

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département : Génie Electrique  
Réf : .....



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم : الهندسة الكهربائية  
المرجع : .....

**Thèse présentée en vue de l'obtention  
du diplôme de Doctorat en Sciences en Génie Electrique  
Option : Electrotechnique**

**Optimisation et Gestion de l'énergie d'un système  
de traction électrique alimenté par plusieurs  
sources d'énergie.**

**Mohamed Nacereddine SID**

*Magister en Electrotechnique*

Soutenue publiquement le 22/12/2022 Devant le jury composé de :

<b>BOUMEHRAZ Mohamed</b>	<b>Prof</b>	<b>Président</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>ABOUBOU Abdennacer</b>	<b>Prof</b>	<b>Encadrant</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>BECHERIF Mohamed</b>	<b>Maître de Conférences HDR</b>	<b>Co-encadrant</b>	<b>U.T.B.M. (France)</b>
<b>AZOUI Boubekeur</b>	<b>Prof</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Batna 2</b>
<b>TIGANI Ilyes</b>	<b>Maître de Conférences A</b>	<b>Examineur</b>	<b>ESTI Annaba</b>

## ***Remerciements***

Je tiens premièrement à m'incliner devant Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour terminer cette thèse de Doctorat.

Tout d'abord, j'exprime ma profonde gratitude à Monsieur **Abdennacer ABOUBOU** mon directeur de thèse, Professeur à l'Université de Biskra et à Monsieur **Mohamed BECHERIF** mon co-directeur de thèse, Maître de conférences (HDR) à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (France), pour leur disponibilité et leur soutien permanent durant toute la période de la réalisation de mon travail de recherche, ainsi que pour leurs aides précieuses, leurs conseils et pour l'attention portée à l'élaboration de cette thèse, et pour tous leurs efforts.

J'adresse mes vifs remerciements au Col **Khoudir MAROUANI** Chef de l'UER Électrotechnique, de l'École Militaire Polytechnique.

Mes remerciements vont également à tous mes enseignants durant mes années d'études.

J'ai été profondément honoré que Monsieur **Mohamed BOUMEHRAZ**, Professeur à l'Université de Biskra, ait accepté d'examiner ce travail et de présider ce jury.

J'exprime également mes remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer mon travail de thèse :

- Monsieur **Boubekeur AZOUI**, Professeur à l'Université de Batna 2.
- Monsieur **Ilyes TIGANI**, MCA à l'Ecole Supérieure de Technologies Industrielles à Annaba.

Je voudrais exprimer mes remerciements aux **Lts Y. ACHOUR** et **M. R. KESSI** pour leurs aides et leurs disponibilités pendant la phase de la réalisation pratique. Je tiens à remercier également les **Cdts H. ALLOUI** et **M. AISSANI**, pour leur collaboration et leur amabilité.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de mon travail.

## *Dédicaces*

*À mes très chers parents. Que Dieu les protège.*

*À mes sœurs et mon frère.*

*À ma femme et mon fils Ali*

*Et à tous mes amis.*

# **SOMMAIRE**

# SOMMAIRE

**SOMMAIRE**

**NOMENCLATURE**

**SYMBOLES**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES TABLEAUX**

**INTRODUCTION GÉNÉRALE ..... 1**

## **CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉS SUR LES VÉHICULES HYBRIDES ET LES SOURCES D'ÉNERGIE**

I.1. INTRODUCTION.....	6
I.2. LES VEHICULES HYBRIDES (VHS).....	6
I.2. 1. Définition et historique.....	6
I.2. 2. Architectures des véhicules électriques hybrides.....	7
I.2.3. Concept d'une chaîne de traction hybride.....	9
I.3. VEHICULE HYBRIDE A PILE A COMBUSTIBLE.....	10
I.4. LA PILE A COMBUSTIBLE .....	11
I.4. 1. Historique.....	11
I.4. 2. Principe de la pile à combustible.....	12
I.4. 3. Types de piles à combustible.....	13
I.4. 4. Les PEMFCs.....	14
I.4. 5. Constitution d'une PEMFC.....	15
I.5. SYSTEME PILE A COMBUSTIBLE DESTINE POUR LA PROPULSION ELECTRIQUE .....	16
I.5.1. Différentes architectures d'un véhicule électrique à PàC.....	18
I.6. ELEMENTS TECHNOLOGIQUES DE STOCKAGE D'ENERGIE.....	20
I.6. 1. Les Supercondensateurs.....	20
I.6. 2. Les batteries.....	24
I.6.3. Choix de la technologie de stockage.....	29
I.7. CONCLUSION.....	29

## **CHAPITRE II. MODÉLISATION ET DIMENSIONNEMENT DES COMPOSANTS DU VÉHICULE HYBRIDE Â PÂC**

II.1. INTRODUCTION .....	32
II.2. PRESENTATION DU VEHICULE A PAC CONSIDERE.....	32
II.3. MODELISATION ET DIMENSIONNEMENT DE LA CHAINE DE TRACTION .....	33
II.3.1. Modèle dynamique du véhicule.....	33
II.3.2. Le moteur de traction.....	35
II.4. MODELISATION DES SOURCES D'ENERGIE .....	37

II.4.1. Modélisation de la PàC.....	37
II.4.1.1. Caractéristiques statiques d'une cellule de la PàC.....	37
II.4.2. Modélisation de la batterie.....	47
II.4.3. Modèle du supercondensateur.....	48
II.5. DIMENSIONNEMENT DES SOURCES D'ENERGIE .....	50
II.5.1. Dimensionnement du stack de PàCs.....	50
II.5.2. Dimensionnement des supercondensateurs.....	52
II.5.3. Dimensionnement de pack de batteries.....	53
II.6. MODELISATION ET DIMENSIONNEMENT DES CONVERTISSEURS STATIQUES LIES AUX SOURCES D'ENERGIE	54
II.6.1. Convertisseur lié à la source principale.....	54
II.6.2. Convertisseur lié à la source secondaire.....	57
II.7. CONCLUSION.....	58

### **CHAPITRE III. GESTION DES FLUX ÉNERGÉTIQUES**

III.1. INTRODUCTION .....	60
III.2. GENERALITES SUR LES TECHNIQUES DE LA GESTION DES FLUX ENERGETIQUES.....	60
III.2.1. La notion de la gestion des flux énergétiques.....	60
III.2.2. Etat de l'art sur les techniques de la gestion de l'énergie.....	61
OPTIMISATION GLOBALE .....	62
III.3. COMMANDE OPTIMALE.....	65
III.3.1. Généralités sur la commande optimale.....	65
III.3.2. Problème de l'optimisation et gestion d'énergie.....	69
III.3.3. Utilisation de la théorie de la commande optimale en vue de la gestion de l'énergie.....	72
III.4. GESTION DE L'ENERGIE "BASEE SUR DES REGLES" OU HEURISTIQUE.....	79
III.5. APPLICATION DE LA GESTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE SUR LA DEUXIEME ARCHITECTURE.....	86
III.5.1. Gestion de l'énergie basée sur la séparation fréquentielle.....	87
III.5.2. Gestion de l'énergie par thermostat.....	89
III.5.3. Gestion de l'énergie basée sur la minimisation de la consommation équivalente	91
III.6. CONCLUSION.....	98

### **CHAPITRE IV. MISE EN ŒUVRE EXPÉRIMENTALE**

IV.1. INTRODUCTION .....	100
IV.2. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAIS EXPERIMENTAUX .....	100
IV.2.1. Notion de l'émulation.....	102
IV.3. REALISATION DE L'EMULATEUR DE LA PAC.....	103
IV.3.1. Réalisation du hacheur.....	105
IV.3.2. Implémentation de la commande.....	106
IV.3.3. Résultats expérimentaux de l'émulateur.....	106
IV.4. REALISATION DES CONVERTISSEURS STATIQUES DE L'EMULATEUR DE LA CHAINE DE TRACTION .....	108
IV.4.1. Hacheur survolteur.....	108
IV.4.2. Réalisation du convertisseur connecté aux batteries.....	111

IV.4.3. Assemblage des convertisseurs d'adaptation au bus continu.....	113
IV.4.4. Réalisation du hacheur à quatre quadrants.....	114
IV.5. IMPLEMENTATION DES TECHNIQUES DE GESTION DE L'ENERGIE .....	115
IV.5.1. Construction du cycle NEDC par la régulation de la MCC.....	115
IV.5.2. Test de l'émulateur de l'environnement extérieur du VE.....	116
IV.5.3. Test de la technique de séparation fréquentielle.....	118
IV.6. CONCLUSION.....	121
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>122</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>125</b>
<b>ANNEXE A : LES CYCLES DE CONDUITE CONSIDERES .....</b>	<b>126</b>
<b>ANNEXE B : LES PROGRAMMES DEVELOPPES .....</b>	<b>131</b>
<b>ANNEXE C : LA CARTE D'ACQUISITION PCI-6052E.....</b>	<b>134</b>
<b>ANNEXE D: LES BATTERIES «VALVE REGULATED RECHARGEABLE LEAD ACID BATTERY» .....</b>	<b>136</b>
<b>ANNEXE E: IDENTIFICATION DES PARAMETRES DE LA MCC.....</b>	<b>142</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>145</b>
<b>CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES.....</b>	<b>155</b>

## NOMENCLATURE

<b>MCI</b>	<b>M</b> oteur à <b>C</b> ombustion <b>I</b> nterne
<b>PàC</b>	<b>P</b> ile à <b>C</b> ombustible
<b>VH</b>	<b>V</b> éhicule <b>H</b> ybride
<b>ES</b>	<b>E</b> lément de <b>S</b> tockage
<b>DC</b>	<b>D</b> irect <b>C</b> urrent
<b>AFC</b>	<b>A</b> lkaline <b>E</b> lectrolyte <b>F</b> uel <b>C</b> ell
<b>PEMFC</b>	<b>P</b> rotons <b>E</b> xchange <b>M</b> embrane <b>F</b> uel <b>C</b> ell
<b>PAEC</b>	<b>P</b> hosphoric <b>A</b> cid <b>F</b> uel <b>C</b> ell
<b>MCFC</b>	<b>M</b> olten <b>C</b> arbonate <b>F</b> uel <b>C</b> ell
<b>SOFC</b>	<b>S</b> olid <b>O</b> xide <b>F</b> uel <b>C</b> ell
<b>DMFC</b>	<b>D</b> irect <b>M</b> éthanol <b>F</b> uel <b>C</b> ell
<b>SoC</b>	<b>S</b> tate of <b>C</b> harge
<b>VE</b>	<b>V</b> éhicule <b>E</b> lectrique
<b>SSE</b>	<b>S</b> ystèmes de <b>S</b> tockage de l' <b>E</b> nergie
<b>SH</b>	<b>S</b> ystème <b>H</b> ybride
<b>SC</b>	<b>S</b> upercondensateur
<b>MCC</b>	<b>M</b> achine à <b>C</b> ourant <b>C</b> ontinu
<b>PFD</b>	<b>P</b> incipe <b>F</b> ondamental de la <b>D</b> ynamique
<b>fem</b>	<b>F</b> orce <b>é</b> lectromotrice
<b>MLI</b>	<b>M</b> odulation de <b>L</b> argeur d' <b>I</b> mpulsions
<b>IGBT</b>	<b>I</b> nsulated <b>G</b> ate <b>B</b> ipolar <b>T</b> ransistor
<b>NEDC</b>	<b>N</b> ew <b>E</b> uropean <b>D</b> riving <b>C</b> ycle
<b>UDDS</b>	<b>U</b> rban <b>D</b> ynamometer <b>D</b> riving <b>S</b> chedule
<b>FTP</b>	<b>F</b> ederal <b>T</b> est <b>P</b> rocedure
<b>HWFET</b>	<b>H</b> ighway <b>F</b> uel <b>E</b> conomy <b>T</b> est



## SYMBOLES

$E$	Tension théorique à vide de la PàC
$V_{act}$	Chute de tension par activation
$V_{ohm}$	Chute de tension ohmique
$V_{conc}$	Chute de tension par concentration
$i_0$	Densité de courant d'échange
$i_{pac}$	Densité de courant de la PàC
$R_{ohm}$	Résistance ohmique
$t_m$	Epaisseur de la membrane
$\sigma_m$	Conductivité de la membrane
$\lambda_m$	Teneur en eau de la membrane
$i_{max}$	Densité de courant maximale
$V_{cell}$	Tension élémentaire d'une cellule
$V_{pac}$	Tension totale de la PàC
$N_{cell}$	Nombre de cellules
$I_{pac}$	Courant de la PàC
$A_{cell}$	Surface active d'une membrane
$P_{pac}$	Puissance brute fournie par la PàC
$T_{pac}$	La température
$E_0$	Tension à vide de la batterie
$C_{bat}$	Capacité interne de la batterie
$R_{bat}$	Résistance interne
$V_{bat}$	Tension de la batterie
$V_{Bus}$	Tension du bus continu
$T$	Période
$I_{charge}$	Le courant équivalent demandé aux bus continu
$L_{DC}$	Inductance du hacheur boost
$C_{Bus}$	Capacité connectée au bus continu
$I_{bat}$	Courant de la batterie
$L_{bat}$	Inductance du hacheur réversible
$T_{repi}$	Temps de réponse de la boucle de courant
$T_{repv}$	Temps de réponse de la boucle de tension

$M_v$	Masse du véhicule
$v$	Vitesse du véhicule
$F_{air}$	Force équivalente à la résistance de l'air sur le véhicule
$\rho_{air}$	Masse volumique de l'air
$S$	Surface frontale du véhicule
$C_x$	Coefficient de pénétration dans l'air
$F_r$	Résistance des roues sur le sol
$P$	Poids du véhicule
$\alpha$	Angle formé par la route et l'horizontale
$C_r$	Coefficient de roulement
$F_t$	Force de traction
$g$	Constante de pesanteur
$P_m$	Puissance mécanique
$\widehat{V}_{VE}$	Vitesse maximale du véhicule
$\phi$	Diamètre des pneus
$P_{roues}$	Puissance transmise aux roues
$P_{mot}$	Puissance du moteur électrique
$\eta$	Le rendement de la transmission du moteur- roues
$P'$	Poids du véhicule
$F$	Force totale
$F_a$	Force d'accélération
$T_m$	Couple résistant appliqué sur l'arbre du moteur
$w_{ref}$	Vitesse de référence

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I-1</b> : Architecture hybride série [11].	8
<b>Figure I-2</b> : Architecture hybride parallèle [11].	8
<b>Figure I-3</b> : Architecture hybride combinée [11].	9
<b>Figure I-4</b> : Schéma illustrant le concept d'un véhicule hybride [12].	10
<b>Figure I-5</b> : Schéma d'une cellule élémentaire de PàC [21].	12
<b>Figure I-6</b> : Principe des piles à combustible à électrolyte acide (en haut) et alcalin (en bas).	14
<b>Figure I-7</b> : Exemple de schéma de montage d'une cellule de pile [24].	16
<b>Figure I-8</b> : Schéma d'une cellule de pile, les 7 régions [25].	16
<b>Figure I-9</b> : Structure du système à PàC type PEM pour les véhicules [20].	17
<b>Figure I-10</b> : Schéma illustrant la première architecture possible.	19
<b>Figure I-11</b> : Schéma illustrant la deuxième architecture possible.	19
<b>Figure I-12</b> : Schéma illustrant la troisième architecture possible.	19
<b>Figure I-13</b> : Structure des supercondensateurs (Création de la couche double électrique) [14, 25].	21
<b>Figure I-14</b> : Principe de fonctionnement d'une cellule d'une batterie.	24
<b>Figure I-15</b> : Plages de fonctionnement en tension d'un élément électrochimique.	25
<b>Figure I-16</b> : Évolution de la tension en fonction de la capacité restante pour différents régimes de décharge.	25
<b>Figure I-17</b> : Plan de Ragonne [18].	29
<b>Figure II-1</b> : Première architecture électrique du véhicule à PàC étudiée.	33
<b>Figure II-2</b> : Deuxième architecture électrique du véhicule à PàC étudiée.	33
<b>Figure II-3</b> : Bilan des forces sur le véhicule [36].	34
<b>Figure II-4</b> : Schéma électrique de la MCC à excitation séparée.	36
<b>Figure II-5</b> : Modèle de la MCC à excitation séparée.	37
<b>Figure II-6</b> : Caractéristique statique d'une cellule de PàC [43].	38
<b>Figure II-7</b> : Caractéristique statique d'une cellule PEM en considérant seulement les pertes d'activation.	41
<b>Figure II-8</b> : Caractéristique statique d'une cellule PEM en considérant seulement les pertes ohmiques.	42
<b>Figure II-9</b> : Caractéristique statique d'une cellule PEM en considérant seulement les pertes de concentration.	43
<b>Figure II-10</b> : Schéma bloc du modèle de simulation de la tension du stack.	44
<b>Figure II-11</b> : Surtension d'activation à température constante (80°C) et à pression variable.	45
<b>Figure II-12</b> : Surtension ohmique à température constante (80°C) et à pression variable.	45
<b>Figure II-13</b> : Surtension de concentration à température constante (80°C) et à pression variable.	45
<b>Figure II-14</b> : Tension d'une cellule à PàC à température constante (80°C) et à pression variable.	45
<b>Figure II-15</b> : Tension de la PàC à température constante (80°C) et à pression variable.	46
<b>Figure II-16</b> : Puissance de la PàC à température constante (80°C) et à pression variable.	46
<b>Figure II-17</b> : Tension de PàC à pression constante (3 bar) et à température variable.	46

<b>Figure II-18</b> : Puissance de la PàC à pression constante (3 bar) et à température variable....	46
<b>Figure II-19</b> : Tension de la PàC pour une pression de 3 bars pour deux valeurs de la teneur en eau de la membrane. ....	47
<b>Figure II-20</b> : Puissance de la PàC pour une pression de 3 bars pour deux valeurs de la teneur en eau de la membrane. ....	47
<b>Figure II-21</b> : Modèle R-C de la batterie.....	47
<b>Figure II-22</b> : Tension de la batterie pour différents courant de décharge. ....	48
<b>Figure II-23</b> : Etat de charge de la batterie pour différents courants de décharge. ....	48
<b>Figure II-24</b> : Modèle d'un élément. ....	49
<b>Figure II-25</b> : Caractéristiques électriques d'une cellule PEMFC. ....	51
<b>Figure II-26</b> : Caractéristique (tension-courant) à gauche et (puissance-courant) à droite pour le dimensionnement choisi de la PàC. ....	52
<b>Figure II-27</b> : Schéma électrique d'un hacheur élévateur sans pertes. ....	54
<b>Figure II-28</b> : Schéma électrique du hacheur élévateur avec les pertes ohmiques.....	55
<b>Figure II-29</b> : Rapport d'élévation du hacheur en fonction du rapport cyclique pour différentes valeurs de la résistance de la bobine.....	56
<b>Figure II-30</b> : Rendement du hacheur en fonction du rapport cyclique pour des différentes valeurs de la résistance de la bobine.....	57
<b>Figure II-31</b> : Schéma électrique du hacheur élévateur réversible en courant. ....	58
<b>Figure III-1</b> : Schéma électrique du bus continu.....	60
<b>Figure III-2</b> : Schéma global du contrôle de la gestion de l'énergie.....	61
<b>Figure III-3</b> : Classification des différentes stratégies de gestion de l'énergie dans un véhicule hybride [12]. ....	62
<b>Figure III-4</b> : Système électrique du véhicule étudié. ....	70
<b>Figure III-5</b> : La vitesse de véhicule avec la référence. ....	75
<b>Figure III-6</b> : Courbes de puissances échangées dans le véhicule pour le cycle NEDC.....	76
<b>Figure III-7</b> : : Courbes de puissances échangées entre (0 et 200 s).....	76
<b>Figure III-8</b> : Courbes de puissances échangées entre (800 et 1200 s).....	77
<b>Figure III-9</b> : L'évolution de l'état de charge du SC .....	77
<b>Figure III-10</b> : Le courant de références du module de SCs durant le cycle de.....	78
<b>Figure III-11</b> : Evolution de la tension aux bornes du module de SCs durant le cycle de fonctionnement NEDC. ....	79
<b>Figure III-12</b> : Rendement et consommation d'Hydrogène d'une PEMFC en fonction de puissance [66]. ....	80
<b>Figure III-13</b> : Points d'opération de la PàC pour la stratégie MEPT. ....	81
<b>Figure III-14</b> : Point de fonctionnement de la PàC pour la stratégie améliorée basée sur la caractéristique du rendement. ....	82
<b>Figure III-15</b> : Vitesse de véhicule avec sa référence pour la stratégie MEPT.....	83
<b>Figure III-16</b> : Courbes de puissances échangées pour la stratégie MEPT.....	83
<b>Figure III-17</b> : L'évolution de l'état de charges de SC pour la stratégie MEPT.....	84
<b>Figure III-18</b> : Les puissances échangées pour la stratégie MEPT améliorée. ....	84
<b>Figure III-19</b> : L'évolution de l'état de charge de SC pour la stratégie MEPT améliorée.....	85
<b>Figure III-20</b> : Comparaison de la consommation d'hydrogène (g/Km) des stratégies proposées. ....	86

<b>Figure III-21</b> : Gestion de l'énergie basée sur la séparation fréquentielle. ....	87
<b>Figure III-22</b> : Vitesse de véhicule avec sa référence en appliquant la gestion basée sur la séparation fréquentielle.....	88
<b>Figure III-23</b> : Les puissances échangées dans le véhicule par la séparation fréquentielle. ...	88
<b>Figure III-24</b> : L'évolution de l'état de charge de la batterie en appliquant la séparation fréquentielle.....	89
<b>Figure III-25</b> : Limites supérieures et inférieures imposées sur l'état de charge et la puissance de la PàC.....	89
<b>Figure III-26</b> : Les puissances échangées par la technique thermostat.....	90
<b>Figure III-27</b> : L'évolution de l'état de charge de la batterie par la technique thermostat. ....	91
<b>Figure III-28</b> : Les puissances échangées pour la stratégie basée sur la commande optimale (Cycle NEDC). ....	94
<b>Figure III-29</b> : L'évolution de l'état de charge de batterie.....	95
<b>Figure III-30</b> : Les puissances échangées en utilisant la gestion d'énergie basée sur ECMS (cycle UDDS). ....	97
<b>Figure III-31</b> : L'évolution du l'état de charge (cycle UDDS) .....	98
<b>Figure IV-1</b> : Schéma synoptique du banc d'essais expérimental.....	100
<b>Figure IV-2</b> : Photographie du banc d'essais. ....	101
<b>Figure IV-3</b> : Schéma descriptif d'un émulateur .....	102
<b>Figure IV-4</b> : Schéma fonctionnel de l'émulateur de la PàC. ....	103
<b>Figure IV-5</b> : Schéma bloc de la commande du hacheur.....	104
<b>Figure IV-6</b> : Photographie de l'émulateur de la PàC .....	104
<b>Figure IV-7</b> : Superposition des caractéristiques V(I) simulées et points de fonctionnement de l'émulateur PàC pour différents nombres de cellules de la PàC.....	107
<b>Figure IV-8</b> : Réponse dynamique pour une charge résistive variable ( $42 \Omega$ à $21 \Omega$ ). ....	108
<b>Figure IV-9</b> : Schéma synoptique du hacheur Boost.....	109
<b>Figure IV-10</b> : Schéma synoptique de la carte de commande rapprochée .....	110
<b>Figure IV-11</b> : Schéma synoptique de la carte de capteur.....	111
<b>Figure IV-12</b> : Schéma synoptique du hacheur buck-boost. ....	112
<b>Figure IV-13</b> : Schéma synoptique de la carte de mesure. ....	113
<b>Figure IV-14</b> : Photographie des convertisseurs. ....	114
<b>Figure IV-15</b> : Architecture générale du hacheur quatre quadrants .....	114
<b>Figure IV-16</b> : Photographie du hacheur à quatre quadrants réalisé. ....	115
<b>Figure IV-17</b> : Schéma de la régulation de la vitesse d'une MCC.....	115
<b>Figure IV-18</b> : Régulation de la MCC pour un cycle de vitesse NEDC. (Parcours urbain du cycle (à gauche) et parcours extra urbain du cycle (à droite)).....	116
<b>Figure IV-19</b> : Vitesse (verte) et courant (jaune) du moteur de traction, courant fourni par la génératrice (violette).....	116
<b>Figure IV-20</b> : Courant dans la génératrice (image du couple émulé) (Jaune) et la vitesse du moteur (verte) avec le cycle NEDC (parcours urbain). ....	117
<b>Figure IV-21</b> : Courant dans la génératrice (image du couple émulé) (Jaune) et la vitesse du moteur (verte) avec le cycle NEDC (parcours extra-urbain).....	117

<b>Figure IV-22</b> : Résultats de la technique de séparation fréquentielle pour une charge résistive. Tension du bus (bleue), courant de la charge (jaune), puissance de la charge (rouge), courant des batteries (violette) et courant de la PàC (verte).....	118
<b>Figure IV-23</b> : Résultat expérimental de la gestion de l'énergie par séparation fréquentielle avec le cycle NEDC (parcours urbain) :la vitesse (bleue) ; courant de l'émulateur (jaune) ;courant PàC (verte) et le courant de la batterie (violette). .....	119
<b>Figure IV-24</b> : courants fournis par les deux sources : la PàC (verte) et la batterie (violette). .....	120
<b>Figure IV-25</b> : Résultat expérimental de la gestion de l'énergie par séparation fréquentielle avec le cycle NEDC (parcours extra-urbain) : la vitesse (bleue) ; courant de l'émulateur (jaune) ; courant PàC (verte) et le courant de la batterie (violette). .....	120
<b>Figure IV-26</b> : Courants fournis par les deux sources : la PàC (verte) et la batterie (violette). .....	120

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I-1</b> : Différents type de PàC (ion traversant l'électrolyte, température de fonctionnement et applications typiques) [20, 21]. .....	13
<b>Tableau II-1</b> : Paramètres de la dynamique du véhicule.....	35
<b>Tableau III-1</b> : Paramètres de simulation de la gestion de l'énergie optimisée. ....	74
<b>Tableau III-2</b> : Paramètres de simulation pour les techniques heuristiques. ....	82
<b>Tableau III-3</b> : Paramètres choisis pour la technique thermostat. ....	90
<b>Tableau III-4</b> : Paramètres de simulation de la commande optimale. ....	94
<b>Tableau III-5</b> : Comparaison entre les gestions de l'énergie.. ....	96
<b>Tableau IV-1</b> : Points de fonctionnement pour $N=40$ , $S=2 \text{ cm}^2$ . ....	107
<b>Tableau IV-2</b> : Points de fonctionnement pour $N=30$ , $S=2 \text{ cm}^2$ .....	107
<b>Tableau IV-3</b> : Points de fonctionnement pour $N=20$ , $S=2 \text{ cm}^2$ .....	107
<b>Tableau C-0-1</b> : intervalle de variation des signaux d'entrée .....	134

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

La consommation mondiale d'énergie est étroitement liée à la population. La croissance de la population mondiale et les activités industrielles dans les pays en développement ont entraîné une augmentation de la demande énergétique. L'exploitation excessive des ressources fossiles pour répondre à ces besoins est la principale cause des émissions de gaz polluants ; leur pollution est à l'origine du réchauffement climatique et du changement climatique. Actuellement, le secteur des transports est responsable de près d'un tiers des émissions mondiales de dioxyde de carbone. Les énergies renouvelables sont une alternative aux énergies fossiles car elles ont peu d'impact sur l'environnement. Malheureusement, jusqu'à présent, la puissance installée en énergies renouvelables n'a pas pu rivaliser avec les grandes centrales électriques actuelles en raison de leurs intermittences et de coûts d'investissement. Par conséquent, des moyens de stockage doivent être utilisés pour assurer la continuité de l'approvisionnement en énergie. Ces sources d'énergie renouvelables et les dispositifs de stockage associés constituent donc un système hybride [1, 2].

Dans le domaine des transports, tant par route que par voie aérienne ont subi des changements sans précédent, permettant à chacun d'avoir accès à la terre entière, rendant l'existence de villes plus grandes, loin des habitations des citadins, mais encore plus distantes des sources de nourriture et de biens de consommation. L'être humain a ainsi vu ses besoins essentiels facilement comblés et a pu se tourner vers des entreprises toutes autres, provoquant des développements sans précédent à tous les niveaux, tant scientifiques, industriels et médicaux que culturels, artistiques et sociaux. Bref, cette explosion de l'énergie librement disponible dans la société a catapulté l'humanité dans une ère d'abondance et de facilité inconcevable à peine cent ans plus tôt la pile à combustible (Fuel Cell (FC)), convertisseur électrochimique permettant de convertir l'énergie de l'hydrogène en électricité, est le moyen par excellence pour utiliser ce vecteur énergétique afin d'alimenter des charges électriques, notamment dans le cadre du transport. Le véhicule à Pile à Combustible (PàC), alimenté directement en hydrogène n'engendre donc aucune pollution atmosphérique locale, ni bruit, avec une grande autonomie [3].

Cependant, la PàC présente quelques inconvénients comme le coût élevé et sa durée de vie courte, mais le défi majeur se pose dans sa dynamique lente due à ses auxiliaires [4, 5]. La solution idéale est d'ajouter à la PàC d'une source d'énergie auxiliaire capable de fournir l'énergie impulsionnelle lors des accélérations et de récupérer l'énergie lors des freinages. La combinaison de ces deux sources forme un Système Hybride (SH) de manière à combiner les

avantages de chacune d'entre elles. La batterie peut être utilisée comme source d'alimentation auxiliaire pour gérer les transitoires de puissance, récupérer l'énergie de freinage, prolonger sa durée de vie et réduire son coût. Pour les voitures Mirai et Tucson, Toyota et Hyundai, les concepteurs ont choisi cette technologie, utilisant respectivement des batteries nickel-hydrure métallique et des batteries lithium-polymère [5, 6]. Une autre solution intéressante consiste à hybrider la PàC avec des supercondensateurs (SCs) comme tampons d'énergie/puissance : avec sa puissance spécifique élevée et sa densité de puissance élevée, le SC peut facilement aider la PàC à répondre aux besoins de puissance [5, 7]. De plus, bien que la durée de vie de la batterie puisse être estimée à 1 000 cycles, celle du SC peut durer de 500 000 à 1 000 000 de cycles [5]. En 2002, Honda a d'abord choisi cette technologie pour la première fois pour fournir une puissance supplémentaire à ses véhicules. En 2014, elle a fourni des véhicules électriques en configuration PàC/batterie [5]. En effet, ces dernières années, les concepteurs des batteries ont fait d'importants progrès. De plus, les batteries sont bien connues des constructeurs car elles sont utilisées dans les véhicules hybrides (par exemple, la Toyota Prius). Désormais, les applications industrielles utilisent des batteries et des SCs pour prendre en charge les véhicules à PàC. Selon les spécifications techniques et financières, la configuration directe ou indirecte de véhicules électriques hybrides est possible [5].

Bien que les véhicules à PàC ne soient pas encore entrés dans la phase de commercialisation intensive, ils pourraient être la dernière étape de la transition du secteur des transports vers des véhicules respectueux de l'environnement. Cependant, pour y parvenir, cette technologie doit surmonter de nombreux défis techniques, tels que la réduction du coût du système, l'amélioration de sa durabilité, son poids et son volume, et les défis liés à la production, au transport et au stockage de l'hydrogène [8]. Bien qu'économiquement parlant, l'utilisation de véhicules électriques pour les tests en milieu éducatif peut conduire à une mort prématurée de l'étude. En effet, le coût élevé des véhicules et de leurs équipements auxiliaires (PàC et l'Élément de Stockage (ES) pour de telles applications) rend les recherches coûteuses et fatales aux erreurs. Par conséquent, le concept de simulation est introduit dans le domaine de la recherche scientifique, dans lequel il existe un mélange organisé entre le matériel (hardware) et le logiciel (software) pour reproduire le fonctionnement réel du système considéré, ce qui permet aux chercheurs d'effectuer plusieurs tâches de tests rapidement sans aucun risque et à moindre coût. Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'optimisation de la gestion de l'énergie dans un véhicule à multi-sources : il s'agit d'étudier un système hybride ayant une PàC comme source primaire d'énergie. Nous espérons résoudre les limitations de la PàC en concevant une architecture hybride, son contrôle et les stratégies de gestion de l'énergie associées. Par

conséquent, une connaissance même simplifiée des phénomènes mis en jeu dans un système PàC, et son dimensionnement, est indispensable comme prérequis à cette étude.

Le système hybride à PàC fait partie des systèmes pluridisciplinaires. Il demande des compétences multiples pour son développement, sa conception et sa gestion des flux énergétiques. L'objectif principal de ce travail est l'étude de ces techniques de gestion en se basant sur la théorie de la commande optimale pour les structures choisies. Cela comprend le contrôle du système hybride et la loi de répartition des puissances entre les deux sources. L'objectif global visé est la satisfaction de la puissance demandée sur un profil de mission donné en minimisant la consommation de l'hydrogène tout en étant capable de stocker et d'utiliser la puissance récupérée par freinage régénératif, sans oublier de respecter l'intégrité de chacune des sources (dynamique lente de la PàC, état de charge de l'ES... etc.). En effet, une partie du travail expérimental a été effectuée à l'Ecole Militaire Polytechnique, au laboratoire de Commande des Machines Électriques.

Dans la première partie de ce travail de thèse, nous posons l'étude dans son contexte général en décrivant brièvement les différents éléments mis en jeu, nous présentons un état de l'art sur les véhicules hybrides d'une façon générale ainsi que les différentes configurations d'hybridation. Par la suite, nous nous intéresserons aux véhicules électriques à PàC, nous commençons par un bref historique sur les PàCs puis nous présentons sommairement leur principe de fonctionnement. Suite à cette description, les contraintes engendrées par son utilisation dans un véhicule sont abordées. Ces contraintes favorisent l'emploi d'une source secondaire d'énergie réversible en puissance (les batteries ou les SCs). La deuxième partie est consacrée aux systèmes d'énergie auxiliaires. Nous décrivons la constitution et le principe de fonctionnement de chaque source.

Le deuxième chapitre sera dédié à la modélisation et au dimensionnement des différents éléments constituant le système d'alimentation et de traction du véhicule, La modélisation de ces sources constitue un passage obligatoire si on veut les utiliser au mieux dans le véhicule électrique, à savoir : les sources d'énergie, les différents convertisseurs qui leur sont associés, et le modèle dynamique du véhicule, ainsi que le moteur utilisé dans notre architecture. Des simulations de ces modèles seront présentées et commentées.

Le troisième chapitre sera consacré à la gestion de l'énergie dans les véhicules hybrides. Nous commencerons par présenter un état de l'art sur les lois de gestion de l'énergie et sur les techniques d'optimisation. Par la suite nous focaliserons notre étude sur la gestion d'énergie à

base d'optimisation. Le but est d'établir une loi optimale de la gestion de l'énergie dans un véhicule électrique à PàC associée à un ES. Dans la première architecture étudiée, il s'agit de calculer la puissance de référence des SCs qui minimise l'énergie fournie par la PàC à partir de la puissance sollicitée par la charge (motorisation et auxiliaire). Les restrictions du système doivent être prises en considération dans cette loi. Ces contraintes concernent la limitation de la puissance de la PàC et sa réponse en régime dynamique.

Dans la deuxième architecture, nous appliquons un algorithme basé sur la théorie de la commande optimale classique dans laquelle nous minimisons une fonction appelée l'Hamiltonienne du système, l'optimisation globale nécessite une connaissance à priori du profil de conduite. Par conséquent, les résultats obtenus ne sont valables qu'en laboratoire, mais peuvent être utilisés comme base de comparaison en temps réel avec d'autres stratégies. Un algorithme d'optimisation en temps réel appelé « stratégie de minimisation de consommation équivalente » ou L'ECMS a également été développé. Cela introduit la notion de consommation équivalente. Pour étudier l'algorithme, le modèle Simulink a été implémenté, puis le modèle a été développé en utilisant Stateflow sur le modèle de véhicule hybride. Cette méthode est ensuite comparée avec d'autres techniques de gestion, afin d'atteindre les objectifs souhaités et s'approcher le plus possible de cet optimum.

Le quatrième chapitre est consacré à la mise en œuvre expérimentale, où nous donnons une description détaillée du banc expérimental réalisé, et nous présenterons les résultats expérimentaux des convertisseurs réalisés, et des algorithmes de commande de la technique de gestion de l'énergie implémentée sur la carte PCI.

Nous terminerons notre thèse par une conclusion générale et des perspectives.

**CHAPITRE I**

**GÉNÉRALITÉS SUR LES**

**VÉHICULES HYBRIDES ET**

**LES SOURCES D'ÉNERGIE**

## **I.1. Introduction**

Dans ce premier chapitre, nous replacerons la recherche dans un contexte général en décrivant brièvement les différents éléments utilisés dans la chaîne de traction électrique. Nous allons commencer par présenter les véhicules hybrides d'une façon générale après un bref historique, leurs différentes configurations possibles sont présentées. Par la suite, nous nous intéresserons aux véhicules à PàC partant du principe de fonctionnement de cette dernière, en passant par le cœur de la pile jusqu'au système complet de la pile et ses auxiliaires, nous décrirons aussi dans cette partie les différentes architectures d'un véhicule électrique à PàC. Nous introduisons ensuite dans la deuxième partie une étude sur les sources d'énergie à bord, ses caractéristiques sont définies, ainsi que les critères retenus pour les comparer. Les systèmes hybrides obtenus font l'objet de cette thèse.

## **I.2. Les véhicules hybrides (VHs)**

### **I.2. 1. Définition et historique**

Un véhicule hybride est un véhicule qui peut intégrer plusieurs sources d'énergies distinctes, en peut prendre comme exemple un véhicule à combustion interne donc son moteur thermique conventionnel avec son réservoir de carburant représente la première source et une machine électrique associée à une batterie qui joue le rôle de la deuxième source.

La grande majorité des véhicules électriques hybrides utilisent deux sources d'énergie conjointement pour parvenir à leurs fins, dans le but de propulser le véhicule. Lorsqu'une batterie peut également être chargée sur le réseau, on parle de véhicule hybride rechargeable, on le désigne comme un hybride « plug-in » [3].

En 1898, la Lohner-Porsche, connue sous le nom de « la chaise », fut la première voiture hybride thermoélectrique. Son architecture série comprend un moteur à combustion interne entraînant une génératrice qui alimente un moteur électrique situé dans le moyeu de la roue avant. Cette voiture peut parcourir près de 60 kilomètres avec des batteries seules [9].

Dans les années 1900, les véhicules hybrides/électriques développés par le constructeur Pieper ont été lancés en Belgique. Un moteur électrique alimente le moteur à essence de 3,5 chevaux en montagne et recharge la batterie en descente [10].

En 1902, la société Krieger a réalisé des prototypes hybrides équipés de moteurs thermiques, qui chargent les batteries grâce à des générateurs. Le constructeur parisien produit déjà des voitures électriques à traction avant [11].

À partir de 1904, avec le développement des moteurs thermiques et de la ligne de production d'Henry Ford, l'intérêt des gens pour les véhicules hybrides a commencé à faiblir [3].

Entre 1910 et 1918, le moteur à essence des véhicules produits par Commercial Construction Trucks alimentait une génératrice qui alimentait directement le moteur de traction, éliminant ainsi la nécessité d'une transmission ou d'une batterie.

En 1969, les véhicules hybrides réapparaissent après une longue période d'inactivité. La General Motors 512 est conçu pour fonctionner en trois modes : entièrement électrique à des vitesses inférieures à 16 km/h, mode combiné électricité-essence à 16 à 21 km/h et à tout thermique au-dessus de 21 km/h [10].

Après l'embargo pétrolier de 1973, l'intérêt pour la technologie hybride est revenu. Volkswagen développe une voiture hybride appelée « Taxi », qui a la plus grande plage d'efficacité de toutes les voitures hybrides au monde à ce jour, car elle peut basculer entre son moteur électrique et son moteur à essence

En 1989, Audi présente son hybride Duo. Il s'agit d'un véhicule hybride bi-mode dont le moteur électrique est alimenté par une batterie nickel-cadmium et est relié aux roues arrière du véhicule, tandis qu'un moteur thermique entraîne les roues avant [10].

L'ère moderne des véhicules hybrides a commencé en 1997 lorsque la Toyota Prius a été commercialisée au Japon. Deux ans plus tard, Honda a lancé l'Insight, suivi de la Honda Civic Hybrid. En une dizaine d'années, plus d'un million de véhicules hybrides ont été vendus dans le monde et plus de 20 nouveaux modèles ont été introduits sur le marché automobile [10].

### **I.2. 2. Architectures des véhicules électriques hybrides**

Trois familles d'architectures hybrides sont généralement définies :

La structure série dans la configuration série est illustrée à figure I.1 [9, 11] où seul le moteur est directement connecté à la transmission et donc aux roues. Le moteur thermique est associé à un générateur et agit donc comme un générateur et convertit l'énergie de combustion en énergie électrique. L'électricité ainsi générée peut être stockée dans un élément de stockage telle qu'une batterie électrochimique ou utilisée par un moteur électrique pour entraîner le véhicule.

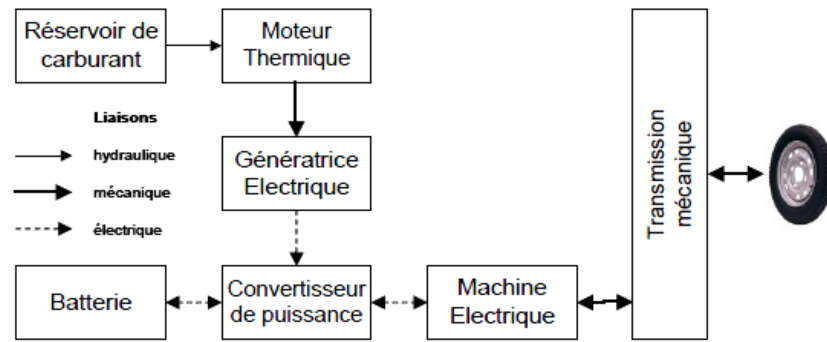


Figure I-1 : Architecture hybride série [11].

La **structure parallèle** dans la configuration parallèle, à la fois le moteur thermique et électrique sont directement reliés à la transmission et donc aux roues. Ainsi, ces deux moteurs peuvent participer indépendamment ou simultanément à la propulsion du véhicule, puis augmenter leur puissance mécanique au niveau de la roue. Dans la configuration en série, la puissance est combinée dans le nœud électrique, et ici, elles sont combinées dans le nœud mécanique [9, 12].

Le schéma de principe de la structure parallèle ainsi que les transferts d'énergie possibles entre les différents organes sont représentés en figure I.2. La configuration générale de l'architecture est constituée d'un moteur thermique avec un réservoir de carburant et d'un moteur électrique couplé à un élément de stockage, tel qu'une batterie et une transmission mécanique, comprenant une boîte de vitesses et un embrayage [9].

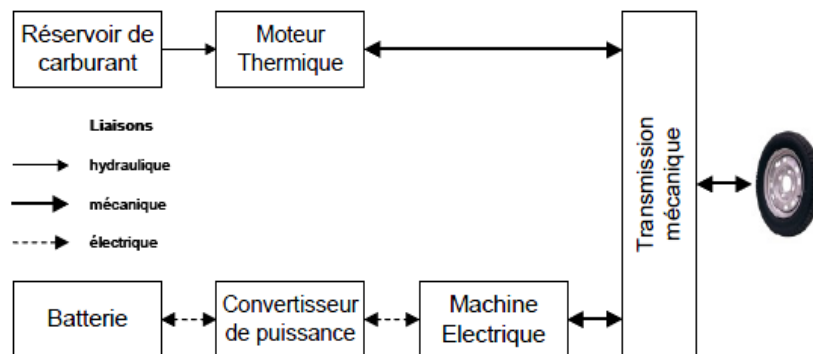
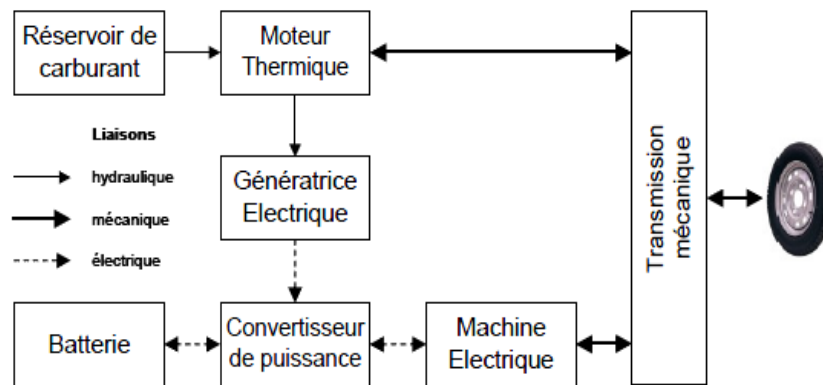


Figure I-2 : Architecture hybride parallèle [11].

