des éléments (pile, supercondensateurs, bus DC). Les signaux émis par les cartes (modulation de largeur d'impulsions) seront transmis vers les cartes de commande des IGBT des hacheurs. En retour, une instrumentation (sondes de courant, voltmètre, wattmètre) permettra le contrôle des différentes boucles en regard des références (courant et tension) générées par le programme principal. Cette partie informatique industrielle sera couplée à la partie puissance représentée par le banc d'expérimentation selon le schéma suivant (Figure 35) :

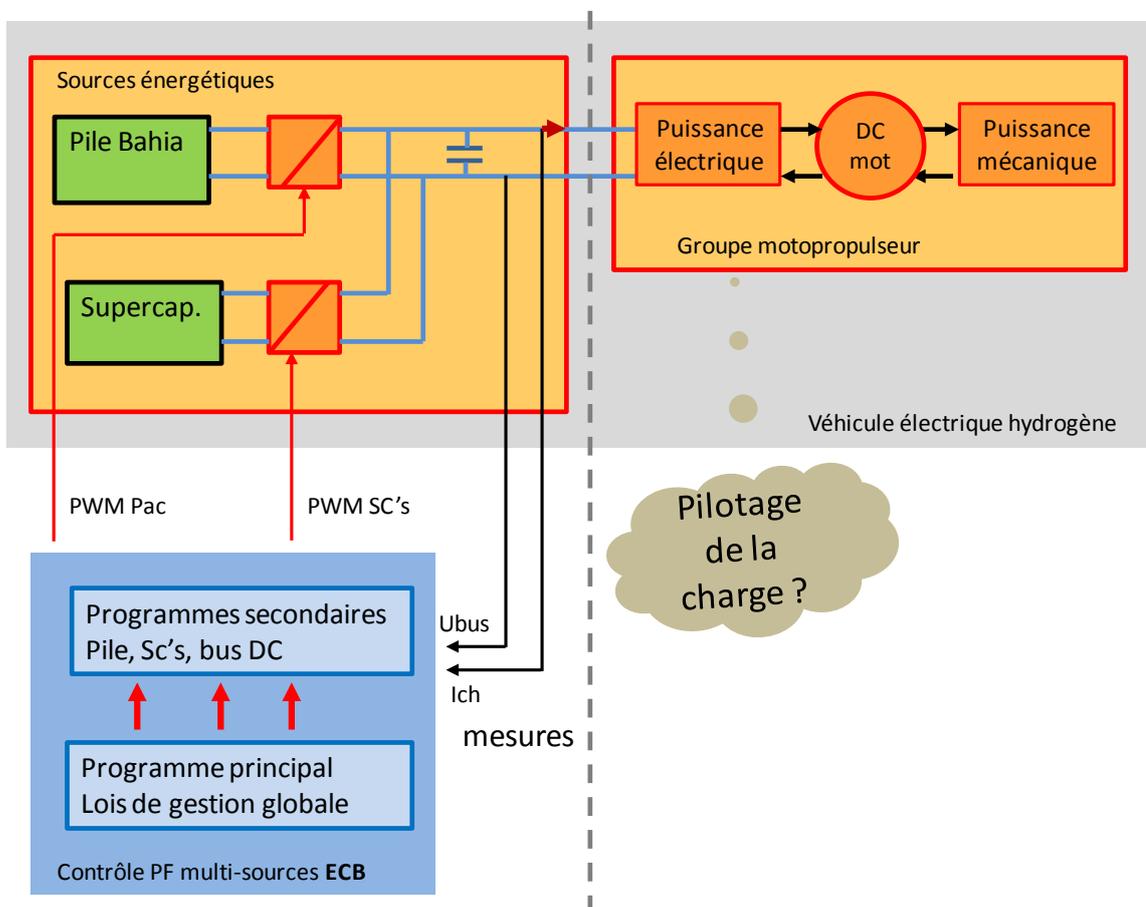


Figure 35 - Synoptique de la future plate-forme d'expérimentation

Cependant si du côté des sources, les solutions matérielles existent, la charge électrique pose divers problèmes. En effet, si l'on considère qu'il s'agit d'une charge variable, on pourrait se satisfaire en premier lieu d'une charge électronique comme celle installée sur le banc Bahia. Néanmoins les profils dynamiques du signal  $I_{charge}$

doivent se rapprocher de ceux de l'automobile électrique et les offres commerciales correspondants à ce type de signaux sont très chères et parfois d'une puissance trop faible par rapport à nos besoins. C'est pourquoi la solution de la simulation dite Hardware In The Loop s'impose parfaitement dans notre cas.

#### 4.1.b. Principe de la simulation Hardware in the Loop (HIL)

Historiquement, une fois la modélisation complète effectuée, il fallait recourir à un prototypage physique de l'ensemble soit à l'échelle 1, soit à une échelle réduite mais qui rendait bien compte de l'ensemble des phénomènes. Ce principe est rigoureux mais coûteux et chronophage. Plus récemment, les industriels de l'aéronautique ont procédé à la numérisation complète des processus d'études avec d'excellents résultats. Ceci leur a permis de réaliser de substantielles économies en évitant la fabrication de maquettes d'avions très coûteuses. Il faut cependant posséder des modèles très complexes et un haut niveau de maîtrise des phénomènes perturbateurs pour garantir les résultats avec cette méthode. La simulation dite Hardware In the Loop se trouve à la frontière des deux approches. Elle consiste à insérer dans un simulateur numérique, une partie matérielle, soit dans le but de la valider, soit pour améliorer la qualité de la simulation par l'introduction de phénomènes réels.

En ce qui concerne la partie charge, nous souhaitons implanter une motorisation complète (hacheur et moteur DC du véhicule) pour bénéficier de plusieurs avantages par rapport à une charge résistive classique :

- Raccorder une charge type RL donc avec les effets de self classique (démarrage moteur),
- Bénéficier d'une structure de commande locale de la charge visant à faire varier la vitesse du moteur (comme dans le cas d'une voiture électrique réelle),

- Piloter le couple résistant pour faire monter les appels en courant qui solliciteront plus le système multi-sources,
- Traiter la récupération d'énergie notamment pour la recharge des supercondensateurs.

Il faut donc émuler la partie mécanique du véhicule et c'est sur ce point que la simulation Hardware In the Loop va être utilisée (Figure 36).

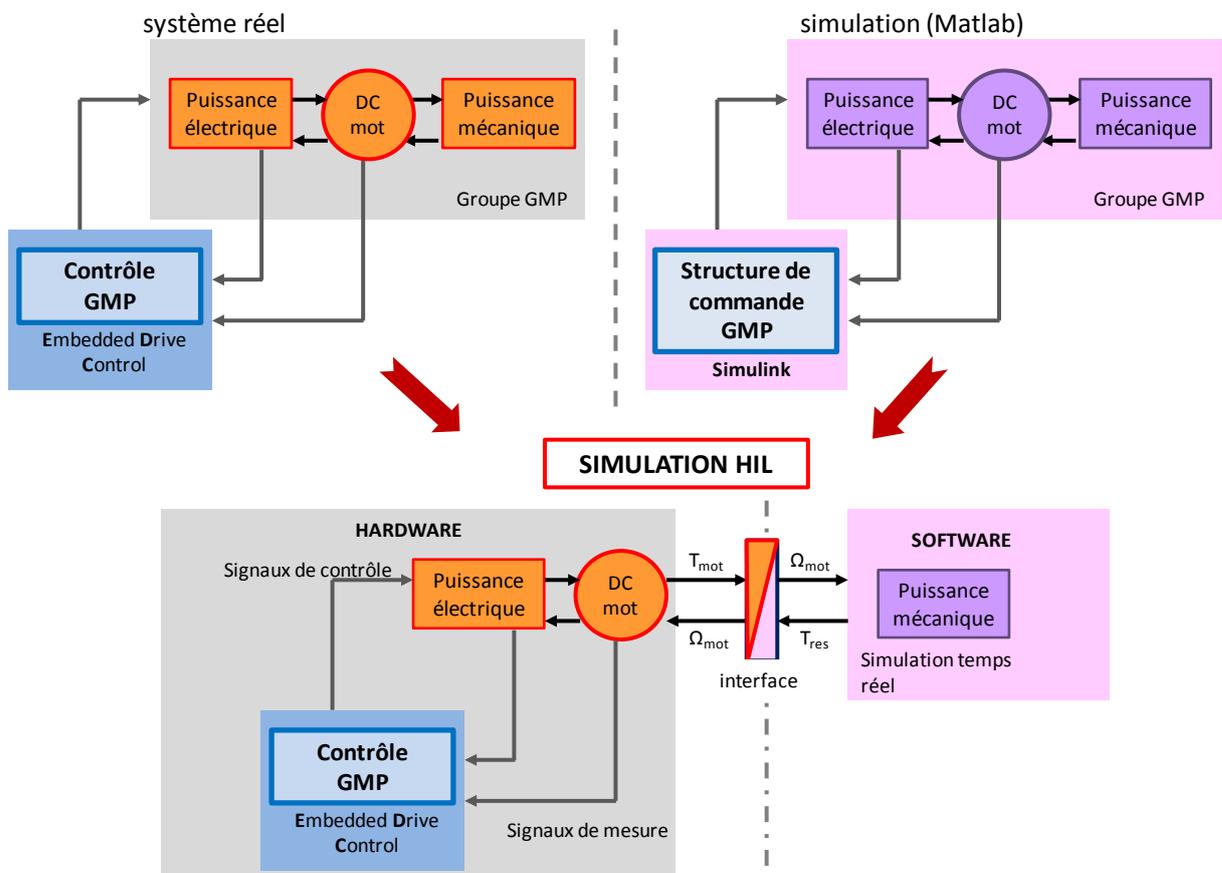


Figure 36 - Simulation Hardware In the Loop groupe motopropulseur

Nous souhaitons conserver l'ensemble hacheur-moteur du futur véhicule sur la plate-forme sur laquelle sera installée les sources (PaC et supercondensateurs). L'émulateur des parties mécaniques du véhicule doit, au travers d'une interface, générer un couple de résistance  $T_r$ , égale à celui produit par le déplacement du véhicule à une vitesse  $V_{veh}$ . Le moteur DC sera piloté par un système type Drive

Control appelé EDC et l'asservissement de vitesse du moteur est déduit de la vitesse  $V_{veh}$  ECE-15 utilisée comme référence comme nous l'avons vu au paragraphe 3.5.