La **structure combinée**, également appelée hybride de dérivation de puissance, peut combiner les avantages des structures en série et en parallèle. Par rapport à l'hybride série, cette structure présente une liaison mécanique supplémentaire entre le moteur thermique et la transmission. Par rapport à la structure parallèle représentée sur la figure I.3, un générateur est ajouté entre le moteur thermique et le convertisseur de puissance. Par conséquent, la puissance est combinée en deux nœuds : l'un est électrique et l'autre est mécanique [9, 13]



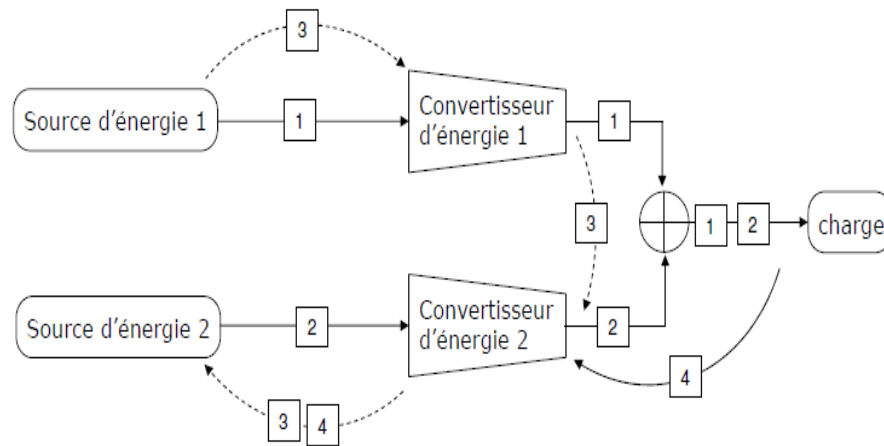


**Figure I-3** : Architecture hybride combinée [11].

### I.2.3. Concept d'une chaîne de traction hybride

Les systèmes électriques hybrides se composent généralement de deux sources d'énergie associées à des convertisseurs d'énergie correspondants, comme illustré à la figure I.4. L'une de ces sources, la source 2 sur la figure, est considérée comme bidirectionnelle, d'une part pour fournir l'énergie nécessaire, et d'autre part pour absorber et stocker une partie de l'énergie pour une utilisation ultérieure. Cette structure hybride fournit plusieurs chemins de flux de puissance, permettant différentes stratégies de contrôle. Par conséquent, les différents scénarios de routage d'alimentation sont décrits comme suit [12, 14]:

1. La source 1 fournit la puissance requise par la charge (chemin 1 sur la figure).
2. La source 2 fournit la puissance requise par la charge (chemin 2 sur la figure).
3. Les deux sources 1 et 2 alimentent en même temps (chemins 1 et 2).
4. La source 2 est alimentée par la charge (chemin 4).
5. La source 2 est alimentée par la source 1 (chemin 3).
6. La source 2 reçoit la puissance à partir de la charge et de la source 1 simultanément (chemins 3 et 4).
7. La source 1 délivre la puissance à la charge et à la source 2 en même temps (chemins 1 et 3).
8. La source 1 délivre la puissance à la source 2 et la source 2 délivre la puissance à la charge (chemins 2 et 3).
9. La source 1 fournit la puissance à la charge et la charge délivre la puissance à la source 2 (chemins 1 et 4).



**Figure I-4** : Schéma illustrant le concept d'un véhicule hybride [12].

### I.3. Véhicule hybride à pile à combustible

Un VH à PàC se classe dans la catégorie des véhicules à architecture d'hybridation série où la source de puissance qui est hybride, la motorisation restante entièrement électrique. Elle utilise donc une source secondaire d'énergie électrique réversible en puissance (fonctionnement en charge et en décharge).

Un véhicule à PàC est essentiellement conçu autour des composants suivants :

- Un stockage d'hydrogène ou un système de production d'hydrogène (reformeur par exemple),
- Une PàC,
- Un système de stockage d'électricité fonctionnant en parallèle avec la pile (batterie ou SC),
- Un moteur électrique entraînant les roues,
- Un compresseur d'air (la pile fonctionne sous très haute pression),
- Échangeurs de chaleur et radiateur servant à dissiper la chaleur générée par la pile,
- Divers composants spécifiques : pompes, capteurs, séparateurs, convertisseurs de courant, contrôle, commande... [15]

Pour les véhicules à PàC hybridés par une source secondaire (batterie ou SC), il existe une multitude de topologies possibles. Toutes ont un bus continu en commun, ce qui est logique vu la nature continue des sources et l'entrée continue des variateurs de vitesse des moteurs.

Les rôles de la source secondaire d'énergie sont [16]:

- PàC Power Assist : Lorsque la pile atteint sa puissance maximale (par exemple, lors d'une accélération du véhicule), l'alimentation auxiliaire fournit une puissance supplémentaire.
- Récupération de l'énergie cinétique lors du freinage : La récupération de l'énergie cinétique lors du freinage permet d'économiser de l'hydrogène et d'augmenter le kilométrage du véhicule
- Introduire un certain degré de liberté dans la distribution de l'énergie : L'hybride permet de répartir la demande de puissance entre le système PàC et l'énergie secondaire.

## I.4. La pile à combustible

### I.4. 1. Historique

En 1839, la première PàC a été inventée par Sir William Robert Grove, professeur de philosophie expérimentale à l'Institut Royal de Londres. Depuis, il est surnommé « *le Père de la pile à combustible* ». Son expérience d'électrolyse - l'utilisation de l'électricité pour séparer l'eau en hydrogène et oxygène - a conduit à la première mention d'un appareil qui serait plus tard appelé pile à combustible. Il pense qu'il est possible d'inverser le processus d'électrolyse et de générer de l'électricité en faisant réagir de l'oxygène avec de l'hydrogène. Pour tester cette théorie, il a enfermé deux platines dans des bouteilles différentes, l'une avec de l'hydrogène et l'autre avec de l'oxygène. Lorsque ces récipients sont immergés dans de l'acide sulfurique dilué, un courant électrique commence à s'accumuler entre les deux électrodes et l'eau formée dans la bouteille de gaz. Afin d'augmenter la tension générée, il a connecté plusieurs de ces appareils en série et a produit ce qu'il a appelé une « batterie à gaz », qui était le prédécesseur de la PàC moderne [17].

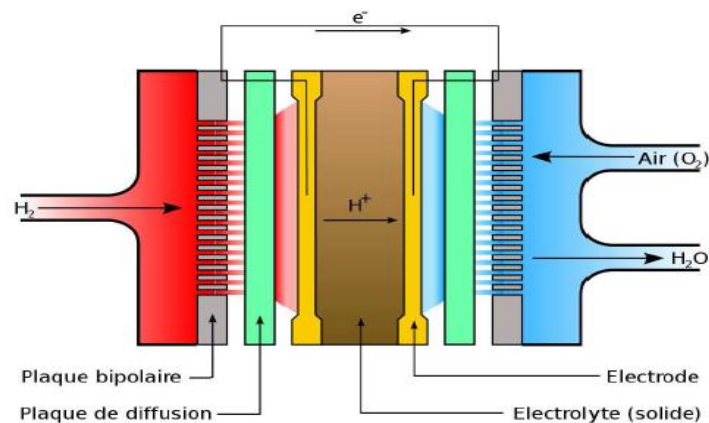
La PàC a connu une renaissance au début des années 1960, lorsqu'une nouvelle agence gouvernementale américaine - *the National Aeronautics and Space Administration* (NASA) - a étudié comment produire de l'électricité pour les vols spatiaux. La NASA a éliminé les batteries car elles sont trop lourdes, l'énergie solaire est trop chère, l'énergie nucléaire est trop risquée et elle cherche des sources alternatives. La PàC est devenue une solution possible, et la NASA a attribué de nombreux contrats de recherche pour développer la solution. Ces recherches ont conduit au développement de la première membrane échangeuse de protons ou « membrane d'électrolyte polymère » [18].

Ces piles à combustible utilisent de l'oxygène pur et de l'hydrogène pur, sont petites, chères et non disponibles dans le commerce. L'intérêt de la NASA pour les piles à combustible et la reprise du développement des équipements pour pallier la crise énergétique de 1973. Depuis

lors, la recherche sur les piles à combustible s'est poursuivie et les piles à combustible ont été développées et utilisées avec succès dans diverses applications [19].

#### I.4. 2. Principe de la pile à combustible

Une PàC est un dispositif de conversion d'énergie qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique (figure I.5). Lorsque l'hydrogène réagit avec l'oxygène de l'air, de l'énergie est produite. Dans un moteur à combustion interne, lorsqu'une réaction se produit, de l'énergie est libérée sous forme de chaleur, dont une partie peut être utilisée pour effectuer un travail utile en poussant le piston. Dans la PàC, la réaction est électrochimique et génère de l'électricité et de la chaleur. L'énergie électrique peut être employée pour effectuer le travail utile directement tandis que la chaleur est soit dissipée soit employée par ailleurs [17, 20].



**Figure I-5 :** Schéma d'une cellule élémentaire de PàC [21].

Une caractéristique de base des PàCs est que la charge détermine le taux de consommation d'hydrogène et d'oxygène. Le gaz fournit de l'hydrogène à l'anode et de l'oxygène à la cathode.

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains fonctionnent à haute température et d'autres à basse température. Les piles à combustible fonctionnant à basse température nécessitent souvent un catalyseur en métal noble, généralement du platine, pour améliorer la réaction à l'électrode. La plupart des PàCs utilisées dans les applications automobiles utilisent des électrolytes solides à basse température qui conduisent les ions hydrogène.

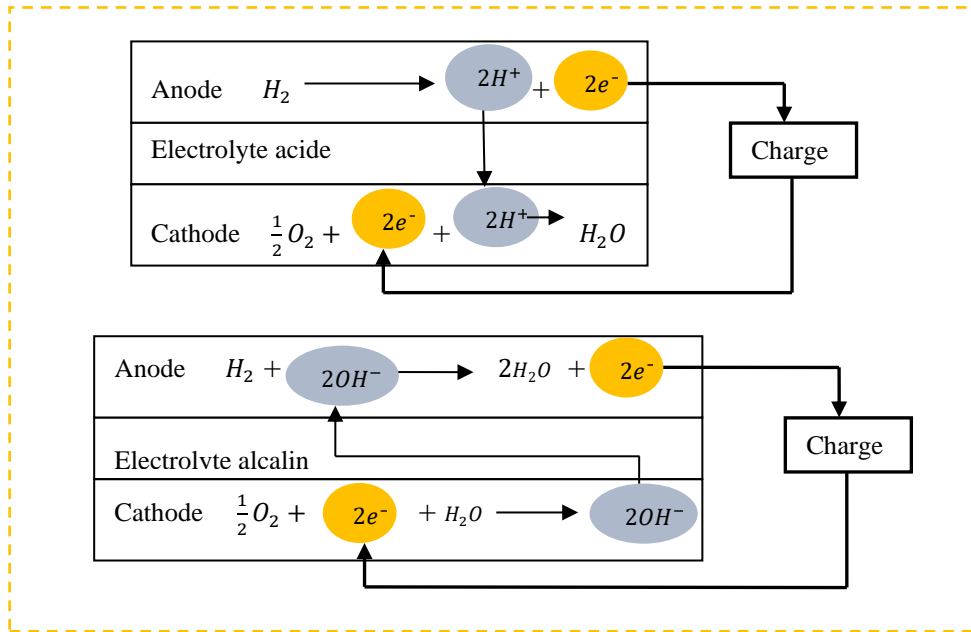
En principe, une PàC peut fonctionner avec une variété de combustibles et d'oxydants. L'hydrogène est considéré comme le carburant le plus efficace car il a une réactivité électrochimique plus élevée que les autres carburants (tels que les hydrocarbures ou les alcools). L'oxygène est un excellent oxydant en raison de sa grande réactivité et de son abondance dans l'air [20].

### I.4. 3. Types de piles à combustible

Les types de piles à combustible diffèrent principalement par l'électrolyte utilisé (figure I.6). L'électrolyte qui est traversé par les ions détermine la température de fonctionnement qui varie fortement selon le type de PàC (Tableau. I.1).

**Tableau I-1** : Différents type de PàC (ion traversant l'électrolyte, température de fonctionnement et applications typiques) [20, 21].

Type de pile	Ion Mobile	Température (°C)	Rendement Électrique	Temps de démarrage	Applications
Alcaline (AFC)	$\text{OH}^-$	50-200	Pile : 60-70 % Système : 62 %	< 0.1 h	Vaisseaux spatiaux Apollo, p. ex.)
Membrane échangeuse de protons (PEMFC)	$\text{H}^+$	50-100	Pile : 50-68 % avec reformeur : 43-50 %	< 0.1 h	Véhicules, applications mobiles, petite cogénération
Acide phosphorique (PAFC)	$\text{H}^+$	220	Pile : 50% système (gaz naturel) : 40 %	1-4 h	Cogénération
Carbonate fondu (MCFC)	$\text{CO}_3^{2-}$	650	Pile : 65% système : 55-65%	5-10 h	Cogénération
Oxyde solide (SOFC)	$\text{O}^{2-}$	800-1000	Pile : 60-65 % Système : 55-65%	8h ou plus	Cogénération, auxiliaires des véhicules
Méthanol direct (DMFC)	$\text{H}^+$	50-130	Pile : 20-30 %	<0.1 h	Applications mobiles, transport



**Figure I-6** : Principe des piles à combustible à électrolyte acide (en haut) et alcalin (en bas).

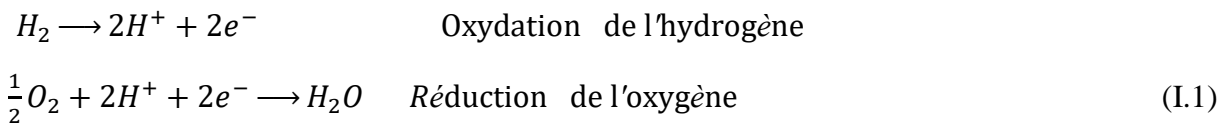
#### I.4. 4. Les PEMFCs

Actuellement, le type privilégié pour les applications automobiles est la pile à membrane échangeuse de protons vue les températures de fonctionnement basses requises [22]. Les PEMFCs utilisent une membrane en polymère comme électrolyte. Cette membrane est acide et a pour rôle de laisser passer les ions  $H^+$  de l'anode vers la cathode tout en empêchant les électrons de passer. Les électrons passent par l'anode et rejoignent la cathode en passant à travers la charge électrique. La membrane doit être humide pour fonctionner correctement. Si elle est trop sèche, elle ne conduit pas correctement les ions, si elle est trop humide, elle les bloque.

Le combustible est de l'hydrogène pur et l'oxydant est de l'oxygène pur ou celui contenu dans l'air.

L'anode et la cathode disposent d'un catalyseur contenant des particules de platine qui permet ; à l'anode de séparer le dihydrogène en deux électrons et deux protons d'hydrogène et d'augmenter la cinétique de réduction de l'oxygène.

Les réactions d'oxydation de l'hydrogène et de réduction de l'oxygène :



## Avantages et inconvénients des PEMFC

### ❖ Avantages

Les avantages généralement cités sont [23] :

- **Un rendement de conversion important** ; parce que l'enthalpie libre de la réaction chimique est directement convertie en énergie électrique, la perte généralement causée par la combustion du carburant est évitée, puis cette chaleur de combustion est convertie en énergie mécanique, et enfin d'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Un générateur propre** ; Les PàC ne rejettent pratiquement pas de gaz nocifs ( $CO_2, NO_x$ ).
- **Un système modulable** ; Les PàC sont modulables car la taille de la PàC peut être facilement augmentée ou diminuée, et le rendement électrique est relativement indépendant de cette taille.
- **Un système relativement silencieux** ; puisqu'il n'a pas de pièces mobiles au niveau du cœur, la pile ne produira pas de pollution sonore importante pendant le fonctionnement.

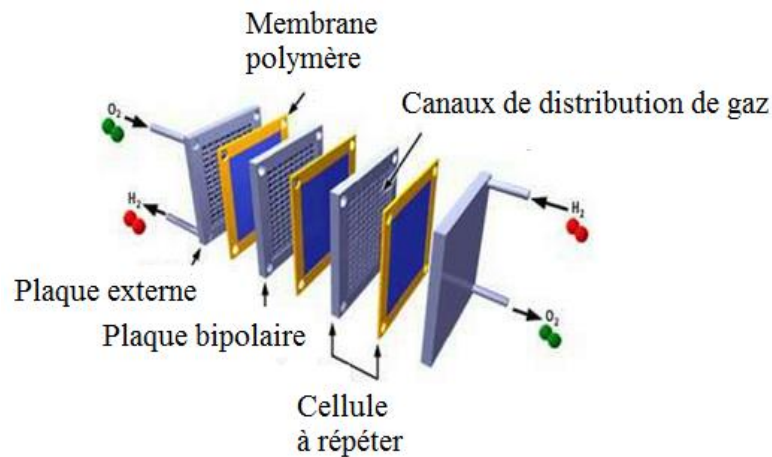
### ❖ Inconvénients

Elles présentent aussi quelques inconvénients :

- Nécessité d'utiliser comme catalyseur du platine et d'alimenter le cœur de la pile par de l'hydrogène pur à cause des membranes actuellement utilisées.
- **Une technologie qui est encore au stade artisanal** ; ce qui induit des coûts de fabrication élevés, bien que la structure du cœur de la pile soit assez simple.
- **Une durée de vie encore faible** ; en particulier si le courant délivré subit des variations importantes et répétées, pour remédier à ce problème, un élément de stockage doit être prévu pour assurer la réponse aux pics de courant et améliorer la durée de vie de la pile, ce qui constitue un système hybride de puissance (SH).

### I.4. 5. Constitution d'une PEMFC

Une PàC est constituée d'un amas de cellules formant un empilement. Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode-membrane-électrode (EME).

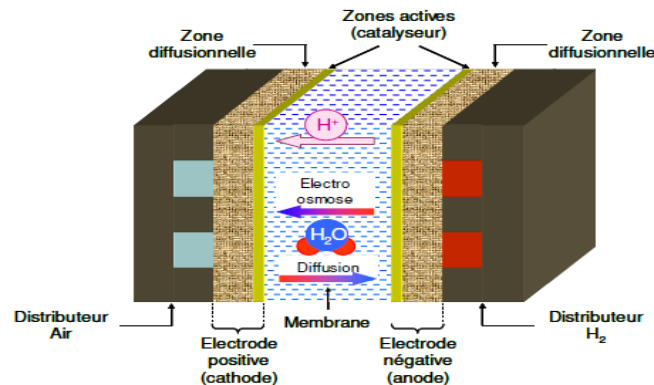


**Figure I-7** : Exemple de schéma de montage d'une cellule de pile [24].

La structure d'une cellule peut être classiquement divisée en 7 régions, chaque région assure une fonction distincte (figure I.8).

- Deux plaques bipolaires permettant la canalisation des gaz et la collecte du courant.
- Deux couches hydrophobes assurent la distribution des gaz (couches de diffusion).
- Deux zones actives (couches réactionnelles) contenant des électro-catalyseurs.
- Une membrane monomère qui constitue l'électrolyte solide.

L'ensemble couche de diffusion – couche de réaction constitue une électrode. L'ensemble électrode-membrane - électrode (EME) constitue le cœur de la pile [25, 26].



**Figure I-8** : Schéma d'une cellule de pile, les 7 régions [25].

### I.5. Système pile à combustible destiné pour la propulsion électrique

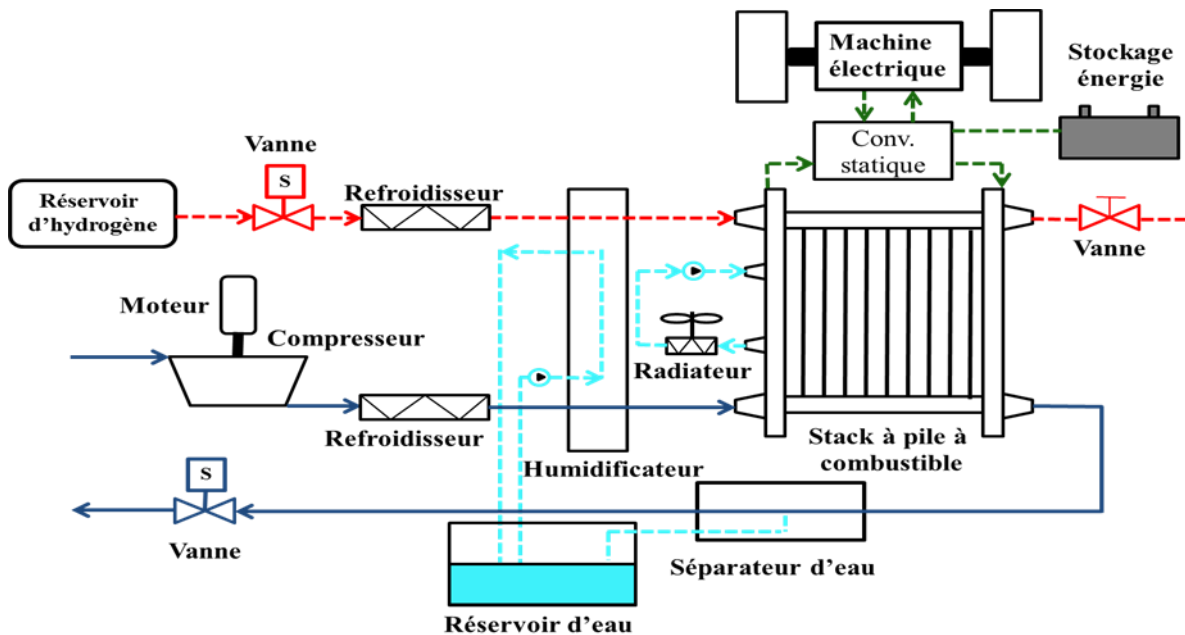
Un stack à PàC doit être intégré avec plusieurs composants auxiliaires pour former un système complet à PàC. Le diagramme de la figure I.9 représente un exemple de ce système. Les composants auxiliaires fondamentaux de ce stack sont : (i) système d'alimentation en



hydrogène, (ii) système d'alimentation en air, (iii) système de refroidissement, et (iv) système d'humidification.

L'hydrogène est fourni par un réservoir à haute pression avec un débit commandé par une servovalve. Puisque le stockage à haute pression agit comme une source de grande énergie, le débit d'hydrogène peut être ajusté rapidement. L'air est fourni par un compresseur qui est utilisé pour augmenter la densité de puissance de tout le système. La figure I.9 représente aussi un système d'humidification externe pour les gaz anodiques et cathodiques [15].

La puissance du stack à PàC est fonction de la tension résultante et le courant du stack. La tension d'une cellule est fonction du courant du stack, des pressions partielles des réactifs sous chaque cellule, de la température d'une cellule est de l'humidité de la membrane. Dans ce qui suit, on suppose que les cellules à PàC soient conçues pour fonctionner de la même façon, on peut donc les étudier de la même manière et les rassembler sous forme d'un stack de plusieurs cellules. Si la déshydratation de la membrane existe, elle se produit simultanément en chaque cellule et toutes les cellules sont représentées ainsi par les mêmes courbes de polarisation. Cette hypothèse de l'invariabilité des performances d'une cellule à une autre est nécessaire pour les modèles de système d'ordre réduit [27].



**Figure I-9** : Structure du système à PàC type PEM pour les véhicules [20].

La consommation en courant électrique dans la PàC est traduite par un épuisement des réservoirs d'hydrogène, avec une production d'eau et de chaleur. Pour maintenir la pression partielle désirée d'hydrogène, le niveau d'hydrogène doit être complété par son circuit d'alimentation, qui inclut le réservoir d'hydrogène à haute pression et une servovalve d'alimentation. De même, le niveau d'air doit être complété par le système d'air pour maintenir

la pression partielle de l'oxygène. Le système d'air se compose d'un compresseur d'air, d'un moteur électrique et des pipes ou des conduites entre les composants. Le compresseur fournit non seulement le flux d'air désiré mais augmente également la pression atmosphérique qui améliore de manière significative la vitesse de la réaction au niveau des membranes, et ainsi le rendement général et la densité de puissance. Puisque le flux d'air comprimé quittant le compresseur est à haute température, un refroidisseur d'air est nécessaire pour réduire la température d'air entrant dans le stack. Un humidificateur est utilisé pour prévenir la déshydratation de la membrane de PàC. L'eau utilisée dans l'humidificateur est fournie à partir du réservoir d'eau. Le niveau d'eau dans le réservoir est maintenu en accumulant l'eau produite par le stack, qui est transporté avec le flux d'air. La chaleur excessive libérée dans la réaction de PàC est enlevée par le système de refroidissement, qui circule l'eau désionisée à travers le stack à PàC et enlève la chaleur excessive par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur [15, 27].

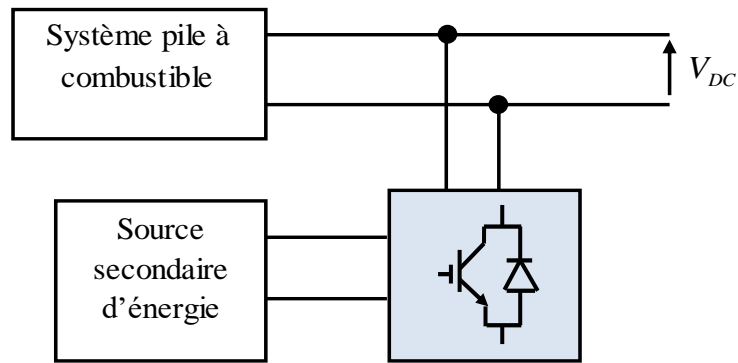
### **I.5.1. Différentes architectures d'un véhicule électrique à PàC**

Le véhicule à PàC se compose de trois principales parties : La source d'énergie (PàC), la source de puissance (Batterie/SC) et le moteur électrique de traction. Afin de connecter ces éléments sur un (ou plusieurs) bus, il est nécessaire de définir une architecture électrique.

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

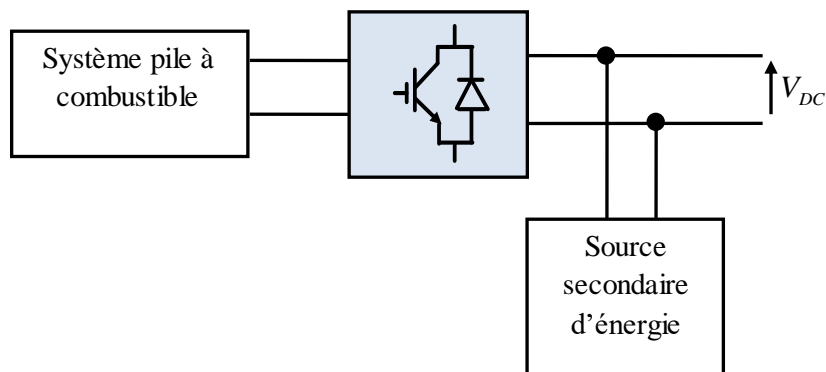
Au niveau de la source de puissance, l'un des rôles principaux des convertisseurs de puissance est de contrôler la répartition de puissance entre le système PàC et la source secondaire d'énergie. De plus, sa commande locale permet généralement de limiter le courant, la tension et/ou la puissance transmise de manière à assurer la sécurité des organes auquel il est relié. Principalement, trois architectures électriques hybrides sont considérées [28] :

1. Le système PàC est directement connecté au bus électrique et lui applique une tension. Un convertisseur DC/DC réversible en puissance est utilisé entre la source secondaire et le bus (figure I.10).



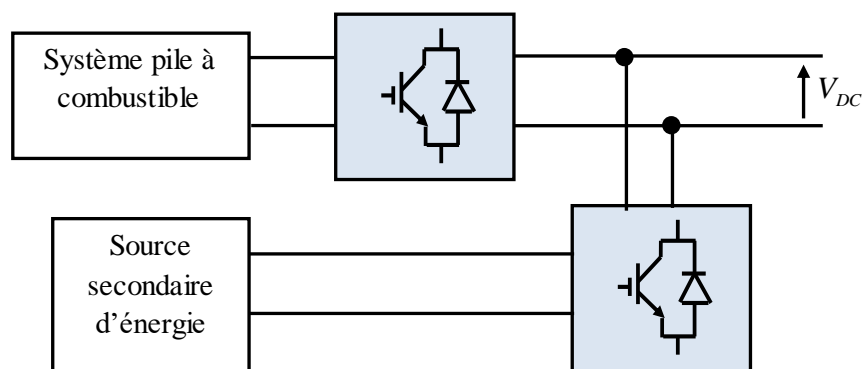
**Figure I-10** : Schéma illustrant la première architecture possible.

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



**Figure I-11** : Schéma illustrant la deuxième architecture possible.

3. Le système PàC et la source secondaire sont connectés tous les deux via des convertisseurs DC/DC. Dans ce cas, la tension du bus peut être choisie librement (dans la plage de fonctionnements possibles des convertisseurs utilisés) :



**Figure I-12** : Schéma illustrant la troisième architecture possible.

L'utilisation d'un seul convertisseur au niveau de la source de puissance hybride (architectures n°1 et n°2 ci-dessus) présente des avantages et des inconvénients [28] :

- Avantages :

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

• Inconvénients :

- Le composant connecté directement sur le bus de puissance ne possède pas de limitation en courant ce qui peut affecter la sécurité de l'installation.
- L'utilisation d'un second convertisseur permet évidemment de remédier à ce problème.

L'architecture n°3 a été choisie car elle permet de s'adapter à tous les niveaux de tension et de courant.

## **I.6. Eléments technologiques de stockage d'énergie**

Dans le contexte d'hybridation des véhicules, il apparaît que les moyens de stockage est un jalon technologique dans leur développement. L'avantage d'hybrider différents éléments de stockage est de profiter de leur complémentarité dans ces propriétés. Dans ce contexte, on distinguera les sources disponibles, dont la technologie est mature et connaît des développements importants, à savoir : Batteries (stockage sous forme chimique) et SCs (stockage sous forme électrique). Par la suite, nous donnons, un aperçu général du large panorama aujourd'hui offert par ces moyens de stockages, à travers un court état de l'art accompagné d'une analyse qui met en exergue quelques propriétés qualitatives qui nous paraissent intéressantes au regard du SH envisagé. Nous tenterons donc d'identifier le candidat apportant la réponse la plus adaptée à nos besoins [29].

### **I.6. 1. Les Supercondensateurs**

Le SC est un composant qui permet d'emmagasiner de l'énergie électrique. Le stockage électrochimique conventionnel (forte densité d'énergie et faible puissance spécifique) et les condensateurs conventionnels (forte densité de puissance mais faible énergie emmagasinée) sont les deux domaines développés. Les SCs sont situés quelque part entre les deux et convient parfaitement aux besoins de stockage d'énergie à haute efficacité à court terme (1 seconde à 10 secondes). Ils répondent aux applications nécessitant un appel de puissance important pendant un court instant [30].

#### **I.6.1.1. Historique**

À la fin des années 1950, le projet de recherche sur les électrodes de carbone PàC a eu des conséquences inattendues. Ils ont conduit à la technologie des SCs. C'est le Dr R. Rightmire du SOHIO (Standard Oil of Ohio Research Center) qui a démontré la possibilité d'utiliser la

capacité double couche d'une interface matérielle avec une grande surface spécifique et de l'utiliser ensuite dans les piles [30, 31].

Le premier lot de brevets remonte à 1957 (H. EBecker, brevet américain 2 800 616, General Electric), SOHIO a d'abord essayé de commercialiser ces composants en 1969. À la fin des années 1970, Nec et Matsushita (maintenant EPCOS) ont commencé à vendre les SCs [30].

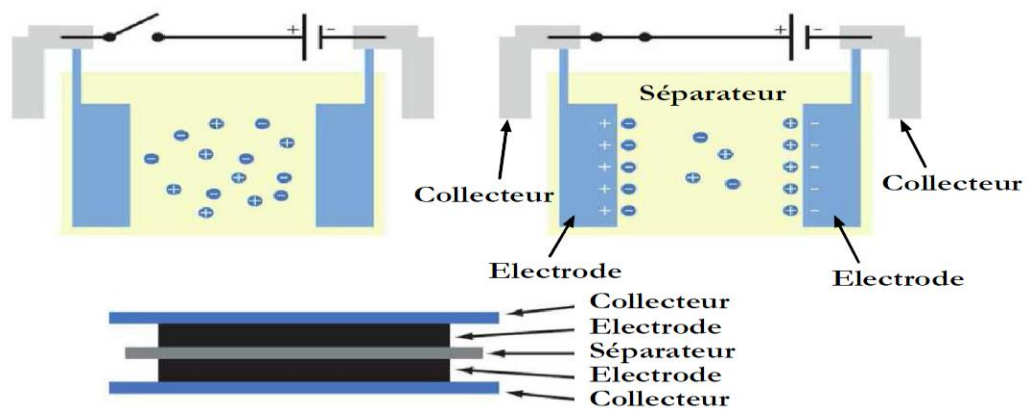
En 1989, le DOE (Department of Energy) a lancé un plan pour développer la technologie des SCs et la rendre particulièrement adaptée aux véhicules hybrides [30].

### I.6.1.2. Principe de fonctionnement

Le travail des SCs est basé sur le principe électrochimique de la double couche, qui a été découvert par le physicien Helmholtz dans les années 1850. Il a remarqué que l'application d'une différence de potentiel sur l'électrode, en contact avec l'électrolyte, provoquerait des ions de l'électrolyte sur la surface d'interface.

Le principe général de fonctionnement des SCs repose sur la formation d'une double couche électrochimique (figure I.13), à l'interface d'un électrolyte et d'une électrode polarisable de grande surface spécifique. L'application d'une différence de potentiel à travers le dispositif entraînera le stockage d'une charge électrostatique au niveau des deux interfaces électrode-électrolyte [19].

Contrairement à un condensateur "classique" (avec ou sans diélectrique) ou un condensateur électrolytique, qui stockent l'énergie électrique sous forme de charges électriques qui s'accumulent dans les électrodes, les SCs stockent des charges électriques à l'aide de la double-couche de Helmholtz : c'est la raison pour laquelle ils sont aussi appelés " Electrochemical double layer capacitor".



**Figure I-13** : Structure des supercondensateurs (Création de la couche double électrique) [14, 25].

### I.6.1.3. Propriétés

Les propriétés d'un SC sont [23, 26, 32] :

- Grande capacité (de quelques Farad jusqu'à plusieurs milliers de Farad)
- Basse tension limitée par la présence d'un électrolyte (entre 1V en milieu aqueux jusqu'à 3,5V en milieu organique)
- La puissance spécifique est comprise entre 800 et 2000W.kg<sup>-1</sup>
- La densité énergétique massique est supérieure à celle des condensateurs et de l'ordre de 5 à 15Wh.kg<sup>-1</sup> : 15Wh.kg<sup>-1</sup> pour les matériaux nobles et autour de 5Wh.kg<sup>-1</sup> pour les matériaux carbonés
- La densité énergétique volumétrique est comprise entre 1 et 10Wh.l<sup>-1</sup>
- Compte tenu du faible déplacement des ions dans l'électrolyte, faible constante de temps de décharge. La décharge de SC prend plusieurs secondes voire plusieurs dizaines de secondes

Les SCs, comme les systèmes de stockage d'énergie électrique "directs", est considéré comme un moyen de stockage de puissance spécifique élevée et de stockage d'énergie spécifique faible [27].

La tension de fonctionnement est généralement de quelques Volts par élément. Par conséquent, la mise en série des composants est essentielle pour atteindre la tension requise pour les applications haute puissance. Il est évident que la mise en série de plusieurs SCs diminue la capacité et augmente la résistance interne de l'ensemble. Une association en série et en parallèle des SCs doit être envisagée pour répondre au cahier des charges. En fait, la connexion en série peut atteindre le niveau de tension en fonction de l'application finale et la connexion en parallèle peut augmenter la capacité finale.

### I.6.1.4. Avantages et inconvénients des Supercondensateurs

#### ❖ Avantages [32]

- Cyclabilité presque illimitée
- Faible impédance, permettant des pics de courant élevés
- Charge rapide
- Méthode de recharge simple, aucune détection de recharge requise

#### ❖ Inconvénients

- Impossible d'utiliser la pleine capacité

- Densité énergétique très faible
- La tension des cellules est extrêmement faible et doit être connectée en série
- Si plus de trois batteries sont connectées en série, un équilibre de tension est requis

#### **I.6.1.5. Applications**

Le SC peut être utilisé comme une source de puissance ou d'énergie [24] :

- Une source de puissance, qui peut fournir une puissance importante sur une durée courte, en complément d'accumulateurs.
- Dans une moindre mesure remplacer la source d'énergie de la batterie. L'avantage ici est qu'un SC a de meilleures performances que les batteries car il garantit plus de cycles et de meilleures performances à basse température.

Les SCs sont essentiellement considérés comme une source de puissance, et une source d'énergie limitée. Cependant, avec le développement de nouveaux matériaux (RuO<sub>2</sub> et autres matériaux précieux), une performance énergétique spécifique de l'ordre de 15 Wh.kg<sup>-1</sup> peut être atteinte, ce qui équivaut à la densité énergétique. (L'énergie spécifique des batteries plomb-acide est généralement comprise entre 15 et 40 Wh.kg<sup>-1</sup>).

Les SCs sont utilisés dans diverses applications [25] :

- Sauvegarde de la mémoire dans le système électrique basse tension (atténuer les pannes du système électrique ou les coupures de courant en remplaçant l'alimentation insuffisante pendant quelques minutes)
- Alimentation haute tension (compléter un ensemble d'alimentations en fournissant un effet tampon par rapport à l'appel de puissance)
- Stocké dans un véhicule ou un équipement isolé (stocker l'énergie électrique en privilégiant la vitesse de charge ; cependant, le SC a une énergie spécifique plus faible, ce qui nécessite un grand nombre de composants)

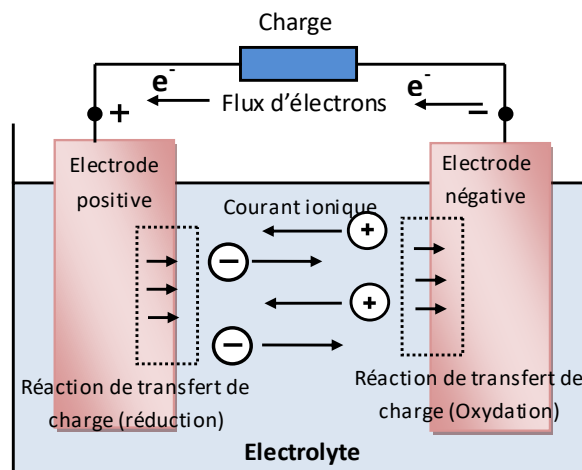
Par conséquent, les domaines d'application incluent l'automobile (avec l'avènement des véhicules électriques et des véhicules hybrides), les transports publics urbains (aide au démarrage et récupération d'énergie au freinage), l'industrie (utilisée dans les systèmes d'urgence...), l'électronique domestique (utilisée également pour le stockage de sauvegarde) et aéronautique [29].

## I.6. 2. Les batteries

### I.6.2.1. Généralités

Les batteries sont des sources électrochimiques qui convertissent l'énergie électrique en énergie chimique pendant la phase de charge, et l'énergie chimique en énergie électrique au cours de la phase de décharge. Les batteries peuvent être classées en batteries primaires ou batteries secondaires. Une pile (batterie primaire) n'est utilisée qu'une seule fois, car la réaction chimique qui fournit le courant est irréversible. La batterie secondaire (accumulateur) est réutilisable [15].

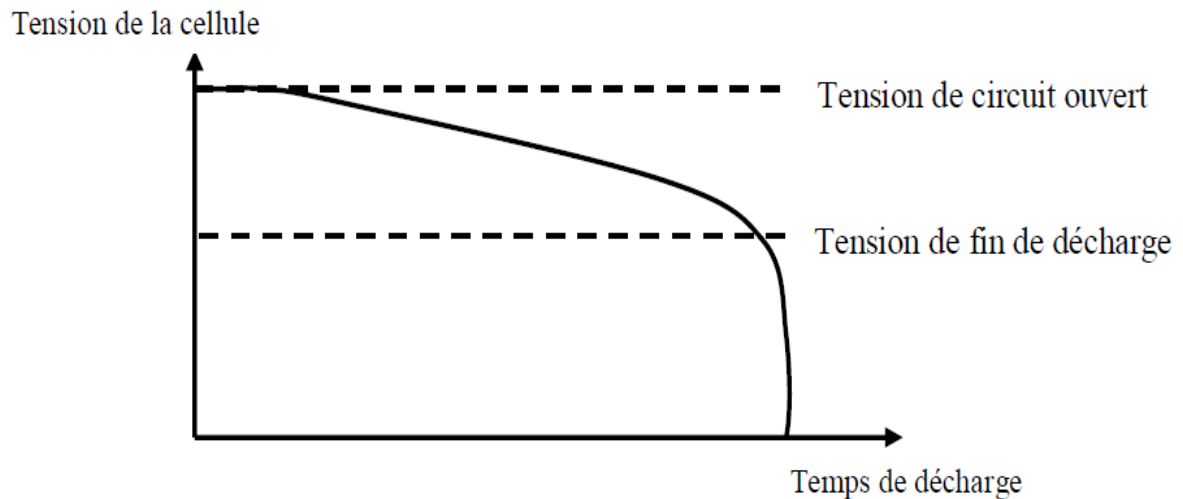
Une batterie est un composant constitué de plusieurs cellules, et une unité indépendante et complète possède toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires au stockage. Elles sont assemblés dans un même module uniquement pour avoir une tension plus élevée aux bornes de l'appareil. Une cellule (figure I.14) est constituée de trois éléments de base : une électrode positive (cathode), une électrode négative (anode) et un électrolyte.



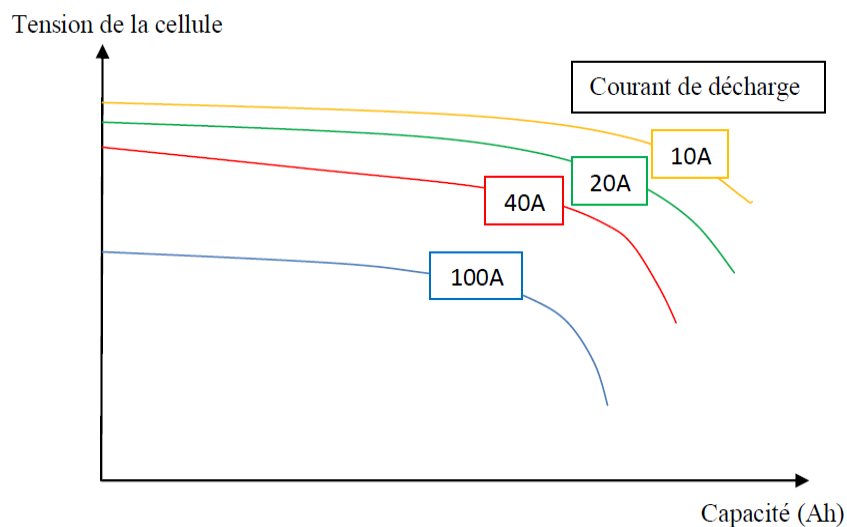
**Figure I-14** : Principe de fonctionnement d'une cellule d'une batterie.

Les batteries sont normalement spécifiées par une capacité exprimée en ampères-heures (*Ah*). Cette valeur est définie comme l'énergie que peut fournir la batterie de pleine charge caractérisée par une tension de circuit ouvert, à un état où la tension à ses bornes chute brutalement, tension dite de fin de décharge (figure I.15). Veuillez noter que la valeur de la capacité dépend du courant fourni. On peut remarquer sur la figure I.16, qu'elle est plus faible si le courant de décharge est important [33].