Pour réaliser cette interface, nous avons recours à un moteur à courant continu utilisé en génératrice et dont le couple résistant  $T_{res}$  sera ajusté via une structure d'asservissement. Pour calculer sa valeur, on entre le couple moteur dans l'émulateur et celui-ci établit une vitesse de rotation de référence estimée grâce à la modélisation des parties mécaniques (Figure 37). En fonction de l'écart observé entre les deux vitesses  $\Omega_{mot}$  et  $\Omega_{mot\_ref}$ , le courant  $I_{gen}$  sera adapté pour donner le couple résistant  $T_{res}$  tel qu'à l'équilibre (vitesse  $V_{veh}$  constante), on ait :

$$T_{mot} - T_{res} = J_{eq} \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

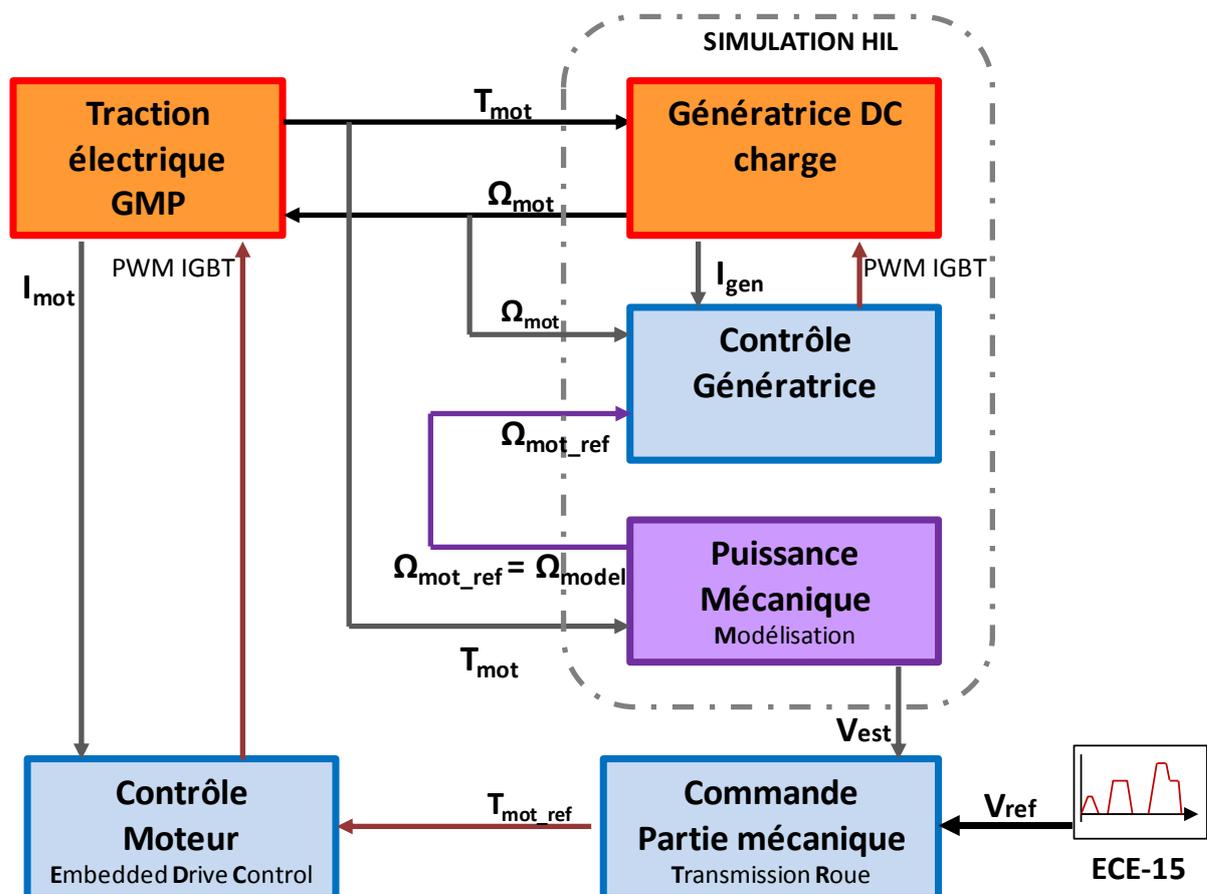


Figure 37 - Synoptique du simulateur HIL pour le groupe GMP

## 4.1.c. Mise à l'échelle du banc

A ce stade, se pose la problématique de puissance entre ce que nous possédons en termes de sources (autour de 1KW de puissance nominale pour la pile) et les besoin pour mouvoir un véhicule du type urbain (vu au 3.2.d). Il a donc fallu effectuer une opération de mise à l'échelle de la plate-forme. Cette question d'une réduction de la puissance électrique imposée par les sources doit donc s'accorder sur une réduction de puissance mécanique dans le même ordre de grandeur. Il eu été facile de trouver une motorisation qui satisfasse que le seul critère de la puissance absorbée mais il faut voir que notre problématique de véhicule engendre une vitesse de rotation et un couple reliés entre eux par la puissance. Toute réduction de puissance, se répercute soit sur l'une des valeurs, soit sur les deux.

Afin de respecter cette problématique, j'ai donc opté pour un moteur banc test qui soit en mesure d'avoir la même gamme de vitesse de rotation que celui prévu dans l'étude du 3.2.d, c'est à dire de 0 à 4000 trs/min. En accord avec la tension de bus fixé à 48V, il restait à trouver un modèle de moteur auprès de fournisseurs pour les kart électrique. Notre choix s'est porté vers le modèle LEM 130 95S de la société *Lynch Motor Company* dont les caractéristiques techniques complètes sont données en annexe C ainsi que dans le tableau ci dessous (Tableau X) :

*Tableau X - Caractéristiques des moteurs courant continu LEM 130 95 et 95S*

	No Load Current	Torque Constant	Speed Constant	Armature Resistance DC	Armature Inductance @ 15kHz	Armature Inertia	Peak Power	Peak Efficiency	Peak Current	Rated Power	Rated Speed	Rated Voltage	Rated Current	Rated Torque
Motor	A	Nm/A	Rpm/V	mΩ	μH	Kgm <sup>2</sup>	kW	%	A	kW	Rpm	V	A	Nm
95	6	0.0631	138	32.5	14	0.0116	3	82	100	2.27	4968	36	75	4.35
95S	6	0.0631	138	32.5	14	0.0117	4	88	100	3.02	6624	48	75	4.35

Afin de rendre compatible cette réduction de puissance mécanique, il fallait dans le même temps généré dans le simulateur des parties mécaniques, des données

de véhicules correspondant à ce niveau de puissance. Le maintien de la gamme de vitesse, nous assure de ne devoir jouer que sur le couple moteur, donc sur le couple exercé par les roues et donc par les forces de résistance du véhicule  $F_{res}$ . La maquette réduite du véhicule aura donc les mêmes caractéristiques que celle énoncé au paragraphe 3.2.c à l'exception de la masse abaissée à 100 kg. L'on donne ci dessous (Figure 38), les valeurs de puissance et de couple moteur de la maquette et de la voiture.

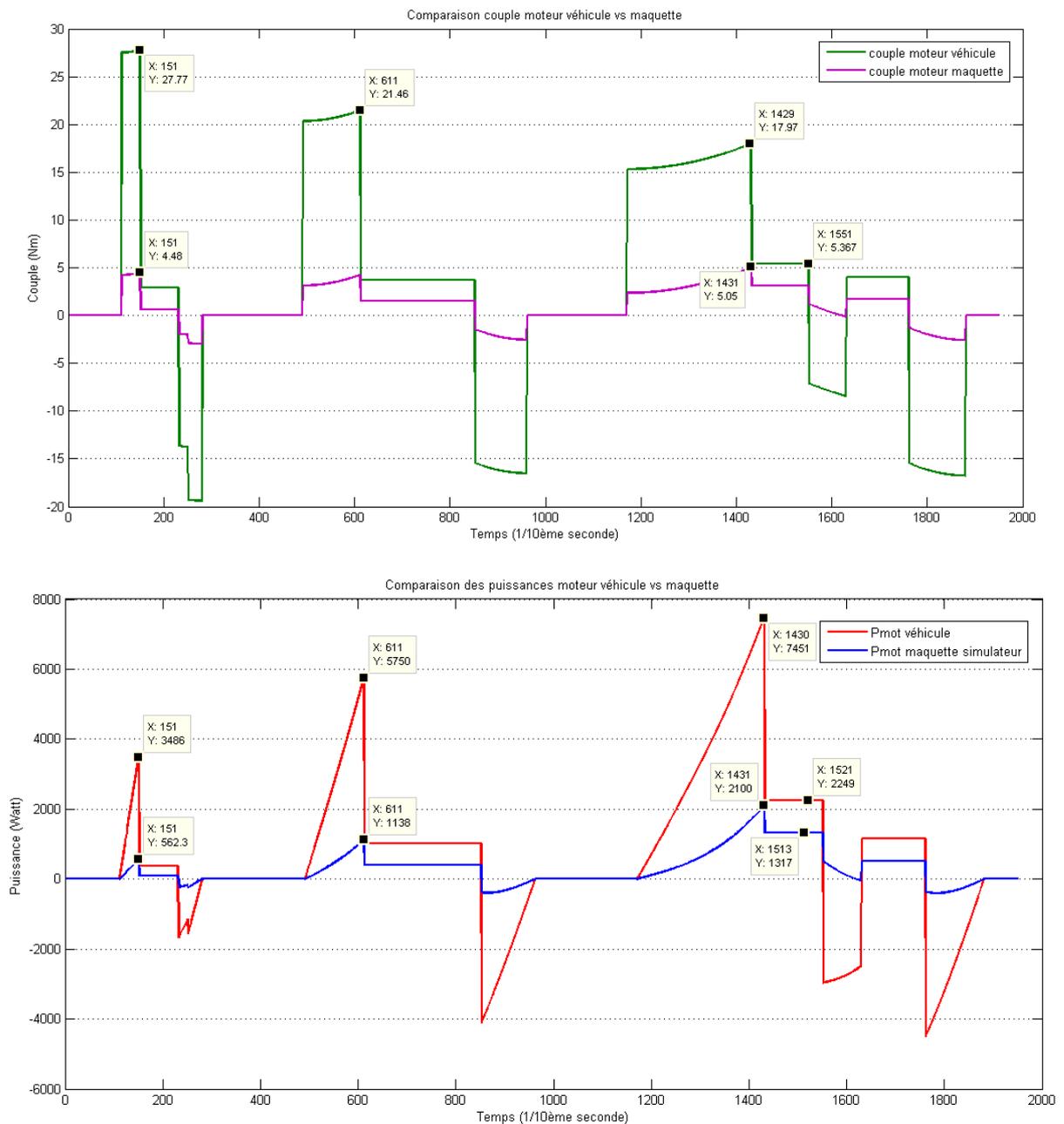


Figure 38 - graphique comparatif des couples (haut) et puissances (bas) véhicule réel et maquette

On remarque que dans l'ensemble, les profils se rapprochent à un facteur six près. Néanmoins, on constate aussi que dans le cas de la décélération après le palier à 50km/h (autour de  $t=1600$ ), la puissance reste majoritairement positive dans le cas de la maquette tandis que l'on récupérait de l'énergie dans le cas réel. Ceci est la traduction d'une baisse de l'énergie cinétique emmagasinée par la maquette, au regard de son faible poids (1/6ème du poids réel).

## 4.2. STRUCTURE DU SIMULATEUR

### 4.2.a. Le simulateur de plate-forme multi-sources

Ne disposant pas du matériel nécessaire à l'élaboration du banc test et devant la nécessité de valider les futurs algorithmes de gestion d'énergie sur une simulation entièrement numérique, il fut décidé en décembre 2012 de mettre au point un simulateur de la partie charge tout en reprenant le concept de la simulation HIL. Il s'agissait donc de convertir sous Matlab le montage HIL complet avec la représentation énergétique macroscopique associée. Ce travail devait ensuite nous permettre de :

- Valider le module charge et de raccorder cette partie avec les modèles Matlab des sources afin d'obtenir une maquette numérique de l'ensemble du système,
- Faciliter le portage de la programmation de la partie logicielle grâce aux cartes DSpace qui intègre le code Matlab.

En s'appuyant sur le schéma HIL développé précédemment, il fallait transposer sous Matlab le contrôle de la génératrice avec une structure de commande déduite de la modélisation de celle-ci sous le format REM.

### 4.2.b. La problématique de l'inertie du véhicule transposée au banc

Le montage des deux moteurs doit donc être modélisé sous forme REM comme le montre la Figure 39. Néanmoins la suppression de la partie mécanique pose la question du traitement de l'inertie ramené à l'arbre de couplage des moteurs.

## 4.2.c. La commande en couple du moteur de charge

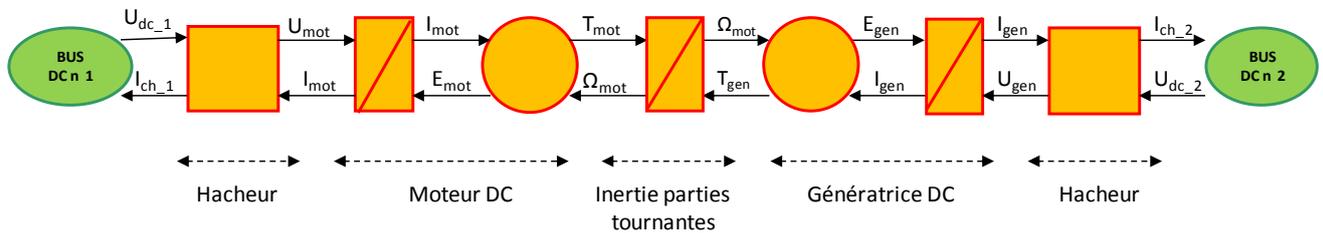


Figure 39 - Représentation REM du couplage moteur - génératrice DC

Pour ce faire, nous avons fait le raisonnement inverse de celui qui avait été utilisé lors de la modélisation du GMP. Les moments d'inertie respectifs des moteurs sont conservés et la masse de la maquette (soit 100kg) est traduite en inertie équivalente après une transformation qui tient compte de la chaîne cinématique entre l'arbre moteur et le poids répercuté sur les roues. L'inertie totale équivalente est donnée par l'équation suivante :

$$J_{eq} = J_{mot} + J_{gén} + \frac{M R_{roue}^2}{n^2}$$

## 4.2.d. Structure complète du simulateur

Pour construire la représentation REM de l'ensemble du simulateur, nous partons du synoptique donné Figure 37. Nous reprenons aussi le schéma REM avec la structure de commande maximale du GMP (Figure 33). En entrée du montage, on envoie le signal  $V_{ref}$  issu du cycle ECE-15. La chaîne de commande du bas doit permettre la commande en rotation du moteur DC en agissant sur le rapport de transformation du hacheur (commande par modulation de largeur d'impulsions des IGBT).

À une tension  $U_{mot}$  fixée, le moteur va entraîner l'arbre avec un couple moteur  $T_{mot}$ . Cette valeur de couple est envoyée aussi sur le module de simulation des parties mécaniques, qui va exécuter plusieurs opérations nécessaires au fonctionnement correct du système :

- Le calcul de la vitesse du véhicule  $V_{veh}$  à partir de cette information  $T_{mot}$ ,
- Le calcul de la vitesse de référence  $\Omega_{mot\_ref}$ , c'est à dire la vitesse qu'aurait eu le moteur pour vaincre l'inertie du véhicule mais aussi du couple résistif imposé par les forces de résistance à l'avancement  $F_{res}$ .

Cette dernière valeur est envoyée, en même temps que la mesure de vitesse réelle  $\Omega_{mot}$  sur le correcteur de la boucle de contrôle de couple de la génératrice. Cette boucle va donc régler le couple résistant de la génératrice pour faire coïncider les deux vitesses et ainsi simuler en temps quasi-réel le même comportement en dynamique que l'aurait fait le véhicule (Figure 40).