**Figure I-15 :** Plages de fonctionnement en tension d'un élément électrochimique.



**Figure I-16 :** Évolution de la tension en fonction de la capacité restante pour différents régimes de décharge.

Un paramètre très important pour gérer correctement la batterie est son état de charge, que l'on note SoC (State of Charge). L'état de charge est le rapport entre la capacité actuelle de la batterie et sa capacité chargée. Lorsque la batterie est totalement chargée son SoC vaut 100 %, lorsqu'elle est déchargée son SoC vaut 0 % [13].

Enfin, il existe deux grandeurs qui permettent de comparer les batteries : l'énergie massique et la puissance massique. L'énergie massique est définie comme la capacité énergétique ( $Wh/kg$ ) par rapport au poids de la batterie. L'énergie massique théorique est l'énergie maximale qui peut être produite par la masse totale de la batterie active. Pour sa part, la puissance massique est définie comme la puissance maximale qu'une batterie peut produire en un court laps de temps par rapport à son poids. Cette puissance massique est un paramètre important dans les applications embarquées, comme les véhicules électriques et incite les recherches sur la réduction du poids de la batterie [33].

### I.6.2.2 Les différentes technologies de batteries

Il existe de nombreuses technologies de batteries, dans la section suivante, nous présenterons par ordre chronologique les séries à base de plomb, lithium et nickel.

- **Batteries au Plomb**

La batterie au plomb est la plus ancienne des batteries, découverte par Gaston Planté en 1859, et est encore utilisée de nos jours dans les voitures conventionnelles. Ces batteries sont peu chères et la technologie est maîtrisée. Elles permettent de fournir des courants importants et leur durée de vie (nombre de cycles) est correcte. Ce sont des caractéristiques intéressantes pour une utilisation pour les véhicules électriques VE et les VH [13]. En revanche, l'idée de l'emploi de cette solution technique est contrariée par une faible densité énergétique ainsi qu'une grande dépendance à la température en termes de puissance et d'énergie spécifique (baisse de performances en dessous de 10°C) [34].

- **Batteries au nickel**

#### **Nickel –Cadmium (Ni-Cd)**

Les caractéristiques de cette technologie sont une puissance spécifique élevée et une cyclabilité élevée. En revanche, sa tenue en température permet une utilisation dans une large plage thermique (−40 à +85°C). Cette caractéristique constitue un avantage indéniable dans les applications transport. Cependant, cette technologie souffre d'un coût élevé, d'une tension de cellule relativement faible et d'un impact environnemental important. De plus, en raison de la forte cancérogénicité du cadmium, l'emballage du module doit présenter une fiabilité irréprochable. Ces aspects ont entraîné l'adoption d'une directive européenne (2002/95/CE) limitant leur utilisation à un usage professionnel [34].

#### **Nickel-Fer (Ni-Fe)**

Ce type de batterie est beaucoup moins coûteux à fabriquer que les batteries Nickel-Cadmium. Ce sont des batteries pratiquement indestructibles. La longévité de ces batteries est due au fait que les métaux des électrodes sont stables. Cette stabilité fait aussi que ces batteries ne peuvent pas fournir un courant très important et ne conviennent pas au démarrage de systèmes (véhicules...) [30]. Ces batteries sont sujettes à l'auto décharge, en effet elles perdent un peu plus de 5% d'énergie durant les 4 heures qui suivent la fin de charge. Ces problèmes sont en passe d'être résolus sur des prototypes. Leur densité énergétique plus importante que les batteries plomb/acide, leur durée de vie supérieure (environ 2 000 cycles) et leur tolérance plus importante aux faibles températures, en font une batterie plus intéressante pour une application VE [13].

#### **Nickel-Métal-Hydrure (Ni-MH)**

Les batteries Ni-MH diffèrent des Ni-Cd de par la constitution de l'électrode négative, ici basée sur de l'hydrogène adsorbé dans un métal. Cette technologie apporte des améliorations intéressantes par rapport au Ni-Cd. Premièrement, il est supérieur à l'énergie. Deuxièmement, l'absence de cadmium facilite le recyclage des batteries usagées, et il y a moins de problèmes possibles de rupture de conteneur. Malheureusement, le coût de cette batterie est encore élevé [15].

- **Batteries Lithium-ion**

L'électrolyte est composé d'une solution organique ou d'un polymère solide. Ce métal est très léger, peut obtenir une densité d'énergie et une tension de batterie extrêmement élevées, ainsi qu'une densité de puissance élevée. Aujourd'hui, cette technologie est considérée comme très prometteuse et fait l'objet de recherches approfondies, et le problème de sécurité (incendie) fréquemment évoqué est en train d'être résolu. Pour les applications de type véhicule électrique, ces batteries présentent le meilleur choix [34].

### I.6.2.3. Comparaison des différents types de batteries

On se limite ici aux quatre types de batteries les plus utilisées actuellement : Plomb, Ni-Cd, Ni-MH et Li-Ion. Sur le **Tableau I.2** sont indiqués leurs principaux avantages et inconvénients [23] :

**Tableau I-2:** Comparaison entre les différentes technologies de batteries [15].

Technologie	Avantages	Inconvénients
Plomb	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Economique</li> <li>- Recharge facile</li> <li>- Stockage de longue durée (autodécharge faible)</li> <li>- Recyclage simple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensible aux décharges trop profondes.</li> <li>- Capacité massique faible.</li> <li>- Risque de sulfatation irréversible.</li> <li>- Durée de vie faible.</li> <li>- Contamination au plomb en cas de destruction</li> </ul>
Ni-Cd	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Charge facile et rapide même après un stockage à long terme</li> <li>- Recharge facile même à basse température</li> <li>- Grande durée de vie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible densité d'énergie</li> <li>- Autodécharge assez rapide (20% par mois).</li> <li>- Sensibilité à l'effet mémoire</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bonnes performances à basse température</li> <li>- Très faible résistance interne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Assez polluant à cause du Cadmium.</li> </ul>
Ni-MH	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contient beaucoup plus d'énergie que le Ni-Cd</li> <li>- Simple à stocker et à transporter</li> <li>- Ne pollue pas comme le Ni-Cd</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ne supporte pas le dépassement de charge.</li> <li>- Détection de fin de charge difficile.</li> <li>- Le nombre de cycles est inférieur à celui du Ni-Cd</li> <li>- Coût élevé.</li> <li>- Tension faible</li> </ul>
Li-Ion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'effet mémoire</li> <li>- Faible autodécharge (1% par mois, quelques pourcents par an)</li> <li>- Ne nécessite pas de maintenance</li> <li>- Avec haute densité d'énergie et poids léger</li> <li>- Accepte une charge rapide</li> <li>- Peu de pollution et recyclable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût élevé de production</li> <li>- Problèmes de densité thermique.</li> <li>- Sensible aux chocs.</li> <li>- Recharge sous haute surveillance, risque d'explosion</li> <li>- Recyclage très technique</li> </ul>

#### I.6.2.4. Bilan sur les batteries

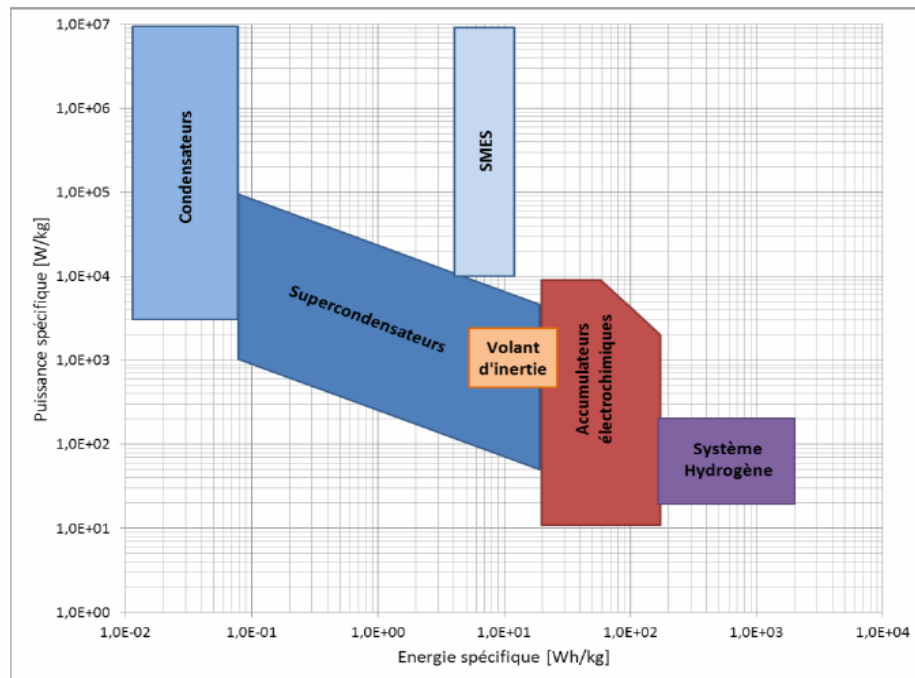
Le choix de la batterie va dépendre de son utilisation. Dans le cas d'un VH, les batteries sont sollicitées lors des accélérations et des déplacements à très faible vitesse, elles ne seront pas sollicitées dans la durée. Les batteries à base de nickel sont encore très utilisées et le lithium commence à faire son apparition alors que le plomb est encore présent.

Le plomb reste la technologie la moins chère sur le marché, mais les performances de ces batteries sont en retrait par rapport aux batteries au nickel. La solution batterie au plomb est en voie d'abandon pour la traction. Les batteries Ni-MH remplacent actuellement les batteries Ni-Cd. Les batteries hautes températures offrent également de très bonnes performances, mais le design des véhicules devra être changé pour permettre l'utilisation de telles batteries. Le futur verra certainement les batteries au lithium, car elles offrent des performances comparables aux batteries hautes températures mais à température ambiante.

La durée de vie de la batterie est un élément essentiel, car le coût de remplacement de celle-ci est très important aujourd'hui pour qu'un VE puisse être commercialisé.

### I.6.3. Choix de la technologie de stockage

Le support de stockage idéal doit avoir une puissance spécifique élevée et une densité d'énergie élevée. Or il apparaît (voir figure I.17 ; diagramme de Ragone) qu'aucun périphérique de stockage ne présente ces caractéristiques. C'est pourquoi nous nous tournons vers une combinaison de modes de stockage avec des caractéristiques énergie/puissance complémentaires [16].



**Figure I-17** : Plan de Ragone [18].

L'utilisation d'un élément de stockage dans un SH est envisagée pour compléter la source principale, car elle ne peut pas fournir toute la puissance nécessaire au fonctionnement du système et permettre l'absorption de tous les pics de freinage. Par conséquent, le système de stockage d'énergie choisi doit être capable d'effectuer un très grand nombre de cycles de charge et de décharge. Il doit également avoir une densité de puissance élevée et un temps de réponse faible.

Les différentes sources d'énergie peuvent être représentées dans un même plan appelé plan de Ragone (figure I.17). Ce plan représente l'énergie spécifique en fonction de la puissance spécifique.

## I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes architectures des véhicules électriques hybrides ont été présentées. Cependant, la suite de notre étude sera consacrée à l'étude du véhicule hybride à PàC de type PEM. Une description des sources d'énergie les plus utilisées dans un véhicule

électrique de type urbain à savoir la PàC, la batterie et le SC a été introduite, face aux contraintes de fonctionnement des systèmes purs à PàC, l'utilisation d'une source secondaire d'énergie a été justifiée.

Les systèmes électriques hybrides qu'on va étudier dans ce qui suit sont composés de deux architectures la première consiste à utiliser un pack de SCs comme source secondaire avec la source principale (PEMFC), et la deuxième une batterie de type Ni-MH à la place du pack de SCs. Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation de la PàC et de ces sources auxiliaires d'énergie, le choix de type des convertisseurs d'électronique de puissance utilisés et le dimensionnement de ces éléments.

# **CHAPITRE II**

**MODELISATION ET  
DIMENSIONNEMENT DES  
COMPOSANTS DU  
VEHICULE HYBRIDE Â PÂC**

## II.1. Introduction

Le système hybride considéré est principalement formé de deux sources d'énergies électriques. Chacune des sources définit une voie représentant un certain flux d'énergie. La voie primaire est formée du système à PàC comportant la PàC et ses auxiliaires associés à un hacheur élévateur. D'autre part, une voie secondaire d'énergie est constituée par le pack de SCs ou de batteries ainsi qu'un hacheur réversible en courant. Ces deux voies sont reliées au niveau du nœud électrique pour fournir la puissance nécessaire à la traction. Ainsi, la puissance demandée est la somme de la puissance utile du système à PàC et de la puissance utile de l'élément de stockage.

Nous allons au cours de ce chapitre modéliser les différents composants du véhicule électrique considéré, ainsi que les convertisseurs qui y sont connectés. Ensuite, nous allons présenter le dimensionnement de chaque élément, ce dernier doit être mis en relation directe avec l'utilisation faite du véhicule, ce qui nécessite une modélisation du comportement dynamique du véhicule.

## II.2. Présentation du véhicule à PàC considéré

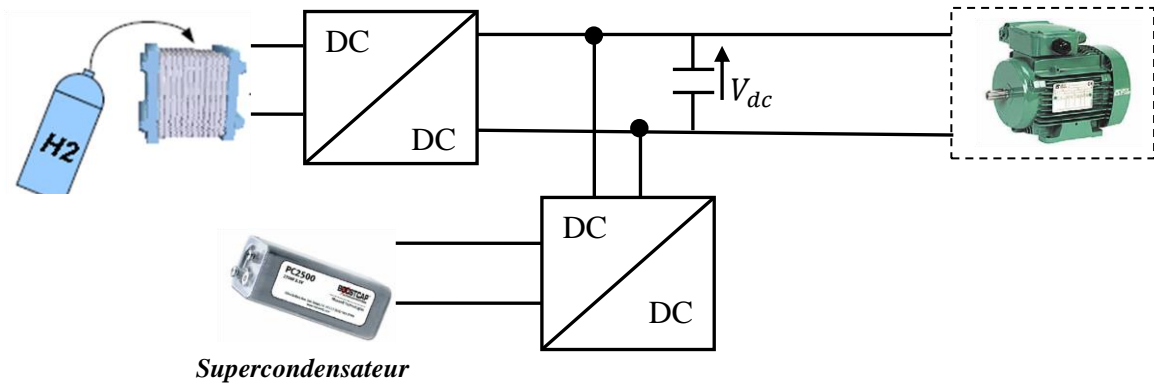
Actuellement de nombreuses applications automobiles sont basées sur l'utilisation des PàCs comme source principale d'énergie et des SCs comme source auxiliaire de puissance. L'utilisation des SCs permet de réduire la contrainte en puissance sur la source d'énergie principale [35]. Dans notre cas on va étudier deux systèmes (architectures) multi-sources comprenant :

- Une PàC qui représente la source d'énergie,
- Un pack de SCs dans la première architecture, et batterie dans la deuxième, qui joue le rôle d'une source de puissance,
- Un hacheur élévateur relié à la PàC qui permet d'élever sa tension,
- Un hacheur réversible en courant relié à l'élément de stockage permettant ainsi son fonctionnement dans les deux modes de charge et de décharge,
- Un bus continu auquel sont reliés les deux hacheurs et qui permet le transfert des flux d'énergie,
- Un hacheur à quatre quadrants et une machine à courant continu (MCC) constituant la charge.

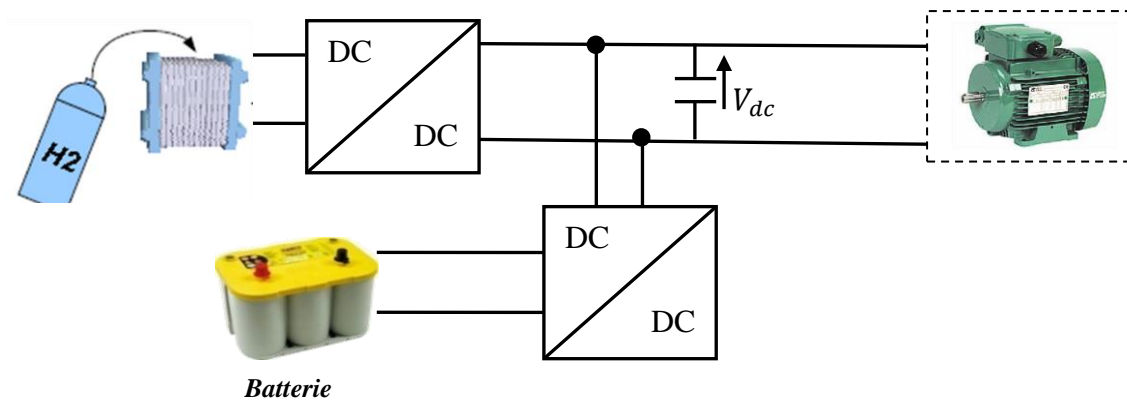
Supposons que les caractéristiques du véhicule à l'étude soient :



- une vitesse maximale de 120 km / h,
- une accélération de 0 à 100 km / h en 15 s.



**Figure II-1** : Première architecture électrique du véhicule à PàC étudiée.



**Figure II-2** : Deuxième architecture électrique du véhicule à PàC étudiée.

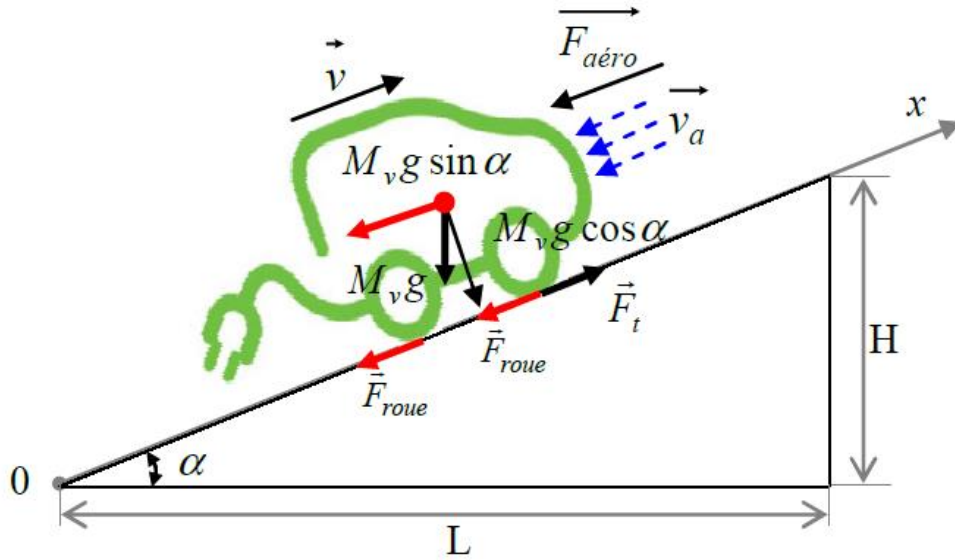
Ces architectures, encombrantes et coûteuses à cause du nombre des convertisseurs de puissance utilisés, permet en effet de maîtriser la puissance qui sera absorbée ou fournie. Par conséquent, la gestion des flux est facile à réaliser car elle passe par le bus continu (DC).

### II.3. Modélisation et dimensionnement de la chaîne de traction

#### II.3.1. Modèle dynamique du véhicule

Afin de dimensionner les sources d'énergie du véhicule, il est important d'estimer la puissance demandée par le véhicule, en fonction de ses caractéristiques, de sa vitesse et de son accélération. Pour calculer la puissance nécessaire à l'avancement du véhicule, on applique le principe fondamental de la dynamique (P.F.D) [15],

$$M \frac{dv}{dt} = \sum \overrightarrow{F_{ext}} \quad (\text{II.1})$$



**Figure II-3** : Bilan des forces sur le véhicule [36].

Le bilan des forces extérieures appliquées au véhicule est illustré par la figure II.3. En lui appliquant le P.F.D,

$$M_v \frac{dv}{dt} = \vec{F}_{aéro} + \vec{P} + \vec{F}_{roue} + \vec{F}_t \quad (\text{II.2})$$

La force équivalente à la résistance de l'air  $\vec{F}_{aéro}$  sur le véhicule est donnée par l'équation suivante :

$$\vec{F}_{aéro} = -\frac{1}{2} \rho_{air} v^2 S C_x \vec{x} \quad (\text{II.3})$$

Où  $v$  est la vitesse du véhicule (en  $m/s$ ) et  $\rho_{air}$  la masse volumique de l'air ( $\rho_{air} = 1,3 \text{ kg}/m^3$ ). La surface frontale du véhicule  $S$  et le coefficient de pénétration dans l'air  $C_x$  sont des paramètres de construction du véhicule.

La résistance des roues sur le sol  $\vec{F}_{roue}$  est donnée par la formule suivante :

$$\vec{F}_{roue} = -P' C_r \cos \alpha \vec{x} \quad (\text{II.4})$$

Où  $P'$  représente le poids du véhicule et  $\alpha$  l'angle formé par la route et l'horizontale. Le coefficient de roulement  $C_r$  dépend du type et de la pression des pneumatiques.

D'après la figure II.3, nous pouvons remarquer que la composante de la force de traction  $\vec{F}_t$  suivant  $\vec{y}$  est nulle. On calcule donc  $|\vec{F}_t|$  en projetant  $\vec{F}_t$  sur l'axe porté par le vecteur  $\vec{x}$ ,

$$M_v \frac{dv}{dt} \vec{x} = (-\frac{1}{2} \rho_{air} v^2 S C_x - M_v g \sin \alpha - M_v g C_r \cos \alpha + \vec{F}_t) \vec{x} \quad (\text{II.5})$$

Donc, l'expression de la force de traction  $\vec{F}_t$  mécanique est :

$$\vec{F}_t = M_v \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \rho_{air} v^2 S C_x + M_v g \sin \alpha + M_v g C_r \cos \alpha \quad (\text{II.6})$$

La puissance mécanique nécessaire pour faire avancer le véhicule est égale au produit de la force de traction et de la vitesse.,

$$P_m = F_t v \quad (\text{II.7})$$

Donc, d'après les équations (II.6) et (II.7), l'expression de la puissance de traction du véhicule en fonction de la vitesse  $v$  et de l'accélération  $dv/dt$  est,

$$P_m = v \left( M_v \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \rho_{air} v^2 S C_x + M_v g \sin \alpha + M_v g C_r \cos \alpha \right) \quad (\text{II.8})$$

### II.3.2. Le moteur de traction

Le choix d'une technologie de motorisation est étroitement lié à l'augmentation des performances des véhicules électriques, il existe trois grandes catégories de moteurs (à courant continu, asynchrone et synchrone). La motorisation à courant continu a été pendant longtemps une solution de référence, soit dans sa version à excitation série, solution robuste qui présente de manière intrinsèque une caractéristique à la traction (véhicule Volta), soit plus récemment, dans sa version à excitation séparée commandée par hacheur (véhicule Express de Renault). Mais l'évolution de l'électronique de puissance et des matériaux tels que les aimants permanents conduit aujourd'hui à s'orienter vers des solutions plus performantes telles que les motorisations synchrones ou asynchrone [37, 38, 39].

Quelle que soit sa nature (à courant continu ou à courant alternatif) le moteur électrique présente un certain nombre d'avantages [37, 40] :

- ✓ Il peut fournir un couple à toutes les vitesses, y compris à l'arrêt. Cette caractéristique permet l'élimination de l'embrayage dans la chaîne de transmission de couple, et la tension d'alimentation peut être contrôlée de manière appropriée dans le cas d'un moteur à courant continu, ou le moteur à courant alternatif peut être contrôlé par un onduleur.
- ✓ Il peut supporter des charges brèves, et fournir des sur-couples importants, de l'ordre de 2 à 4 fois le couple nominal, pendant la période de démarrage.
- ✓ Il est réversible.

Pour des raisons de simplification et pour se concentrer sur notre objectif qui focalise sur la validation des techniques de gestion de l'énergie, notre choix s'est dirigé vers un MCC, ce dernier doit être capable de fournir une puissance mécanique nécessaire pour la traction du véhicule, il est dimensionné selon la vitesse maximale donnée par le cahier des charges, les caractéristiques du véhicule considéré sont données dans le tableau. II.1 :

**Tableau II-1** : Paramètres de la dynamique du véhicule.

Paramètres	Valeurs
------------	---------

Masse totale en charge	1400 kg
Vitesse maximale	120 km.h <sup>-1</sup>
Diamètre des pneus sous charge	0.5 m
Le coefficient de traîné	0.86
L'accélération due à la pesanteur	9.81 m.s <sup>-2</sup>
La masse volumique de l'air	1.23 kg.m <sup>-3</sup>
Le coefficient de roulement du véhicule	0.01

Pour calculer la puissance maximale que doit fournir le moteur, on applique la formule (II.8) ; en supposant un terrain plat et la vitesse du véhicule est stabilisée à la vitesse maximale, la puissance du moteur est calculée à 26 kW, et pour assurer le roulage du véhicule sur des terrains non plats (en pente), on a surdimensionné le moteur à 30 kW.

Le moteur choisi est un MCC de tension nominale 400 V et d'une puissance de 30 kW.

### II.3.2.1. Modélisation du moteur de traction

Le circuit électrique équivalent de la MCC à excitation séparée est donné par la figure II-4.

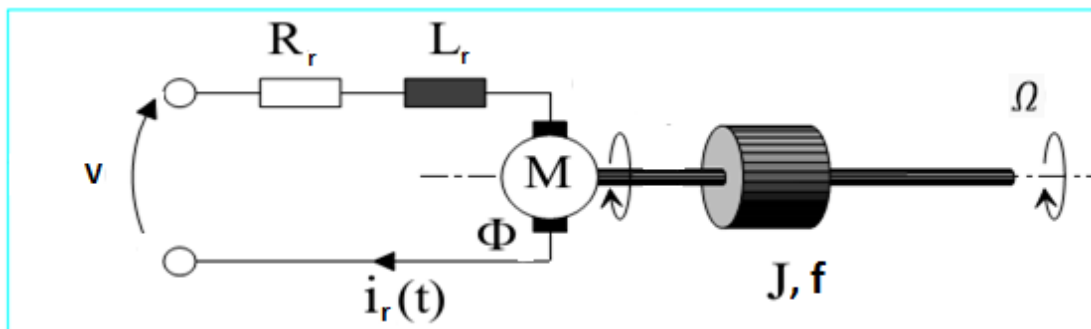


Figure II-4 : Schéma électrique de la MCC à excitation séparée.

La MCC à excitation séparée est caractérisée par deux équations différentielles ; une électrique et l'autre mécanique :

- L'équation électrique :  $V = E + R_r \cdot i_r + L_r \frac{di_r}{dt}$  (II-9)

- L'équation mécanique :  $C_m = C_r + f \cdot \Omega + J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$  (II-10)

Avec :

- $R_r$ : résistance de l'induit ;
- $L_r$ : inductance de l'induit ;
- $E$  : force contre électromotrice induite ;
- $\Omega$  : vitesse de rotation mécanique de la machine ;
- $f$ : coefficient de frottement visqueux ;
- $J$  : moment d'inertie de la machine plus la charge ;

- $C_m$  : couple délivré par la machine ;
- $C_r$  : couple résistant de la charge.

A ces deux équations différentielles, s'ajoutent deux relations qui définissent la force contre électromotrice et le couple de la machine :

$$\begin{cases} E = K \cdot \Phi \cdot \Omega = K \cdot \Omega \\ C_m = K \cdot \Phi \cdot i_r = K \cdot i_r \end{cases} \quad (\text{II-11})$$

$\Phi$  est le flux du champ magnétique créé par l'inducteur à travers les spires de l'induit.

$i_r$  est le courant d'induit.

On voit bien que le couple et la vitesse dans la MCC sont découplés. Théoriquement, cette machine peut fournir n'importe quel couple à n'importe quelle vitesse ce qui facilite la commande de ce type de machine. En réalité, nous sommes limités par le courant maximal (et donc le couple maximal) et aussi par une vitesse maximale à ne pas dépasser.

En utilisant ces équations, et en adoptant la transformée de Laplace, on trouve :

$$\begin{cases} I(p) = \frac{1}{R_r + L_r \cdot p} \cdot [V(p) - E(p)] \\ \Omega(p) = \frac{1}{f + J \cdot p} \cdot [C_m(p) - C_r(p)] \end{cases} \quad (\text{II-12})$$

De ces quatre équations, nous pouvons construire un schéma bloc, présenté sur la figure II-5, qui modélise la MCC comme suit :

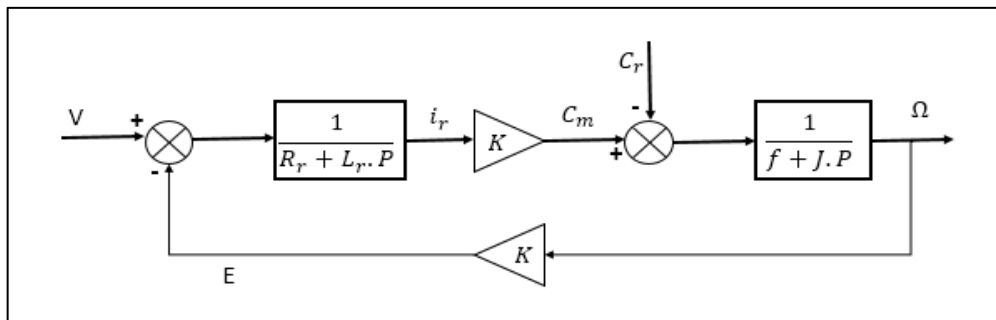


Figure II-5 : Modèle de la MCC à excitation séparée.

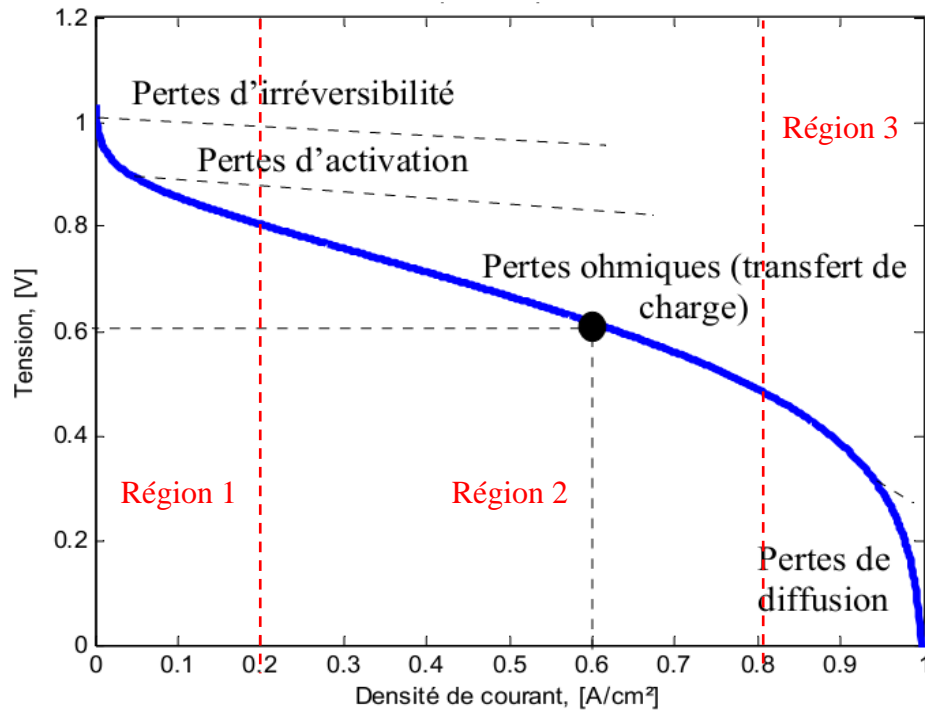
## II.4. Modélisation des sources d'énergie

### II.4.1. Modélisation de la PàC

#### II.4.1.1. Caractéristiques statiques d'une cellule de la PàC

De nombreux travaux, tels que [41, 42, 43] ont proposé un modèle statique, décrivant la courbe de polarisation de la pile PEM (Fig. II.6) comme la somme de quatre termes : tension théorique à vide  $E$ , surtension d'activation  $V_{act}$  (ou chute d'activation : zone 1), surtension

ohmique  $V_{ohm}$  (ou chute ohmique : zone 2) et surtension de concentration  $V_{conc}$  (ou chute de concentration : zone 3) [44].



**Figure II-6** : Caractéristique statique d'une cellule de PàC [43].

$$v_{fc} = E - v_{act} - v_{ohm} - v_{conc} \quad (\text{II.13})$$

Où :

$v_{fc}$  : est la tension de la pile (V),

$E$ : Tension à vide de la PàC.

#### II.4.1.2. La tension à vide de la pile à combustible, équation de Nernst

La PàC convertit directement l'énergie chimique en énergie électrique. L'énergie chimique libérée est déterminée par la variation de l'énergie libre de Gibbs  $\Delta g_f$ , qui est la différence entre l'énergie libre de Gibbs des produits et l'énergie libre de Gibbs des réactifs. L'énergie libre de Gibbs est utilisée pour calculer l'énergie disponible nécessaire pour le travail externe. La variation de l'énergie libre de Gibbs pour la PàC est donnée par la formule ci-dessous [45]:

$$\Delta g_f = g_f \text{ des produits} - g_f \text{ des réactifs} = (g_f)_{H_2O} - (g_f)_{H_2} - (g_f)_{O_2} \quad (\text{II.14})$$

La variation de l'énergie libre de Gibbs dépend de la température et de la pression :

$$\Delta g_f = \Delta g_f^0 - \bar{R} T_{fc} \ln \left[ \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right] \quad (\text{II.15})$$

Où :

$\Delta g_f^0$ : Variation de l'énergie libre de Gibbs à la pression standard (1 bar) qui dépend de la température  $T_{fc}$  exprimée en Kelvin.

$p_{H_2}$ ,  $p_{O_2}$  et  $p_{H_2O}$ : pressions d'hydrogène, d'oxygène et de vapeur d'eau.

$\bar{R}$ : Constante universelle des gaz (8.3145j/kg.K).

Notons que la valeur de  $\Delta g_f^0$  est négative ( $-237.2kJ/mol$ ) car l'énergie est libérée par la réaction. En absence de pertes dans la PàC, toute l'énergie libre de Gibbs serait convertie en énergie électrique. Deux électrons par mole d'hydrogène traversent un circuit externe, et leur travail électrique est calculé comme suit :

$$\text{Travail électrique effectué} = -2FE \quad (\text{joules}) \quad (\text{II.16})$$

Où :

$F$ : est la constante de Faraday ( $F = 96485 \text{ coulombs}$ ) qui représente la charge électrique d'une mole d'électrons.

Si le système est sans perte, le travail électrique est égal à la variation de l'énergie libre de Gibbs :

$$\Delta g_f = -2FE \quad (\text{II.17})$$

La tension à vide de la PàC peut donc être exprimée par l'expression suivante :

$$E = \frac{-\Delta g_f}{2F} = \frac{-\Delta g_f^0}{2F} + \frac{\bar{R}}{2F} T_{fc} \ln \left[ \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right] \quad (\text{II.18})$$

En pratique, le fonctionnement des piles à combustible s'accompagne toujours par des pertes, une partie de l'énergie chimique étant convertie en chaleur.

Le terme  $\frac{-\Delta g_f^0}{2F}$  varie en fonction du point de fonctionnement, il est égal à 1.229 V à l'état standard ( $25^\circ C$  et 1 bar). En pratique, on peut exprimer la tension  $E$  sous la forme [20]:

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{fc} - 298.15) + 4.03085 \times 10^{-5} T_{fc} \left[ \ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right] \quad (\text{II.19})$$

Où :

$T_{fc}$  : Température de la PàC exprimée en (Kelvin),

$p_{H_2}$ ,  $p_{O_2}$ : Pressions d'hydrogène et d'oxygène exprimées en bar.

La valeur théorique de  $E$  est d'environ 1,299 V. (une valeur qui ne sera jamais atteinte même à vide) [20].

### II.4.1.3. Les pertes d'activation

Les pertes d'activation sont dues essentiellement aux cinétiques des réactions chimiques, la réaction de l'hydrogène étant rapide, tandis que celle de l'oxygène est plus lente. Par conséquent, aux faibles densités de courant, le transfert de charge lent de la cathode domine. L'expression (II.16) de Tafel, permet de calculer les pertes d'activation [45]:

$$v_{act} = a \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (\text{II.20})$$

Où :

$i$  : Densité de courant délivrée par la PàC,

$i_0$ : Densité de courant d'échange équivalente au flux d'électrons dans l'interface électrolyte/électrode à circuit ouvert.

Cette densité de courant est en fonction des matériaux de la cellule, de la fabrication et de la température. A des températures de fonctionnement élevées, la réaction dans l'électrode est rapide et les pertes d'activation sont faibles. Toutefois, quand la température chute, les pertes d'activation deviennent importantes.

Cependant l'équation de Tafel est valide seulement pour  $i > i_0$ . Une autre fonction similaire, valide pour toute la gamme de  $i$ , est utilisée dans les modèles de la PàC. Donc l'expression dans l'équation (II.20) devient :

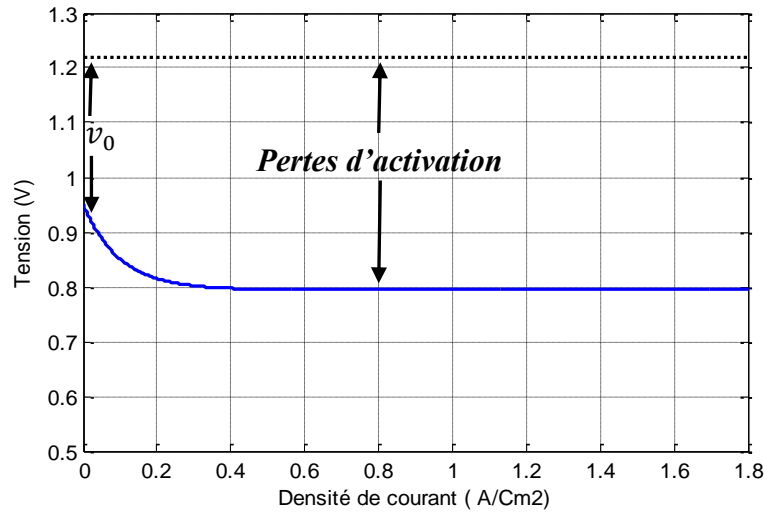
$$v_{act} = v_0 + v_a(1 - e^{-c_1 i}) \quad (\text{II.21})$$

Où :

$v_0$  : représente la chute de tension à densité de courant égale à zéro,  $v_a$ (volts) et  $c_1$  sont constantes.

L'allure de la tension aux bornes de la cellule d'une PàC, si en considère seulement les pertes d'activation, est représentée dans la figure. II.7





**Figure II-7** : Caractéristique statique d'une cellule PEM en considérant seulement les pertes d'activation.

#### II.4.1.4. Les pertes ohmiques

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance de contact des différentes couches de la pile d'une part, et à la résistance rencontrée par les particules chargées d'autre part, les ions  $H^+$  dans l'électrolyte et les électrons  $e^-$  dans les électrodes, les plaques bipolaires et les connexions (la résistance de contact est négligeable devant la résistance ionique de l'électrolyte et les résistances de l'anode et de la cathode) [37].

D'après la loi d'Ohm, les pertes ohmiques peuvent être exprimées par la relation suivante :

$$v_{ohm} = i \cdot R_{ohm} \quad (\text{II.22})$$

La résistance ohmique est en fonction de la conductivité de la membrane  $(\Omega \cdot cm)^{-1} \sigma_m$  sous la forme suivante :

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (\text{II.23})$$

Où :  $t_m, \sigma_m$  sont respectivement l'épaisseur et la conductivité de la membrane, sachant que la conductivité est en fonction de la teneur en eau de la membrane  $\lambda_m$  et de la température de la PàC.

La variation de la conductivité de la membrane avec différentes valeurs d'humidité et de température est donnée sous la forme suivante :

$$\sigma_m = b_1 \exp \left( b_2 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T_{fc}} \right) \right) \quad (\text{II.24})$$

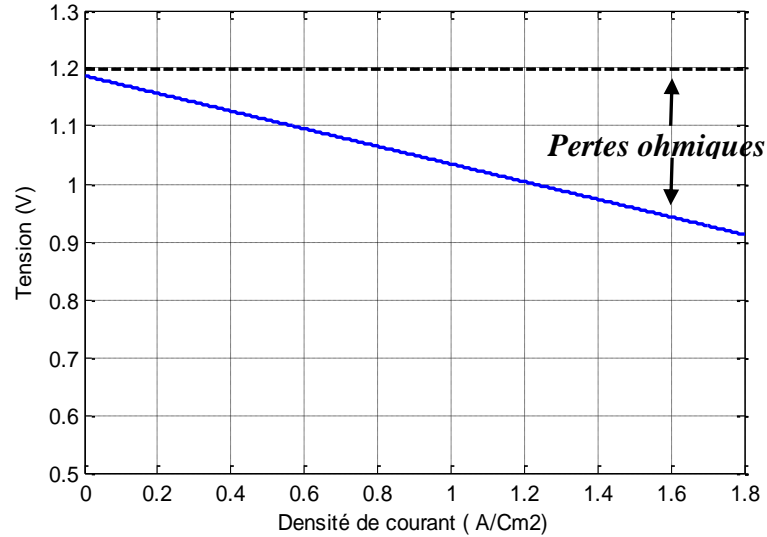
Où :

$$b_1 = (b_{11} \lambda_m - b_{12}) \quad (\text{II.25})$$

$b_1$  est en fonction de la teneur en eau de la membrane,  $b_2$  et  $\lambda_m$  sont des constantes.

Les constantes  $b_{11}$ ,  $b_{12}$  et  $b_2$  sont habituellement déterminées empiriquement. Les valeurs empiriques de  $b_{11}$  et de  $b_{12}$  pour la membrane de Nafion 117 sont indiquées dans [46]. La valeur du  $\lambda_m$  varie entre 0 et 14 équivalents à l'humidité relative 0% et 100%.

La caractéristique statique d'une cellule PEM en considérant seulement les pertes ohmiques est représentée dans figure II.8.



**Figure II-8 :** Caractéristique statique d'une cellule PEM en considérant seulement les pertes ohmiques.

#### II.4.1.5. Les pertes de concentrations

A des densités de courant élevées, la faible vitesse de transport des réactifs ou des produits vers le site de la réaction est la principale cause de la chute de concentration. Cette chute de tension s'exprime en fonction d'une densité de courant limite appelée  $i_L$  inversement proportionnelle à la température, et d'une constante  $B$  appelée constante de transport ou du transfert de masse [37]:

$$v_{conc} = -B \ln \left[ 1 - \frac{i}{i_L} \right] \quad (\text{II.26})$$

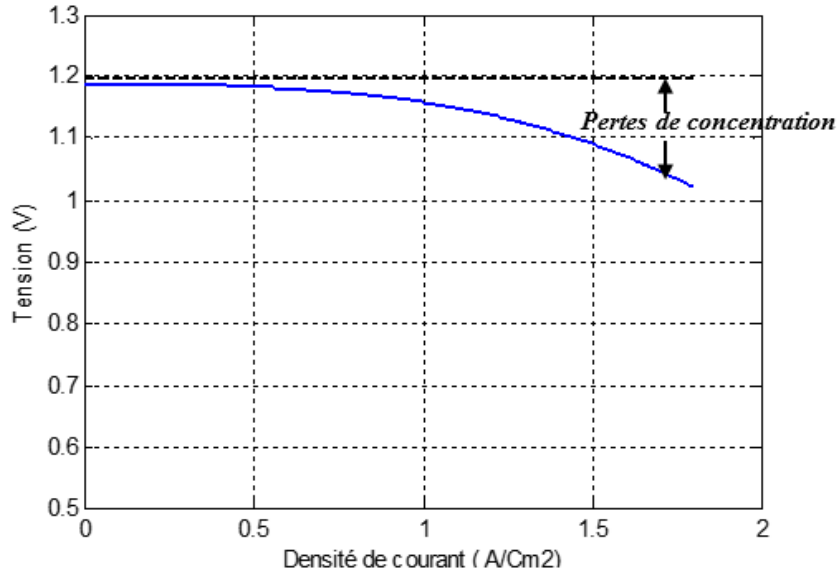
Une autre relation empirique plus simple que la précédente permet de calculer les pertes de concentrations est utilisée :

$$v_{conc} = i \left( c_2 \frac{i}{i_{max}} \right)^{c_3} \quad (\text{II.27})$$

Où :  $c_2$ ,  $c_3$  : constantes qui dépendent de la température et de la pression partielle des réactifs et peuvent être déterminées empiriquement.