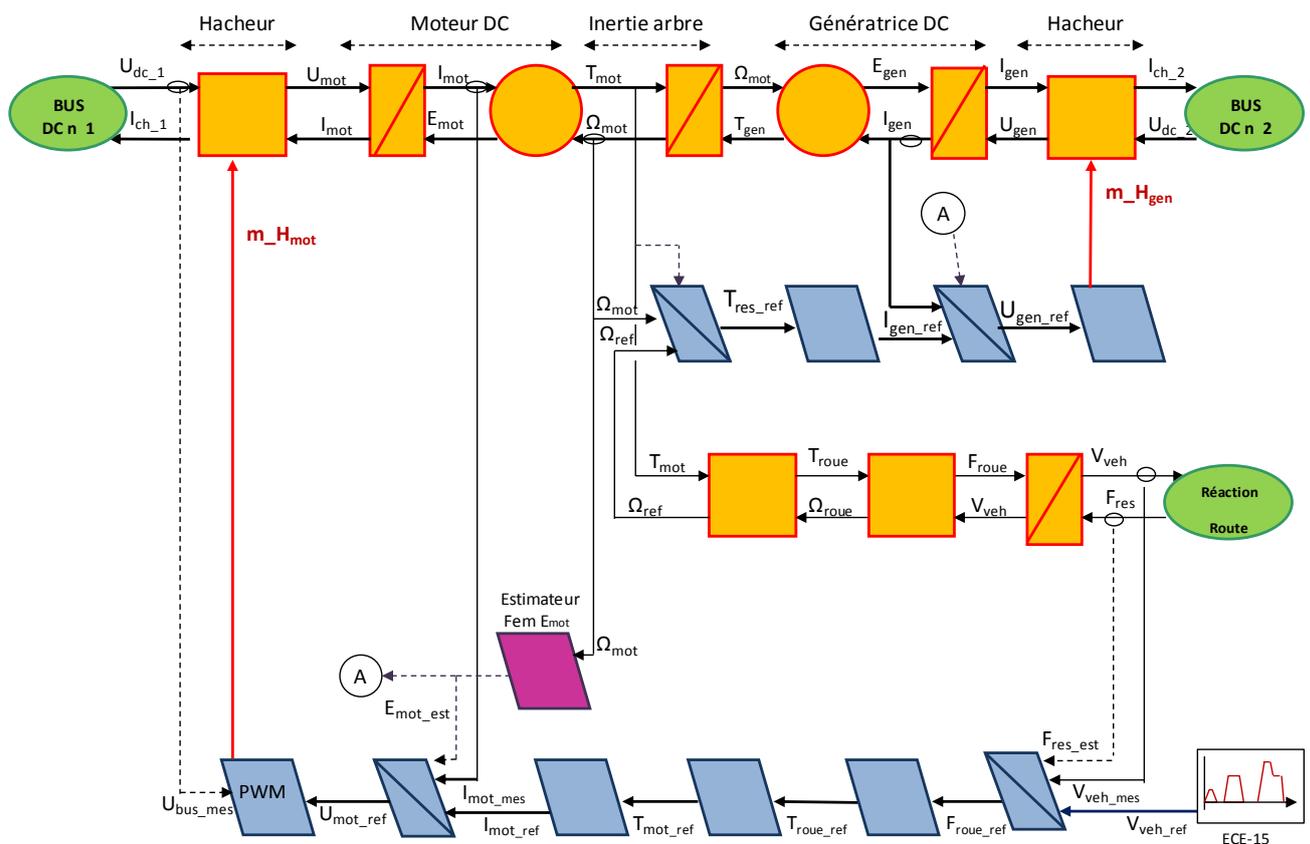


Figure 40 - Structure du simulateur HIL pour groupe motopropulseur

## 5. GESTION DE PROJET

### 5.1. DÉFINIR LE PROJET

#### 5.1.a. Contexte du projet

Présentée dans la première partie de ce mémoire, la naissance du projet de plate-forme multi-sources multi-énergies est à la frontière entre deux contextes, l'un scientifique et l'autre industriel. Du côté scientifique, la thématique de recherche du laboratoire LSIS, est en partie centrée sur l'analyse des phénomènes multi physiques et leurs modélisations. De l'autre, le défi énergétique nécessite des solutions techniques novatrices en plein développement notamment dans le domaine de l'hybridation de nouvelles sources d'énergies.

Le CER Arts et Métier ParisTech, en liaison avec son laboratoire de recherche LSIS, a entamé des démarches de coopération avec des entreprises partenaires. Un premier projet, nommé APACHE, a vu le jour en 2010 avec la société *TRANSDEV*, pour la mise au point d'un navire de promenade touristique vers les calanques de Cassis. Doté d'une propulsion électrique alimentée par une pile à combustible, il devait être plus respectueux de l'environnement, fragile dans cette zone. Bien qu'ayant enregistré de réelles avancées avec la mise à l'eau du navire "Green Calanque", le projet n'a pu être mené jusqu'à son terme. En 2011, une nouvelle orientation était prise avec l'arrivée d'un projet autour de la filière photovoltaïque.

#### 5.1.b. Le projet initial avec la société Solairemed

La société *SOLAIREMED* est spécialisée dans le développement des dispositifs de gestion de l'énergie pour des installations photovoltaïques aux particuliers. Elle a développé un centre de gestion et de production d'énergie électrique baptisé Power Center (PWC). Ce dispositif gère la production, le stockage et la distribution d'électricité des sources photovoltaïques dans l'optique d'une meilleure régulation de la puissance fournie au réseau. Les panneaux sont en effet surdimensionnés en

terme de puissance crête, ce qui permet à puissance fixe (vue par EDF) de recharger des batteries qui débitent lors des phases d'ensoleillement moindre. L'objectif est donc d'offrir une puissance mieux régulée, ce qui favorise la gestion de l'énergie à un niveau supérieur.

C'est en continuant dans cette optique de régulation de la puissance transmise sur le réseau électrique, que la société *SOLAIREMED* a décidé d'engager un nouveau projet, en collaboration avec le laboratoire, avec l'intégration de supercondensateurs et d'une pile à combustible dans le système Power Center (Figure 41).

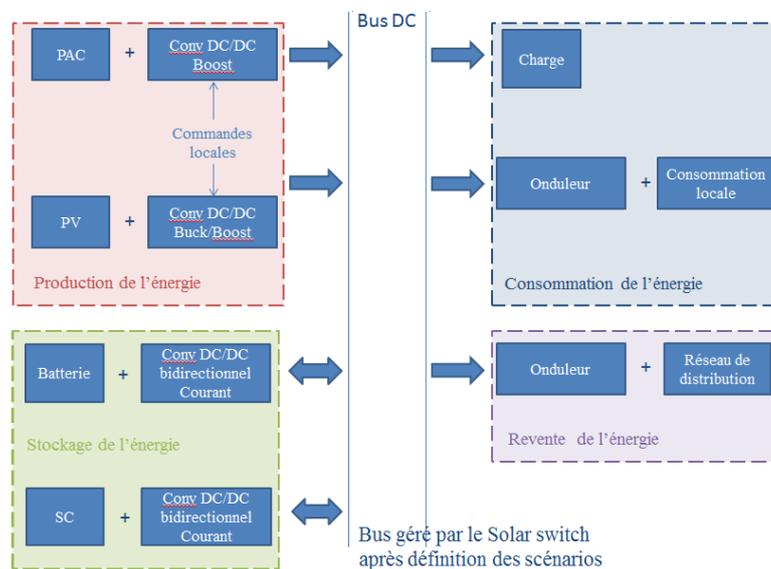


Figure 41 – Synoptique du Hybrid Power Center de la société Solairemed

Le laboratoire avait à charge la mise au point de l'algorithme de gestion d'énergie du système en tenant compte des spécificités des différents éléments. La principale difficulté provient des dynamiques très hétérogènes de la pile à combustible, des panneaux photovoltaïque et des moyens de stockage (supercondensateurs, batteries).

Les travaux ont commencé au printemps 2012, par une étude bibliographique sur l'intégration des piles à combustibles dans un système hybride et les différents modèles mathématiques associés. A l'issue de cette période, il a été retenu que la modélisation pourrait s'appuyer sur une approche énergétique du problème, couplé

à l'utilisation de la Représentation Énergétique Macroscopique REM. Un renforcement de l'équipe s'est opéré à la rentrée 2012 avec l'arrivée d'une doctorante du Mexique pour la partie supercondensateurs – pile à combustible et le démarrage de mon stage au sein de ce projet.

#### 5.1.c. Crise économique et répercussions

Malheureusement la crise économique, qui frappe particulièrement la filière photovoltaïque dans le Sud de la France, a eu des répercussions directes sur notre projet commun. La diminution des aides de l'état ainsi que le recul des investissements dans le domaine de l'habitat ont mis à mal la société *SOLAIREMED* qui a déposé le bilan à la fin de l'année 2012.

Cet évènement a bien évidemment eu de lourdes conséquences sur le déroulement du projet. Outre le retard occasionné par de nombreuses réunions pour tenter de trouver une solution, il a fallu se résoudre à abandonner le projet et renoncer au support applicatif du sujet tout en conservant l'aspect système énergétique multi-sources. La pile à combustible constituant une forte valeur ajoutée aux travaux, il a été décidé d'abandonner la partie photovoltaïque pour se réorienter vers une application plus marquée vers la technologie hydrogène.

### **5.2. RÉORIENTER LE PROJET**

#### 5.2.a. Mesurer l'impact économique de la technologie hydrogène

Cet évènement montrait la fragilité du développement d'un projet novateur dans un contexte économique difficile. Il existait de fortes dépendances techniques, humaines et financières qui se conjuguèrent difficilement avec une durée de développement estimée à deux ans. Une nouvelle approche projet du sujet de recherche était nécessaire et j'ai donc proposé de parfaire nos connaissances sur l'élément à forte valeur ajoutée que constitue la pile à hydrogène.

Il s'agissait de mieux connaître l'environnement économique autour de cette technologie tout en faisant une analyse poussée des axes de recherche les plus prometteurs. Cette double étude m'a été confiée et a été décrite au début de la deuxième partie de ce mémoire. J'ai pu recueillir des informations provenant de sources diverses comme les laboratoires de recherche, l'ADEME, des associations, ou des industriels. Ce fut une étude très enrichissante et sa synthèse a souvent été utilisée car peu de documents de ce type existe sur le sujet en France.

#### 5.2.b. Choisir un support applicatif pérenne pour le projet

Cet environnement connu, nous avons donc réfléchi au support applicatif pour la gestion d'énergie pour une plate-forme multi-énergie. Il ressortait de l'étude que seul trois domaines étaient réellement soutenus à la fois par une filière industrielle encore tenue mais aussi par les pouvoirs publics. Le choix d'une orientation vers le domaine automobile correspond à plusieurs avantages que l'on peut énumérer de la manière suivante :

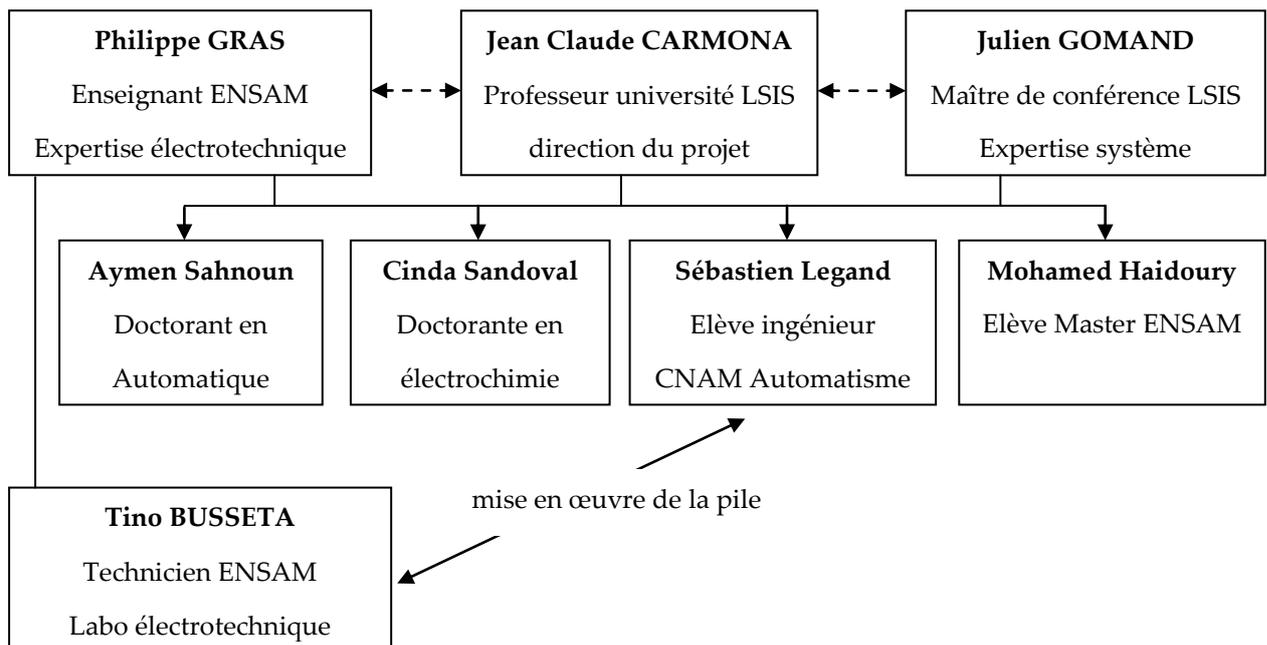
- bénéficier d'un écho positif auprès d'organismes régionaux de soutien à l'innovation comme Cap Energie,
- utiliser une bibliographie, notamment anglo-saxonne et germanique, plus importante sur cette application que dans le cas des applications stationnaires,
- s'appuyer sur les compétences en mécanique et en automobile développé par l'ENSAM et concrétisé sur des projets comme une navette électrique pour la ville d'Aix-en-Provence,
- réutiliser une partie des résultats de l'étude avec Solairemed notamment en ce qui concerne la REM et la modélisation de la pile.

Il est intéressant de noter que l'étude de marché des piles à combustibles, m'a permis de bénéficier ensuite d'une veille technologique très pertinente puisqu'ayant ciblé les organismes et les laboratoires les plus en pointe en la matière.

### 5.3. ORGANISER LE PROJET

#### 5.3.a. L'équipe projet

Une fois les contours du projet redéfini fin octobre, il a fallu organiser le projet en s'appuyant sur l'équipe en place et le découper en tâches et en livrables. A ce stade, une nouvelle inconnue s'est ajoutée. Le doctorant Ayhmen Sahnoun, engagé dans une thèse CIFRE avec la société SOLAIREMED, faisait l'objet d'une procédure de licenciement avec la société. Il n'était donc plus certain qu'il puisse se maintenir avec nous. Malgré plusieurs tentatives auprès d'entreprises de la région pour reprendre le sujet du projet, il dut finalement modifier son sujet de thèse. En février 2013, il rejoignait une entreprise de panneaux solaires avec un thème différent de recherche, portant sur les trackers MPPT.



L'équipe projet s'est ensuite renouvelée avec l'arrivée d'un élève en master 2 à l'ENSAM, qui dans le cadre de son projet de fin d'étude, reprit les travaux sur la gestion d'énergie en se focalisant sur la pile à combustible. Il faut aussi noter qu'une équipe de quatre élèves de l'ENSAM, en deuxième année de formation, avait choisit durant l'automne, un thème projet autour d'un véhicule de course (Formula Student).

Ce véhicule devait être doté d'une motorisation électrique avec une association supercondensateurs et batteries. Des échanges ont eu lieu sur la thématique de la gestion d'énergie ainsi que sur le dimensionnement des composants.

### 5.3.b. Différentes approches projet

Afin de faire progresser le projet et d'utiliser au mieux les différentes ressources disponibles, nous avons réfléchi à un découpage du projet en sous-projet, chacun avec un livrable, de manière à baliser son déroulement et de mieux capitaliser les acquis théoriques. En m'appuyant de nouveau sur l'étude du mois d'octobre, il apparaissait que la conduite du projet ne pouvait entièrement se calquer sur celle utilisée dans l'industrie mais que les spécificités de la Recherche notamment l'unicité du sujet, la part de contribution et la publication régulière de résultats devait être prise en compte.

Dans le cadre d'une thèse doctorale, le déroulement de la thèse sur trois ans implique très souvent un processus de développement classique et qui se décompose de la façon suivante :

- Définition d'un périmètre d'étude
- Etude bibliographique
- Choix d'un sujet d'étude comportant la part de contribution du chercheur
- Etude de la théorie avec les modèles correspondants
- Expérimentation validant les résultats
- Rédaction de la thèse

Dans l'industrie, on utilise divers cycles de développement mais on peut citer deux méthodes bien connues l'approche traditionnelle (analyse du besoin, analyse fonctionnelle, prototypage, tests et fabrication) et la méthode en cycle V bien connue du monde informatique. Il fallait donc trouver une approche qui puissent satisfaire les exigences à la fois du monde industriel mais aussi ceux de la Recherche.

Il s'agissait de garantir aux différents doctorants une structure classique d'étude dans le cadre d'une thèse doctorale mais aussi d'attirer des investisseurs éventuels avec une maquette et un simulateur qui constitueraient les livrables projet. En concertation avec les autres membres de l'équipe, j'ai proposé à M. Carmona et à l'encadrant Julien Gomand un découpage du projet global en quatre phases distinctes qui conciliait les deux approches (Recherche et Industrie).

#### Phase n°1 : avant-projet

- Définir le périmètre du projet, connaissance de l'environnement technique et économique,
- Définir un support de modélisation commun : La REM,
- Définir une application et la structure de la plate-forme : PAC + SCs; automobile électrique.
- Recherche bibliographique sur le thème de la gestion d'énergie globale

#### Phase n°2 : Modèle de connaissance pour chaque élément

- Etude complète pour chacun des éléments de base de la structure : PAC, supercondensateurs, groupe motopropulseur,
- Chaque étude comprend : Une recherche bibliographique complète, la sélection de différents modèles, choix du modèle utilisé et représentation REM,
- Etude des commandes locales sur les divers éléments,
- Possibilité de réaliser des test unitaires sur le banc Bahia ou un pack de supercondensateur.

#### Phase n°3 : Mise au point d'une maquette numérique globale

- Assemblage des différents modules pour former une maquette numérique

- Mise au point des algorithmes de commande locale après dimensionnement de l'ensemble des composants
- Mise au point d'une loi globale de gestion énergie empirique pour valider l'interconnexion des éléments,
- Travaux pour le montage de la plate-forme de test : choix des composants, devis, approvisionnement.

#### Phase n°4 : Loi de gestion globale et expérimentation sur banc test

- Déterminer les lois de gestion d'énergie globale selon l'approche choisie,
- Implantation de toutes les lois de commande dans la maquette numérique,
- Expérimentation sur banc test.

Ce choix de découpage permettait aux chercheurs de bénéficier de l'étude bibliographique dès les phases 1 et 2, ce qui leur assurait de pouvoir commencer des études théoriques rapidement. D'autre part, il paraissait évident que le montage de la plate-forme d'expérimentation ne pouvait s'opérer de suite, faute de connaître suffisamment les paramètres de dimensionnement. C'est pour cela, que la phase 3 permet de mettre l'accent sur une maquette numérique, qui est plus facilement modifiable et sur laquelle des tests de lois de gestion globale permettront de mieux comprendre les effets sur le bus DC et les éléments. Enfin, c'est à partir des comportements observés sur cette maquette, qu'il sera possible de faire évoluer l'algorithme puis de procéder à des tests grandeur nature.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le projet de gestion d'énergie pour une plate-forme multi-sources n'est bien évidemment pas terminé. Néanmoins, les résultats et les diverses études menées au cours de mon stage, vont permettre au reste de l'équipe de continuer les travaux. Le chantier est important car malgré de nombreuses publications, la gestion d'énergie reste encore un thème de recherche porteur. Les premiers résultats à base de logique floue ou de minimisation de pertes énergétiques souffrent d'une confrontation sur plate-forme réelle. La technologie des piles à membranes est encore en voie d'amélioration et, comme le montre plusieurs études, les paramètres ne sont pas invariant dans le temps. Il y a là peut-être un champs d'étude supplémentaire ainsi que sur les réelles capacités de la pile à gérer les fortes dynamiques dans le temps.

Du point de vue industriel, l'étude de marché des piles à combustible a permis de mieux appréhender la filière hydrogène et de constituer une veille technologique efficace. L'assise du projet s'en est retrouvée renforcée et il sera plus facile de communiquer sur ce sujet vers des partenaires potentiels. La filière est encore ténue et devra se développer en investissant massivement dans des projets d'études et développement. Le laboratoire LSIS pourrait ainsi se positionner, dans une région PACA qui souhaite faire émerger une filière énergétique.

Les études séparées des différents éléments vont bientôt se terminer, ce qui va permettre de lancer la mise au point d'un simulateur global de plate-forme multi-énergie. A partir de cet outil, il sera plus aisée de travailler sur les algorithmes de gestion d'énergie. La puissance de l'outil Matlab/Simulink devrait permettre de traiter le cœur du projet tandis que les résultats observés serviront dans la mise au point de la plate-forme d'essais.

Les travaux sur le GMP ont été très intéressants car ils nécessitaient des connaissances en électrotechnique, en génie automobile et en mécanique. Bien que la modélisation retenue repose sur un petit nombre d'hypothèses simplificatrices, rien n'empêchera l'équipe d'améliorer le simulateur, en prenant mieux en compte les

pertes ou en intégrant une liaison plus complexe au niveau de l'accouplement. Enfin, l'utilisation de la Représentation Energétique Macroscopique sur l'ensemble des modèles, a permis de s'approprier un outil puissant et adapté à notre étude.