$i_{max}$  : densité de courant maximale qui est la cause de la forte chute de tension.

La figure II.9 montre la caractéristique statique d'une cellule PEM en considérant seulement les pertes de concentration.



**Figure II-9 :** Caractéristique statique d'une cellule PEM en considérant seulement les pertes de concentration.

#### II.4.1.6. Tension aux bornes d'une PàC

En combinant toutes les chutes de tension liées à toutes les pertes dans les sections précédentes, la tension de fonctionnement de la PàC peut être écrite sous la forme suivante [45] :

$$v_{fc} = E - \left[ v_0 + v_a(1 - e^{-c_1 i}) \right] - [i.R_{ohm}] - \left[ i \left( c_2 \frac{i}{i_{max}} \right)^{c_3} \right] \quad (II.28)$$

La tension calculée  $v_{fc}$  représente la tension d'une seule cellule de PàC. Puisque plusieurs cellules sont empilées en série pour former un stack, la tension de stack est calculée en multipliant la tension d'une cellule par le nombre de cellules  $n$  et le courant de stack,  $I_{st}$ , est égale au courant de la cellule. La densité du courant est alors définie comme le courant de stack par unité de surface active de la cellule :

$$\begin{cases} v_{st} = N \times v_{fc} \\ i = \frac{I_{st}}{A} \end{cases} \quad (II.29)$$

#### II.4.1.7. Simulation du modèle de tension de la PàC

Les paramètres dans l'expression (II.28) sont donnés par les équations suivantes [19]:

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} \left[ \ln\left(\frac{p_{H_2}}{1.01325}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{p_{O_2}}{1.01325}\right) \right]$$

$$v_0 = 0.279 - 0.85 \times 10^{-3}(T_{fc} - 298.15)$$

$$\begin{aligned}
 & + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} \left[ \ln \left( \frac{p_{ca} - p_{sat}}{1.01325} \right) + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{0.1173(p_{ca} - p_{sat})}{1.01325} \right) \right] \\
 v_a = & \left( -1.618 \times 10^{-5} T_{fc} + 1.618 \times 10^{-2} \right) \left( \frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right)^2 \\
 & + (1.8 \times 10^{-4} T_{fc} - 0.166) \left( \frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + (-5.8 \times 10^{-4} T_{fc} + 0.5736)
 \end{aligned}$$

$$c_1 = 10$$

$$t_m = 0.0125$$

$$b_{11} = 0.005139$$

$$b_{12} = 0.00326$$

$$b_1 = 0.005139 \lambda_m - 0.00326$$

$$b_2 = 350$$

$$c_2 = \begin{cases} \left( (7.16 \times 10^{-4} T_{fc} - 0.622) \left( \frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + (-1.45 \times 10^{-3} T_{fc} - 1.68) \right. \\ \quad \left. \text{POUR } \left( \frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) < 2 \text{ atm} \right. \\ \left. (8.66 \times 10^{-5} T_{fc} - 0.068) \left( \frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + (-1.6 \times 10^{-4} T_{fc} - 0.54) \right. \\ \quad \left. \text{POUR } \left( \frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) > 2 \text{ atm} \right. \end{cases}$$

$$i_{max} = 2.2$$

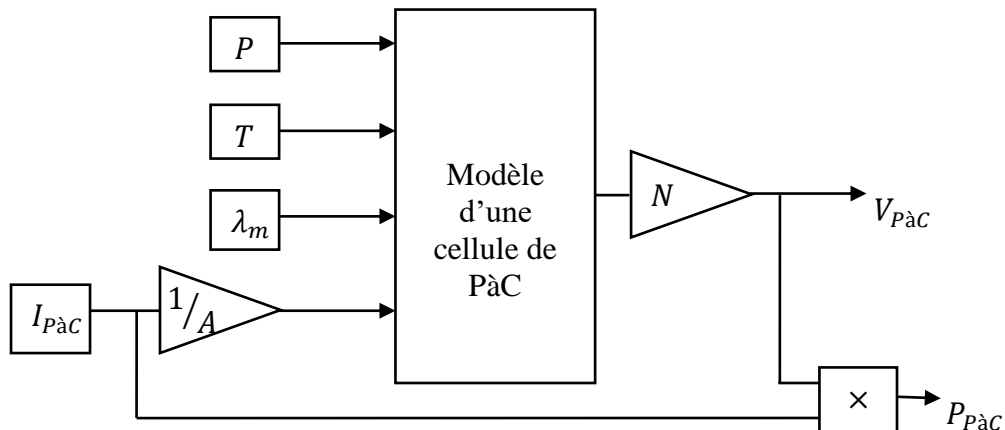
$$c_3 = 2$$

Où :

$p_{ca}$  (bar) : Pression à la cathode,

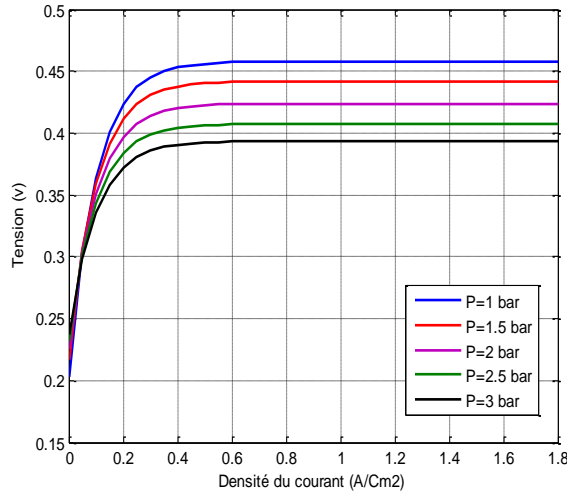
$p_{sat}$  (bar) : Pression de saturation de l'eau qui est en fonction de la température,

Le calcul des paramètres de l'équation (II.28) exige la connaissance de la pression cathodique (qui représente la pression totale)  $p_{ca}$ , de la pression partielle de l'oxygène  $p_{O_2}$  et la pression partielle de l'hydrogène  $p_{H_2}$ , la température de la PàC  $T_{fc}$ , et le degré d'humidification de la membrane  $\lambda_m$  [47, 48].

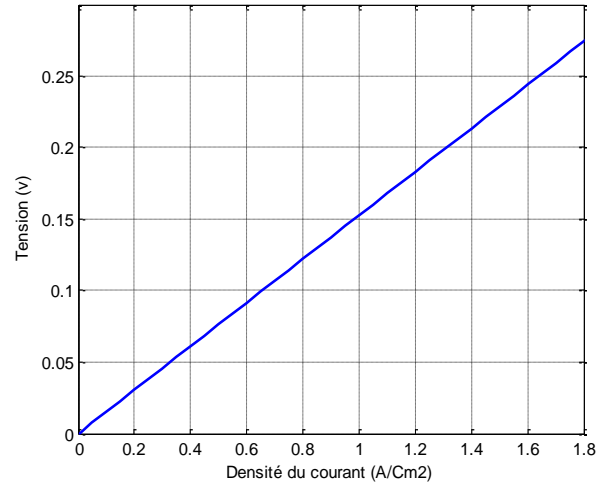


**Figure II-10** : Schéma bloc du modèle de simulation de la tension du stack.

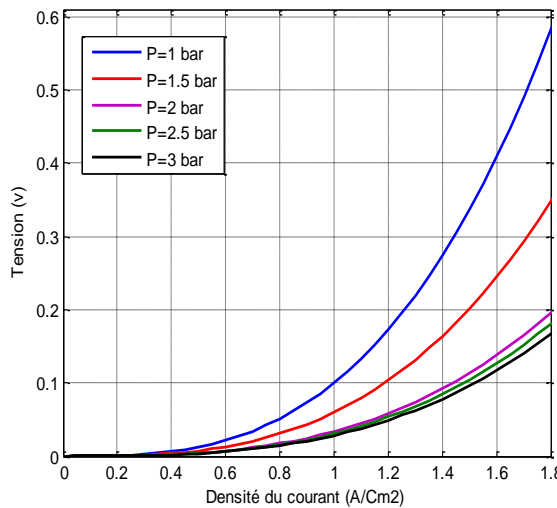
Les figures II.11, II.12 et II.13 représentent respectivement les surtensions d'activation, ohmique et de la concentration à différentes pressions et à température constante égale à (80°C) en fonction de la densité de courant pour une seule cellule. On voit bien que les pertes diminuent en augmentant la pression de fonctionnement de la PàC, sauf la surtension ohmique qui ne dépend pas de la pression. Par conséquent la tension et la puissance de la PàC augmentent.



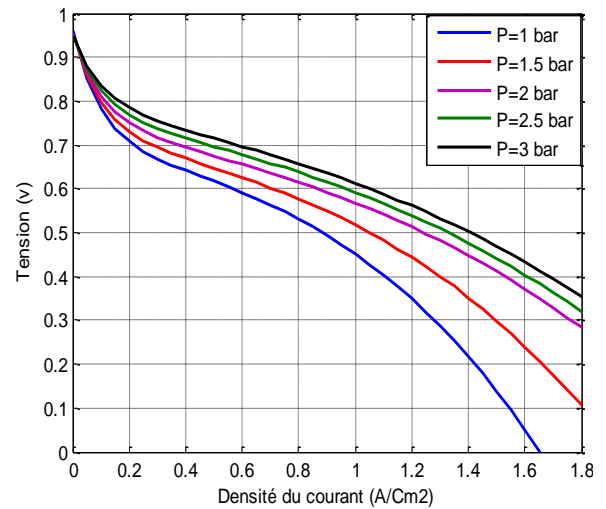
**Figure II-11** : Surtension d'activation à température constante (80°C) et à pression variable.



**Figure II-12** : Surtension ohmique à température constante (80°C) et à pression variable.



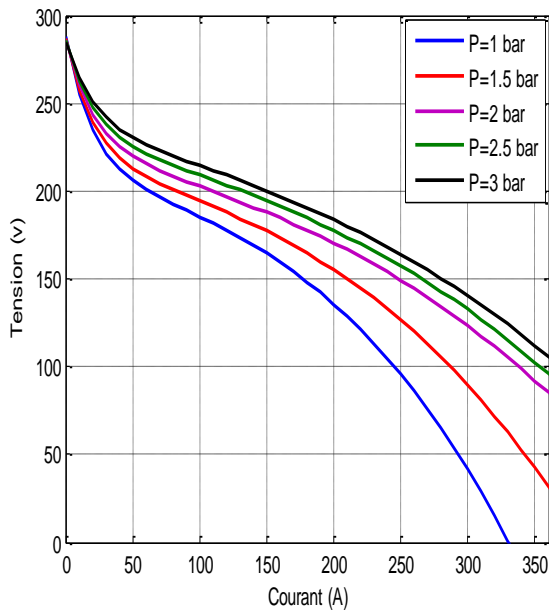
**Figure II-13** : Surtension de concentration à température constante (80°C) et à pression variable.



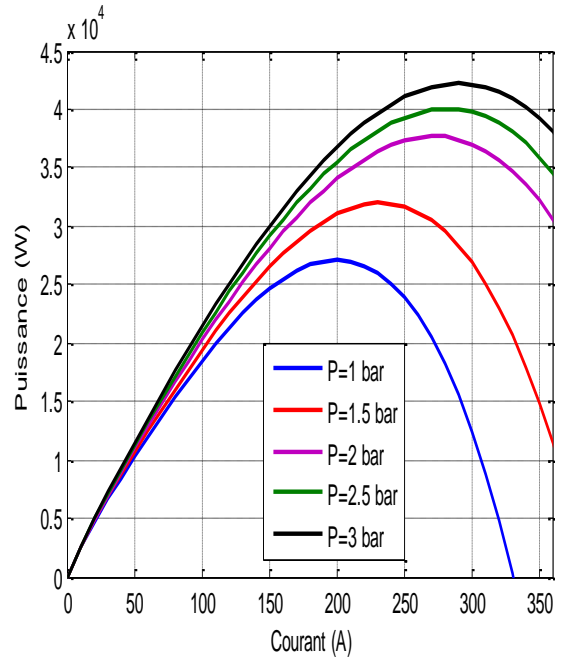
**Figure II-14** : Tension d'une cellule à PàC à température constante (80°C) et à pression variable.

L'influence de la pression sur le niveau de tension peut être expliquée par la disponibilité des molécules de gaz au niveau des sites de réaction. Quand la pression est plus élevée, il y a plus de molécules dans un volume donné. Par conséquent, nous nous attendons à ce que les

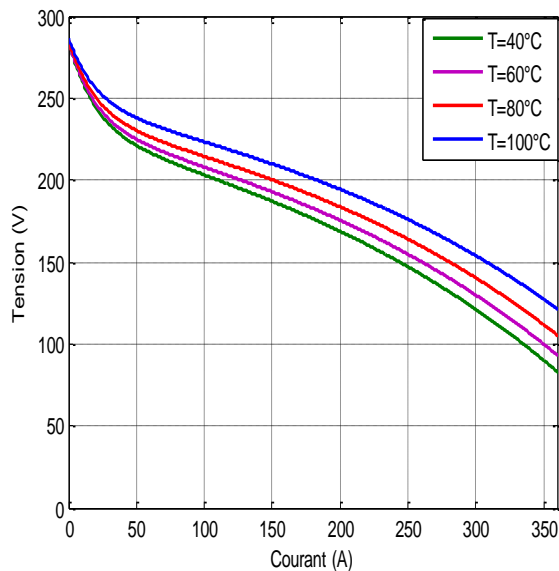
performances de la pile augmentent lorsque la pression augmente. L'augmentation de la pression des réactifs doit alors permettre d'améliorer de façon significative les performances de la pile.



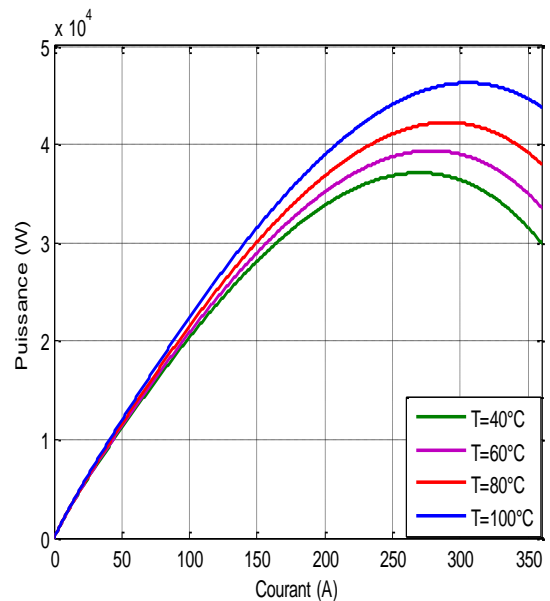
**Figure II-15 :** Tension de la PàC à température constante (80°C) et à pression variable



**Figure II-16 :** Puissance de la PàC à température constante (80°C) et à pression variable.



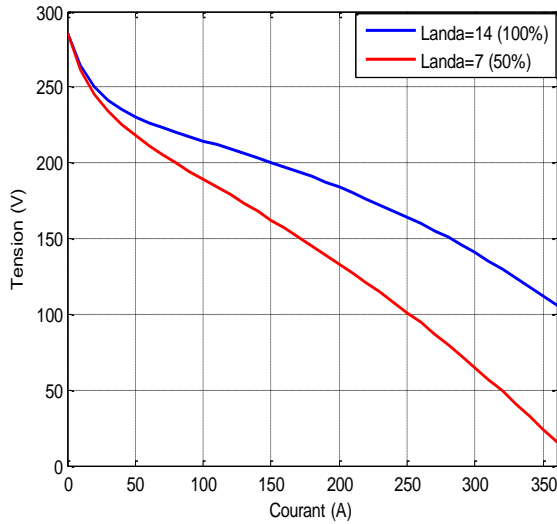
**Figure II-17 :** Tension de PàC à pression constante (3 bar) et à température variable.



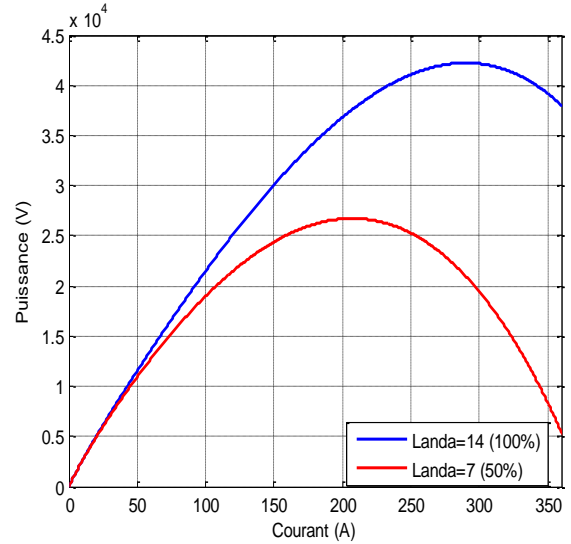
**Figure II-18 :** Puissance de la PàC à pression constante (3 bar) et à température variable.

Les figures II.17 et II.18 montrent respectivement l'effet de la température sur la tension et la puissance de la PàC. Il est clair qu'une augmentation de la température de pile de 40°C à 100°C conduit, comme attendu, à une amélioration des performances en tension et en puissance

de la PàC. L'effet de l'humidité de la membrane sur les caractéristiques électriques de la pile est représenté sur les figures II.19 et II.20. On voit bien que la tension du stack pour une membrane humidifiée à 50% est inférieure à la tension d'une membrane humidifiée à 100%, pour cette raison il faut bien humidifier la membrane en injectant de l'eau avec les réactifs.



**Figure II-19 :** Tension de la PàC pour une pression de 3 bars pour deux valeurs de la teneur en eau de la membrane.

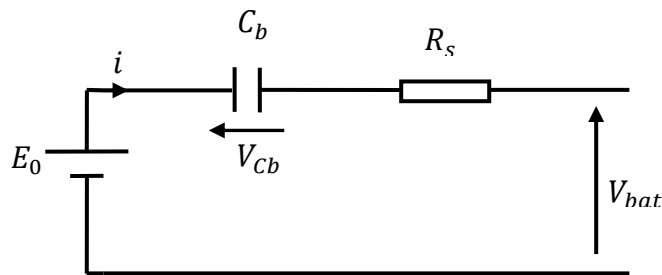


**Figure II-20 :** Puissance de la PàC pour une pression de 3 bars pour deux valeurs de la teneur en eau de la membrane.

## II.4.2. Modélisation de la batterie

### II.4.2.1. Le modèle du circuit équivalent

Plusieurs modèles de batteries trouvés en littérature utilisent un modèle simple (Fig II.21). Il comprend, une f.é.m.  $E_0$  modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne  $C_b$  de la batterie et une résistance interne  $R_s$  [47, 48].



**Figure II-21 :** Modèle R-C de la batterie.

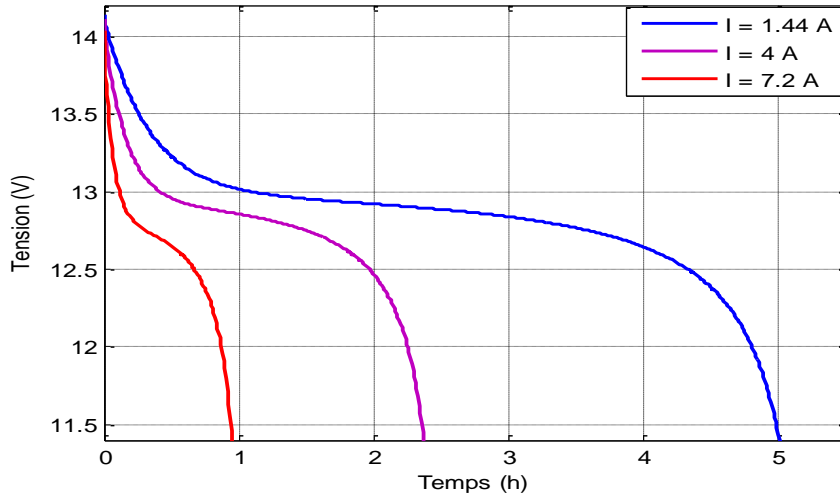
Nous avons donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s \times i - V_{cb} \quad (II.30)$$

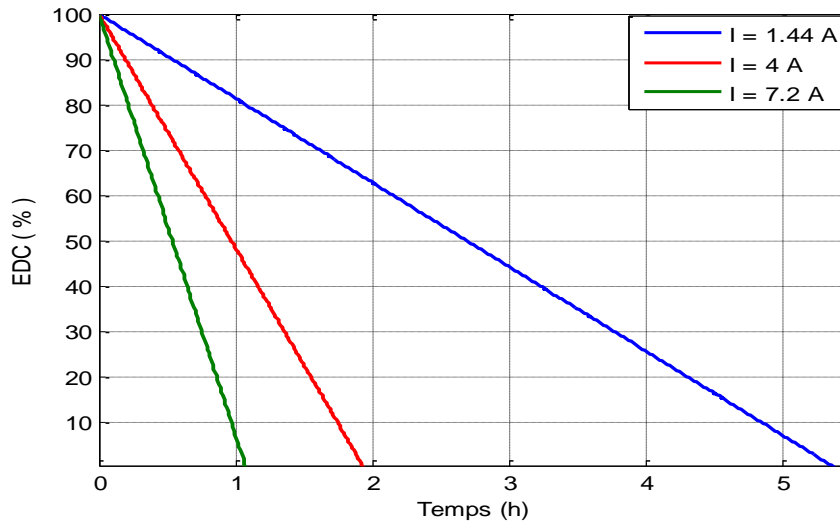
L'état de charge (EDC) de la batterie est également défini comme :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_b} \quad (II.31)$$

Avec :  $C_b$  la capacité (Ah) nominale de la batterie et  $Q_d$  la quantité de charge manquante par rapport à  $C_b$ .



**Figure II-22** : Tension de la batterie pour différents courants de décharge.



**Figure II-23** : Etat de charge de la batterie pour différents courants de décharge.

### II.4.3. Modèle du supercondensateur

L'utilisation de SCs comme système de stockage d'énergie à bord du véhicule passe par la réalisation d'un pack en associant plusieurs éléments en série et en parallèle [49]. Un modèle simple basé sur le circuit électrique équivalent est utilisé.

#### II.4.3.1. Modèle du circuit équivalent du supercondensateur

Le modèle équivalent est un condensateur en série avec une résistance :



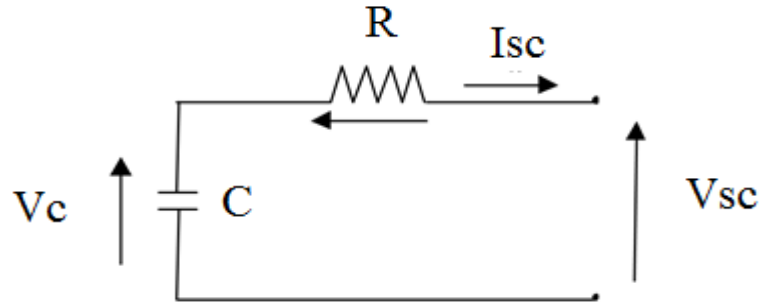


Figure II-24 : Modèle d'un élément.

Définissons la convention utilisée pour analyser ce circuit. La puissance est définie par :

$$P_{SC} = V_{SC} \times I_{SC} \quad (\text{II.32})$$

La convention utilisée est :

$P_{SC} > 0$  en traction (décharge du pack de SC).

$P_{SC} < 0$  en freinage (charge du pack es SC).

La capacité  $C$  est considérée constante. Soit  $Q$  la quantité de charge stockée dans l'armature du SC, elle s'écrit :

$$Q(t) = CV_C(t) \quad (\text{II.33})$$

L'énergie maximale  $E_{MAX}$  contenue dans un SC est définie pour la tension de service  $V_{C-SERV}$  :

$$E_{MAX} = \frac{1}{2} CV_{C-SERV}^2 \quad (\text{II.34})$$

La profondeur de décharge  $K$  est définie par le rapport entre la tension minimale  $V_{C,MIN}$  et la tension maximale  $V_{C,MAX}$  d'un élément :

$$K = \frac{V_{C,MIN}}{V_{C,MAX}} \quad (\text{II.35})$$

L'énergie maximale utilisable  $E_{UTIL}$  est calculée entre la tension maximale et la tension minimale de service :

$$E_{UTIL} = \left[ \frac{1}{2} CV_C^2 \right]_{V_{C,MIN}}^{V_{C,MAX}} = \left[ \frac{1}{2} CV_C^2 \right]_{KV_{C,MAX}}^{V_{C,MAX}} = (1 - K^2) E_{MAX} \quad (\text{II.36})$$

En règle générale :  $K = \frac{1}{2}$

$$E_{UTIL} = \frac{3}{4} E_{MAX} \quad (\text{II.37})$$

L'énergie d'un élément est définie donc par :

$$E(t) = \frac{1}{2} CV_C^2(t) \quad (\text{II.38})$$

## II.5. Dimensionnement des sources d'énergie

Le dimensionnement des sources d'énergie dans le véhicule dépend des performances dynamiques qui sont spécifiées par le cahier des charges. Elles sont notamment caractérisées par la vitesse maximale et par les temps d'accélération du véhicule. Ces contraintes dynamiques permettent de calculer la taille limite de l'alimentation hybride [50], c'est-à-dire la puissance maximale que la PàC doit fournir, les SCs dans la première architecture, et la capacité minimale du module de batterie dans la seconde architecture.

Dans ce travail, nous choisissons le cycle européen de vitesse pour estimer la puissance demandée par le véhicule. Cette puissance doit être satisfaite par l'ensemble (PàC – élément de stockage).

### II.5.1. Dimensionnement du stack de PàCs

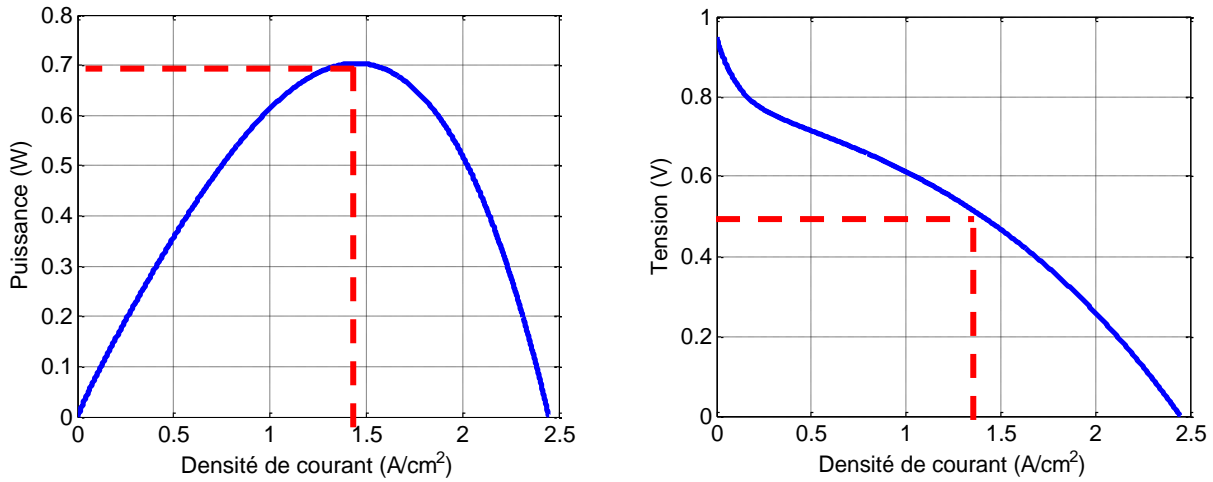
Le dimensionnement du stack comprend la détermination du nombre et de la surface des cellules qui composent l'empilement de la PàC. Ce dimensionnement doit prendre en compte la tension nominale requise, la puissance nominale de la batterie et la densité de courant que l'on souhaite avoir [35, 49].

#### II.5.1.1. Nombre de cellules en série

La tension en pleine charge  $V_{cell\_ch}$  d'une cellule d'une PàC de type PEM est d'environ 0.53V, cette tension correspond à la puissance maximale délivrée par la PàC (voir les figures II.23). La PàC doit alimenter un bus continu fixé à  $V_{bus} = 400V$  via un hacheur boost. Ce dernier a un rendement inversement proportionnel au rapport de transformation, pour cela on a choisi un rapport de transformation égal à 2 [35, 49]. Le nombre des cellules en série est donnée par :

$$N_{série} = \frac{V_{bus}}{2V_{cell\_ch}} = 377 \quad (II.39)$$

Si le stack de PàC contient 125 cellules, Ce nombre de cellules correspond à trois stacks montés en série.



**Figure II-25** : Caractéristiques électriques d'une cellule PEMFC.

### II.5.1.2. Détermination de la surface active

Le dimensionnement de la surface active de la PàC est basé sur la connaissance de la puissance maximale souhaitée. Cette puissance doit satisfaire la puissance demandée par le moteur de traction (calculée à 30 kW), en ajoutant la puissance nécessaire pour le fonctionnement des auxiliaires de la PàC, qui est estimée à 20% de la puissance totale de la PàC. La puissance maximale de la PàC se calcule par la relation suivante [21] :

$$P_{PàC\_max} = 30kW + 0.2 \times 30kW = N_{série} \times V_{cell\_ch} \times J_{ch} \times A_{fc} \quad (II.40)$$

Avec :  $A_{fc}$  La surface active des cellules ( $cm^2$ ).

$J_{ch}$ : La densité de courant qui correspond à la puissance maximale d'une cellule soit  $0.6A/cm^2$

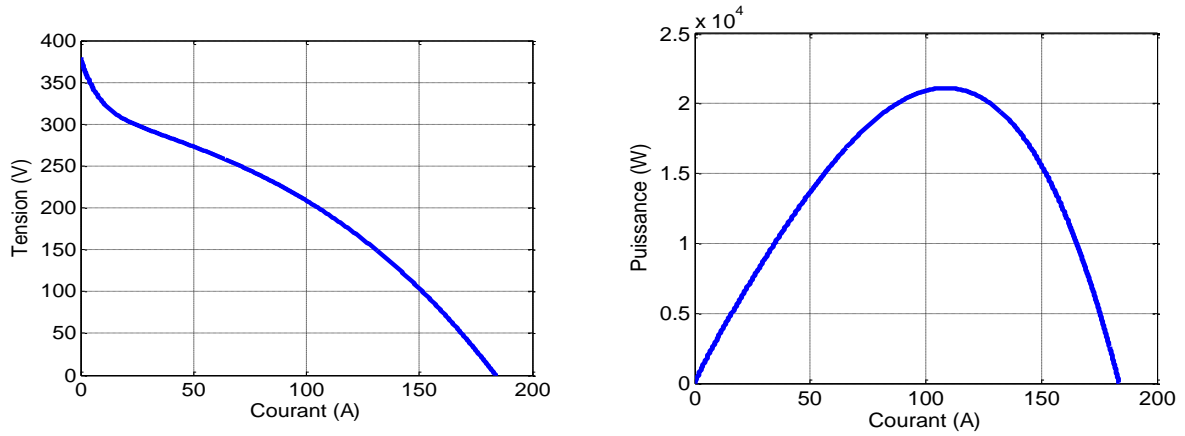
Donc la surface active des cellules est calculée à  $333.55 \text{ cm}^2$ .

Cette surface de la PàC élevée peut être obtenue par plusieurs empilements en parallèle (d'un point de vue électrique et hydraulique), ce qui permet une surface de pile plus petite et permet des limitations techniques, la puissance d'une cellule de PàC est généralement de  $P_{PàC\_cell} = 0.64 \text{ W}$  [35], on peut calculer le nombre de blocs de cellules en parallèle par :

$$N_{parallèle} = \frac{P_{PàC\_max}}{N_{série} \cdot P_{PàC\_cell}} \quad (II.41)$$

Pour résumer, la PàC embarquée dans le véhicule est constituée de deux blocs montés en parallèle, chaque bloc contient trois stacks montés en série, le stack est un assemblage de 125 cellules de 64 W.

La figure II.26 illustre la caractéristique (tension-courant) et (puissance-courant) de la PàC choisi pour le véhicule.



**Figure II-26** : Caractéristique (tension-courant) à gauche et (puissance-courant) à droite pour le dimensionnement choisi de la PàC.

### II.5.2. Dimensionnement des supercondensateurs

Dans la première architecture étudiée, les SCs constituent une source d'énergie auxiliaire qui intervient pendant les accélérations et lors du freinage du véhicule. La puissance maximale que les SCs doivent fournir au véhicule pour qu'ils satisfassent le cahier des charges (une accélération de 0 à  $V_{tf} = 100$  km / h en  $t_a = 18$  s) est exprimée par :

$$P_{pack} = M_v \frac{dv_{tf}}{dt} \times V_{tf} = 60kW \quad (II.42)$$

La méthodologie de dimensionnement consiste à déterminer :

- Plage de tension de fonctionnement.
- L'énergie maximale transférée  $E_{max}$ .
- Le nombre d'éléments à mettre en série  $N_s$  et en parallèle  $N_p$ .

On définit les paramètres suivants :

- $N_{élé}$  : Le nombre total de SCs.
- $V_{élémax}$  : La tension maximale autorisée d'un SC.
- $V_{cmax}$  : La tension maximale du module de SCs.
- $V_{cmin}$  : La tension minimale du module de SCs.

Généralement,  $V_{cmin} = V_{cmax} / 2$

L'énergie maximale transférée (correspond à 60 kW pendant 18 s) est donnée par :

$$E_{\max} = P_{\text{pack}} \times t_a = \frac{1}{2} C_{\text{elem}} N_{\text{elem}} (V_{\text{ele\_max}}^2 - \frac{V_{\text{ele\_max}}^2}{4}) \quad (\text{II.43})$$

En utilisant l'équation (II.46), le nombre des SCs élémentaires nécessaires pour fournir la demande en énergie est exprimé par :

$$N_{\text{elem}} = N_s \times N_p = \frac{8}{3} \frac{E_{\max}}{C_{\text{elem}} V_{\text{ele\_max}}^2} \quad (\text{II.44})$$

Si la capacité d'une cellule de SC est de valeur :  $C_{\text{élé}} = 1500 \text{ F}$ , avec  $V_{\text{élémax}} = 2.55 \text{ V}$  (la tension maximale étant fixée à cette valeur pour garantir une meilleure longévité) [35]. D'où :  $E_{\max} = 750 \text{ KJ}$  et  $N_{\text{élé}} = 205$  cellules.

La tension maximale du module de SCs est fixée à  $V_{c,\max} = 360 \text{ V}$  pour que le rendement du convertisseur soit acceptable, d'où :

$$N_s = \frac{V_{c,\max}}{V_{\text{ele\_max}}=141} \text{ et } N_p = \frac{V_{\text{elem}}}{V_s} \approx 2$$

Pour résumer, le module de SCs embarqué dans le véhicule est constitué de quatre blocs montés en parallèle. Chaque bloc contient 118 cellules de SCs montées en série. Chaque cellule a une capacité de 1500 F.

### II.5.3. Dimensionnement de pack de batteries

Le pack de batteries constitue dans la deuxième architecture une source d'appoint qui intervient pendant les accélérations et lors du freinage du véhicule, et il permet aussi d'augmenter la vitesse du véhicule. La PàC est dimensionnée pour que le véhicule puisse maintenir une vitesse constante de 100 km/h, si on veut aller à une vitesse maximale de 120 km/h, le pack de batteries doit rajouter une puissance donnée par la relation suivante :

$$P_{\text{bat}} = P_{V_{120\text{km/h}}} - P_{V_{100\text{km/h}}} = 27275 - 17500 = 9775 \text{ W} \quad (\text{II.45})$$

Avec :

$P_{V_{120\text{km/h}}}$  et  $P_{V_{100\text{km/h}}}$  : sont respectivement les puissances demandées par le véhicule pour les vitesses 120 et 100 km/h, elles sont estimées à partir du modèle dynamique du véhicule.

La capacité totale du pack de batteries est calculée pour que le véhicule puisse maintenir une vitesse maximale de 120 km/h pendant une durée spécifiée par un cahier des charges (selon le profil de vitesse, la durée de conduite en vitesse de 120 km/h est d'environ 10s). La relation suivante permet approximativement de calculer la capacité des batteries :

$$C_b \approx \frac{P_{\text{bat}} \times \text{aut}}{V_{\text{bat}} \times D_{\text{bat}}} \quad (\text{II.46})$$

Avec :

$C_b$  : La capacité nominale des batteries (Ah).

$P_{bat}$  : La puissance délivrée par le pack de batteries pour une vitesse de 120 km/h (W).

$V_{bat}$  : La tension nominale du pack de batteries (V).

$aut$  : La durée d'autonomie de pack des batteries (h).

$D_{bat}$  : La profondeur de décharge des batteries.

Dans le cadre des simulations réalisées, des batteries de type Ni-MH ont été retenues car il s'agit actuellement de la technologie la plus mature et la plus répandue dans le cadre d'utilisation aux véhicules électriques et hybrides [16]. Les cartographies de tension à vide et de résistance interne sont issues du logiciel Advisor et correspondent à une cellule Ni-MH Ovonic de capacité unitaire nominale 28 Ah, de rendement faradique moyen 0,95 f et de masse 0,72 kg. Le courant en charge et en décharge est limité à 250 A.

## II.6. Modélisation et dimensionnement des convertisseurs statiques liés aux sources d'énergie

### II.6.1. Convertisseur lié à la source principale

#### II.6.1.1. Modèle sans pertes

Pour assurer le transfert d'énergie unidirectionnel entre la PàC et le bus continu (la PàC n'est pas réversible en courant), un convertisseur statique DC-DC survolteur est utilisé pour réaliser cette interface, pour adapter le niveau de tension de la pile au niveau du bus continu. Le schéma électrique de ce hacheur est donné par la figure II-27.

Un modèle instantané du convertisseur est considéré et peut être analysé avec le jeu d'équations des différentes séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur K :

- Interrupteur K passant : ( $0 < t < d.T_e$ )

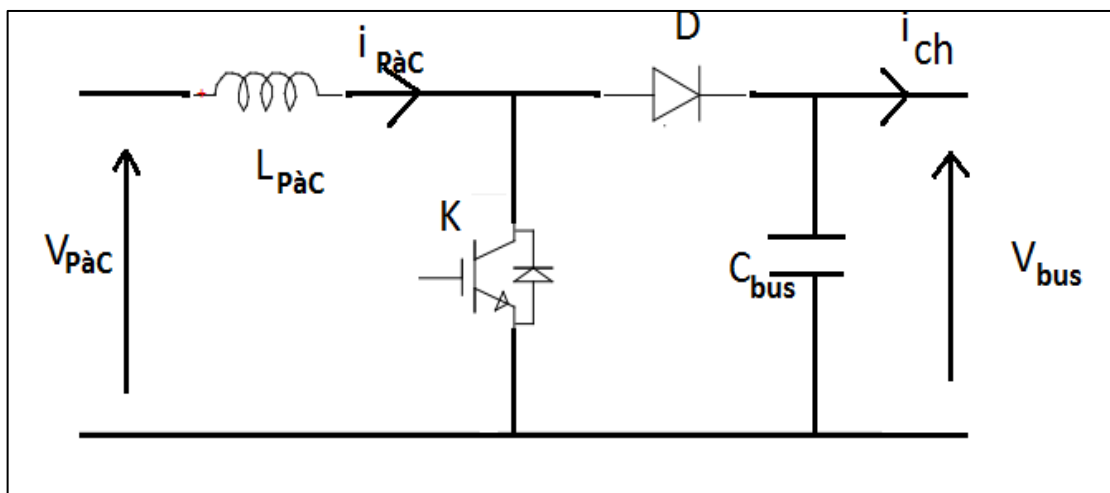


Figure II-27 : Schéma électrique d'un hacheur élévateur sans pertes.

$$\begin{cases} L_{PàC} \cdot \frac{di_{PàC}}{dt} = V_{PàC} \\ i_{ch} + C_{bus} \cdot \frac{dV_{bus}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (II.47)$$

➤ Interrupteur K ouvert : ( $d.T < t < T_e$ )

$$\begin{cases} L_{PàC} \cdot \frac{di_{PàC}}{dt} = V_{PàC} - V_{bus} \\ i_{ch} + C_{bus} \cdot \frac{dV_{bus}}{dt} = i_{PàC} \end{cases} \quad (II.48)$$

Nous obtenons la relation caractérisant ce convertisseur (rapport de transformation) reliant la tension de sortie  $V_{bus}$  à la tension d'entrée  $V_{PàC}$  :

$$\begin{cases} V_{bus} = \frac{V_{PàC}}{1-d_{PàC}} \\ i_{PàC} = \frac{i_{ch}}{1-d_{PàC}} \end{cases} \quad (II.49)$$

De ces équations, nous pouvons extraire deux formules essentielles pour le dimensionnement du hacheur :

$$\begin{cases} \Delta I_{PàC} = \frac{d.T_e.V_{PàC}}{L_{PàC}} \\ \Delta V_{bus} = \frac{d.T_e.i_{ch}}{C_{bus}} \end{cases} \quad (II.50)$$

### II.6.1.2. Modèle avec prise en compte des pertes Joule

Dans la modélisation précédente, le rapport d'élévation peut aller jusqu'à l'infini et le rendement est unitaire (ce n'est pas le cas en pratique). Donc, elle ne donne pas une description réelle du hacheur car elle ne prend pas compte les pertes d'énergie.

Pour remédier à ce problème, nous supposons que les pertes dans le hacheur sont essentiellement dues à l'effet Joule dans la bobine et nous négligeons les autres types de pertes (comme les pertes par commutations ...).

Le nouveau schéma du hacheur est représenté sur la figure II-28.

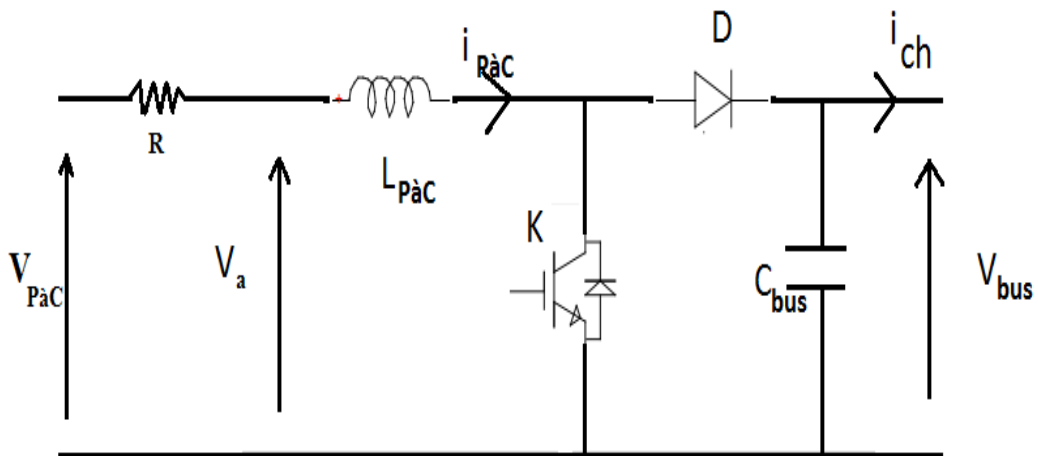


Figure II-28 : Schéma électrique du hacheur élévateur avec les pertes ohmiques.

Les relations précédentes (en valeurs moyennes) restent valables mais en remplaçant  $V_e$  par  $V_a$ . La relation entre  $V_a$  et  $V_e$  peut être déterminée en appliquant simplement la loi des mailles et on trouve :

$$V_{PàC} = R \cdot i_{PàC} + V_a \quad (\text{II.51})$$

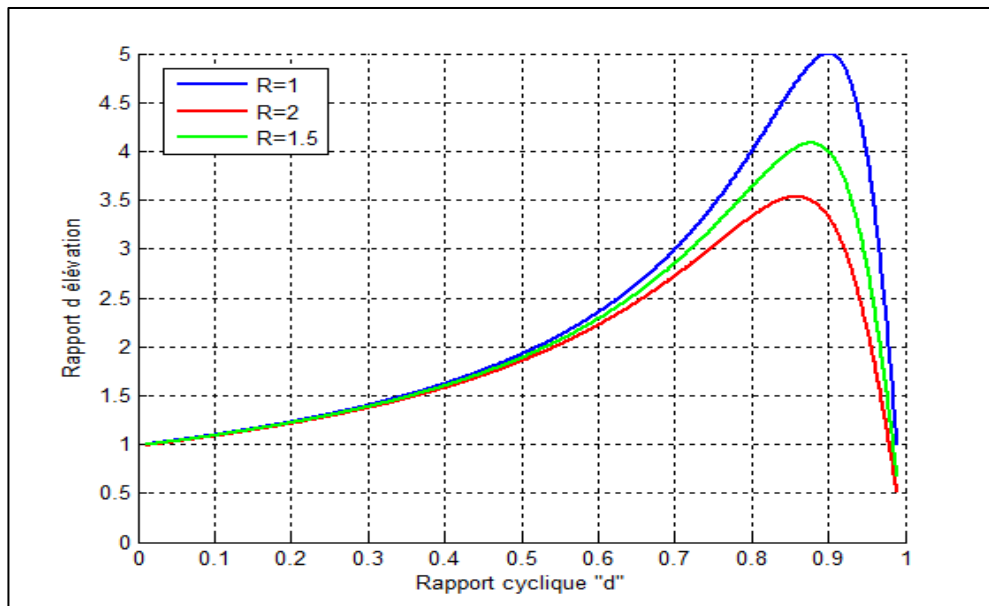
$$V_{PàC} = R \cdot \frac{i_{ch}}{1 - d_{PàC}} + (1 - d_{PàC}) \cdot V_{bus}$$

$$\frac{V_{bus}}{V_{PàC}} = \frac{1}{(1 - d_{PàC}) \cdot \left(1 + \frac{R}{(1 - d_{PàC})^2} \cdot \frac{i_{ch}}{V_{bus}}\right)} \quad (\text{II.52})$$

On pose  $R_{ch} = \frac{V_{bus}}{i_{ch}}$  la résistance d'entrée de la charge, on obtient la nouvelle expression du rapport d'élévation :

$$\frac{V_{bus}}{V_{PàC}} = \frac{1}{(1 - d_{PàC}) \cdot \left(1 + \frac{R}{(1 - d_{PàC})^2} \cdot R_{ch}\right)} \quad (\text{II.53})$$

On remarque bien que si on pose  $R = 0$  on retrouve l'expression du modèle sans pertes. Pour une  $R_{ch} = 100 \Omega$ , nous avons représenté sur la figure II-29 le rapport d'élévation en fonction du rapport cyclique pour différentes valeurs de la résistance de la bobine.



**Figure II-29** : Rapport d'élévation du hacheur en fonction du rapport cyclique pour différentes valeurs de la résistance de la bobine

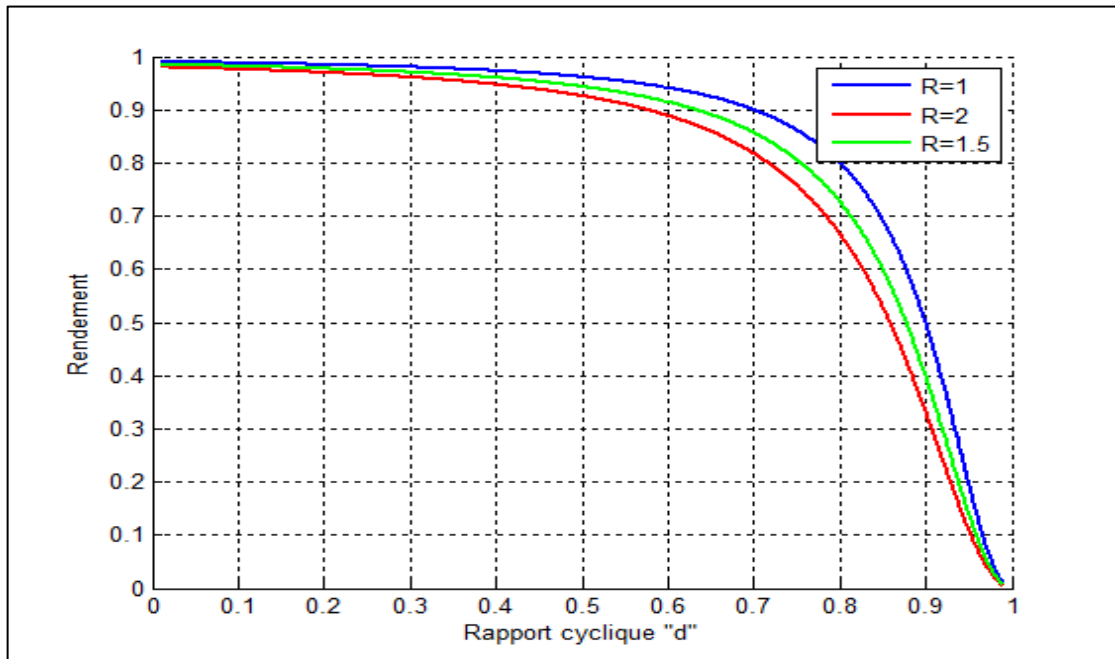
Ce qui concerne le rendement, nous pouvons le déduire à l'aide de l'expression :

$$\eta_{PàC} = \frac{P_{bus}}{P_{PàC}} = \frac{V_{bus} \cdot i_{ch}}{V_{PàC} \cdot i_{PàC}} = \frac{V_{bus} \cdot (1 - d_{PàC}) \cdot i_{PàC}}{V_{PàC} \cdot i_{PàC}} \quad (\text{II.54})$$

$$\eta_{PàC} = \frac{1}{1 + \frac{R}{(1 - d_{PàC})^2} \cdot R_{ch}}$$



Comme le représente la figure II-30, le rendement du hacheur est une fonction décroissante du rapport cyclique, donc il est préférable de travailler avec de petits rapports.



**Figure II-30** : Rendement du hacheur en fonction du rapport cyclique pour des différentes valeurs de la résistance de la bobine.

On peut aussi dériver le rapport d'élévation, on trouve qu'il admet un maximum pour un rapport cyclique :

$$d_{PàC\max} = 1 - \sqrt{\frac{R}{R_{ch}}} \quad (\text{II.55})$$

Pour cette valeur, le rapport d'élévation maximal sera :

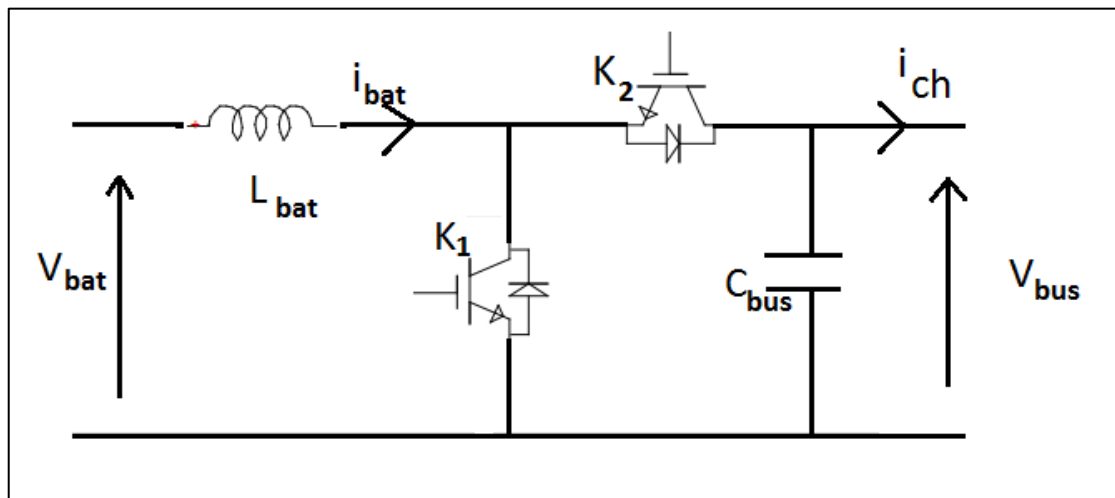
$$\left( \frac{V_{bus}}{V_{PàC}} \right)_{\max} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\frac{R}{R_{ch}}}} \text{ et le rendement sera } \eta_{PàC} = 0.5$$

Donc, pour augmenter le rapport d'élévation maximal que peut atteindre le hacheur, il est nécessaire de diminuer la résistance de la self. D'où la nécessité d'un bon dimensionnement de cette bobine.

### II.6.2. Convertisseur lié à la source secondaire

Pour assurer le transfert d'énergie bidirectionnel entre les SCs ou la batterie et le bus continu (la source secondaire étant réversible en courant) de façon à permettre tant le stockage d'énergie que sa restitution, un convertisseur statique DC-DC bidirectionnel est utilisé pour réaliser cette interface.

Nous présentons sur la figure II-31 le schéma de base de cette conversion statique. On retrouve donc la structure du convertisseur survolteur unidirectionnel avec un deuxième interrupteur K2 à la place de la diode. Cela assure la réversibilité en courant.



**Figure II-31** : Schéma électrique du hacheur élévateur réversible en courant.

D'une manière similaire, l'équation caractéristique de ce convertisseur (rapport de transformation), reliant les deux tensions (entrée  $V_{bat}$  et sortie  $V_{bus}$ ) en fonction du rapport cyclique ( $d$ ) des interrupteurs K1, K2 à la même expression, donnée par les équations (II.49) et (II.50). Le convertisseur sera piloté via le signal de grille des interrupteurs K1, K2 selon le principe classique de la MLI (Modulation de la Largeur d'Impulsion), de façon complémentaire. Ceci dit, le rapport cyclique  $0 \leq d \leq 1$  de la MLI représente l'entrée de commande du système.

## II.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la structure des architectures étudiées, la modélisation et le dimensionnement des différents composants de la chaîne de traction et d'alimentation du véhicule électrique hybride considéré, tels que le comportement dynamique du véhicule, la PàC, les systèmes de stockage d'énergie, le moteur de traction, ainsi que les convertisseurs liés aux sources d'énergie.

Le cœur de ce travail étant l'optimisation de gestion de l'énergie électrique, dans le prochain chapitre, nous explorerons différentes stratégies pour optimiser la distribution de puissance instantanée entre la PàC et l'élément de stockage pour satisfaire la demande de puissance du moteur de traction, la relation entre cette dernière et l'énergie stockée dans le réservoir d'hydrogène présente l'élément clé dans la minimisation de la consommation de l'hydrogène sur un parcours donné.

# **CHAPITRE III**

## **GESTION DES FLUX**

## **ÉNERGÉTIQUES**

### III.1. Introduction

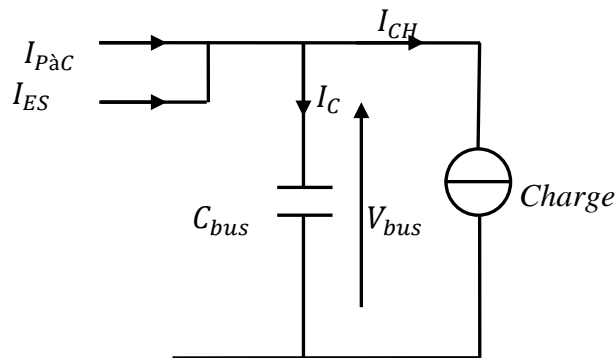
Le problème de la gestion des flux d'énergie est de trouver la meilleure répartition de puissance entre les sources d'énergie. L'existence de sources auxiliaires introduit des degrés de liberté supplémentaires pour atteindre la puissance requise. Cependant, cette affectation doit toujours répondre aux besoins de puissance du moteur et respecter les contraintes de fonctionnement (puissance de la PàC, état de charge limite de l'élément de stockage). Dans ce chapitre, on s'intéressera essentiellement au problème de la réduction de la consommation du carburant (l'hydrogène dans notre cas) pour un véhicule hybride, ceci peut être posé comme un problème de contrôle optimal : la consommation de carburant doit être minimisée sous les contraintes du système dynamique correspondant au dispositif de stockage d'énergie électrique.

Ce chapitre est organisé en trois parties : la première partie sera consacrée aux généralités sur la notion de la gestion de l'énergie, un bref état de l'art sur les techniques de gestion des flux énergétiques, la deuxième partie présente la commande optimale détaillée allant du principe de cette commande. Dans la troisième partie et afin d'atteindre les objectifs souhaités, on applique la stratégie de minimisation de la consommation équivalente à la deuxième architecture, d'autres stratégies de gestion de l'énergie sont discutées et comparées entre elles, l'enjeu est de trouver la solution qui s'approche le plus possible de cet optimum.

### III.2. Généralités sur les techniques de la gestion des flux énergétiques

#### III.2.1. La notion de la gestion des flux énergétiques

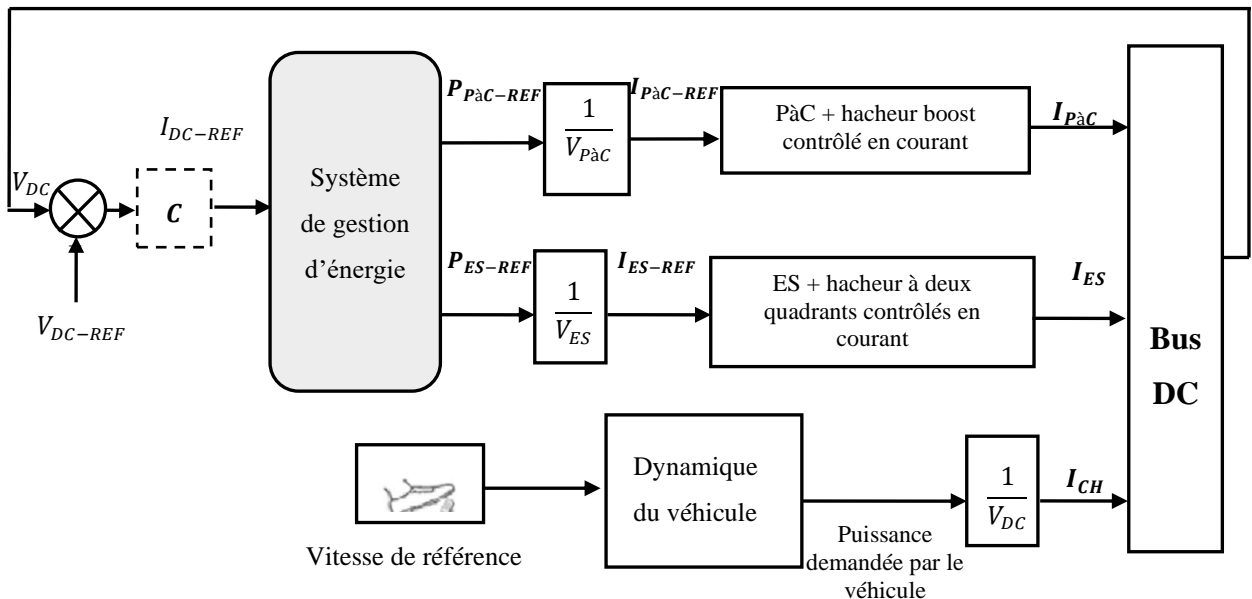
Dans notre système d'alimentation hybride (PàC, élément de stockage), les sources d'énergie sont connectées à un bus commun via les différents convertisseurs, ce bus est appelé DC bus (Direct Current Bus ou Bus à Courant Continu), comme le montre la figure III.1.



**Figure III-1** : Schéma électrique du bus continu.

La régulation de la tension du bus continu peut être satisfaite par action sur les deux sources d'énergie, en contrôlant la puissance fournie ou absorbée par chaque source à travers la régulation des courants de chaque source (voir la figure III.2).

La stratégie de gestion d'énergie est de partager la puissance en deux références entre la PàC et l'élément de stockage, de manière à répondre à la demande de puissance globale au niveau du bus continu en récupérant l'énergie de freinage et en maintenant un bus continu à tension constante.



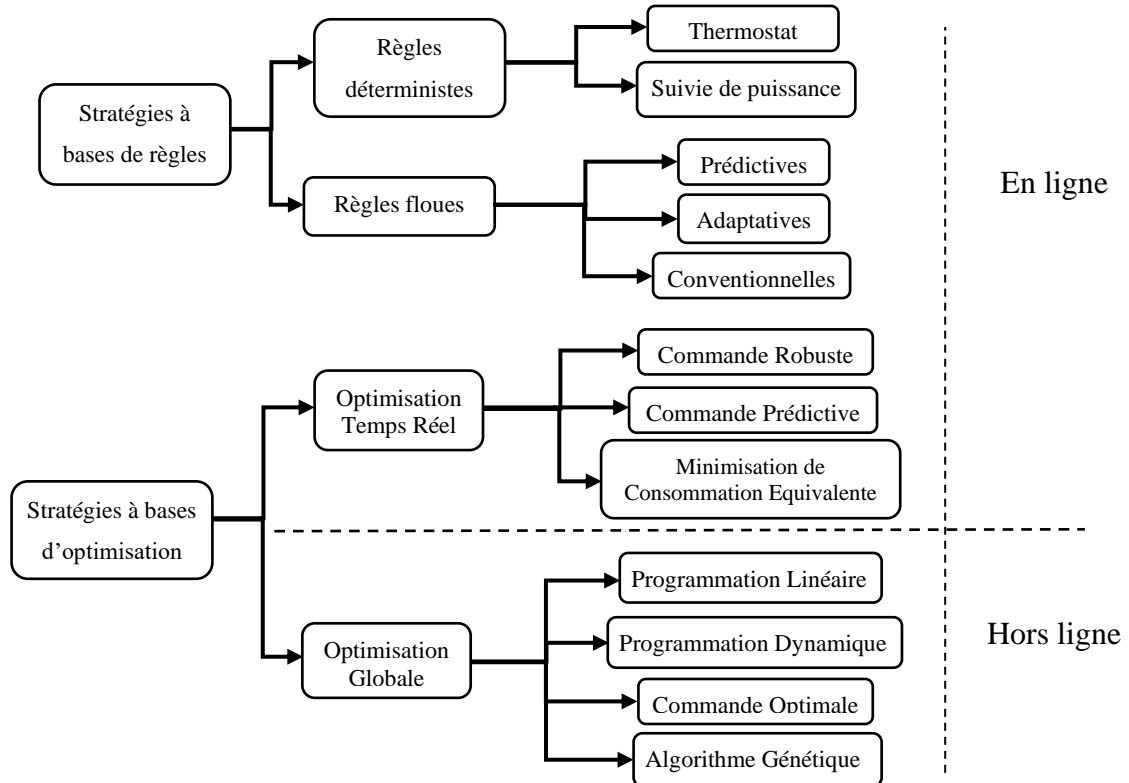
**Figure III-2** : Schéma global du contrôle de la gestion de l'énergie.

### III.2.2. Etat de l'art sur les techniques de la gestion de l'énergie

La gestion des échanges d'énergie dans la chaîne de traction d'un VH est un élément clé dans l'optimisation du fonctionnement des sources, principale comme la PàC (amélioration de la durée de vie, minimisation de la consommation en hydrogène, ...) ou auxiliaire comme les batteries (augmentation du nombre de cycles de recharge). On peut définir, pour gérer ces échanges énergétiques entre le bus continu, la source principale qui est la PàC et l'élément de stockage, trois régimes possibles de fonctionnement :

- ❖ Un régime dit de charge, pour lequel la PàC fournit de l'énergie aux ES et récepteur,
- ❖ Un régime dit de décharge, pour lequel la PàC et l'ES fournissent de l'énergie au récepteur,
- ❖ Un régime dit de récupération, pour lequel le récepteur fournit de l'énergie à l'ES [20].

La gestion de l'énergie peut être réalisée par différentes techniques qui peuvent être classées selon deux catégories : des stratégies hors ligne qui requièrent une connaissance à priori de la puissance demandée et des stratégies en ligne qui nécessitent uniquement des informations en temps réel.



**Figure III-3** : Classification des différentes stratégies de gestion de l'énergie dans un véhicule hybride [12].

### III.2.2.1. Stratégies hors ligne

Les méthodes hors ligne, sont des méthodes qui cherchent à optimiser la consommation du véhicule, en exigeant une connaissance préalable de la puissance demandée connue sur un intervalle de temps donné [12, 20]. Parmi ces méthodes on trouve :

#### Optimisation globale

Cette approche est basée sur la théorie générale de la commande optimale, qui permet de résoudre les problèmes d'optimisation, en proposant deux formulations majeures :

##### ❖ Programmation dynamique (PD)

Cette méthode est basée sur le principe de Bellman, qui est une technique utilisée pour trouver des solutions optimales à des problèmes non linéaires avec contraintes (généralement l'état de charge de l'élément de stockage) [20, 51], en utilisant des

algorithmes mathématiques plus ou moins complexes (équations récursives), ayant pour objectif de minimiser la consommation d'hydrogène dans un véhicule à PàC [29]. Cette technique souffre de son temps de calcul important même pour des problèmes d'optimisation simples [29, 52, 53].

#### ❖ **Commande optimale**

Similaire à la programmation dynamique, cette technique est basée sur le principe de *Pontriaguine*, qui minimise une fonction appelée l'Hamiltonien du système. L'avantage de cette méthode par rapport à la PD est que son temps de calcul est nettement réduit, ainsi les règles extraites de cette optimisation peuvent être utilisées pour développer des stratégies en ligne.

### **III.2.2.2. Stratégies en ligne**

Ces stratégies qui sont appelées « les lois de gestion empiriques » s'appuient soit sur un modèle expert, soit sur un modèle de connaissance. Elles ne prennent en considération que les contraintes en temps réel, il est donc impossible d'avoir une solution optimale. Elles sont basées sur des règles qui peuvent être optimisées (faible temps de calcul) [29]. L'inconvénient de ces méthodes est qu'elles n'assurent pas nécessairement l'optimalité [50]. Néanmoins, des méthodes d'optimisation en temps réel sont utilisées pour s'approcher le plus possible de l'optimum.

#### **Optimisation en temps réel**

Plusieurs techniques sont employées pour rendre les stratégies à base d'optimisation, en temps réel. On peut citer la technique de minimisation de consommation équivalente 'ECMS' (Equivalent Consumption Minimization Strategy). Elle tient compte de la consommation réelle du combustible (hydrogène) et d'une consommation fictive représentant l'énergie électrique nécessaire pour recharger l'élément de stockage tout en assurant la demande en puissance de la chaîne de traction. D'autres techniques de gestion d'énergie comme la commande prédictive, traitent les problèmes auxiliaires, à savoir la saturation du compresseur et le taux d'oxygène dans la PàC [12].

#### **Stratégies à bases de règles**

La notion d'optimisation est exclue dans ces stratégies mais la demande instantanée en puissance par la chaîne de traction est toujours assurée, tout en respectant la contrainte posée sur l'état de charge des éléments de stockage [12]. Leur principe est d'imposer des règles qui

permettent de satisfaire les différentes contraintes posées par le système. Ces stratégies sont divisées en deux catégories, les stratégies à base de règles déterministes et les stratégies à base de règles floues.

#### ❖ **Techniques à base des règles déterministes**

Ces algorithmes sont utilisés en raison de leur simplicité. Dans cette catégorie, nous pouvons mentionner la méthode appelée « thermostat » dans laquelle l'état de charge de l'élément de stockage est maintenu dans un intervalle bien choisi selon le type de batteries utilisées. Or cette stratégie ne peut pas satisfaire la demande de puissance du véhicule pour toute condition de fonctionnement, en plus de la négligence de l'optimisation de la consommation du combustible. Une seconde approche consiste à faire fonctionner la PàC au voisinage de son point de rendement maximal, une approche appelée MEPT (Maximum Efficiency Point Tracking) par référence au MPPT utilisée dans le cas des panneaux photovoltaïques ou des éoliennes. De même, cette méthode présente des limitations au niveau de la gestion des contraintes et surtout du maintien de l'état de charge de l'élément de stockage. A partir de ces constatations, un algorithme basé sur des règles est adopté en imposant une limite supérieure et inférieure à l'état de charge de l'élément de stockage, ainsi qu'une limite inférieure et supérieure à la puissance fournie par la PàC [12].

#### ❖ **Techniques à base des règles floues**

Une commande par logique floue est aussi envisageable pour ce genre d'applications, ceci permet de rendre la gestion d'énergie plus souple. Depuis l'introduction du concept de sous-ensembles flous dans la théorie de logique floue, par le Pr. *Zadeh* en 1965, cette théorie a connu un avancement remarquable. Son principe est de diviser l'espace de puissance et d'énergie en plusieurs niveaux augmentant la performance et la robustesse de l'algorithme. La plage de fonctionnement sera divisée en plusieurs niveaux appelés fonctions d'appartenance. A cause de la dynamique lente des auxiliaires de la PàC, un chevauchement entre ces niveaux aura lieu pour rendre la solution plus souple [12].



### III.3. Commande Optimale

#### III.3.1. Généralités sur la commande optimale

##### III.3.1.1. Introduction

On rencontre toujours dans notre vie des problèmes de commande optimale : comment arriver à une destination précise le plus rapidement possible ? comment minimiser la consommation de carburant dans les véhicules ? *etc.* [36]. Pour un système dynamique donné avec des équations connues, le problème de contrôle optimal est de trouver une commande qui minimise une norme spécifiée. Ainsi les domaines d'application sont multiples : l'aérospatiale, l'automobile, la robotique et les communications en général, mais aussi le secteur médical, chimique..., *etc.* [54, 55].

Pour modéliser un système, on peut avoir recours à des équations intégrales, différentielles, stochastiques, *etc.* Pour le contrôle d'un tel système qui dépend d'un paramètre dynamique, la théorie du contrôle est à l'interconnexion de nombreux domaines mathématiques. Les contrôles sont des fonctions ou des paramètres et sont généralement contraints. Une fois le problème de contrôlabilité résolu, on peut aussi minimiser un certain critère de l'état initial à l'état final ; c'est ce qu'on appelle le problème de contrôle optimal.

##### III.3.1.2. Historique

L'idée de base d'un contrôle optimal est très ancienne et est étroitement liée depuis la préhistoire. Elles ont été développées de manière indépendante et pratiquement simultanée, vers le milieu des années 1950, et elles continuent aujourd'hui d'avoir de nombreuses connexions, cette théorie est basée sur deux grandes formulations, la première est le principe du maximum, la deuxième étant la programmation dynamique [35].

La programmation dynamique est dérivée du principe de propagation de la lumière de Huygens : c'est le fameux principe de "source intermédiaire", qui explique les phénomènes de réflexion et de réfraction en supposant la propagation de l'ondelette sphérique secondaire générée par l'onde sphérique principale ; le principe d'Huygens est lui-même fondé sur le principe de Fermat qui postule que la lumière suit le trajet dont le temps de propagation est minimal [56].

Le principe du maximum est une extension de l'équation Hamiltonienne de la méthode du calcul des variations. Cette invention remonte à la solution du problème de la courbe de vitesse proposée par Jean Bernoulli en 1696 ; c'est aussi un problème du temps le plus court. Ce problème a d'abord été résolu par Jean Bernoulli lui-même (et d'autres scientifiques, dont ses frères Jacques Bernoulli, Leibniz et Newton), grâce à l'analogie de Huygens et au principe

d'application de la propagation de la lumière. Puis Euler, élève de Jean Bernoulli, systématisa sa solution à la demande de son professeur, posant les premiers fondements de la méthode des « petites variations » ; en l'occurrence, Euler, à cette occasion a ébauché à partir de considérations géométriques la méthode des « petits changements », Lagrange donna plus tard une forme d'analyse plus élégante [57]. Au milieu du XIXe siècle, un siècle plus tard, Weierstrass définit la notion de valeur extrême forte et établit les conditions nécessaires et suffisantes à l'existence d'une telle valeur extrême. Le principe de valeur maximale est la généralisation de la condition nécessaire de la valeur extrême forte de Weierstrass, qui est obtenue en remplaçant l'hamiltonien par le pseudo-hamiltonien. Constantine Carathéodory avait entrevu ce principe dès 1935, ou plus exactement, Magnus Hestenes l'avait entrevu en 1950 à cette époque. Cependant, c'est précisément sur la base de l'intuition de Pontriaguine et sous sa direction que le principe de la valeur maximale tel que nous l'entendons aujourd'hui est d'abord prouvé dans le problème du temps le plus court, puis dans le cas général. Auteurs : VG Boltyanskii, RV Gamkrelidze et LI Rozonoer entre 1955 et 1959. La mise en oeuvre de la technique des « variations en aiguille », déjà utilisée par James McShane en 1939, est néanmoins due à Boltyanskii, qui a également montré que le principe du maximum n'était qu'une condition nécessaire d'optimalité, et qui a donné au principe du maximum la forme qu'il a prise dans le célèbre livre de Pontriaguine et ses collaborateurs, paru en russe en 1961 [58, 59, 60] .

### III.3.1.3. Formulation du problème de la commande optimale

La théorie de la commande optimale régit des stratégies de commande pour minimiser une fonction coût pendant que l'état d'un système dynamique évolue. La commande optimale est une prolongation d'optimisation statique (par exemple, trouver les paramètres de commande qui définissent des maximums ou des minimums ordinaires des fonctions algébriques). Le problème général est de trouver une commande qui force les variables d'état d'un système à suivre des trajectoires dites optimales en minimisant une fonction coût [12, 35, 52].

On considère le problème de contrôle optimal :

$$PO \begin{cases} \min_{u \in U} \{ J(u) := \int_0^T l(t, x(t), u(t)) dt + q_f(t_f, x(t_f)) \} \\ \text{avec:} \\ \dot{x}(t) = F(t, x, u, p, w), & x(0) = x_0, \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

La stratégie de la commande optimale pour un système dynamique  $\dot{x}(t) = F(t, x, u, p, w)$  dont la variable d'état ' $x(t)$ ' et la commande ' $u(t)$ ' supposent que les paramètres ' $p$ ', les perturbations ' $w$ ' et les conditions initiales ' $x(0)$ ' sont connus avec précision. La commande optimale doit minimiser une fonction coût ' $J$ '. La fonction coût considérée est constituée de deux termes, une

fonction algébrique scalaire ' $q_f$ ' dont les arguments sont l'état final ' $x(t_f)$ ' et le temps final ' $t_f$ ', et une fonction intégrale scalaire dont les arguments sont la commande  $u$  et l'état  $x$ .

### III.3.1.4. Approche basée sur l'équation d'Euler-Lagrange

L'idée de Lagrange est d'introduire des variables additionnelles au même nombre que les éléments du vecteur  $F$  (ces variables, éléments d'un vecteur ' $\lambda$ ' sont appelées multiplicateurs de Lagrange ou l'état adjoint). Définissons tout d'abord l'Hamiltonien  $H$  associé au problème (PO), sous sa forme générale [56, 61] :

$$H(x, u, t, p) = l(x, u, t) + \lambda^T F(x, u, t) \quad (\text{III-2})$$

Le principe du maximum de Pontriaguine montre que la trajectoire optimale satisfait aux conditions suivantes :

- L'équation adjointe :

$$\dot{\lambda}(t) = - \frac{\partial H(x, u, t)}{\partial x} \quad (\text{III-3})$$

Lorsque l'état final est au repos, la valeur finale de l'état auxiliaire apparaît comme une condition. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda(t_f) = - \frac{\partial q_f(t_f, x(t_f))}{\partial x(t_f)} \quad (\text{III-4})$$

- La condition de transversalité est donnée par (minimisation de l'Hamiltonien par rapport à la commande) :

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0 \quad (\text{III-5})$$

Cette condition suppose qu'aucune contrainte n'est subie par la commande.

- L'équation d'état est :

$$\dot{x} = F(t, x, u) \quad (\text{III-6})$$

Avec la condition initiale  $x(t_0)$ .

Les équations (III-3) et (III-6) sont deux équations différentielles décrivant les dynamiques respectivement de l'état adjoint et de l'état. Alors que la condition initiale est donnée sur l'état, c'est une condition finale qui est énoncée sur l'état adjoint dans le cas où l'état final est libre. L'équation de transversalité (III-5) est une contrainte supplémentaire permettant d'exprimer la commande en fonction de l'état et de l'état adjoint ; elle ne s'exprime que si aucune contrainte n'est subie par la commande.

### III.3.1.5. Utilisation du principe d'optimalité de Bellman

Le principe d'optimalité de Bellman s'énonce de la façon suivante : « La stratégie optimale a la propriété que quels que soient l'état initial et le moment initial, les décisions restantes (c'est-à-dire les décisions de cet état initial et de ce moment initial) doivent également constituer une stratégie optimale. » [35].

Il découle de ce principe d'optimalité l'équation de programmation dynamique définie à partir de la notion de fonction de Bellman [35, 61] :

$$V(t, x) = \min_{u(s), t \leq s \leq t_f} \int_{t_0}^{t_f} l(s, x(s), u(s)) ds + q_f(t_f, x(t_f)) \quad (\text{III-7})$$

Avec la condition au temps final :  $V(t_f, x(t_f)) = q_f(t_f, x(t_f))$

Le principe d'optimalité permet d'écrire :

$$V(t, x) = \min_{u(t)} \left[ \int_t^{t+dt} l(s, x(s), u(s)) ds + \min_{u(s), t+dt \leq s \leq t_f} \int_{t+dt}^{t_f} l(s, x(s), u(s)) ds + q_f(t_f, x(t_f)) \right] \quad (\text{III-8})$$

$$V(t, x) = \min_{u(t)} \left[ \int_t^{t+dt} l(s, x(s), u(s)) ds + V((t + dt), x(t + dt)) \right] \quad (\text{III-9})$$

Au premier ordre nous avons :

$$\int_t^{t+dt} l(s, x(s), u(s)) ds = l(t, x(t), u(t)) dt + o(dt) \quad (\text{III-10})$$

Un développement au premier ordre de  $V(t + dt, x(t + dt))$  autour de  $(t, x(t))$  conduit à :

$$V(t + dt, x(t + dt)) = V(t, x(t)) + \frac{\partial V(t, x)}{\partial t} dt + \frac{\partial V(t, x)}{\partial t} F(t, x, u) dt + o(dt) \quad (\text{III-11})$$

Finalement en reportant les deux approximations (III-10) et (III-11) dans (III-9), on obtient :

$$V(t, x) = \min_{u(t)} \left[ l(t, x(t), u(t)) dt + \frac{\partial V(t, x)}{\partial t} dt + V(t, x(t)) + \frac{\partial V(t, x)}{\partial t} F(t, x, u) dt + o(dt) \right] \quad (\text{III-12})$$

En considérant la limite lorsque  $dt \rightarrow 0$ , on obtient finalement l'équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman exprimée par :

$$-\frac{\partial V(t, x)}{\partial t} = \min_{u(t)} \left[ l(t, x(t), u(t)) + \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} F(t, x, u) \right] \quad (\text{III-13})$$

Avec la condition au temps final :

$$V(t_f, x(t_f)) = q_f(t_f, x(t_f)) \quad (\text{III-14})$$

Pour un problème affine-quadratique en  $u$  :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = F(t, x, u) = f(t, x) + g(t, x)u \\ l(t, x, u) = L(t, x) + u^T M(t, x)u \end{cases} \quad (\text{III-15})$$

Avec :  $M = M^T > 0$

La commande optimale  $u^*$  peut être clairement exprimée en utilisant les conditions de stationnarité nécessaires :

$$\nabla_u \left\{ l(t, x, u^*) + \frac{\partial V}{\partial x} F(t, x, u^*) \right\} = 0 \quad (\text{III-16})$$

$\nabla$  est l'opérateur gradient.

Cette condition conduit à la forme explicite suivante :

$$u^*(t, x) = -\frac{1}{2} M(t, x)^{-1} g(t, x)^T \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \quad (\text{III-17})$$

L'équation de Hamilton-Jacobi-Bellman peut s'écrire :

$$-\frac{\partial V(t, x)}{\partial t} = L(t, x) - \frac{1}{4} \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} g(t, x) M(t, x)^{-1} g(t, x)^T \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} + \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} f(t, x) \quad (\text{III-18})$$

Avec la condition au temps final  $V(t_f, x(t_f)) = q_f(t_f, x(t_f))$

### III.3.2. Problème de l'optimisation et gestion d'énergie

#### III.3.2.1. Hypothèses sur le fonctionnement du système PàC

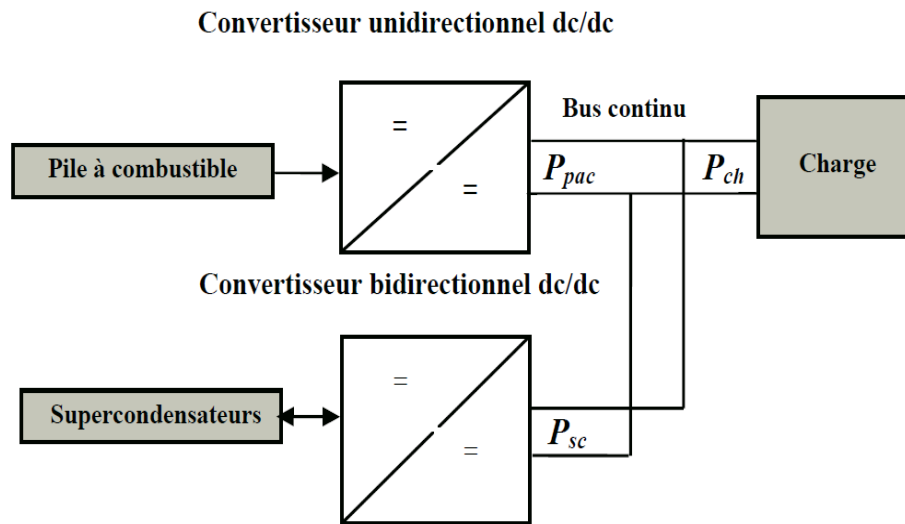
La première hypothèse concerne le démarrage à froid du système PàC. Dans l'approche proposée il est supposé que la PàC a déjà atteint sa température nominale de fonctionnement ( $T_{\text{PàC}} = 80^\circ\text{C}$ ) au début du cycle (démarrage à chaud). Cependant il convient de garder à l'esprit que la puissance du système PàC est réduite lors de son démarrage si elle n'a pas atteint sa température de fonctionnement nominal [16].

La deuxième hypothèse concerne le fonctionnement marche/arrêt du système PàC. Un fonctionnement par intermittence de la PàC est imaginable dans le but de réduire la consommation de l'hydrogène, le véhicule n'utilisant alors que l'énergie issue de la source secondaire pour sa propulsion. Cependant, lors de l'arrêt complet et du redémarrage du système PàC, il est difficile d'estimer le coût en termes de consommation de carburant. De plus, pour des durées d'arrêts prolongées, la PàC va se refroidir et sa puissance sera limitée lors de son redémarrage. Enfin, si un arrêt complet du système PàC est envisageable dans le cas d'un

véhicule hybride avec batteries, il devient difficile, voire impossible, d'employer ce mode de fonctionnement avec des SCs. En effet, l'énergie présente dans les SCs ne peut assurer la propulsion du véhicule que pendant quelques secondes seulement. Pour ces raisons, dans le cadre de cette étude, le système PàC n'est jamais arrêté et fonctionne au ralenti si aucune puissance ne lui est demandée. Le régime de ralenti se traduit par une réduction de la consommation d'hydrogène nécessaire à l'alimentation des composants auxiliaires [16].

### III.3.2.2. Formulation de problème de gestion de l'énergie

Dans un premier lieu on va étudier le problème de la gestion de l'énergie optimale dans un système électrique du véhicule constitué de deux sources électriques (PàC et SCs) et de deux convertisseurs DC-DC reliés à une charge par l'intermédiaire d'un bus continu (figure III.4).



**Figure III-4** : Système électrique du véhicule étudié.

L'optimisation de la gestion de l'énergie dans l'ensemble (PàC, SCs et charge) a pour objectif de minimiser l'énergie électrique fournie par la PàC à la charge durant un cycle de conduite vitesse /temps.

La puissance de la pile  $P_{pac}$  est limitée. Le rôle des SCs dans le véhicule est de fournir une puissance  $P_{sc}$  complémentaire pendant les phases transitoires.

Les SCs interviennent aux pics de puissance de charge (fortes accélérations du véhicule par exemple) et à la récupération de l'énergie lors du freinage du véhicule. L'état de charge des SCs doit être ramené à une valeur de référence à la fin de chaque cycle de fonctionnement pour commencer un autre cycle de conduite. Pour pouvoir appliquer la commande optimale à notre système durant l'intervalle de temps  $[t_0, t_f]$ , nous définissons :

- L'équation d'état : la variable d'état étant l'état de charge des SCs, nous choisissons l'équation d'état est alors celle qui régit son évolution [62].

$$\dot{SoC} = \frac{-i_{SC}}{C_{SC}V_{C,MAX}} \quad (III-19)$$

Condition sur l'état final : l'état de charge des SCs doit être ramené à la fin de cycle de fonctionnement à sa valeur initiale [63].

$$SoC(t_f) \rightarrow SoC(t_0) \quad (III-20)$$

Critère de coût : le coût à optimiser est l'énergie de la pile :

$$E_{pac} = \int_{t_0}^{t_f} P_{pac} dt \quad (III-21)$$

En considérant l'équation (II-33) l'état de charge des SCs peut s'exprimer par :

$$SoC = \frac{V_C}{V_{C,MAX}} \quad (III-22)$$

Donc la tension des SCs peut s'écrire comme suit [62] :

$$V_{SC} = SoC V_{C,MAX} - R i_{SC} \quad (III-23)$$

Et la puissance de SCs en remplaçant la tension dans l'expression de l'équation (II-34) se calcule comme suit :

$$P_{SC} = SoC V_{C,MAX} i_{SC} - R i_{SC}^2 \quad (III-24)$$

L'équation (III-21) devient :

$$E_{pac} = \int_{t_0}^{t_f} (P_{ch} - SoC V_{C,MAX} i_{SC} + R i_{SC}^2) dt \quad (III-25)$$

La taille des composants du SH impose des limites maximales et minimales sur la puissance échangée et le niveau d'énergie atteignable. Ces restrictions forment des contraintes d'inégalité :

$$P_{pac,min} \leq P_{pac}(k) \leq P_{pac,max} \quad (III-26)$$

Contraintes instantanées :

- la puissance  $P_{pac}$  de la pile est limitée, elle doit être comprise entre une valeur minimale  $P_{pac,min}$  que la pile doit fournir aux accessoires (compresseur d'air,..) et une valeur maximale  $P_{pac,max}$ .

$$SoC_{min} \leq SoC(k) \leq SoC_{max} \quad (III-27)$$

- $SoC_{max}$  et  $SoC_{min}$  les états de charge maximale et minimale pouvant être atteints par les SCs.

Sachant que le temps de réponse de la PàC est grand par rapport à d'autres sources d'énergies, par conséquent, elle ne supportera pas certaines pentes de puissance de charge (accélération).

Pour résoudre ce problème, la PaC fournira une puissance dont la pente maximale ne dépasse pas une certaine valeur. (À l'élévation et à la chute de la pente de puissance).

$$\Delta P_{pac,taux \text{ de chute}} \leq \frac{dP_{pac(k)}}{dt} \leq \Delta P_{pac,taux \text{ d'élévation}} \quad (\text{III-28})$$

### III.3.3. Utilisation de la théorie de la commande optimale en vue de la gestion de l'énergie

L'objectif de cette partie est de résoudre le problème de l'optimisation de la gestion de l'énergie par l'utilisation de la théorie de la commande optimale par l'équation d'Euler-Lagrange.

#### III.3.3.1. Technique fondée sur l'équation d'Euler-Lagrange

Notre objectif est de trouver la trajectoire de la puissance donc du courant de référence  $i_{sc}^*$  des SCs qui minimisera l'énergie fournie par la PaC en fonction de l'état de charge des SCs [64, 65].

Posons :

- $x = SoC$ .
- $u = i_{sc}$ .
- $x_{réf} = SoC(t_0)$ .
- $q_f(t_f, x(t_f)) = (x(t_f) - x_{réf})^2$ .
- $l(t, x, u) = P_{ch} - SoC V_{C,MAX} i_{sc} + R i_{sc}^2$ .
- $w(t) = P_{ch}(t)$ .