La simulation, dite *Hardware in The Loop*, nous offre une réelle plus value en matière de test pour le futur banc d'essais. En effet une fois monté, ce banc moteur autorisera des variations de charge réalistes et permettra d'observer plus finement la réaction de la pile au regard des résultats observés sur les modèles. De même, les phases de freinage moteur pourront être mis à profit pour effectuer la recharge des supercondensateurs. A termes, ce banc d'essais constituera un vrai atout pour le CER Arts et Métiers ParisTech d'Aix-en-Provence, tant pour la Recherche que pour l'enseignement technique.

Ce projet a constitué est vrai challenge professionnel et scientifique. En effet, provenant du ministère de la Défense, je n'étais pas familier avec les problématiques liées aux énergies nouvelles comme la pile à combustible. Ce projet, m'a obligé a adopté un regard large sur un thème très novateur, puis à procéder à d'importantes recherches bibliographiques concernant les technologies de piles à hydrogène et la Représentation Energétique Macroscopique. La gestion de projet fut un exercice à part entière mais au final s'est révélé pour moi une source de grande motivation. Ce fut aussi pour moi, l'occasion d'échanger avec un grand nombre de personnes du monde de la Recherche et qui m'ont considérablement enrichis.

---

Notice technique pile à combustible BAHIA



**BANC DIDACTIQUE BAHIA**  
**Type : Bahia V2.1-A1**

---

**MANUEL D'UTILISATION ET D'INSTALLATION**

BAHIA V2.1-A 1

Manuel d'utilisation et d'installation

HELION-022517C  
page 1/64

Ce document est la propriété de HELION

## 1 INTRODUCTION

### 1.1 Description générale

BAHIA est un banc didactique, équipé d'une pile à combustible de type PEM, fonctionnant en mode hydrogène / air.

Il dispose de toutes les fonctionnalités pour assurer une large variété d'expérimentations en toute sécurité, répondant aux exigences du lycée et de l'enseignement supérieur.

Le système Banc est alimenté par le réseau électrique local et nécessite une alimentation en hydrogène et azote pour le fonctionnement de la pile. L'oxygène également nécessaire au fonctionnement de la pile est fourni par un ventilateur interne au système. L'énergie électrique produite par la pile est dissipée dans une charge électronique incorporée au système. Enfin la chaleur produite par la pile est évacuée par ventilation.

Une supervision disponible permet de piloter le système selon différents modes, et offre également un simulateur intégré permettant de s'affranchir du banc.

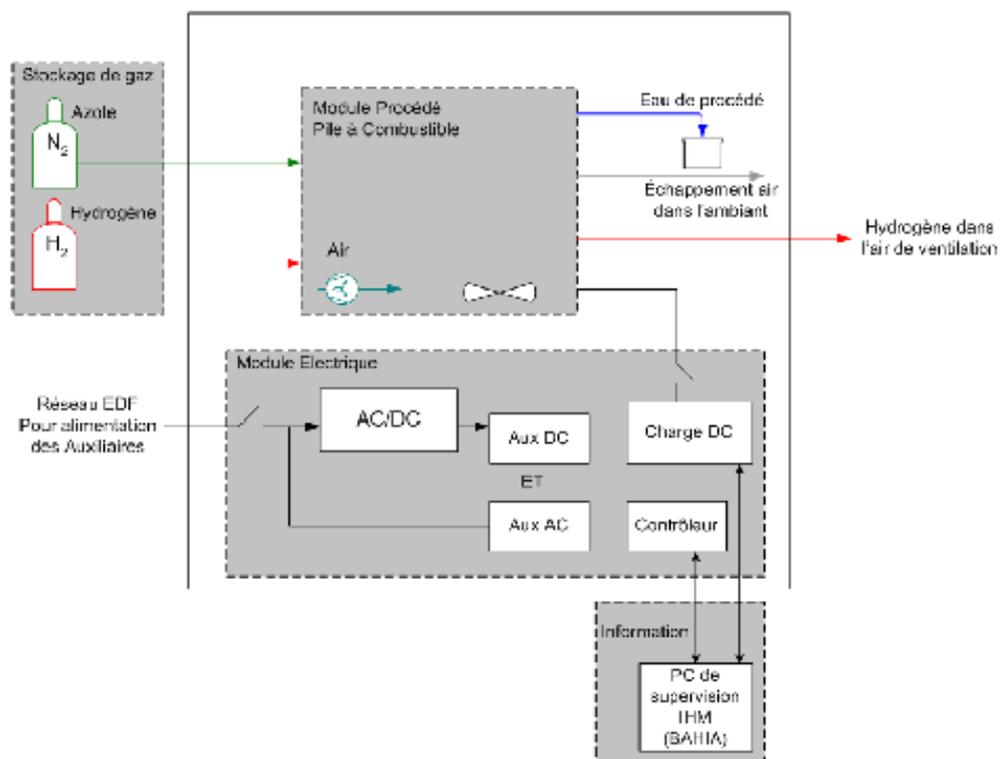


Figure 1 : Schéma de fonctionnement – banc didactique Bahia



## 1.2 Description des fonctions du banc didactique Bahia

### 1. L'admission des gaz

L'hydrogène est introduit dans le système par le biais d'un connecteur de type Quick Connect de marque Swagelok. Le système nécessite une pression de 4 bara (bars absolus) en entrée.

Le gaz introduit est ensuite détendu vers une pression de 1,3 bara (à puissance nominale) avant d'être acheminé vers le cœur du procédé.

De l'azote est également introduit dans le système afin de procéder à l'inertage du stack au cours des phases d'arrêt. L'azote est introduit à la pression de 4 bara avant d'être détendu à 1,35 bara environ pour inertage.

### 2. Le procédé pile à combustible,

L'hydrogène est envoyé dans le cœur du procédé à savoir le stack où il va réagir aux électrodes avec l'oxygène de l'air pour donner de l'électricité continue, de la chaleur et de l'eau.

Sur la ligne cathodique, l'air est acheminé au stack à l'aide d'un ventilateur. L'air sec du ventilateur passe à travers un humidificateur alimenté par l'air humide sortant du stack. L'air sec est ainsi humidifié avant son entrée dans le stack pour maintenir l'humidité des membranes.

Le débit d'air est ajusté proportionnellement au courant du stack et à la stoechiométrie paramétrée par l'utilisateur.

Des purges des 2 côtés, anodique et cathodique, seront réalisées avec de l'azote ou avec de l'air pendant la séquence d'arrêt du système.

Une boucle de refroidissement à eau maintient la température du stack constante. La chaleur sera évacuée à l'extérieur grâce à un échangeur air/eau.

### 3. Architecture électrique et contrôle commande

L'architecture électrique est composée de 3 sous parties complètement indépendantes :

- Le contrôleur intégré dans un boîtier rackable de 19 pouces qui communique avec les auxiliaires du système et avec l'IHM déportée
- La charge électronique rackable en 19 pouces permettant les prises de charges sur le stack
- Une distribution électrique pour l'alimentation des auxiliaires du système à partir du réseau électrique.

### 4. L'interface utilisateur

L'interface, intégrée dans un PC de supervision, permet de piloter le banc

- Contrôler manuellement le module pile à combustible en communiquant avec le contrôleur du système.
- Contrôler la charge électronique directement sans passer par le contrôleur système.



### 1.3 Description du procédé

Le schéma de procédé comprend 6 lignes différentes :

- La ligne 100 cathodique d'alimentation en air
- La ligne 300 d'inertage à l'azote du côté anodique.
- La ligne 400 anodique d'alimentation en hydrogène.
- La ligne 600 de refroidissement primaire du stack.
- La ligne 700 relative au stack,
- La ligne 800 correspondant à l'électricité et au contrôle commande.

#### Ligne 100 cathodique :

L'air est amené à la cathode au moyen d'un ventilateur VNT100. En entrée de ce ventilateur un filtre FT100 est présent et l'air est pris directement dans l'enceinte du module procédé qui est lui-même ventilé pour régénérer l'air.

Un manomètre IP100 indique ensuite la pression de la ligne cathodique et un thermocouple KT101 mesure la température de l'air à la sortie du ventilateur VNT100. Ce thermocouple sert à corriger le débit d'air en fonction de la température de l'air en sortie du ventilateur.

L'air sec provenant de l'enceinte du banc passe ensuite dans l'humidificateur HU100 qui utilise l'air humide de sortie du stack pour humidifier l'air entrant dans le stack. Un thermocouple est présent en sortie de l'humidificateur KT100 avant l'entrée du stack pour contrôler le bon fonctionnement de l'humidificateur. L'air humidifié passe ensuite dans le stack. L'air saturé en vapeur d'eau et contenant de l'eau liquide passe ensuite dans l'humidificateur. L'air en excès est rejeté dans l'environnement du procédé puis évacué par la ventilation du système.

#### Ligne 300 Azote :

Une alimentation d'azote se fait par l'intermédiaire d'une connexion Quick Connect. Une électrovanne NF EV300 permet l'admission d'azote à une pression de 4 bara.

#### Ligne 400 Anodique :

L'alimentation en hydrogène se fait par l'intermédiaire d'une connexion Quick Connect pour acheminer le gaz à une pression de 4 bara. On trouve ensuite un diaphragme DI400 qui sert à limiter le débit d'hydrogène en cas de rupture de canalisation dans le banc, puis 2 électrovannes NF EV400 (A et B) suivies d'un détendeur DT401.

Le détendeur DT401 règle la pression constante dans le stack en mode bouché pour tous les débits de fonctionnement et pour une pression d'entrée de 4 bara. Ce détendeur est suivi d'un capteur de pression KP400 permettant de suivre ce paramètre pour la sécurité.