L'Hamiltonien est exprimé par :

$$H(t, x, u) = w(t) - V_{C,MAX} x u + R u^2 - \frac{\lambda}{C_{SC} V_{C,MAX}} u \quad (\text{III-29})$$

Nous avons à résoudre les quatre équations suivantes :

$$\dot{x} = -\frac{u}{C_{SC} V_{C,MAX}} \quad (\text{III-30})$$

$$\dot{\lambda} = V_{C,MAX} u \quad (\text{III-31})$$

$$-V_{C,MAX} x + 2R u - \frac{\lambda}{C_{SC} V_{C,MAX}} = 0 \quad (\text{III-32})$$

$$\lambda(t_f) = 2(x(t_f) - x_{réf}) \quad (\text{III-33})$$



Avec  $t_0 \leq t \leq t_f$

En dérivant chaque terme de (III-32) on obtient :

$$-V_{C,MAX}\dot{x} + 2R \dot{u} - \frac{\dot{\lambda}}{C_{SC}V_{C,MAX}} = 0 \quad (III-34)$$

En combinant (III-30), (III-31) et (III-34), on obtient :

$$2R \dot{u} = 0 \quad (III-35)$$

D'où :

$$u = k_h \quad (III-36)$$

$k_h$  est une constante réelle à déterminer.

La résolution de (III-30) en tenant compte de (III-36) donne :

$$x(t) = -\frac{1}{C_{SC}V_{C,MAX}}k_h(t - t_0) + x_0 \quad (III-37)$$

Avec  $x(t_0) = x_0 = SoC(t_0)$ .

En remplaçant (III-36) et (III-37) dans (III-32), on obtient :

$$\lambda(t) = V_{C,MAX}k_h(t - t_0) - C_{SC}V_{C,MAX}^2x_0 + 2R k_h C_{SC}V_{C,MAX} \quad (III-38)$$

Par la suite, la combinaison de (III-33) et (III-38) donne :

$$2(x(t_f) - x_{réf}) = V_{C,MAX}k_h(t_f - t_0) - C_{SC}V_{C,MAX}^2x_0 + 2R k_h C_{SC}V_{C,MAX} \quad (III-39)$$

Or,

$$x(t_f) = -\frac{1}{C_{SC}V_{C,MAX}}k_h(t_f - t_0) + x_0 \quad (III-40)$$

L'équation (III-39) devient :

$$2 \left[ -\frac{1}{C_{SC}V_{C,MAX}}k_h(t_f - t_0) + x_0 - x_{réf} \right] = V_{C,MAX}k_h(t_f - t_0) - C_{SC}V_{C,MAX}^2x_0 + 2R k_h C_{SC}V_{C,MAX} \quad (III-41)$$

Donc, l'expression de  $k_h$  peut être déterminée facilement à partir de l'équation (III-41) :

$$k_h = \frac{2(x_0 - x_{réf})C_{SC}V_{C,MAX} + C_{SC}^2V_{C,MAX}^3x_0}{-(C_{SC}V_{C,MAX}^2 + 2)(t_0 - t_f) + 2R C_{SC}^2V_{C,MAX}^2} \quad (III-42)$$

Enfin, la trajectoire du courant de référence  $i_{SC}^*$  des SCs est donnée par :

$$i_{SC}^* = \frac{-2SoC(t_f)C_{SC}V_{C,MAX} + (2C_{SC}V_{C,MAX} + C_{SC}^2V_{C,MAX}^3)SoC(t_0)}{-(C_{SC}V_{C,MAX}^2 + 2)(t_0 - t_f) + 2R C_{SC}^2V_{C,MAX}^2} \quad (III-43)$$

Nous remarquons que ce courant dépend de l'état de charge des SCs à l'instant  $t_0$ .

Dans la pratique, les variables d'état et les commandes d'un système sont soumises à des contraintes physiques ou économiques. Pour notre problème, la puissance  $P_{pac}$  de la pile est limitée (III-26). En exprimant la puissance de la pile en fonction de l'état de charge des SCs dans (III-26), on obtient :

$$P_{pac,min} \leq P_{ch} - SoCV_{C,MAX}i_{SC} + Ri_{SC}^2 \leq P_{pac,max} \quad (III-44)$$

Soit

$$P_{pac}^* = P_{ch} - SoC V_{C,MAX} i_{SC}^* + R i_{SC}^{*2}$$

Nous distinguons trois cas.

1<sup>er</sup> cas : le courant dans les SCs  $i_{SC}^*$ , exprimé par l'équation (III-43), vérifie les inéquations (III-44), elle constituera une commande optimale, ceci se traduit par :

$$i_{SC} = i_{SC}^* = \frac{-2SoC(t_f)C_{SC}V_{C,MAX} + (2C_{SC}V_{C,MAX} + C_{SC}^2V_{C,MAX}^3)SoC(t)}{-(C_{SC}V_{C,MAX}^2 + 2)(t_0 - t_f) + 2R C_{SC}^2V_{C,MAX}^2} \quad (III-45)$$

2<sup>ème</sup> cas :  $P_{pac}^* > P_{pac,max}$ , nous fixons  $P_{pac}$  à  $P_{pac,max}$  et nous calculons de nouveau le courant de référence :

$$i_{SC} = \frac{SoC(t)V_{C,MAX} - \sqrt{SoC^2(t)V_{C,MAX}^2 - 4R(P_{ch} - P_{pac,max})}}{2R} \quad (III-46)$$

3<sup>ème</sup> cas :  $P_{pac}^* < P_{pac,min}$ , nous fixons  $P_{pac}$  à  $P_{pac,min}$ , le courant de référence sera exprimé par :

$$i_{SC} = \frac{SoC(t)V_{C,MAX} - \sqrt{SoC^2(t)V_{C,MAX}^2 - 4R(P_{ch} - P_{pac,min})}}{2R} \quad (III-47)$$

Pour résumer ces trois cas, le courant de référence que les SCs doivent fournir à la charge pour minimiser l'énergie fournie par la pile en tenant compte de la limitation de la puissance de celle-ci, est donné par [63]:

$$\left\{ \begin{array}{ll} i_{SC} = \frac{SoC(t)V_{C,MAX} - \sqrt{SoC^2(t)V_{C,MAX}^2 - 4R(P_{ch} - P_{pac,max})}}{2R} & si : P_{pac}^* > P_{pac,max} \\ i_{SC} = i_{SC}^* & si : P_{pac,min} \leq P_{pac}^* \leq P_{pac,max} \\ i_{SC} = \frac{SoC(t)V_{C,MAX} - \sqrt{SoC^2(t)V_{C,MAX}^2 - 4R(P_{ch} - P_{pac,min})}}{2R} & si : P_{pac}^* < P_{pac,min} \end{array} \right. \quad (III-48)$$

### III.3.3.2. Résultats de simulation de la commande optimale appliquée à la gestion de l'énergie

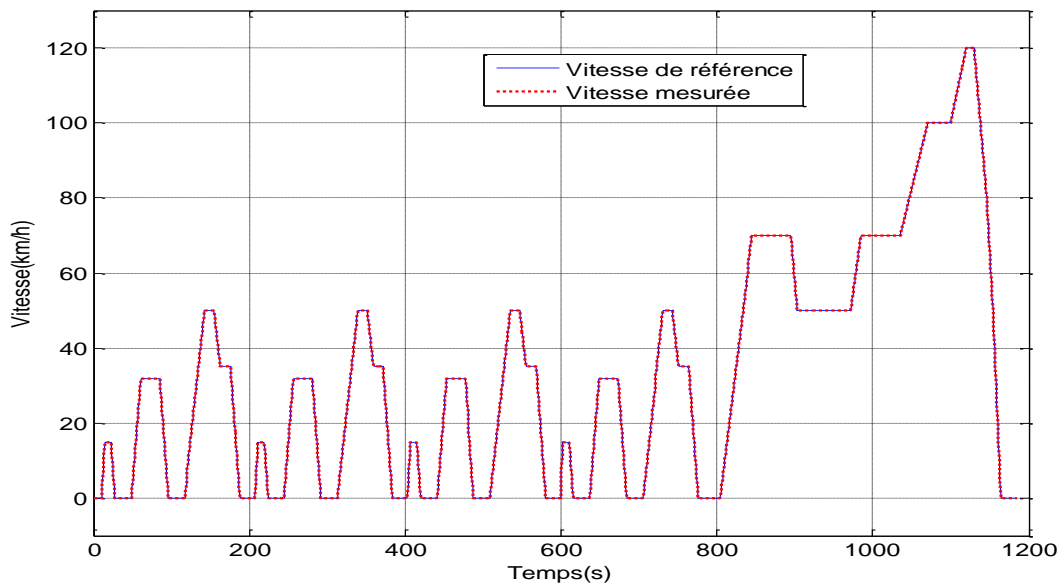
Nous avons effectué une simulation de la commande optimale à partir de l'équation (III-48), utilisant Matlab/Simulink, on suppose que l'état de charge de SCs en début des cycles est de 70%. Les paramètres de simulation sont donnés au tableau III-1. Les cycles de conduite considérés sont en annexe A.

**Tableau III-1** : Paramètres de simulation de la gestion de l'énergie optimisée.

Paramètre	Valeur
Capacité équivalente de SC	$C_{SC} = 21.27 \text{ F}$

Résistance série totale du module de SC	$R = 0.066 \ \Omega$
Tension maximale du SCs	$V_{C,max} = 360V$
Puissance maximale du PàC	$P_{pac,max} = 15Kw$
Puissance minimale du PàC	$P_{pac,min} = 800w$
Puissance de taux d'élévation	$\Delta P_{taux \ d'élévation} = 600 \ Ws^{-1}$
Puissance de taux de chute	$\Delta P_{taux \ de \ chute} = -900 \ Ws^{-1}$
Etat de charge de SC de référence (initial)	70 %

Afin d'illustrer le comportement de la stratégie proposée, les résultats de simulation correspondant au cycle NEDC sont donnés : la vitesse du véhicule et sa référence sur la figure III.5 ; les puissances échangées (la puissance fournie par le module de SCs, la puissance fournie par la pile et la puissance de charge) avec des zooms aux Figs III.6 ; 7 ; 8, l'évolution du SoC du module de SC à la Fig. III.9.



**Figure III-5** : La vitesse de véhicule avec la référence.

Le résultat de la Fig. III.5 montre que la vitesse suit bien sa référence, ce qui se traduit par les puissances échangées montrées par les figures ci-dessous où la somme des puissances fournie par la PàC et fournie ou absorbée par le module de SC assure la puissance demandée par la traction du véhicule tout en respectant les contraintes imposées par les sources d'énergie.

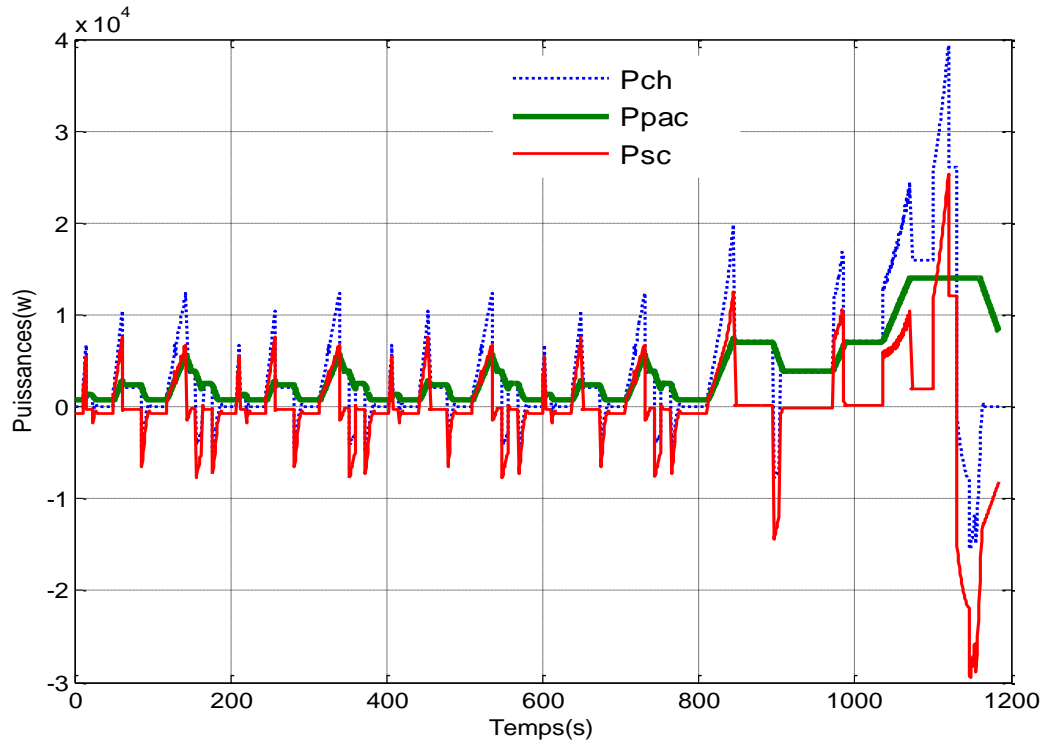


Figure III-6 : Courbes de puissances échangées dans le véhicule pour le cycle NEDC.

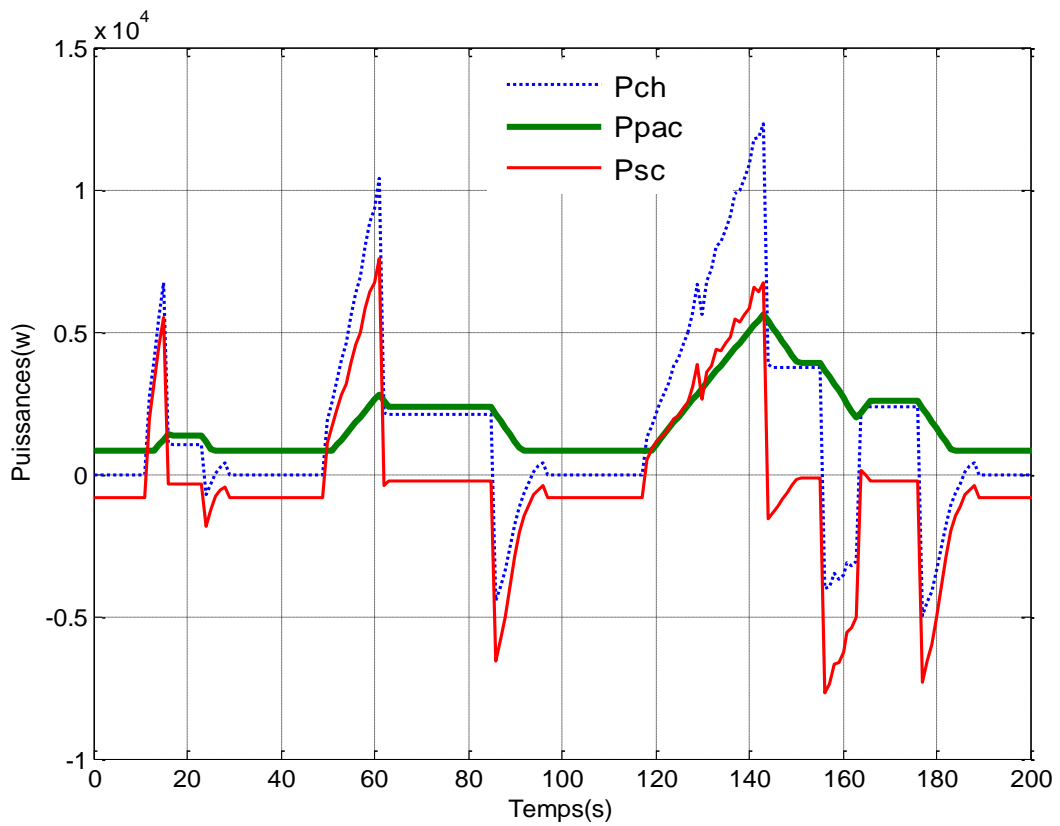
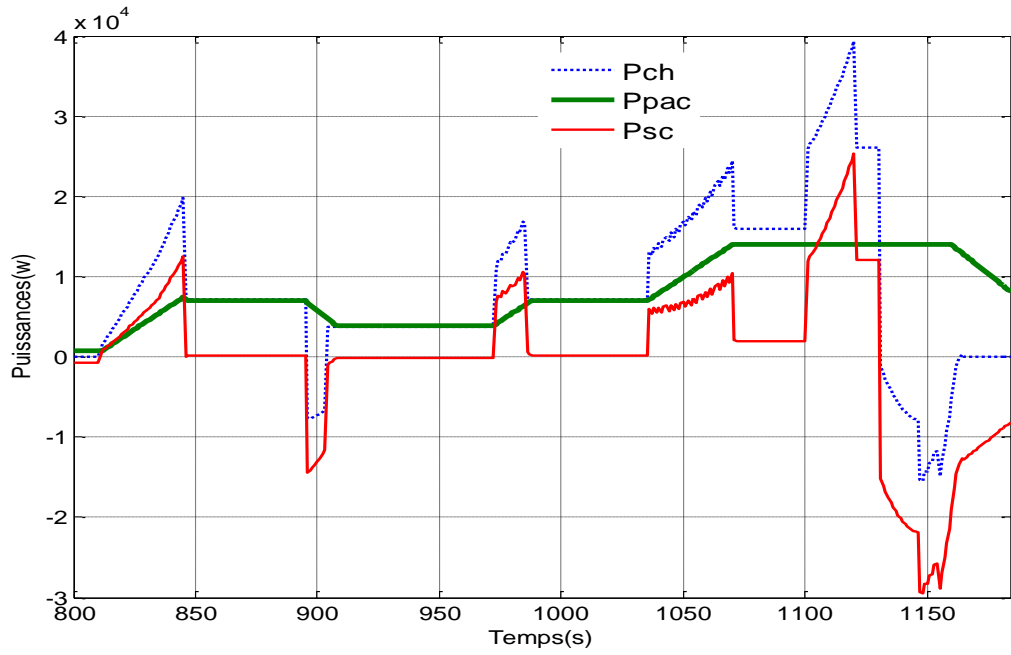
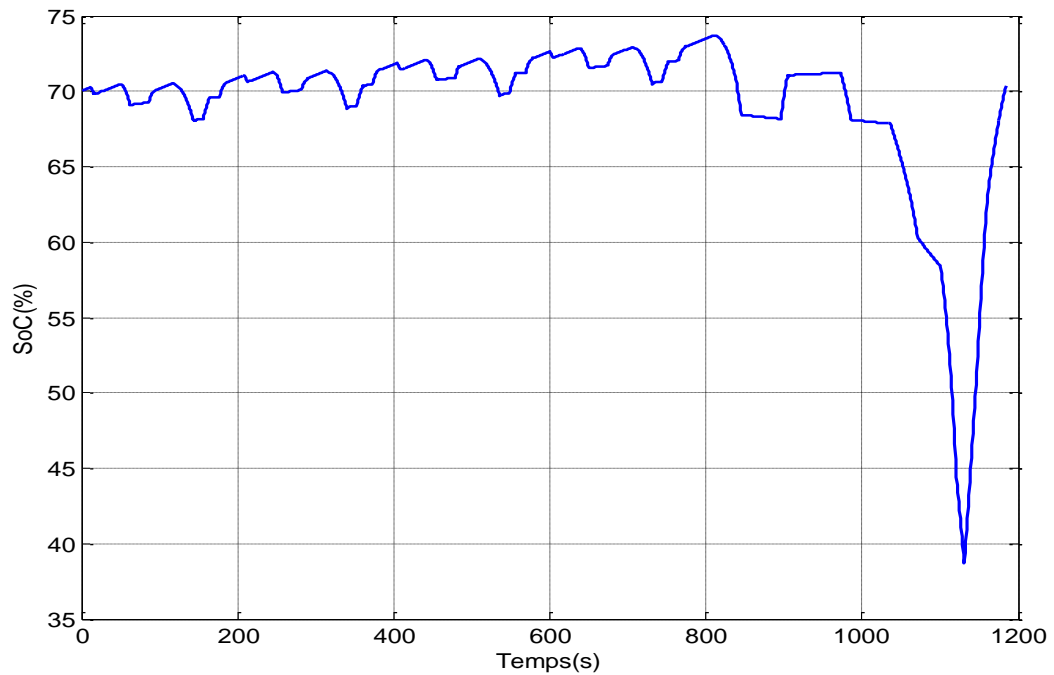


Figure III-7 : : Courbes de puissances échangées entre (0 et 200 s).



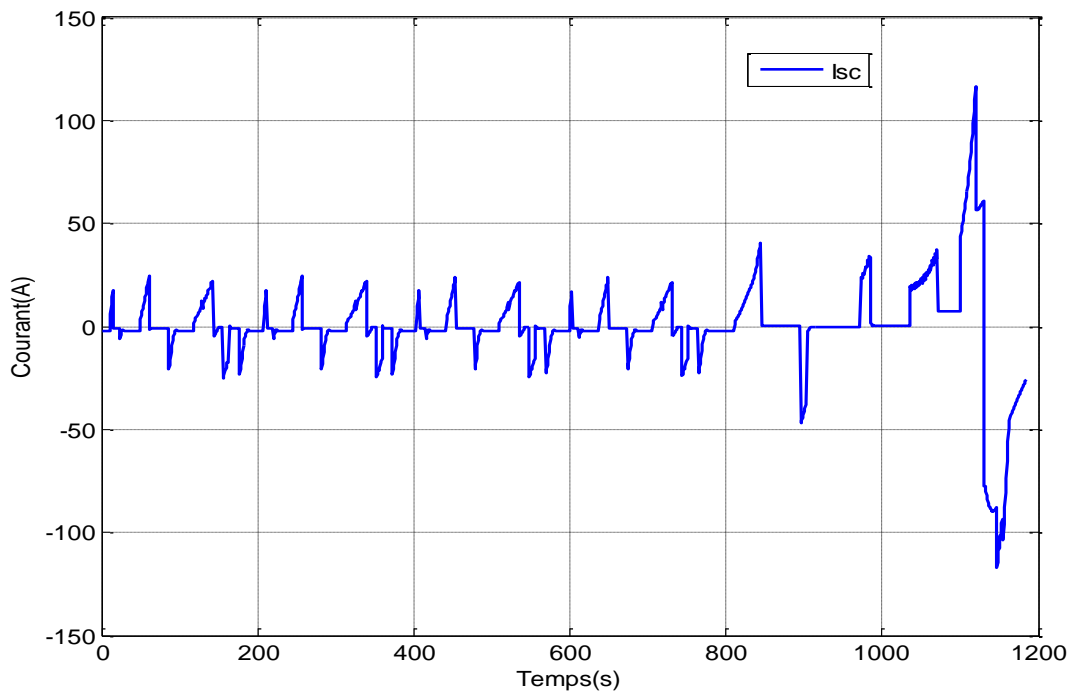
**Figure III-8** : Courbes de puissances échangées entre (800 et 1200 s).

D'après les zooms sur les puissances échangées (Figs. III.7, 8), nous remarquons que les contraintes sur le temps de réponse et la puissance de la pile sont respectées par la loi de la gestion adoptée.



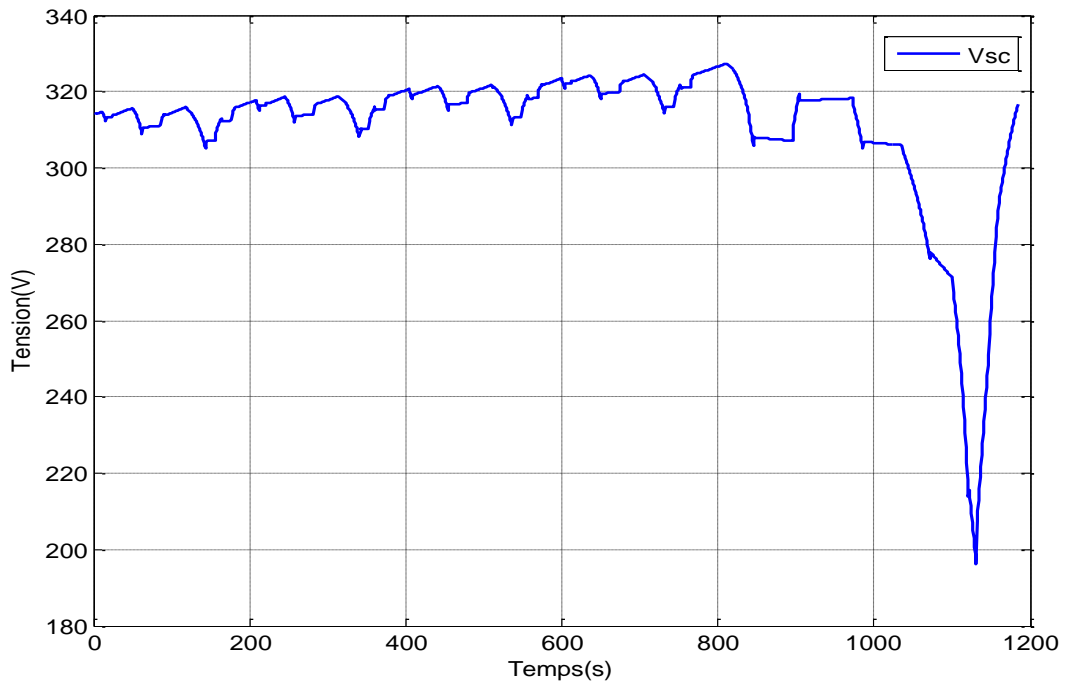
**Figure III-9** : L'évolution de l'état de charge du SC .

Le courant donné par le module de SCs qui minimise l'énergie fournie par la pile est illustré par figure III.10.



**Figure III-10** : Le courant de références du module de SCs durant le cycle de fonctionnement NEDC.

Le comportement de la tension aux bornes du module de SCs est donné par la figure III.11.



**Figure III-11** : Evolution de la tension aux bornes du module de SCs durant le cycle de fonctionnement NEDC.

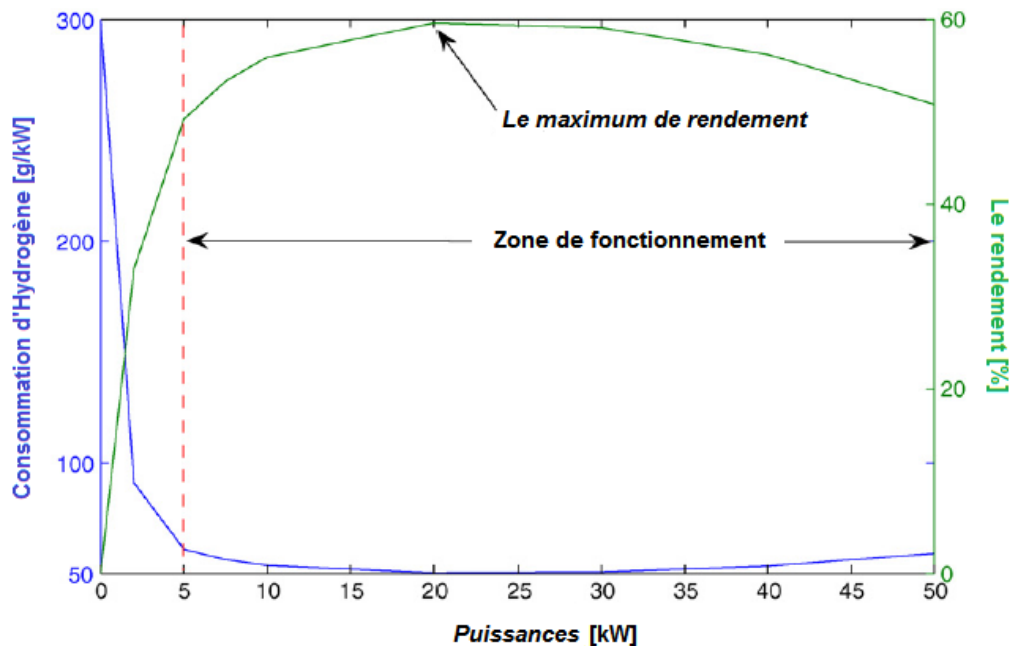
On voit bien que la tension du module de SCs revient à sa valeur de la consigne à la fin du cycle tant que cette tension est l'image de l'état de charge dans le module de SCs.

Pour bien évaluer cette technique de gestion de l'énergie en termes de consommation du combustible et le bon contrôle de l'état de charge de module de SCs, on a opté pour faire une étude comparative avec d'autres techniques de gestion qui se basent sur des règles déterministes afin de minimiser l'énergie fournie par la source principale, pour cela on a choisi une technique qui consiste à faire fonctionner la PàC dans une zone où la consommation est minimale (technique dite MEPT).

#### III.4. Gestion de l'énergie "basée sur des règles" ou heuristique

Afin d'avoir une première idée de l'économie du fuel que l'on peut faire en gérant judicieusement la répartition d'énergie entre source primaire et source secondaire, nous avons mis en place une première stratégie de type heuristique utilisée précédemment dans plusieurs travaux [25, 32, 66]. Comme évoqué précédemment, cette stratégie consiste à faire fonctionner la PàC dans une plage de puissance correspondant à un bon rendement, définie par les valeurs  $P_{pac,max}$  et  $P_{pac,min}$  (Fig. III.12). On fait aussi en sorte de maintenir l'état de charge de SC dans

un intervalle donné pour pouvoir fournir toute l'énergie requise en cas d'éventuelle accélération importante.



**Figure III-12** : Rendement et consommation d'Hydrogène d'une PEMFC en fonction de puissance [66].

Le comportement temporel de la PàC est fondamentalement conditionné par la dynamique du compresseur qui est une dynamique lente. Sans compter de la minimisation du combustible, un autre objectif important de cette stratégie est d'éliminer cet inconvénient. Dans ce sens, la stratégie de gestion de l'énergie agit comme suit : si la puissance demandée à la PàC excède un taux maximum d'élévation, alors le taux d'élévation de puissance que la PàC donne réellement est limité et le reste de puissance sera fourni par l'élément de stockage s'il est possible selon la valeur actuelle de SoC(t). Au contraire, si la puissance demandée à la PàC excède le taux maximum de chute, alors le taux réel de chute de puissance est limité et la puissance excédante sera absorbée par le SSE s'il y a une capacité de stockage suffisante [67].

On suppose que les points de fonctionnement de la PàC sont commandés, ainsi les paramètres externes tels que la température ambiante n'ont aucune influence sur le rendement.

La première stratégie proposée dans ce travail est une stratégie quasi-suivie de la charge où la PàC est actionnée dans une zone avantageuse où le rendement est en haut. Dans ce cas, la zone de fonctionnement est limitée entre la limite inférieure ( $P_{pac,inf}$ ) et la limite supérieure ( $P_{pac,sup}$ ). La limite supérieure est imposée par la puissance maximale que la pile peut fournir (c-à-d.,  $P_{pac,sup}=P_{pac,max}$ ), tandis que la limite inférieure est déterminée selon la courbe de rendement [68].

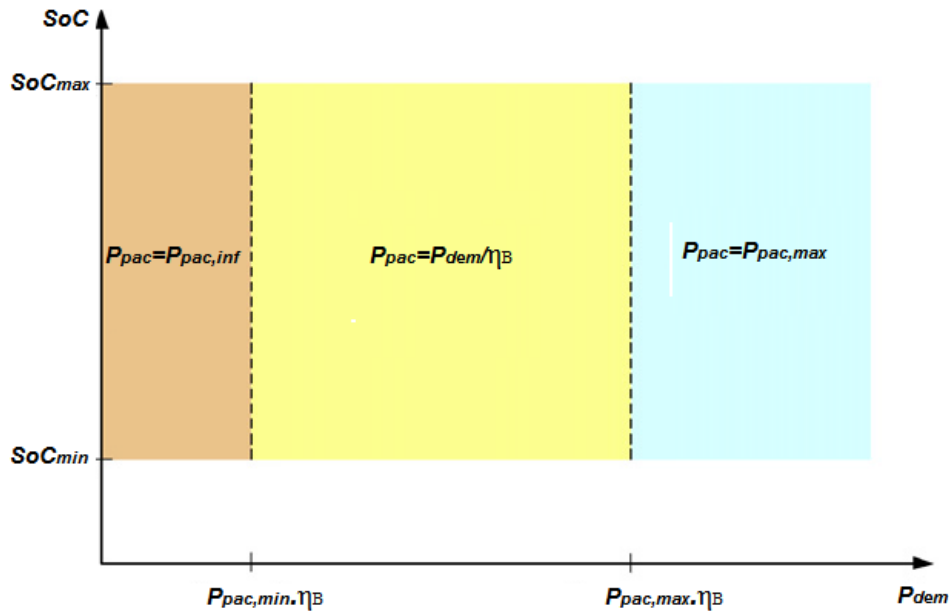


Dans la Fig. III.13, nous montrons comment déterminer les points d'opération de la PàC. Cependant, la transition entre les points de fonctionnement est limitée par les taux d'élévation et de chute, ainsi :

$$P_{pac}(k) = \begin{cases} P_{pac}(k-1) + \Delta P_{pac,taux \text{ d'élévation}} \Delta T, & \text{si } \Delta P_{pac}(k) \leq \Delta P_{pac,taux \text{ d'élévation}} \\ P_{pac}(k-1) + \Delta P_{pac,taux \text{ de chute}} \Delta T, & \text{si } \Delta P_{pac}(k) \geq \Delta P_{pac,taux \text{ de chute}} \end{cases} \quad (\text{III-49})$$

Où :

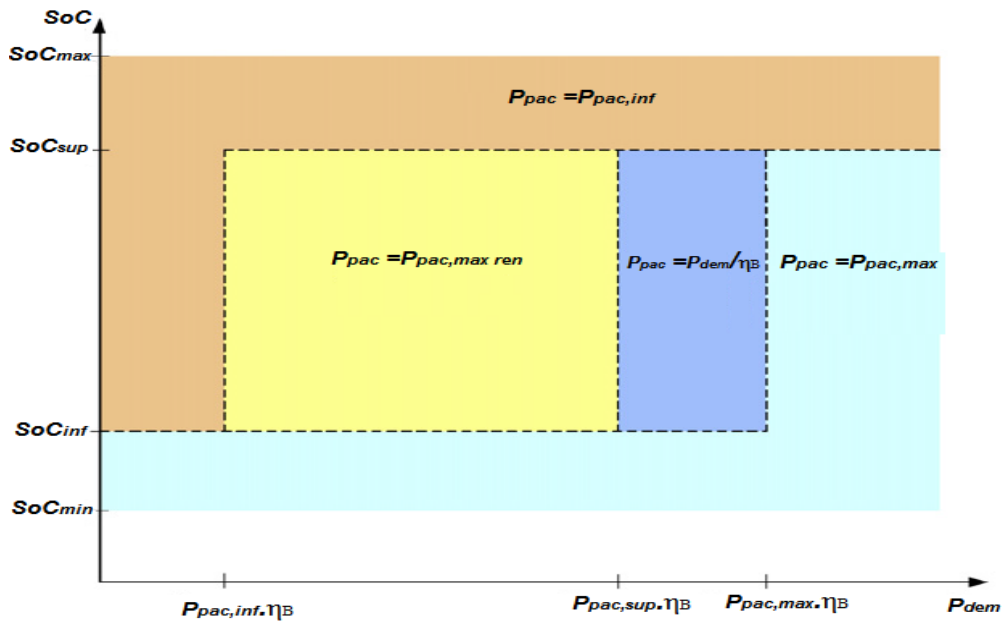
$$\Delta P_{pac}(k) = P_{pac}(k) - P_{pac}(k-1) \quad (\text{III-50})$$



**Figure III-13** : Points d'opération de la PàC pour la stratégie MEPT.

Une deuxième approche basée sur le même principe qui consiste à faire fonctionner la PàC de préférence dans ses points de rendement maximum afin d'améliorer la consommation de l'hydrogène, bien que le point final de fonctionnement de la PàC soit déterminé en se basant sur la demande réelle de puissance et l'état de charge du SC.

La Fig. III.14 indique les points de fonctionnement de la PàC en fonction de la puissance de charge. De la même manière que dans l'approche précédente, la transition entre les points de fonctionnement est réalisée selon les contraintes dynamiques de la pile (le taux maximum de puissance de chute et le taux maximum de puissance comme indiqué précédemment dans (III.49).



**Figure III-14** : Point de fonctionnement de la PàC pour la stratégie améliorée basée sur la caractéristique du rendement.

#### ❖ Résultats de simulation

Bien qu'on ait introduit ces deux techniques (MEPT et MEPT améliorée) pour faire la comparaison avec la gestion basée sur la commande optimale où on n'a pas pris en considération les pertes des convertisseurs DC/DC liés aux sources, idem pour l'élément de stockage, donc les paramètres de simulations sont montrés au tableau (III.2) avec des rendements unitaires.

**Tableau III-2** : Paramètres de simulation pour les techniques heuristiques.

Paramètre	Valeur
Puissance supérieure de la PàC	$P_{pac,sup} = 15Kw$
Puissance inférieure de la PàC	$P_{pac,inf} = 1Kw$
Etat de charge maximal	$SoC_{max} = 100\%$
Etat de charge minimal	$SoC_{min} = 20\%$
Etat de charge supérieur	$SoC_{sup} = 90\%$
Etat de charge inférieur	$SoC_{inf} = 30\%$
Puissance de taux d'élévation	$\Delta P_{taux\ d'élévation} = 600\ Ws^{-1}$
Puissance de taux de chute	$\Delta P_{taux\ de\ chute} = -900\ Ws^{-1}$
Le rendement maximal du système PàC	$\eta_{PàC,max} = 100\%$

Puissance de PàC correspond au $\eta_{pac,max}$	$P_{pac,max}$ de rendement = 6 kW
Le rendement du Boost	$\eta_B = 100\%$
Le rendement du Buck-Boost	$\eta_{B/B} = 100\%$
Le rendement du SC	$\eta_{ESS} = 100\%$

Les résultats de simulation sont montrés, la vitesse de véhicule avec sa référence, les puissances échangées dans le véhicule et l'évolution de l'état de charges de SC aux Figs. III.15-16-17 respectivement.

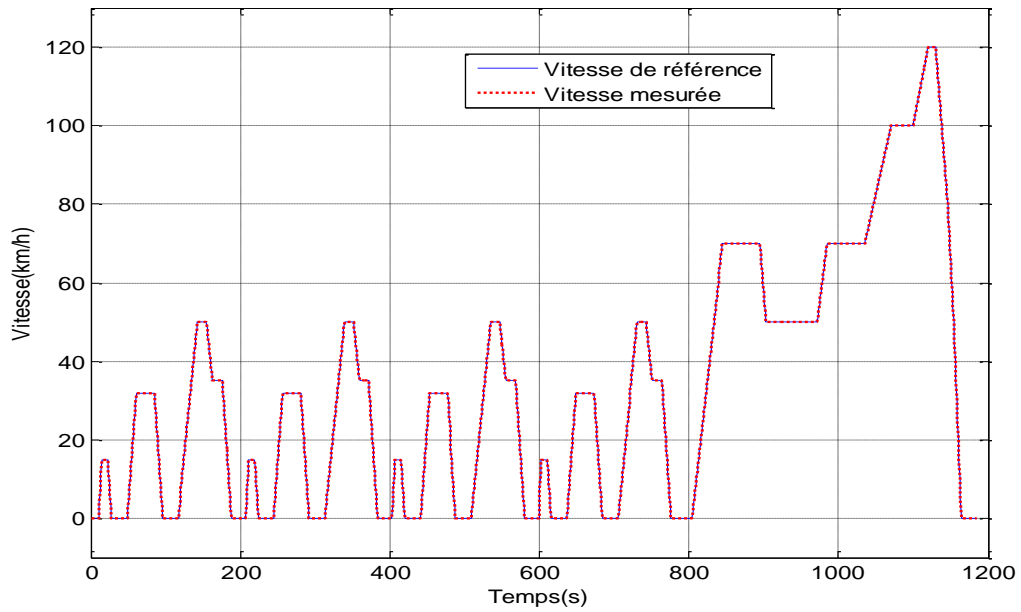


Figure III-15 : Vitesse de véhicule avec sa référence pour la stratégie MEPT.

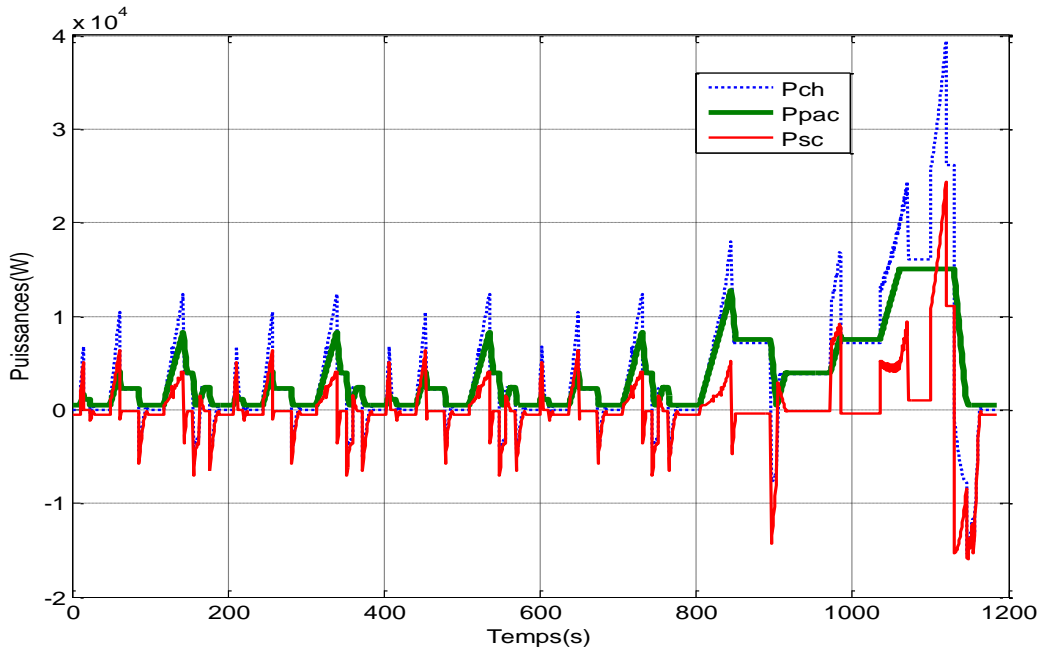
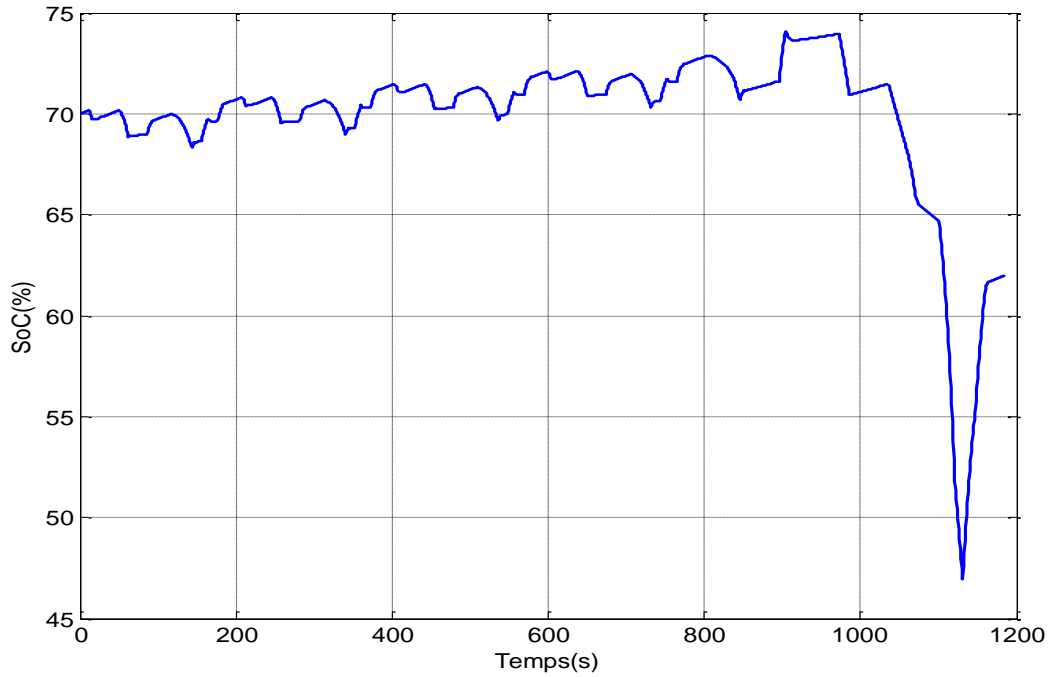
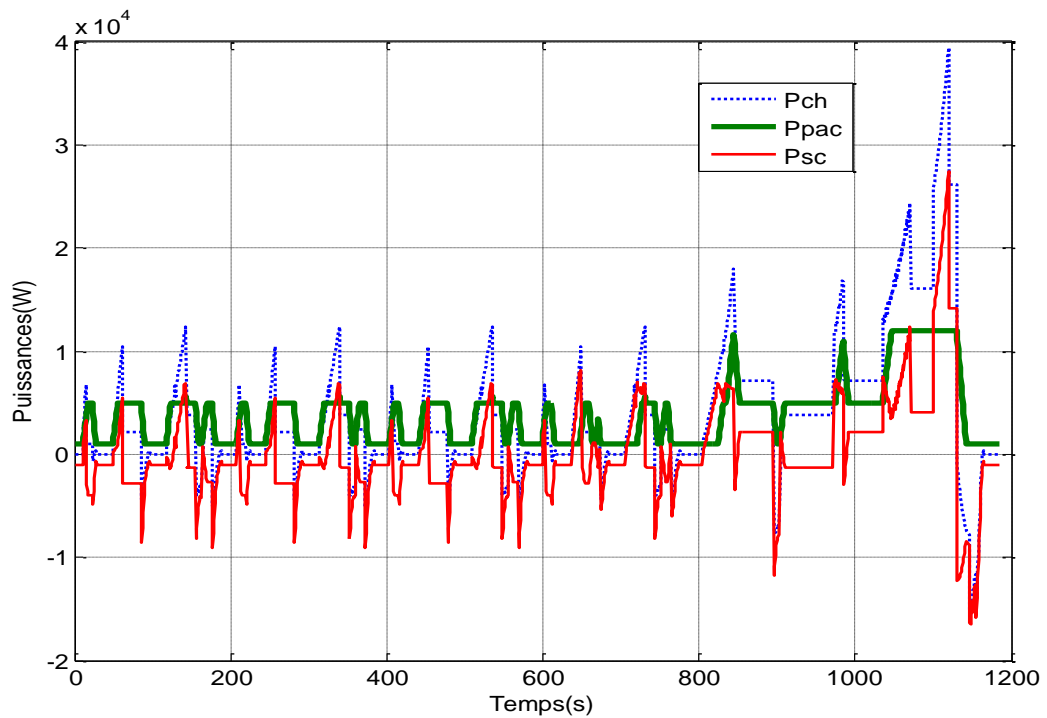


Figure III-16 : Courbes de puissances échangées pour la stratégie MEPT.

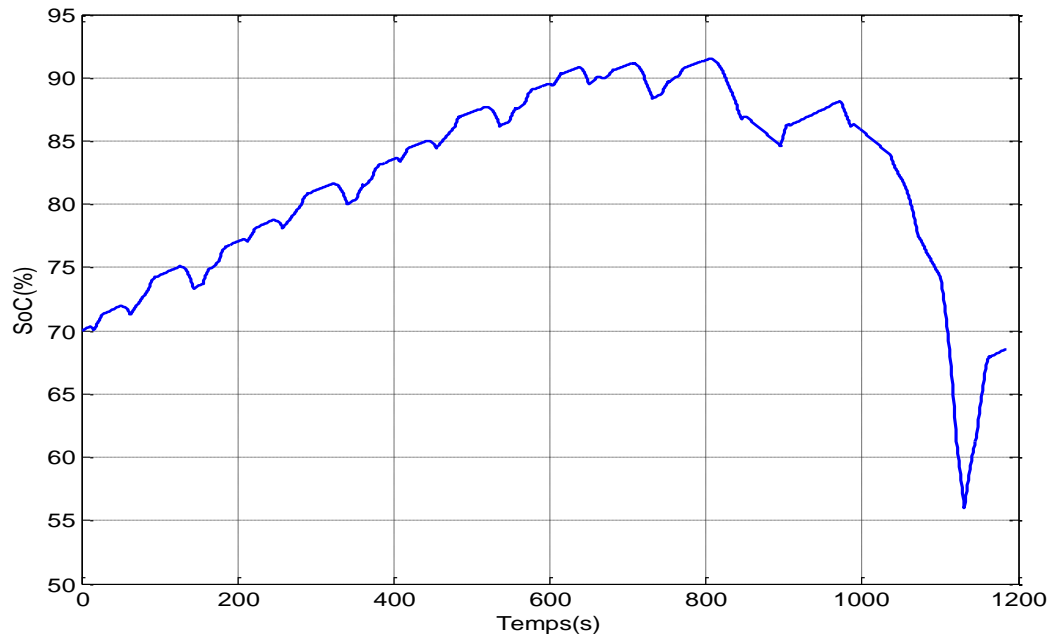


**Figure III-17** : L'évolution de l'état de charges de SC pour la stratégie MEPT.

De même pour la deuxième approche (MEPT) les résultats de simulation correspondent au cycle NEDC sont montrés aux figures. III.18, 19.



**Figure III-18** : Les puissances échangées pour la stratégie MEPT améliorée.



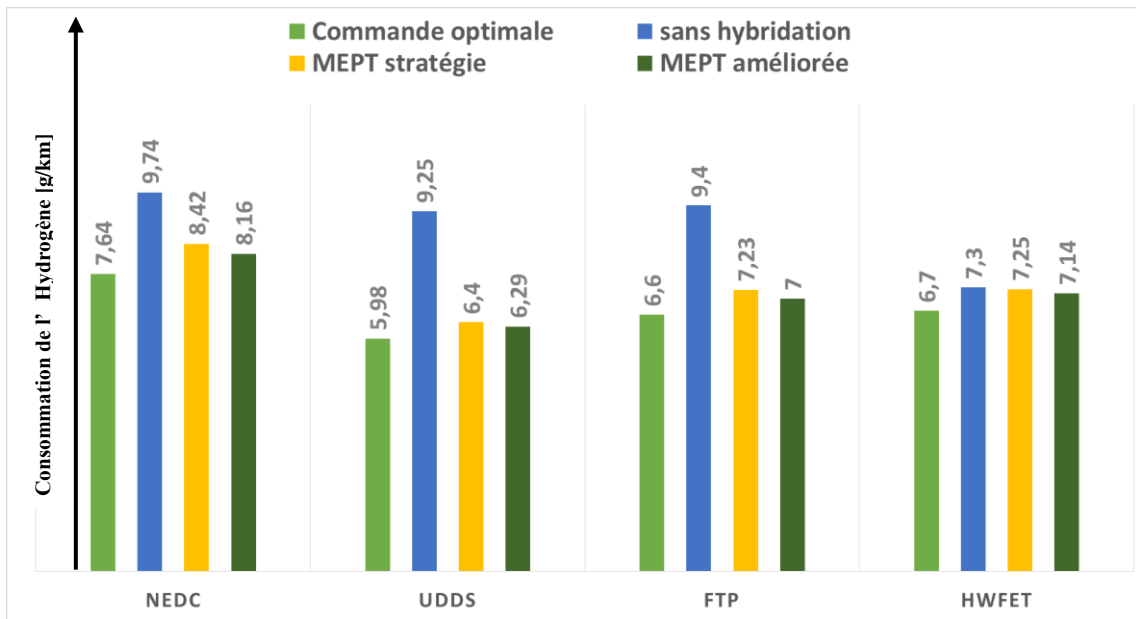
**Figure III-19** : L'évolution de l'état de charge de SC pour la stratégie MEPT améliorée.

#### ❖ Comparaison et Discussions

On observe que les deux stratégies arrivent bien à maintenir l'état de charge des SCs (dans l'intervalle  $[SoC_{min}, SoC_{max}]$ ), la valeur de l'état de charge final est laissée libre (pas de contrôle exact de celle-ci), les deux stratégies montrent un comportement satisfaisant. Ceci est aussi le cas pour tous les autres cycles testés. On peut observer qu'avec la stratégie "MEPT", la puissance de la pile est limitée à la puissance supérieure (15kW pour la stratégie MEPT, 12kW pour l'améliorée). Une analyse comparative des stratégies pour les quatre cycles, en termes de consommation d'hydrogène par cycle, est montrée dans la Fig. III.20. Le comparatif est fait en ce qui concerne le cas optimal (la stratégie basée sur la commande optimale). La méthode proposée pour évaluer cette consommation repose sur les hypothèses suivantes :

- La capacité de stockage dans le SSE est suffisante pour récupérer toute l'énergie disponible lors du freinage.
- Le frein de frottement n'est pas utilisé pendant le cycle entier.

L'analyse de l'économie d'hydrogène dans la Fig. III.20 montre que les trois stratégies ont de bonnes performances par rapport à la situation sans hybridation.



**Figure III-20 :** Comparaison de la consommation d'hydrogène (g/Km) des stratégies proposées.

La stratégie basée sur la commande optimale donne la meilleure exécution dans tous les cas ; cependant, l'exécution est semblable aux deux stratégies basées sur l'extrait de maximum du rendement. D'autre part, comparé au cas sans hybridation, les résultats montrent l'économie considérable d'hydrogène fonctionnant sur les cycles NEDC, UDDS, et FTP. Au contraire, le fonctionnement sur HWFET l'économie est exigüe. Ce dernier, une de ses caractéristiques est que la décélération moyenne est sensiblement inférieure (-0.22) que la correspondance aux autres cycles (NEDC : -0.79 ; UDDS : -0.58 ; FTP : -0.58). Ces résultats montrent que ces stratégies atteignent leurs objectifs de manière satisfaisante lorsqu'il y a de l'énergie lors de la phase de freinage. Il est remarquable qu'il soit possible de satisfaire la puissance de charge dans les quatre cycles de conduite avec une PaC de 20kW, ce qui est sensiblement inférieur à une PaC de 40kW qui est nécessaire si aucune hybridation n'est présente. Cet avantage serait traduit dans une réduction des coûts de production et de la consommation de l'hydrogène.

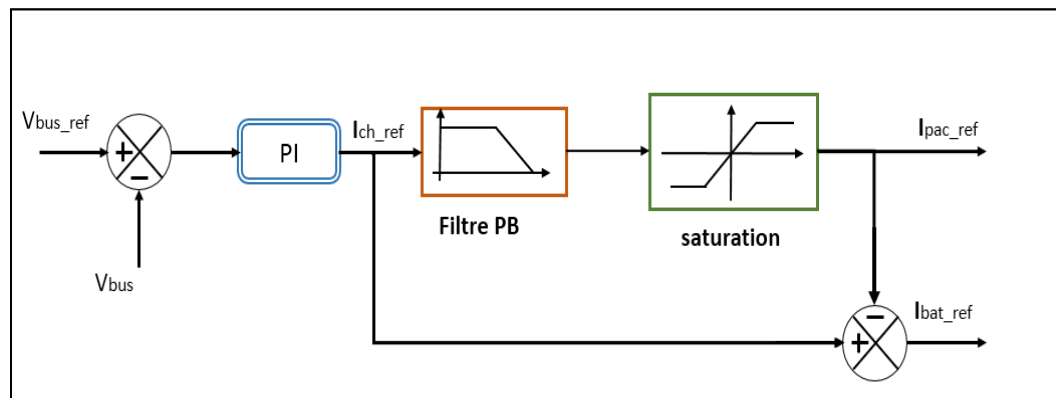
### III.5. Application de la gestion de l'énergie électrique sur la deuxième architecture

Dans cette partie, nous abordons la dernière phase du développement de notre travail par la mise en œuvre de la gestion de l'énergie appliquée à la deuxième architecture étudiée (la PaC avec un pack de batteries voire Fig. II.2, la première architecture qui est limitée à la simulation (à cause de la non-disponibilité d'un module de SC au laboratoire), c'est pourquoi on a retenu la deuxième structure afin de valider quelques résultats pratiquement. Cette partie

est organisée en trois phases, où nous exposons trois techniques choisies et étudiées pour faire une étude comparative. Nous commençons par la technique de gestion de l'énergie basée sur la séparation fréquentielle qui ne prend en compte que la dynamique lente de la PàC. Après, nous entamerons la gestion de l'énergie par la méthode thermostat qui est une stratégie standard, mais ne permet pas l'optimisation de la consommation d'énergie. A la fin, nous passons à la commande optimale avec la présentation de ses avantages et ses inconvénients.

### III.5.1. Gestion de l'énergie basée sur la séparation fréquentielle

Le principe de cette technique est de partager selon la fréquence, le courant demandé par le moteur de traction entre les deux sources d'énergie. Pour cela, après la régulation de la tension du bus continu, un filtre passe-bas est utilisé permettant de récupérer le courant de référence de la PàC ; le courant de référence de la batterie est la différence entre les deux courants (courant de la charge et courant de la pile). Ainsi, la batterie fournira les pics de puissance demandés par le moteur, et protégera la PàC contre les variations brusques qui peuvent causer sa destruction. La Fig. III.21 montre le schéma récapitulatif de cette technique.



**Figure III-21** : Gestion de l'énergie basée sur la séparation fréquentielle.

Les résultats de simulation de cette technique sont montrés aux figures ci-dessous. Nous choisissons la constante de temps du filtre passe-bas  $T=20$  s. Cette valeur doit être bien choisie afin de respecter le temps de réponse du système PàC.

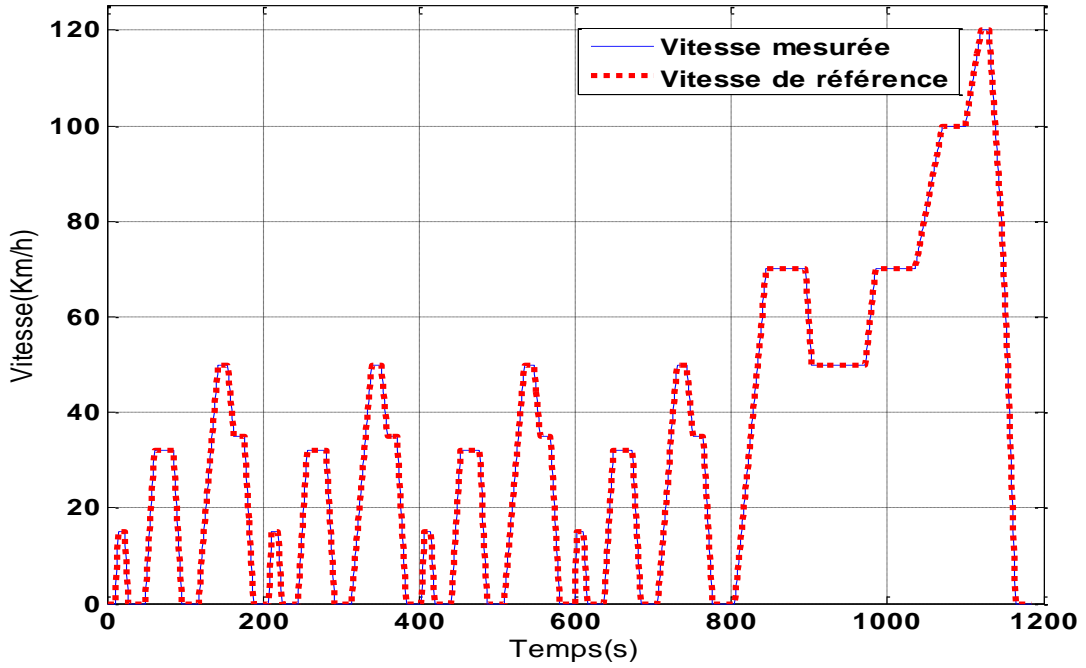


Figure III-22 : Vitesse de véhicule avec sa référence en appliquant la gestion basée sur la séparation fréquentielle.

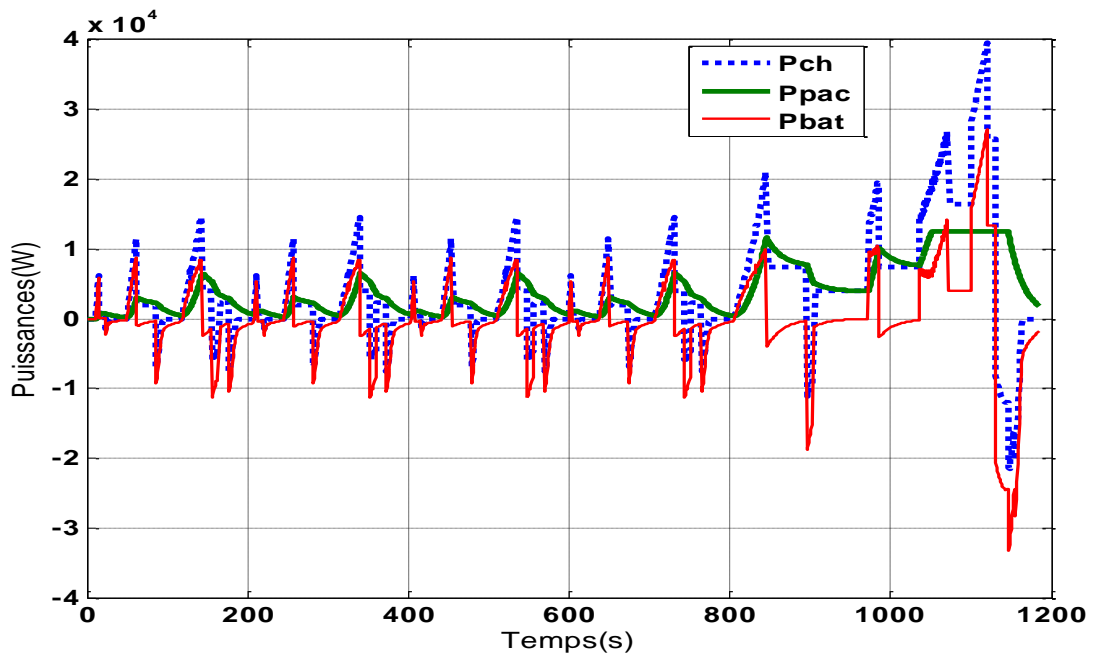
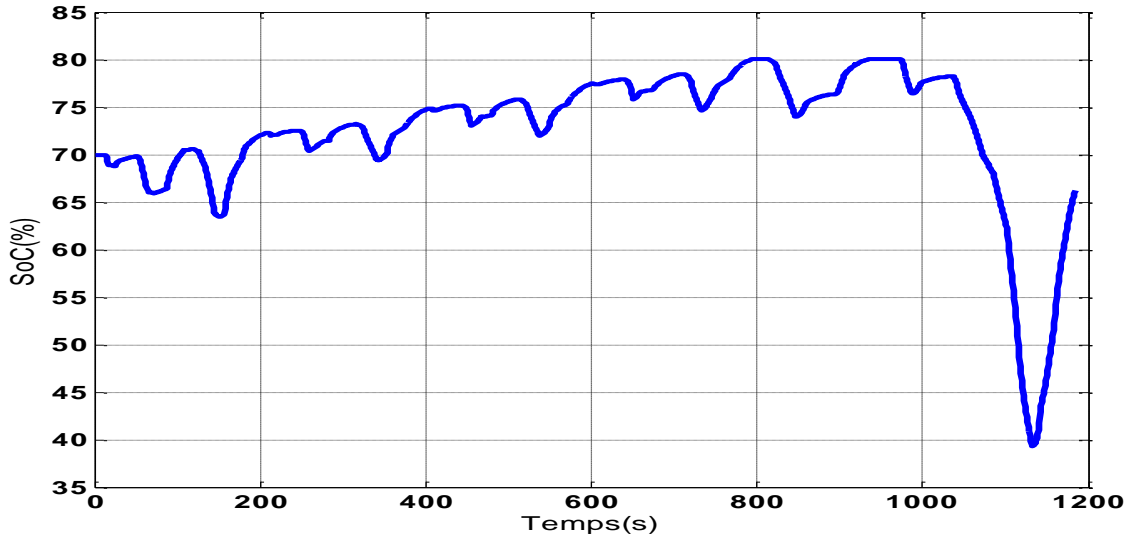


Figure III-23 : Les puissances échangées dans le véhicule par la séparation fréquentielle.

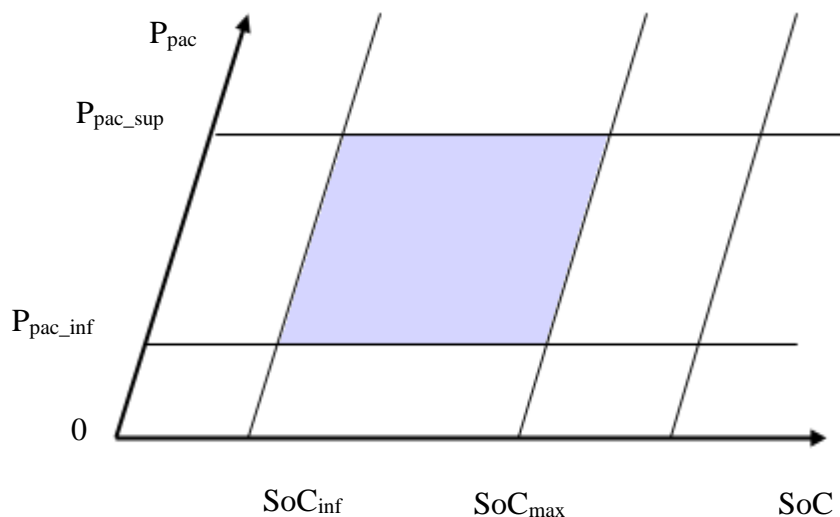




**Figure III-24** : L'évolution de l'état de charge de la batterie en appliquant la séparation fréquentielle.

### III.5.2. Gestion de l'énergie par thermostat

C'est une technique simple à implémenter, elle est basée sur l'imposition de certaines règles sur l'état de charge de la batterie et sur la puissance que la PàC est susceptible de fournir. Ainsi, l'état de charge est maintenu entre deux bornes, inférieure et supérieure prédéfinies  $SoC_{inf}$  et  $SoC_{sup}$  et deux autres bornes pour la puissance fournie par la PàC  $P_{PàC\_inf}$  et  $P_{PàC\_sup}$ . le schéma donné par la figure. III.25 montre le domaine de fonctionnement de cette stratégie.



**Figure III-25** : Limites supérieures et inférieures imposées sur l'état de charge et la puissance de la PàC.

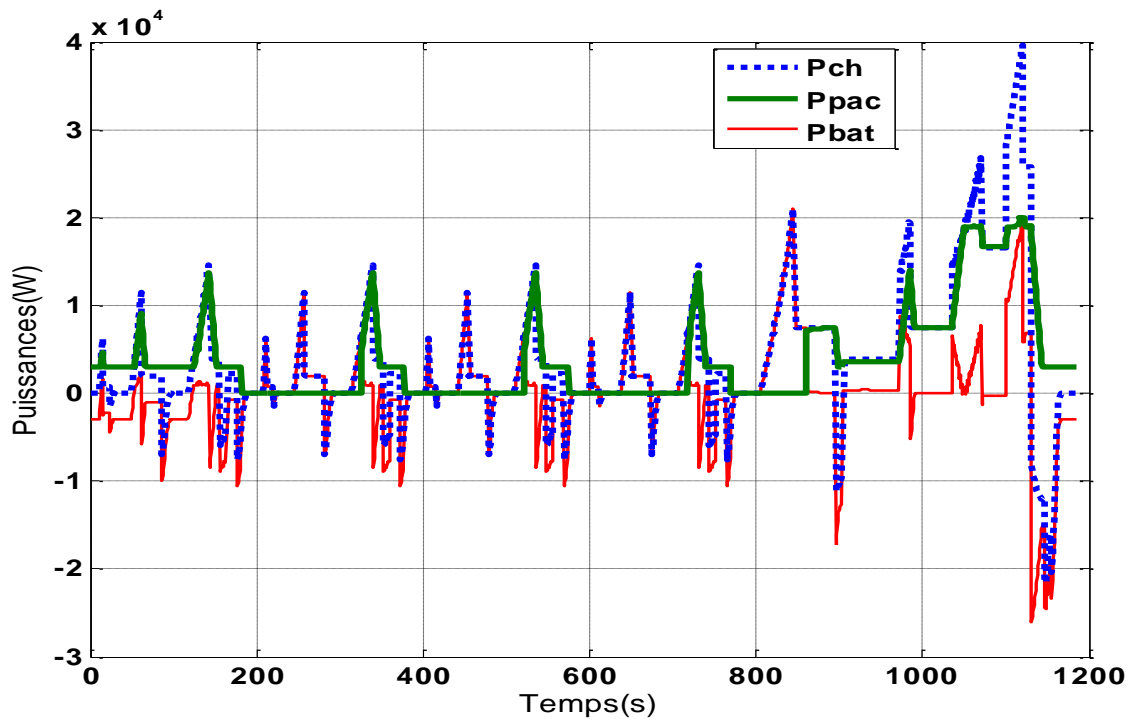
Cependant, cette technique ne peut pas satisfaire la demande de puissance du véhicule pour toute condition de fonctionnement (dans le cas où  $P_{ch} > P_{pac,max}$  et  $SoC < SoC_{min}$ ) ; de même aucune notion de minimisation de combustible n'est prise en compte par cette stratégie.

Les paramètres de la gestion d'énergie choisis sont cités dans le tableau (III.3) :

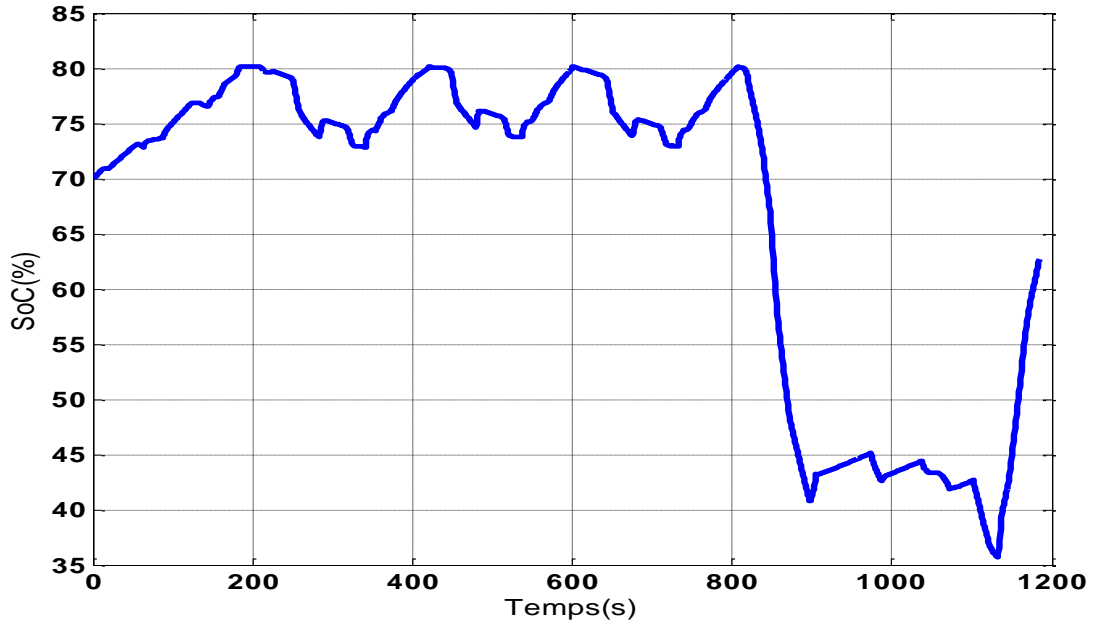
**Tableau III-3** : Paramètres choisis pour la technique thermostat.

Paramètre	Valeur
Puissance supérieure de la PàC	$P_{pac,sup} = 20Kw$
Puissance inférieure de la PàC	$P_{pac,inf} = 0Kw$
Etat de charge supérieur	$SoC_{sup} = 80\%$
Etat de charge inférieur	$SoC_{inf} = 30\%$

Les résultats de simulation de cette technique sont montrés aux Figs. III.26-27.



**Figure III-26** : Les puissances échangées par la technique thermostat.



**Figure III-27** : L'évolution de l'état de charge de la batterie par la technique thermostat.

### III.5.3 Gestion de l'énergie basée sur la minimisation de la consommation équivalente

Cette stratégie qui est basée sur le principe de Pontriaguine, minimise la fonction de l'Hamiltonien du système. Plusieurs critères de performance peuvent interférer avec le choix de cette répartition ; le critère le plus utilisé est la consommation de carburant. Ce critère est appelé aussi la fonction coût et il est exprimé comme suit [69] :

$$J = \int_{t_0}^{t_f} f(x(t), u(t), t) \quad (\text{III-51})$$

Nous considérerons le SoC où la variable d'état est la batterie, en sélectionnant la puissance fournie par la PàC comme variable de contrôle, dans ce cas l'équation pour contrôler la dynamique du système est [70, 71, 72] :

$$\dot{SoC} = -\frac{i}{Q_{bat}}, i = \frac{V_{bat} - \sqrt{V_{bat}^2 - 4R_{bat}P_{bat}}}{2R_{bat}} \quad (\text{III-52})$$

D'autre part, le SH doit assurer la demande instantanée en puissance, ce qui se traduit par la contrainte d'égalité suivante [73]:

$$P_{ch}(t) = P_{pac}(t) + P_{bat}(t) \quad \forall t \quad (\text{III-53})$$

Le dimensionnement des éléments constitutifs du SH impose des limites maximales et minimales, sur les puissances échangées et les niveaux d'énergies pouvant être atteints. Ces limites forment les contraintes d'inégalité exprimées comme suit :

$$P_{pac,min} \leq P_{pac}(k) \leq P_{pac,max}$$

$$\Delta P_{pac,taux \text{ de chute}} \leq \frac{dP_{pac}(k)}{dt} \leq \Delta P_{pac,taux \text{ d'élévation}} \quad (\text{III-54})$$

$$SoC_{\min} \leq SoC(k) \leq SoC_{\max}$$

$P_{pac,max}$  et  $P_{pac,min}$  sont respectivement les puissances minimale et maximale fournies par la PàC.  $SoC_{max}$  et  $SoC_{min}$  sont les états de charge maximal et minimal pouvant être atteints par la batterie. Ceci permet aussi de respecter la dynamique lente de la PàC lors des variations brusques de la demande de puissance par la charge (accélérations). Pour cela, la pile fournira une puissance dont la pente maximale ne dépassera pas une valeur à déterminer. (À l'élévation  $\Delta P_{taux \text{ d'élévation}}$  et à la chute  $\Delta P_{taux \text{ de chute}}$  de la pente de puissance).

Une autre condition est imposée au système afin de garantir le maintien de l'état de charge de la batterie. A ce propos, nous allons considérer que l'état de charge de cet élément à la fin de l'horizon de temps étudié est égal à son état initial [12] :

$$SoC(t_0) = SoC(t_f) \quad (\text{III-55})$$

Comme mentionné précédemment, le contrôle de gestion optimale de l'énergie en ligne vise à réduire la consommation de carburant à un intervalle de temps. La consommation électrique du réservoir de carburant peut être calculée en fonction du potentiel de production et de la puissance totale de la PàC. La fonction de coût qui doit être maintenue à une valeur minimale est représentée dans l'équation suivante [74] :

$$Cons_{H_2}(t) = \text{Min} \sum_{t_0}^{t_f} \frac{P_{pac}(t_i)}{\eta(P_{pac}(t_i))} \Delta t_i \quad (\text{III-56})$$

$\Delta t_i$  est la période d'échantillonnage.

Le rendement de la PàC est proportionnel à sa tension, il peut se déterminer par [12] :

$$\eta_{Pac} = \frac{V_{pac}}{1.48N_{cell}} \quad (\text{III-57})$$

Par conséquent, le problème d'optimisation est basé sur ECMS ; c'est pourquoi une fonction de coût supplémentaire pour charger les batteries par la PàC est ajoutée, la nouvelle fonction de coût est donnée par [75] :

$$Cons_{H_2_{new}}(t_i) = Cons_{H_2}(P_{pac}(t_i)) + Cons_{H_2_{equi}}(P_{bat}(t_i)) \quad (\text{III-58})$$

La nouvelle fonction de coût est expliquée comme suit :

Au départ, si la puissance des batteries est négative ( $P_{bat} < 0$ ), cela signifie que la charge des batteries est activée, alors  $Cons_{H_2_{equi}}(P_{bat}(t_i))$  peut être considéré comme de l'hydrogène

économisé. Les batteries n'auront pas besoin d'être rechargées plus tard, ce qui réduit la consommation de carburant. En revanche, si la puissance des batteries est positive ( $P_{bat} > 0$ ), alors  $Cons_{H_2_{equi}}(P_{bat}(t_i))$  peut être considéré comme la quantité d'hydrogène que la PàC consommera plus tard pour reconstituer l'état de charge de la batterie.

L'expression suivante peut être utilisée pour déterminer l'équivalent hydrogène consommé par la batterie :

$$Cons_{H_2_{equi}}(P_{bat}(t_i)) = \frac{Cons_{H_2}(P_{pac\_Moy})}{\eta_{bat}} \cdot \frac{P_{bat}(t_i)}{P_{pac\_Moy}} \quad (III-59)$$

Où ( $P_{pac\_Moy}$ ) est la puissance moyenne de la PàC définie comme la puissance que la pile devra offrir plus tard pour charger les batteries ou comme la puissance à délivrer plus tard par les batteries pour restaurer le SoC, et  $Cons_{H_2}(P_{pac\_Moy})$  est la consommation moyenne d'hydrogène, qui est calculée à l'aide de la courbe de consommation de la PàC (figure III.12).

Le rendement du pack de batteries peut se calculer par [75] :

$$\eta_{bat} = \begin{cases} \frac{1}{2} + (1 + \sqrt{1 - \frac{4R_{bat}P_{bat}}{E_0^2}}), & P_{bat} \geq 0 \\ \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \frac{4R_{bat}P_{bat}}{E_0^2}}}, & P_{bat} < 0 \end{cases} \quad (III-59)$$

Un coefficient de pénalité est ajouté à l'Éq. (III-60) pour régler le SoC de la batterie, et la nouvelle fonction de coût peut être formulée comme suit :

$$Cons_{H_2_{new}}(t_i) = Cons_{H_2}(P_{pac}(t_i)) + p \cdot \frac{Cons_{H_2}(P_{pac\_Moy})}{\eta_{bat}} \cdot \frac{P_{bat}(t_i)}{P_{pac\_Moy}} \quad (III-61)$$

Le coefficient de pénalité  $p$  est défini dans [75] :

$$p = \begin{cases} \left(1 - \frac{2*(SoC - SoC(0))}{SoC_{MAX} - SoC_{MIN}}\right)^4, & SoC_{MAX} \leq SoC \leq SoC_{MIN} \\ \left(1 - \frac{2*(SoC - SoC(0))}{SoC_{MAX} - SoC_{MIN}}\right)^{20}, & SoC < SoC_{MIN} \text{ } SoC > SoC_{MAX} \end{cases} \quad (III-62)$$

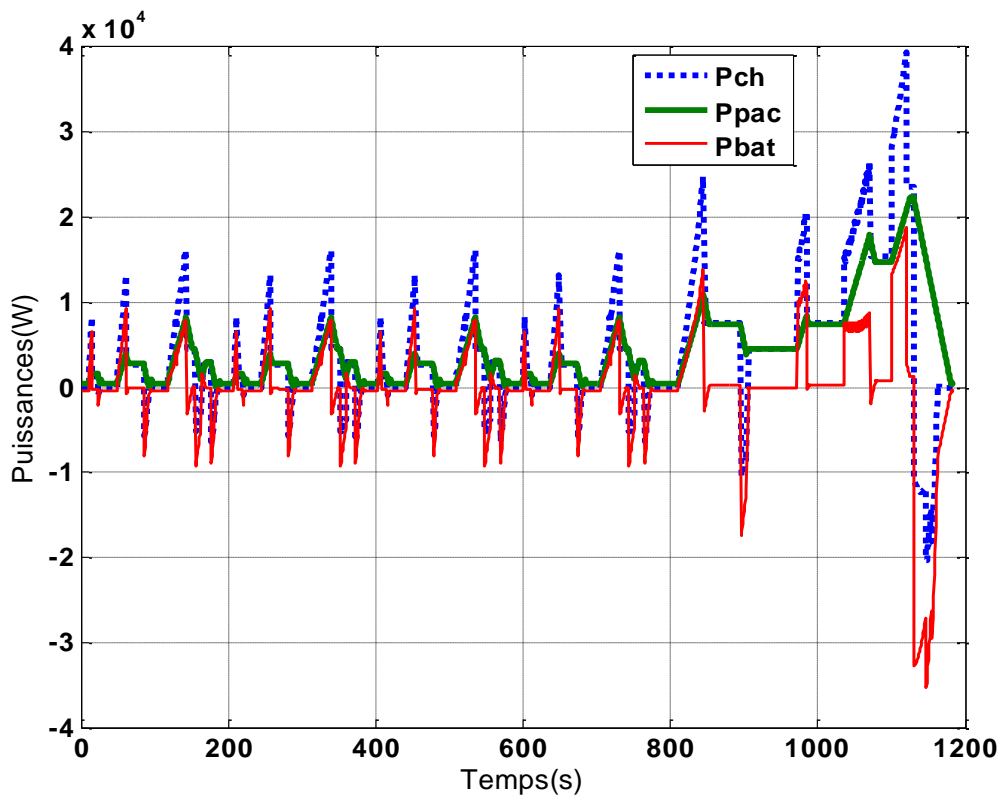
Il est évident dans Éq. (III-62) que  $p$  contrôle le SoC pour s'assurer que la condition exprimée en Éq. (III-61) est maintenue. Par conséquent, une fois que le SoC atteint ses sommets (max et min), le coefficient de pénalité sera élevé pour empêcher l'utilisation de la batterie et favoriser le fonctionnement de la source primaire. Lorsque le SoC se rapproche de sa valeur d'origine, par contre,  $p$  sera faible et la batterie assure un fonctionnement constant. Le problème d'optimisation consiste à fonder la puissance demandée à la PàC, ce qui permet d'observer la condition de maintien du SoC avec la minimisation de la fonction de coût. Notre approche s'est

transformée en un problème non linéaire de programmation [75]. Il a le courant de la PàC comme vecteur d'entrée, et la fonction de coût est soumise aux contraintes énoncées précédemment.

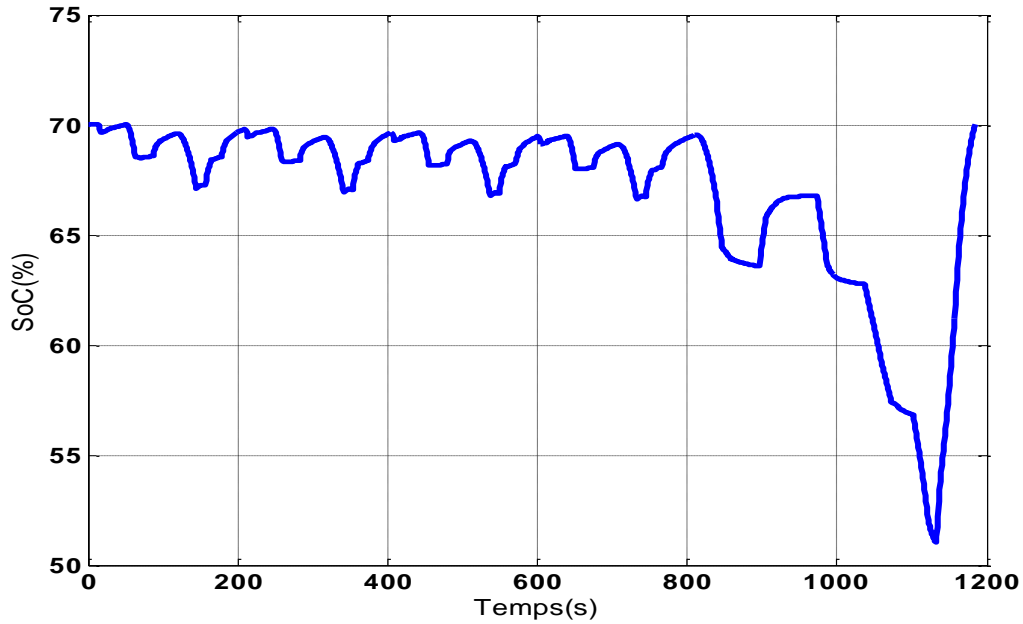
Les paramètres de simulation sont illustrés dans le tableau (III.4) :

**Tableau III-4** : Paramètres de simulation de la commande optimale.

Paramètre	Valeur
Puissance maximale de la PàC	$P_{pac,max}=25KW$
Puissance minimale de la PàC	$P_{pac,min} = 800w$
Etat de charge max	$SoC_{max} = 80\%$
Etat de charge min	$SoC_{min}=30\%$
La valeur initial de l'état adjoint	$p_0 = 1.56$



**Figure III-28** : Les puissances échangées pour la stratégie basée sur la commande optimale (Cycle NEDC).



**Figure III-29** : L'évolution de l'état de charge de batterie.

#### ❖ Comparaison et Discussions

Pour les trois stratégies testées, on voit bien que la vitesse de véhicule suit bien sa référence ce qui se traduit par les puissances échangées montrées par les figures ci-dessus où la somme des puissances fournies par la PàC et fournies ou absorbées par le pack des batteries assure la puissance demandée par la traction du véhicule tout en respectant les contraintes imposées par les sources d'énergie.

L'état de charge du pack de batteries dans le cas de la gestion de l'énergie basée sur ECMS est bien contrôlé, et on remarque qu'il revient à l'état de charge initial à la fin de cycle de conduite dans tous les cas. Ce qui traduit par la loi de commande ajoutée à la fonction de coût à minimiser où l'on a ajouté cette contrainte d'égalité car on minimise dans tous le parcours la surface (l'erreur) entre l'état de charge actuel et l'état de charge désiré. Cette fonction est liée au choix du paramètre de pénalité.

Dans les deux cas de la gestion de l'énergie, l'état de charge de la batterie est laissé libre lors de la mission du véhicule tout en restant dans les limites préconisées précédemment. Ce mode de fonctionnement nécessite la recharge de la batterie à un moment ou à un autre, grâce au réseau électrique, ou bien par le changement du pack de batteries par un autre chargé. D'un autre côté dans la gestion de l'énergie basée sur ECMS l'état de charge de la batterie est contrôlé de manière à ce qu'il revienne à sa valeur initiale en fin de mission. Ainsi, il n'est pas nécessaire de faire appel au réseau électrique pour recharger la batterie. Cependant, ce mode de gestion

n'est possible que si la mission du véhicule est connue à l'avance et que la loi de gestion hors-ligne a fait l'objet d'une optimisation globale.

Une étude comparative entre la gestion de l'énergie basée sur la commande optimale et les deux autres gestions (thermostat et la séparation fréquentielle) a été faite pour bien évaluer les résultats. On prend comme critères de performance la consommation du combustible et le maintien de l'état de charge du pack de batteries, aussi on a pris en considération le cas où aucune hybridation n'est prise en compte où la PàC est la seule source d'énergie, les résultats de cette comparaison sont montrés dans le tableau. (III.5).