L'hydrogène passe ensuite dans le stack pour être consommé. En sortie, une électrovanne NO EV401 cycle en mode ON/OFF (pour le mode bouché + purge) pour évacuer l'eau et l'azote (provenant de la cathode ayant diffusé à travers la membrane) accumulée à l'anode. Cette eau est récupérée dans un purgeur PG400. L'hydrogène utilisé au cours de cette purge rejoint la ventilation du système pour être diluée et rejetée dans l'ambient du local.



### **Ligne 600 Eau de refroidissement primaire :**

La ligne de refroidissement primaire composée d'eau déionisée (< 30 µS) passe à travers le stack pour son refroidissement. Deux thermocouples KT600 et KT601 placés en amont et en aval du stack permettent de réguler la température du stack et d'évaluer la quantité de chaleur générée par celui-ci.

La ligne passe ensuite au travers d'un échangeur (Air-Eau) EC600 qui est refroidi par deux ventilateurs VNT600. En sortie d'échangeur un débitmètre KQ600 permet de mesurer le débit de la ligne de refroidissement.

La ligne passe ensuite par une capacité CA600 faisant office de bac d'expansion lors des cycles thermiques. Enfin une pompe PO600 à vitesse constante permet la circulation du fluide au travers du circuit. Au point le plus bas de la ligne, un bouchon BH600 permet de vidanger le circuit dans le bac CA200.

### **Ligne 000 & 700 & 800 stack :**

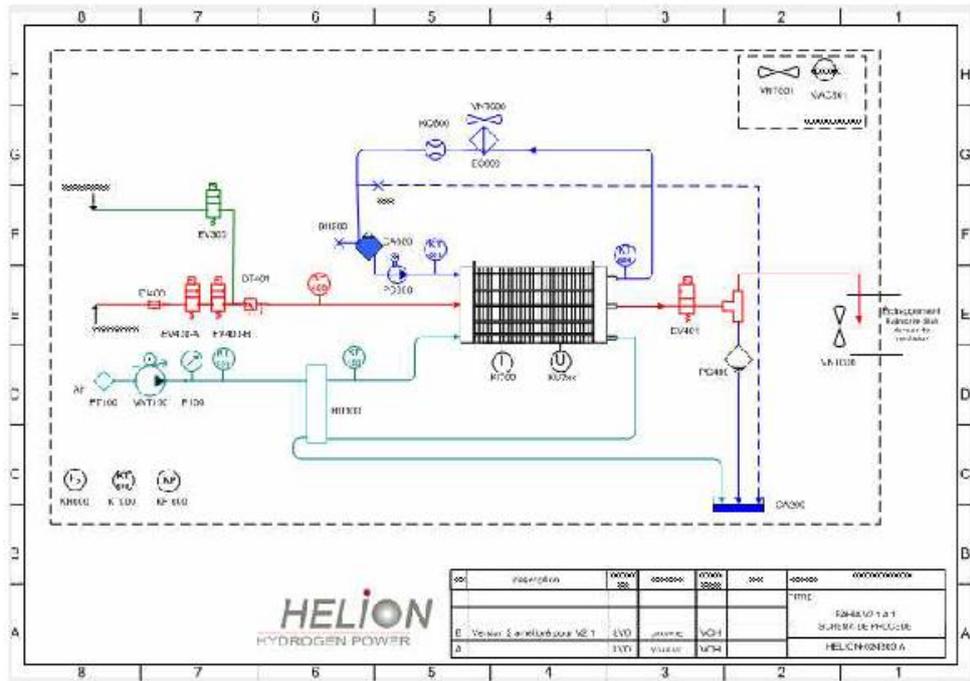
Le courant du stack est mesuré par le biais d'un capteur KI700. Un capteur de courant alternatif KI800 permet de mesurer la consommation totale des auxiliaires nécessaires au fonctionnement du système.

La tension du stack KU700 ainsi que la tension des 12 groupements de deux cellules KU701 à KU712 sont acquises.

Un capteur d'hydrogène KH000 est présent en partie haute de l'enceinte pour détecter les fuites. Ce capteur est placé dans l'enceinte suivant les recommandations issues de l'étude de sécurité.

Un thermocouple KT000 mesure la température ambiante au sein du système.

Un ventilateur VNT000 permet une ventilation permanente de l'unité. Cette ventilation est surveillée par une mesure de différence de pression (KP000) entre l'enceinte du système et la sortie du ventilateur. Cette mesure permet de vérifier la disponibilité de la ventilation.



Bahia V1-A 1

Manuel d'utilisation et d'installation

HELION-020800A  
page 12/64

Ce document est la propriété de HELION



### 1.4 Spécifications et performances

Paramètres		Valeurs
Hydrogène	Pression en entrée du système	4 bara
	Pression de fonctionnement dans le stack	environ 1,3 bara
	Qualité du gaz admissible	99,99 % * de H <sub>2</sub>
	Consommation nominale (à 1000 W) purge	700 NI/h
Air	Pression d'air en entrée	atmosphérique
	Pression d'air dans la pile	1,1 bara
	Humidité relative admissible	0 à 90 %
Eau	Conductivité	< 30 µS
	Capacité du circuit	600 ml
Azote	Qualité du gaz	Azote IU ou alphagaz (99,999 %)
	Pression admissible	4 bara
Energie électrique fournie	Gamme de puissance nominale	400 W – 1000 W DC
	Puissance maximale	1200 W
Tension d'alimentation des auxiliaires		230 VAC – 50 Hz
Temps de démarrage en automatique		< 1 minute
Température de fonctionnement du stack		55°C – 75°C réglable par l'utilisateur
Température ambiante d'exploitation		5°C – 40°C
Stoechiométries		De 1.5 à 2.5 Réglable par l'utilisateur
Demande sur la charge électronique		La demande pourra être manuelle ou selon des profils en courant, ou en voltage ou en puissance ou en résistance constant.

\* Il est recommandé de fonctionner avec de l'hydrogène de pureté 99.999%. Pour information, les données du manuel ont été obtenues avec le l'hydrogène ayant une pureté de 99,999%. Cependant le système peut être utilisé avec de l'hydrogène industriel ayant une pureté de 99,5%. Seulement moyennant une baisse de performance associée.

Les caractéristiques dimensionnelles et massiques du Banc didactique Bahia sont présentées dans le tableau suivant.

Caractéristiques	Valeurs
Hauteur (cm)	107
Profondeur (cm)	61
Largeur (cm)	59
Masse du bloc « procédé » (kg)	49
Masse du bloc « électrique » (kg)	40



### 1.5 Description détaillée

Le banc didactique Bahia se compose de 2 sous-ensembles. Une partie dite « procédé » et une partie « électrique ». Ces 2 blocs sont placés l'un sur l'autre et sont destinés à fonctionner ensemble. Les figures ci-après présentent différentes vues des 2 sous-ensembles assemblés.



Bahia V1-A 1

Manuel d'utilisation et d'installation

HELION-020800A

page 14/64

Ce document est la propriété de HELION et ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation

## Cycle européen ECE-15

N° L 76/8

Journal officiel des Communautés européennes

6. 4. 70

## Cycle de fonctionnement au banc dynamométrique

N° de sé- quence	Séquences	Modes	Accélé- ration m/sec. <sup>2</sup>	Vi- tesse km/h	Durée de chaque		Temps cu- mulé sec.	Rapport de boîtes à utiliser dans le cas d'une boîte mécanique
					sé- quence sec.	mode sec.		
1	Ralenti	1			11	11	11	6 sec. PM + 5 sec. K <sub>1</sub> <sup>(1)</sup>
2	Accélération	2	1,04	0—15	4	4	15	1
3	Vitesse stabilisée	3		15	8	8	23	1
4	Décélération	4	-0,69	15—10	2	5	25	1
5	Décélération moteur débrayé		-0,92	10—0	3		28	K <sub>1</sub>
6	Ralenti	5			21	21	49	16 sec. PM + 5 sec. K <sub>1</sub>
7	Accélération	6	0,83	0—15	5	12	54	1
8	Changement de vitesse		2	56				
9	Accélération	7	0,94	15—32	5	24	61	2
10	Vitesse stabilisée		32	85				
11	Décélération	8	-0,75	32—10	8	11	93	2
12	Décélération moteur débrayé		-0,92	10—0	3		96	K <sub>2</sub>
13	Ralenti	9			21	21	117	16 sec. PM + 5 sec. K <sub>1</sub>
14	Accélération	10	0,83	0—15	5	26	122	1
15	Changement de vitesse		2	124				
16	Accélération	11	0,62	15—35	9	12	133	2
17	Changement de vitesse		2	135				
18	Accélération	12	0,52	35—50	8	13	143	3
19	Vitesse stabilisée		50	155				
20	Décélération	13	-0,52	50—35	8	12	163	3
21	Vitesse stabilisée		35	176				
22	Changement de vitesse	14	-0,86	32—10	7	3	178	2
23	Décélération		-0,92	10—0	7		185	
24	Décélération moteur débrayé	3	188	K <sub>2</sub>				
25	Ralenti	15			7	7	195	7 sec. PM

<sup>(1)</sup> PM = Boîte au point mort, moteur embrayé.  
K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> = Boîte en 1<sup>re</sup> ou 2<sup>e</sup> vitesse engagée, moteur débrayé.

## 1.2. Conditions générales pour l'exécution du cycle

Des cycles d'essais préliminaires doivent être exécutés pour déterminer la meilleure façon d'actionner la commande de l'accélérateur et du frein s'il y a lieu, afin d'exécuter un cycle se rapprochant du cycle théorique dans les limites prescrites.

## 1.3. Utilisation de la boîte de vitesses

1.3.1. Si la vitesse maximale pouvant être atteinte sur le premier rapport de la boîte de vitesse est inférieure à 15 km/h, on utilise les 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> combinaisons.

1.3.2. Les voitures équipées de boîtes de vitesse à commande semi-automatique sont essayées en utilisant les rapports normalement utilisés pour la circulation sur route, et la commande des vitesses est actionnée selon les instructions du constructeur.



## APPENDICE 2

## Décomposition du cycle de fonctionnement utilisé pour l'essai du type I

	<i>Temps</i>		<i>%</i>
<b>1. Décomposition en séquences</b>			
Ralenti .....	60 sec.	30,8	} 35,4
Ralenti véhicule en marche moteur embrayé sur une combinaison .....	9 sec.	4,6	
Passage des vitesses .....	8 sec.		4,1
Accélérations .....	36 sec.		18,5
Stabilisations .....	57 sec.		29,2
Décélération .....	25 sec.		12,8
	195 sec.		100
<b>2. Décomposition en fonction de l'utilisation de la boîte de vitesses</b>			
Ralenti .....	60 sec.	30,8	} 35,4
Ralenti véhicule en marche moteur embrayé sur une combinaison .....	9 sec.	4,6	
Passage des vitesses .....	8 sec.		4,1
— 1 <sup>re</sup> vitesse .....	24 sec.		12,3
— 2 <sup>e</sup> vitesse .....	53 sec.		27,2
— 3 <sup>e</sup> vitesse .....	41 sec.		21
	195 sec.		100

Vitesse moyenne lors de l'essai: 19 km/h.

Temps de marche effectif: 195 sec.

Distance théorique parcourue par cycle: 1,013 km.

Distance équivalente pour l'essai (4 cycles): 4,052 km.

## ANNEXE IV

## ESSAI DU TYPE II

(Contrôle de l'émission de monoxyde de carbone au régime du ralenti)

## Méthode pour conduire l'essai du type II défini au point 3.2.1.2 de l'annexe I

## 1. Conditions de mesure

- 1.1. Le carburant est le carburant de référence dont les caractéristiques sont définies à l'annexe VI.
- 1.2. La teneur en volume en monoxyde de carbone est mesurée immédiatement après les 4 cycles de l'essai du type I, le moteur tournant au ralenti.
- 1.3. Pour les véhicules à boîte de vitesses à commande manuelle ou semi-automatique, l'essai est effectué en position boîte au point mort, moteur embrayé.
- 1.4. Pour les véhicules à transmission automatique, l'essai est effectué avec le sélecteur en position « zéro » ou « stationnement ».

Moteur courant continu LEM 130



**LMC**  
Generating Movement Efficiently  
**Motors**



[www.lmctd.net](http://www.lmctd.net)



MADE IN THE UK

---

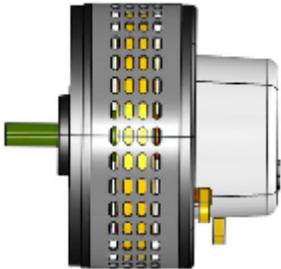
## LEM-130

### Overview:

*The LEM-130 is a 6 Pole Axial Gap D.C. brush motor suitable for light traction and robotics applications.*

*Example applications include railway service vehicle, scooters, mopeds and small vehicles.*

*The LEM-130 is available with two options: 95 and 95S*



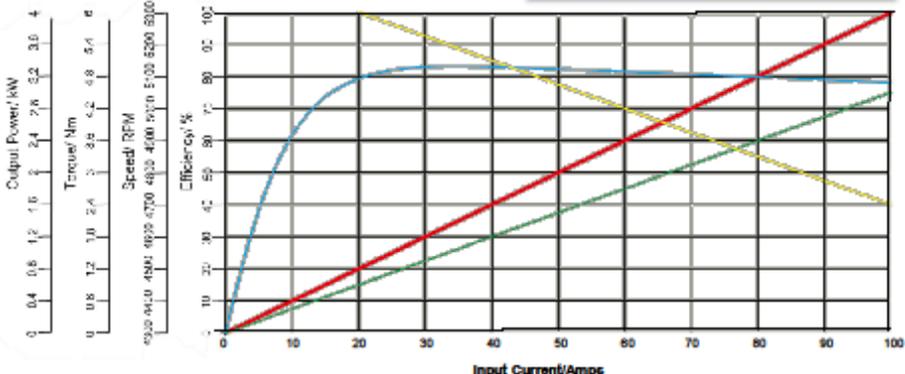
### Features:

- High efficiency (up to 88%)
- Lightweight design
- Simple electronic control
- Long brush Life

- Rugged Construction
- CE Marked
- Ip20 rating
- Voltage 12 to 48v

### Typical Technical Data Curve :

**Data from LEM-130/95 (65V)**



Input Current (Amps)	Efficiency (%)	Speed (RPM)	Torque (Nm)	Output Power (W)
0	0	6500	0	0
10	~75	~5500	~0.5	~0.5
20	~85	~4500	~1.0	~1.0
30	~88	~3500	~1.5	~1.5
40	~88	~2500	~2.0	~2.0
50	~88	~1500	~2.5	~2.5
60	~88	~500	~3.0	~3.0
70	~88	~500	~3.5	~3.5
80	~88	~500	~4.0	~4.0
90	~88	~500	~4.5	~4.5
100	~88	~500	~5.0	~5.0

Page 1 of 2

LEM-130



**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Commissariat général au développement durable, «Bilan énergétique de la France en 2011,» Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2012.
- [2] Université de Corse. [En ligne]. Available: <http://myrte.univ-corse.fr/>. [Accès le janvier 2013].
- [3] AZIB T., «Contribution à l'étude d'électro-générateur à pile à combustible,» Thèse doctorale, Université Paris-Sud XI - Faculté des Sciences d'Orsay, 2010.
- [4] Fuel Cell Today, «The Fuel Cell Industry Review 2012,» London, 2012.
- [5] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Programme Review 2011, Union Européenne, 2011, p. 160.
- [6] Ministère de l'industrie, «Rapport : Les technologies clés - 2015,» 2011.
- [7] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, «L'hydrogène Energie et les Piles à Combustible - Feuille de route stratégique,» ADEME, 2011.
- [8] FC Lab, janvier 2013. [En ligne]. Available: <http://www.fclab.fr/>.
- [9] M. BOUDELLAL, La pile à combustible, seconde édition, Paris: Dunod, 2012, p. 334.
- [10] MIRAOUI A. et BLUNIER B., Piles à combustible, Paris: Ellipses, 2007, p. 179.
- [11] BOULON L., «Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approche systémique pour la gestion d'énergie,» Thèse doctorale, Univeristé de Franche-Comté, 2009.

- [12] EHSANI M., GAO Y., GAY S. et EMADI Y., *Modern electric, hybrid electric, fuel cell vehicles*, CRC Press, 2005.
- [13] GOMAND J., «Analyse de systèmes mult- actionneurs parallèles par une approche graphique causale : application à un processus électromécanique de positionnement rapide,» Thèse doctorale, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Lille, 2008.
- [14] BOUSCAYROL A., «Formalismes de représentation et de commande appliqués aux systèmes électromécaniques multimachines multiconvertisseurs, Habilitation à diriger des recherches,» Université Technologique de Lille, 2003.
- [15] BOUSCAYROL A., LHOMME W. et CHEN K., «Energetic macroscopic representation and inversion-based control : application to an electric vehicle with an electrical differential,» *Journal of Asian Electric Vehicles*, vol. 6 n°1, pp. 1097-1102, June 2008.
- [16] LHOMME W., «Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la Représentation Energétique Macroscopique,» Thèse doctorale, Université des Sciences et techniques de Lille, 188p, 2007.
- [17] Octobre 2012. [En ligne]. Available: <http://www.fuelcelltoday.com/>.



LEGAND S., Conception d'un simulateur pour l'optimisation de la commande d'une plate-forme multi-sources représentant un véhicule électrique à hydrogène. Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Paris 2013.

---

## RESUME

Depuis une vingtaine d'années, de nombreux industriels ainsi que des laboratoires de recherche ont entrepris des projets sur la pile à combustible. Bien qu'elle soit encore marginale dans le paysage énergétique français, elle suscite de vastes espoirs notamment dans le domaine automobile.

Dans le cadre d'un projet de plate-forme multi-sources, mené par le laboratoire LSIS - CER Arts et Métiers, une étude sur l'impact économique des piles à combustibles a permis de montrer l'intérêt de cette technologie mais aussi les faiblesses rencontrées sur la technologie des membranes échangeuses de protons (PEMFC).

Dans la perspective de monter une plate-forme expérimentale, une modélisation du groupe motopropulseur permet de simuler le comportement de la charge vue de la plate-forme, en utilisant une approche systémique grâce à la Représentation Énergétique Macroscopique (REM). Une transposition sur un système de simulation dit hardware In the Loop est réalisé au travers d'un couplage de deux moteurs à courant continu.

**Mots clés** : pile à combustible, supercondensateur, REM, véhicule hydrogène, PEMFC, simulation HIL.

---

## SUMMARY

Since about twenty years, numerous industrialists as well as research laboratories undertook projects on the fuel cell. Although it is still marginal in the French energy landscape, it arouses vast hopes particularly in the automobile domain.

Within the framework of a project of platform multi-sources, led by the laboratory LSIS-CER Arts and Métiers, a study on the economic impact of fuel cells allowed to show the interest of this technology but also the weaknesses met on model with the technology of proton exchange membrane (PEMFC).

In the prospect to take up an experimental platform, a modelling of the powertrain allows to feign the behavior of the load seen by the platform, by using a systematic approach with the help of the Energetic Macroscopic Representation (EMR). A transposition on a hardware In the Loop simulation system is realized through a coupling of two DC motors.

**Key Words** : fuel cell, supercapacitor, EMR, hydrogen vehicle, PEMFC, HIL simulation