**Tableau III-5** : Comparaison entre les gestions de l'énergie..

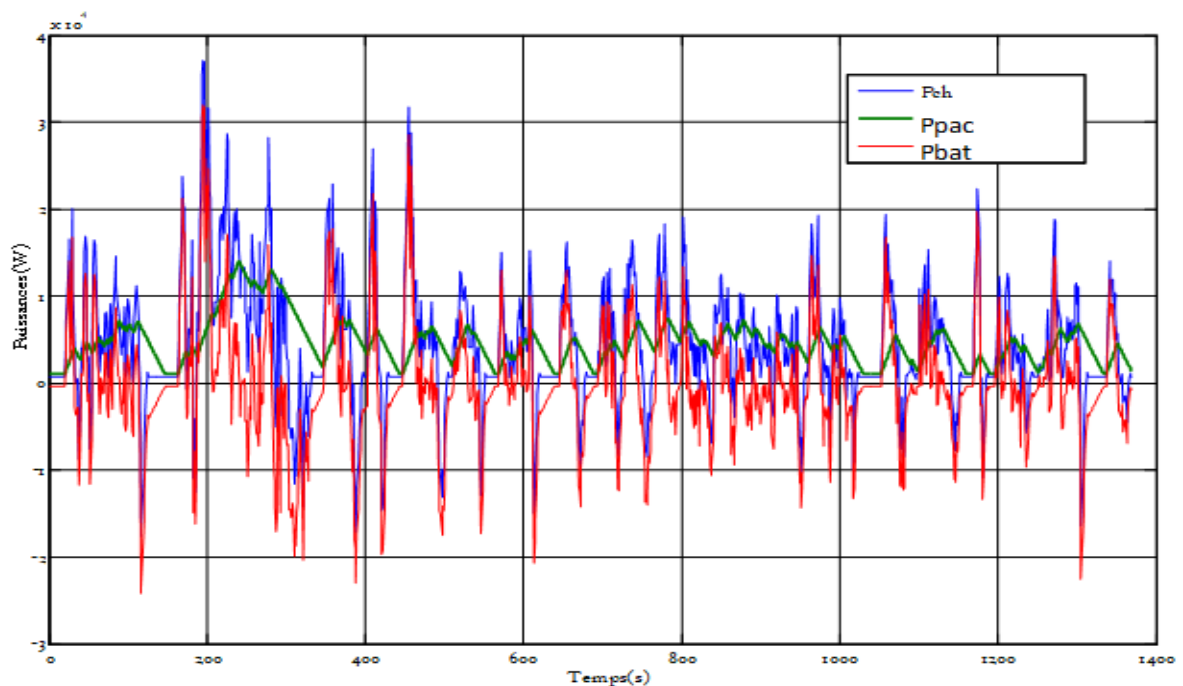
Le cycle de conduite	Stratégie de gestion de l'énergie	La consommation de l'hydrogène (g)	L'écart sur le SoC (%)
NEDC	Sans hybridation	103.06	/
	Thermostat	94.84	-7.43
	Séparation fréquentielle	87.35	-4.03
	ECMS	80.56	-0.12
UDDS	Sans hybridation	108.69	/
	Thermostat	96.48	-4.16
	Séparation fréquentielle	86.69	-2.24
	ECMS	83.09	-0.14
FTP	Sans hybridation	165.01	/
	Thermostat	134.47	-6.62
	Séparation fréquentielle	128.91	-3.47
	ECMS	126.85	-0.1
Cycle japonais	Sans hybridation	41.37	/
	Thermostat	38.87	-2.48
	Séparation fréquentielle	35.72	-1.28
	ECMS	33.79	-0.09

D'après les résultats mentionnés on peut dire que la gestion de l'énergie basée sur ECMS conduit à une bonne réduction de la consommation de l'hydrogène tout en respectant les limites

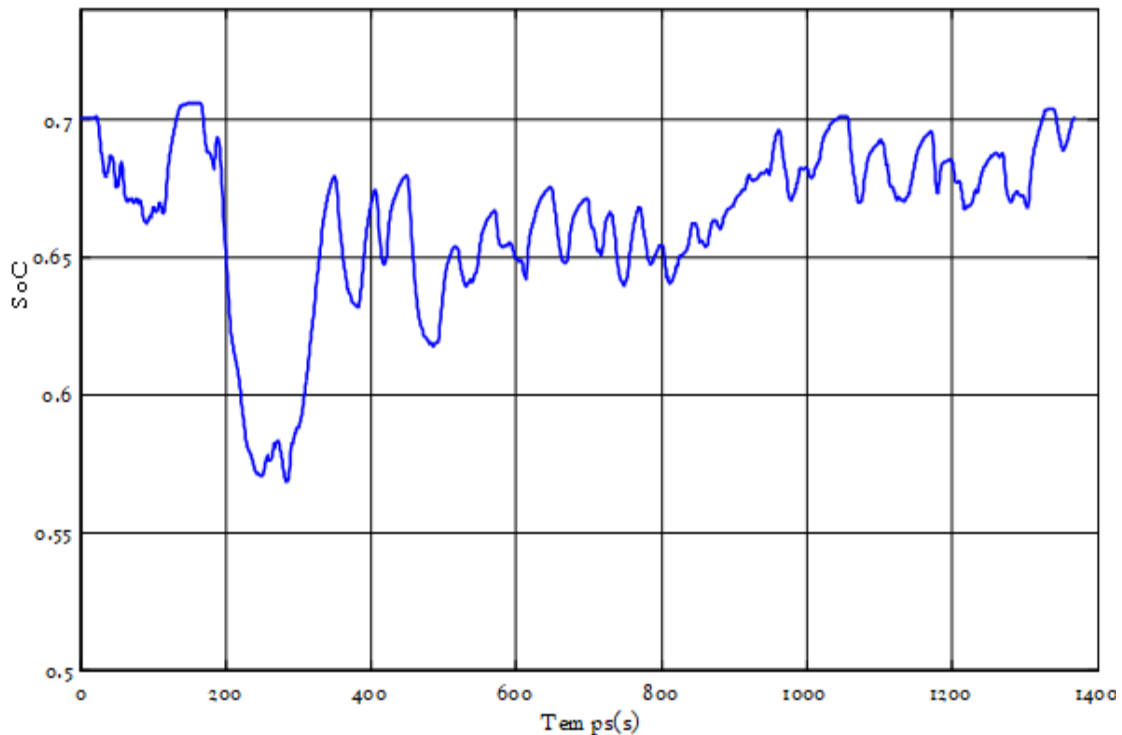


imposées par les sources, un bon contrôle de l'état de charge et une stabilité lors du fonctionnement de la PàC.

La gestion de l'énergie par thermostat permet un bon fonctionnement qui est lié au bon choix des limites préconisées des sources d'énergie. Elle se caractérise par une simplicité d'implémentation mais elle souffre de trois inconvénients majeurs : le premier est lié à la consommation intensive du combustible à cause de l'absence d'un critère de performance qui contrôle ce dernier, le deuxième est le temps de réponse de la PàC qui n'est pas respecté tout le temps et le troisième est que l'état de charge à la fin de cycle est laissé libre mais dans une fourchette acceptable. Ce dernier inconvénient est présent également dans la gestion basée sur la séparation fréquentielle qui fonctionne en respectant la dynamique lente de la PàC ce qui permet de prolonger sa durée de vie, et qui permet aussi de minimiser la consommation mais pas d'une manière satisfaisante et continue. Dans tous les cas traités : la gestion basée sur ECMS présente les meilleures performances désirées, de plus, elle ne souffre pas d'un temps de calcul important comme la gestion de l'énergie basée sur la programmation dynamique où le critère d'optimalité de Bellman est pris en considération. Cependant, cette stratégie est possible pour n'importe quel cycle de conduite. Les figures. III.30, 31 montrent, pour le cycle de conduite UDDS, les puissances échangées et l'évolution du SoC respectivement, ce qui fait de cette stratégie en ligne l'objet d'une optimisation globale.



**Figure III-30:** Les puissances échangées en utilisant la gestion d'énergie basée sur ECMS (cycle UDDS).



**Figure III-31:** L'évolution du l'état de charge (cycle UDDS)

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la problématique des stratégies de gestion de l'énergie dans les véhicules hybrides à PàC, comme précisé dans l'introduction de ce chapitre, l'idée principale derrière l'utilisation de méthodes d'optimisation est d'acquérir une expertise nécessaire vis à vis de la distribution des puissances dans le SH, de plus, un ordre de grandeur servant de référence de comparaison dans l'évaluation des stratégies de gestion en ligne. Le problème d'optimisation globale sous contraintes a été formulé. Sous certaines hypothèses, celui-ci a été résolu par la commande optimale, Comparé à d'autres algorithmes, l'algorithme ECMS donne les meilleurs résultats de simulation. La consommation de carburant a légèrement baissé et le SoC est bien conservé en fin de cycle de conduite, assurant le bilan énergétique nul de l'élément de stockage.

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent que l'on peut radicalement améliorer la consommation en hydrogène du véhicule en adoptant une bonne stratégie de gestion de l'énergie électrique qui permet d'établir une gestion optimale de l'énergie provenant de la PàC en tenant compte des contraintes subies par celle-ci. D'autre part, le choix d'une approche d'optimisation idéale et en ligne reste toujours un sujet d'actualité. Le chapitre suivant sera dédié aux essais expérimentaux.

# **CHAPITRE IV**

## **MISE EN ŒUVRE EXPÉRIMENTALE**

## IV.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons développé des lois de gestion de l'énergie pour un véhicule hybride à PàC pour minimiser la consommation énergétique du véhicule, avec le maintien de l'état de charge de l'élément de stockage. Les résultats de simulations étant concluants, ce dernier chapitre a pour but de valider expérimentalement quelques techniques de gestion développées.

Après une brève description du banc d'essais utilisé, dont l'objectif est de montrer ce dernier qui permettra la validation de l'étude théorique.

Tout d'abord, nous allons citer les différents composants du banc expérimental, après nous allons décrire l'émulateur de la PàC et les différents tests expérimentaux qui permettront sa validation, ensuite nous présenterons les autres convertisseurs statiques réalisés afin de construire l'émulateur de la chaîne de traction ; nous présenterons aussi les principaux résultats expérimentaux permettant de juger des performances du système ainsi que de celles des différents algorithmes de commandes.

## IV.2. Description du banc d'essais expérimentaux

Le banc des essais expérimentaux est composé de plusieurs éléments : un émulateur de la PàC, des batteries et les convertisseurs connectés aux sources électriques, une MCC pour la traction, une autre MCC pour émuler l'environnement extérieur du véhicule connecté elle-même à un convertisseur statique. Toute la chaîne est réalisée dans le but de valider les différents algorithmes de commande qui sont implémentés sous Simulink/MATLAB à l'aide d'une carte PCI6052E intégrée dans un PC. Cette carte assure l'acquisition des différentes grandeurs mesurées et l'envoi des signaux de commande aux convertisseurs statiques. Elle utilise le processeur du PC pour effectuer le calcul. L'émulateur de la chaîne de traction globale est décrit par la figure IV-1 ci-dessous.

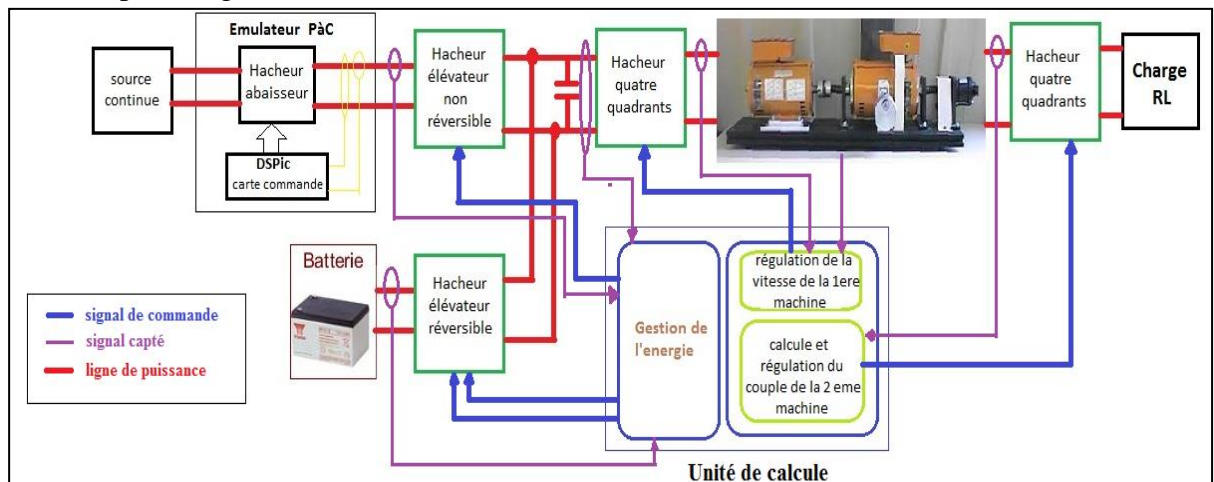
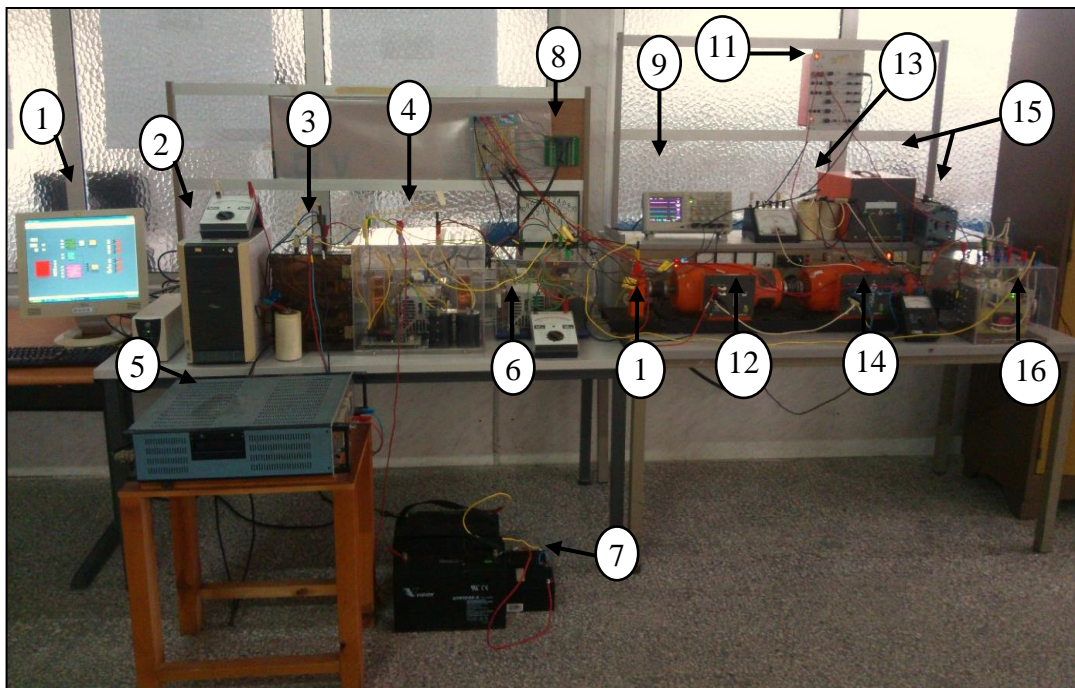


Figure IV-1 : Schéma synoptique du banc d'essais expérimental.

Le banc est représenté par la photographie de la figure IV.2 ci-dessous et sur laquelle, on peut identifier les éléments suivants :

1. PC ;
2. Carte PCI6052E ;
3. Emulateur de la PàC ;
4. Les hacheurs (élevateur et élevateur réversible en courant) ;
5. Alimentation stabilisée ;
6. Onduleur triphasé ;
7. Pack de batteries plomb-acide (deux de type 12V/12Ah et deux de type 12V/150 Ah) ;
8. Adaptateur TBX-68 ;
9. Oscilloscope ;
10. Génératrice tachymétrique ;
11. Filtre ;
12. MCC de traction ;
13. Redresseur ;
14. Génératrice à courant continu ;
15. Charge RL ;
16. Hacheur à quatre quadrants.



**Figure IV-2** : Photographie du banc d'essais.

### IV.2.1. Notion de l'émulation

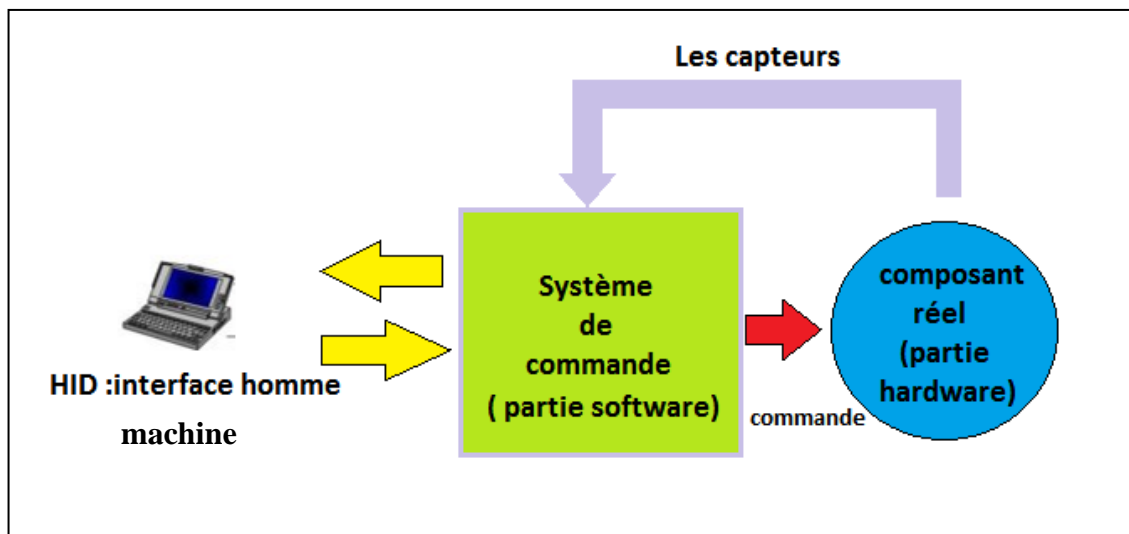
L'émulation est une technique utilisée pour développer et tester des systèmes complexes. Elle a été fondée dans l'industrie avionique puis elle a été généralisée dans toutes les filières de l'industrie moderne. Elle aide à maximiser les performances de tout processus avant sa mise en application.

On peut classifier l'émulation dans la catégorie des simulations en temps réel, mais elle diffère d'eux par l'intégration d'un composant réel dans sa boucle. C'est pourquoi elle est aussi appelée la simulation HIL : Hardware In the Loop.

Pour développer un système par cette technique il faut passer par trois étapes :

- Développement du modèle mathématique du système ;
- Passer à la simulation HIL (l'émulation) ;
- Intégration du système dans l'environnement réel.

Un émulateur est un dispositif qui reproduit entièrement ou partiellement un milieu de travail, c'est une plateforme hybride (matérielles-logicielles) capable de copier le comportement des systèmes physiques qu'on peut utiliser à la place du vrai équipement. Il diffère de la simulation, qui est une modélisation dans un environnement logiciel.



**Figure IV-3** : Schéma descriptif d'un émulateur

Les raisons principales qui justifient l'utilisation d'un émulateur sont :

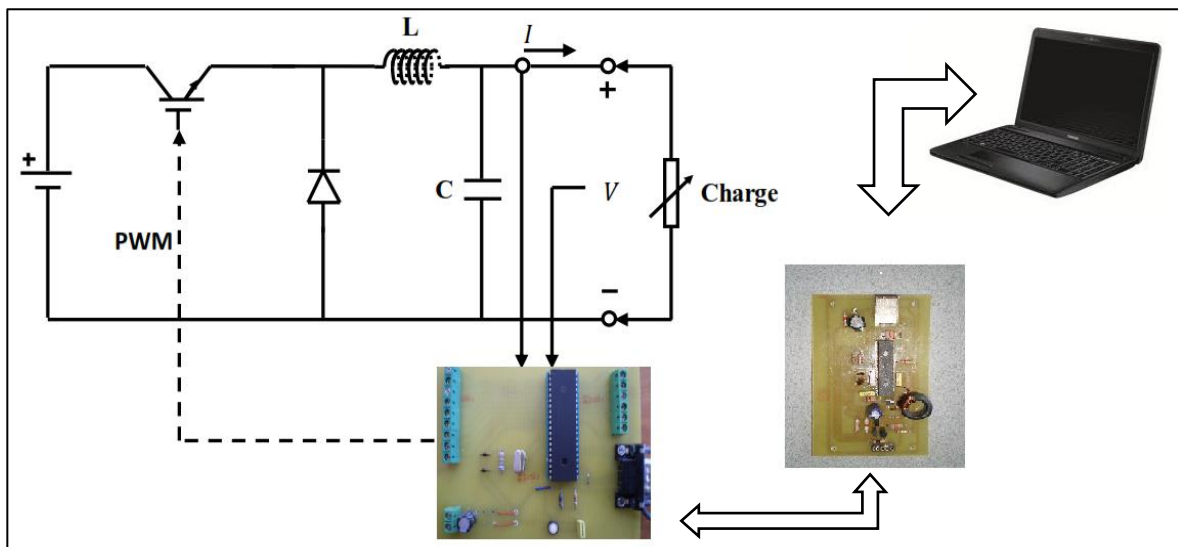
- Le coût élevé d'une installation du système complet ;
- l'espace excessif exigé des auxiliaires ;
- l'utilisation de l'émulation minimise les risques ;
- la gestion de tout le système : le temps de démarrage, les contraintes de la sécurité et les conditions environnementales.

Les émulateurs sont devenus indispensables pour les activités de recherche et de développement et permettent de fournir la flexibilité et l'aide nécessaire durant la phase des essais de divers sous-systèmes.

### IV.3. Réalisation de l'émulateur de la PàC

L'objectif principal de la réalisation d'un émulateur d'une PàC est de reproduire les mêmes caractéristiques d'un module PàC en prenant en considération : la variation de la température, les pressions des combustibles et le taux d'humidité de la membrane.

Le principe de fonctionnement de cet émulateur est présenté sur la figure IV.4.

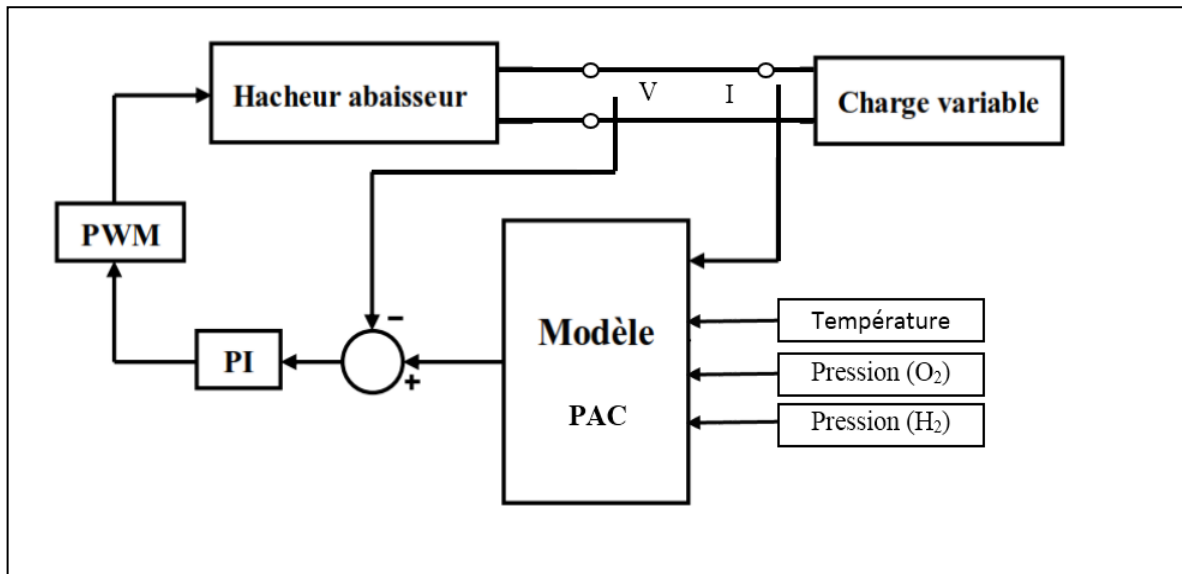


**Figure IV-4** : Schéma fonctionnel de l'émulateur de la PàC.

Il est constitué principalement d'un hacheur abaisseur, contrôlé en tension, qui reproduit la même caractéristique tension-courant de la PàC.

La tension et le courant de sortie du convertisseur sont utilisés dans la régulation afin de reproduire les caractéristiques générées par le modèle de la PàC. La caractéristique de la PàC ainsi que le programme de commande du convertisseur DC-DC sont implantés sur un microcontrôleur DSPIC.

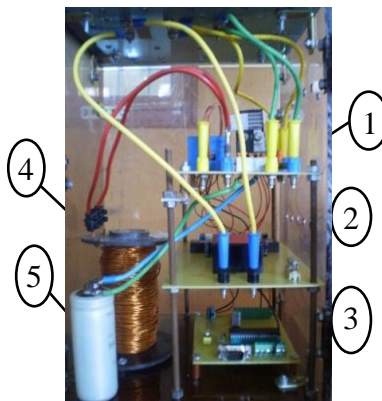
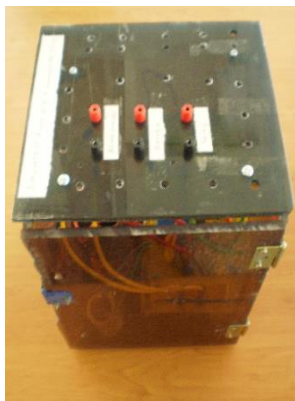
Le hacheur abaisseur représente une source de courant avec une tension de sortie régulée, afin de suivre la tension de référence déterminée par le modèle de la PàC. La stratégie de commande choisie est représentée par la figure IV.5.



**Figure IV-5** : Schéma bloc de la commande du hacheur

Le courant de sortie du convertisseur est utilisé comme entrée au modèle de la PàC après avoir été transformé en densité de courant en le divisant par la surface. Le modèle permet d'avoir la tension de référence qui sera comparée à la tension mesurée, et régulée en utilisant un régulateur PI pour générer les signaux de commande MLI, ainsi le hacheur est contrôlé en tension.

L'entrée du hacheur abaisseur est alimentée par une source continue stabilisée variable, pouvant délivrer jusqu'à 5A, ce qui permet de balayer toute la plage de fonctionnement de l'émulateur. Une autre carte d'alimentation stabilisée avec plusieurs sorties (+5V, ±15V) est utilisée pour assurer l'alimentation des autres cartes de l'émulateur, à savoir la carte de commande rapprochée, la carte des capteurs et la carte de commande à base du microcontrôleur DSPIC.



1. Carte de commande rapprochée + carte de puissance + carte capteur.
2. Carte d'alimentation continue stabilisée (+5V, +15V, -15V).
3. Carte de commande.
4. Bobine de 1.7 mH / 7 ohm.
5. Capacité de sortie 330uF/250v.

**Figure IV-6** : Photographie de l'émulateur de la PàC

Tout le dispositif est illustré sur la figure IV.6 ci-dessus



### IV.3.1. Réalisation du hacheur

Pour dimensionner les éléments du convertisseur, nous prenons les paramètres suivants :

- ✓ Tension d'entrée 100V ;
- ✓ Ondulation maximale du courant de sortie 0.5A ;
- ✓ Ondulation maximale de la tension de sortie 0.2V ;

La fréquence de découpage ( $f_e$ ) est fixée à 10 kHz. Cette fréquence est obtenue d'un compromis entre le dimensionnement des inductances et les ondulations du courant d'une part et les pertes par commutation et la vitesse du calculateur d'autre part.

En mode de conduction continue (le courant dans le convertisseur ne s'annule pas), les équations décrivant le fonctionnement du hacheur sont données par :

$$V_s = d \cdot V_e \quad (\text{IV-1})$$

$$\Delta I_L = \frac{d \cdot (1-d) \cdot V_e}{f \cdot L} \quad (\text{IV-2})$$

$$\Delta V_s = \frac{\Delta I}{8 \cdot C \cdot f} = \frac{d \cdot (1-d) \cdot V_e}{8 \cdot C \cdot L \cdot f^2} \quad (\text{IV-3})$$

A partir des équations précédentes, on peut déterminer les valeurs minimales de l'inductance et de la capacité de sortie qui permettront de respecter les conditions données auparavant :

#### ❖ Dimensionnement de l'inductance

En utilisant l'équation IV.2, nous pouvons calculer la valeur de l'inductance minimale :

$$L_{min} = \frac{d \cdot (1-d) \cdot V_e}{\Delta I_L \cdot f} = 5 \text{ mH}$$

Cette valeur est obtenue pour un rapport cyclique (d) de 0.5.

#### ❖ Dimensionnement de la capacité :

Pour la capacité de sortie, en considérant une ondulation limitée à 0.2V, on aboutit à la valeur du condensateur en utilisant l'équation IV.3 :

$$C_{min} = \frac{d \cdot (1-d) \cdot V_e}{8 \cdot L \cdot f^2 \cdot \Delta V_s} = 31.3 \mu\text{F}$$

Nous avons utilisé une inductance disponible au niveau du laboratoire de valeur  $L = 5\text{mH}$  et un condensateur de sortie de type chimique de  $330\mu\text{F}/250\text{V}$ .

### IV.3.2. Implémentation de la commande

Afin de rendre l'émulateur totalement autonome, nous avons utilisé une carte de contrôle à base d'un microcontrôleur DSPIC 30f4011 qui possède :

- Six modules pour la génération des signaux PWM avec leurs complémentaires. Ces modules nous permettent aussi de contrôler le temps mort entre le signal PWM et son complément. Ce qui réduit énormément la taille de la carte de commande.
- Un convertisseur analogique numérique de 10 bits permet la conversion d'un signal d'entrée analogique à un signal numérique codé sur 10 bits. Ce module dispose de 9 entrées analogiques. Il est caractérisé par un taux d'échantillonnage de 1 Ms/s.

Après l'acquisition du courant et de la tension à la sortie, on passe à l'algorithme de contrôle pour calculer la nouvelle valeur du rapport cyclique. Le plan se compose de trois parties :

- La première partie est l'initialisation des différents modules du microcontrôleur, à savoir le Timer, le convertisseur analogique numérique (ADC) et le module de génération des signaux MLI.
- La deuxième partie se résume dans le programme d'interruption où se fait l'acquisition, le calcul de la nouvelle valeur du rapport cyclique  $d$  par la fonction PID de la bibliothèque « dsp.h » et l'injection de cette valeur dans le module PWM.
- La troisième partie représente le programme principal, où se fait l'initialisation des différentes variables et l'exécution de l'interruption.

Le programme implémenté sur le microcontrôleur est donné en annexe B.

### IV.3.3. Résultats expérimentaux de l'émulateur

L'émulateur a été testé en variant la charge à la sortie du hacheur (résistance variable) et en prenant plusieurs points de fonctionnement et cela pour plusieurs nombres de cellule (N), et pour la même surface active (S) d'une membrane de la PàC. Ces points sont superposés sur les caractéristiques  $V(I)$  du modèle réel (figure IV.7).

La figure IV.7 présente une comparaison entre les résultats de simulation en trait plein, et les résultats expérimentaux en pointillé pour différents nombres de cellules. Nous remarquons que les points relevés correspondent bien aux points du modèle réel.

Les relevés expérimentaux de l'émulateur PàC sont résumés dans les tableaux suivants III-1, III-2 et III-3 :

**Tableau IV-1 : Points de fonctionnement pour N=40, S=2 cm<sup>2</sup>.**

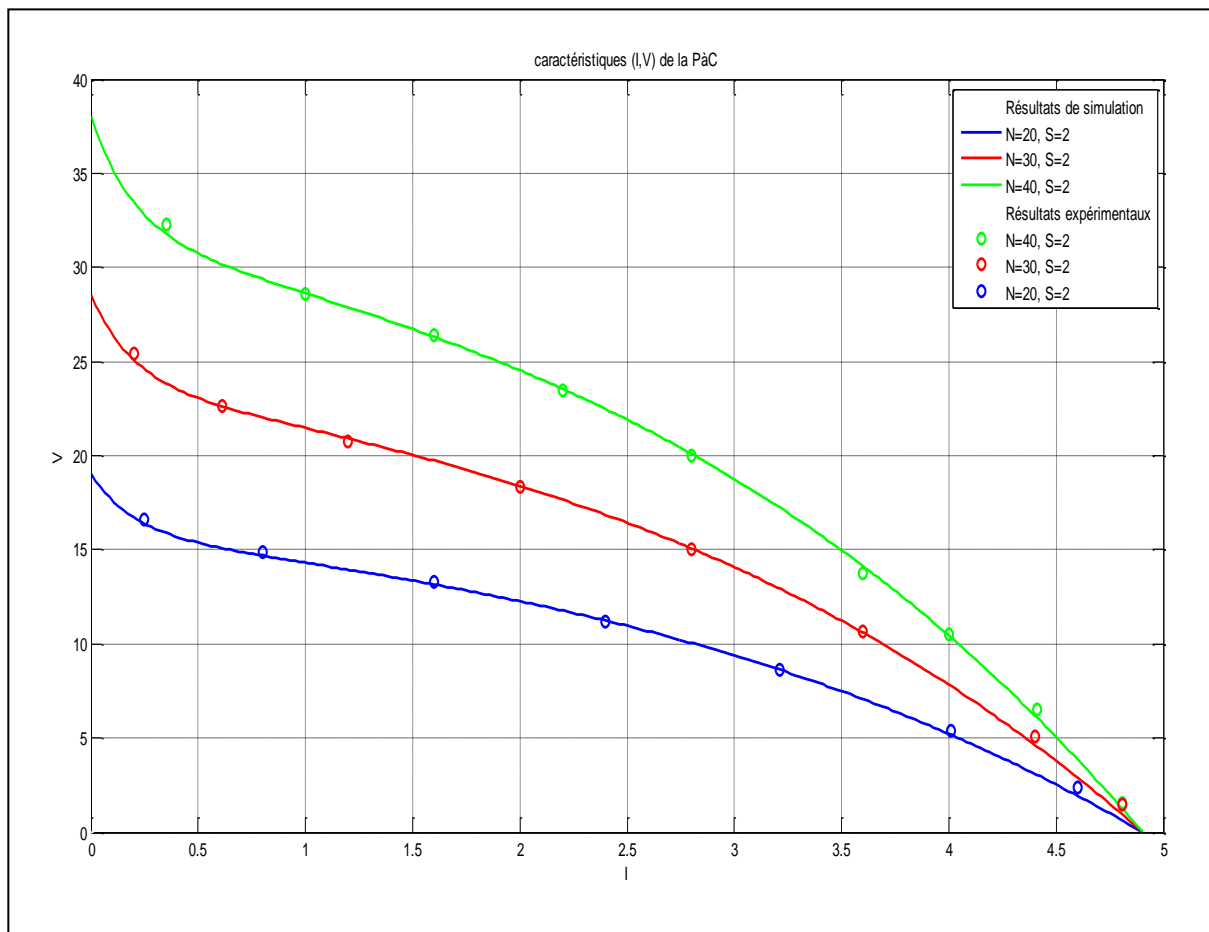
$I_{\text{mesuré}}(\text{A})$	0.35	1	1.6	2.2	2.8	3.6	4.41	4.81
$V_{\text{mesuré}}(\text{V})$	32.3	28.55	26.4	23.5	20	13.73	6.53	1.55

**Tableau IV-2 : Points de fonctionnement pour N=30, S=2 cm<sup>2</sup>**

$I_{\text{mesuré}}(\text{A})$	0.2	0.61	1.2	2	2.8	3.6	4.4	4.81
$V_{\text{mesuré}}(\text{V})$	25.4	22.6	20.79	18.31	15.03	10.69	5.05	1.45

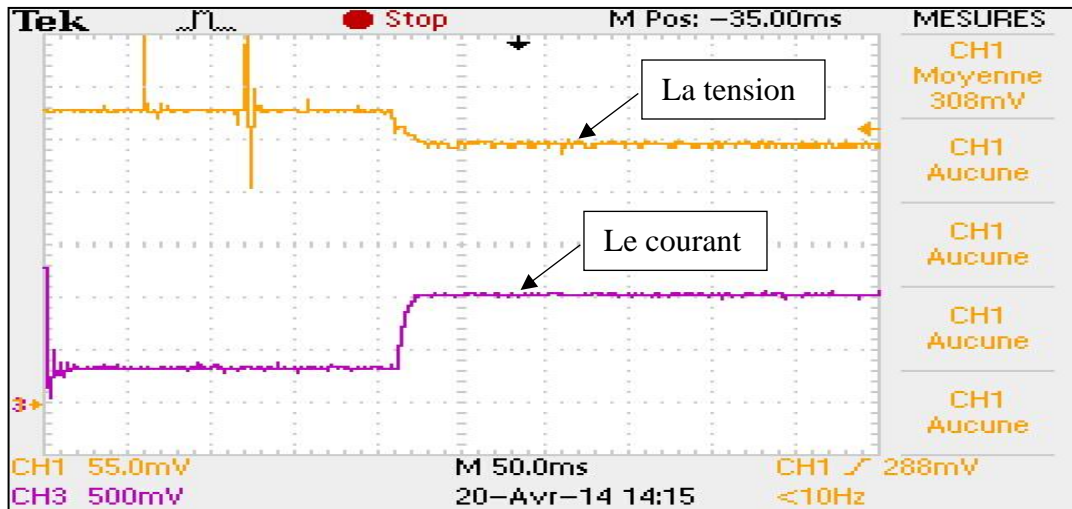
**Tableau IV-3 : Points de fonctionnement pour N=20, S=2 cm<sup>2</sup>**

$I_{\text{mesuré}}(\text{A})$	0.25	0.8	1.6	2.4	3.21	4.01	4.6
$V_{\text{mesuré}}(\text{V})$	16.6	14.86	13.27	11.16	8.65	5.4	2.4



**Figure IV-7 : Superposition des caractéristiques V(I) simulées et points de fonctionnement de l'émulateur PàC pour différents nombres de cellules de la PàC.**

Afin d'analyser les performances de notre émulateur, nous avons relevé la réponse dynamique de l'émulateur pour une variation de la charge (figure IV.8). Nous remarquons que l'émulateur a une réponse du premier ordre sans dépassement et avec un faible temps de réponse. Ainsi, les résultats obtenus montrent bien que l'émulateur converge toujours vers le nouveau point de fonctionnement et pourra ainsi suivre le comportement d'une PàC réelle.



**Figure IV-8:** Réponse dynamique pour une charge résistive variable (42 Ω à 21 Ω).

#### IV.4. Réalisation des convertisseurs statiques de l'émulateur de la chaîne de traction

Nous avons réalisé plusieurs convertisseurs statiques, exprimés concrètement par un hacheur survolteur (unidirectionnel en courant), un hacheur survolteur réversible en courant (bidirectionnel), un hacheur à quatre quadrants et un onduleur triphasé peut être utilisé comme un hacheur à quatre quadrants.

Dans cette partie, nous allons exposer les différents composants utilisés dans la réalisation et détailler le principe de fonctionnement et les schémas de chaque convertisseur.

##### IV.4.1. Hacheur survolteur

La PàC est une source de tension caractérisée par une faible tension et un fort courant, donc pour optimiser le fonctionnement de la PàC, on utilise un étage d'adaptation entre la PàC et le bus continu dans le but d'optimiser le transfert de puissance. Habituellement, cet étage est constitué d'un hacheur parallèle unidirectionnel « boost ».

Le schéma synoptique du hacheur est présenté par la figure IV.9 ci-dessous ; les signaux de commande, peuvent être générés par une carte de commande numérique externe (dSPACE, DSP,  $\mu$ Contrôleur,...). Dans notre cas, la carte d'acquisition et de commande PCI 6052e est utilisée. Les modules et les caractéristiques de cette carte sont donnés en annexe C.

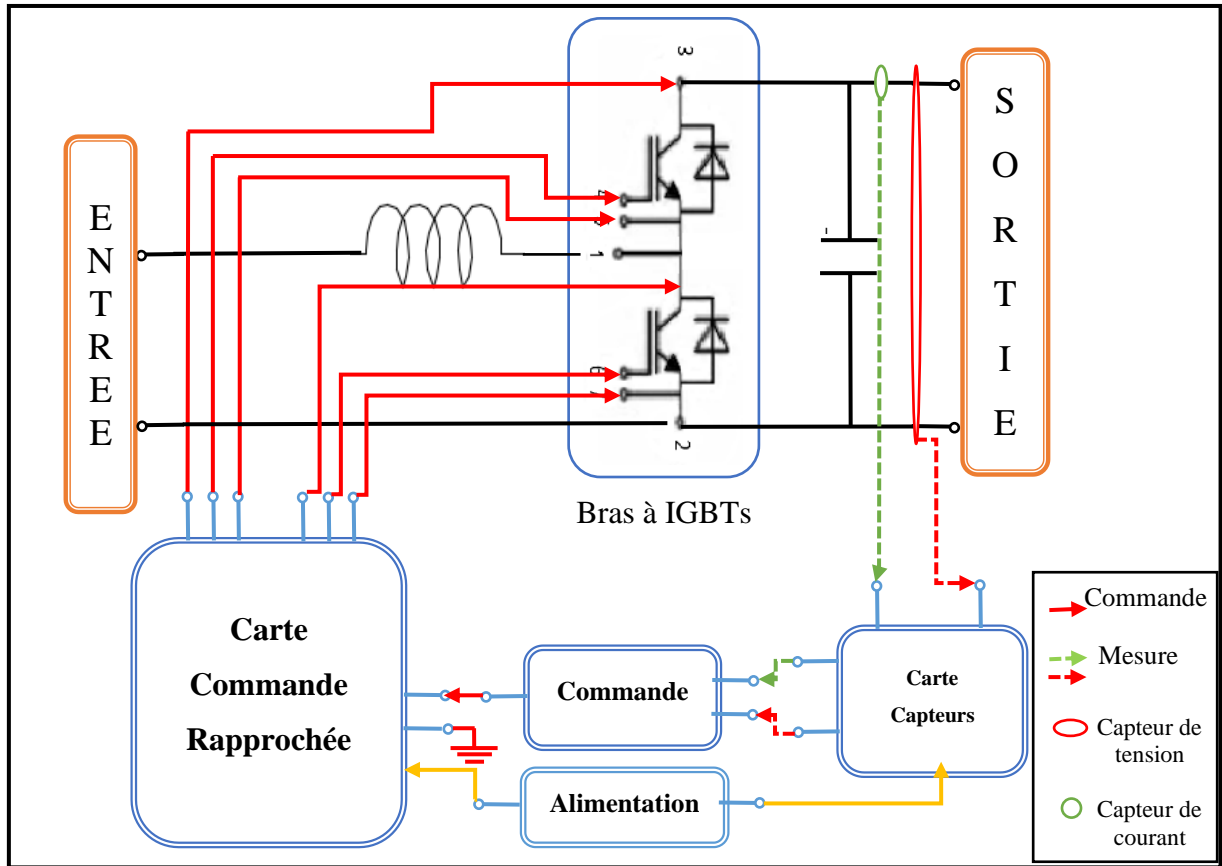
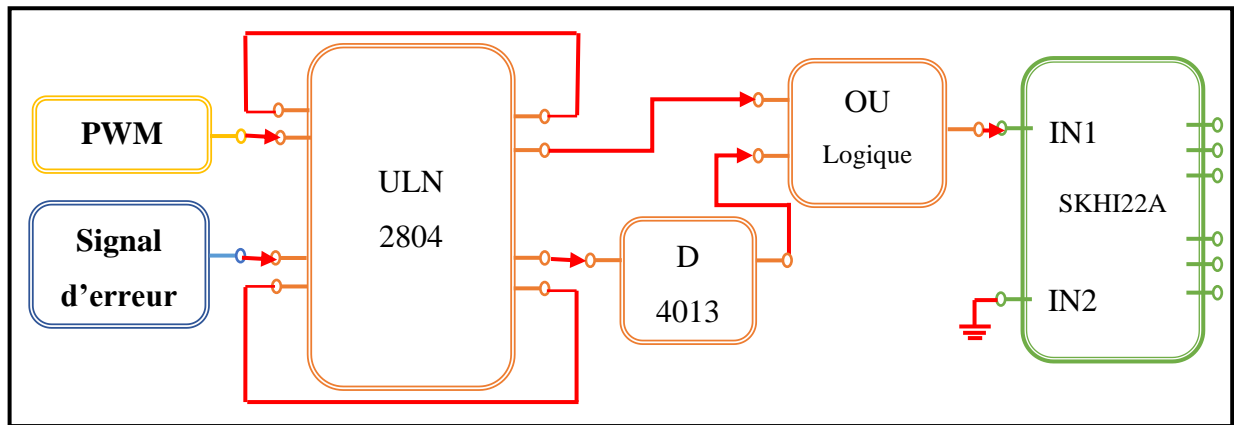


Figure IV-9 : Schéma synoptique du hacheur Boost

#### IV.4.1.1. Carte de commande rapprochée

Les signaux d'entrée sont composés d'un signal PWM (le signal destiné aux IGBTs en mode élévateur), plus un signal d'erreur donné par le capteur lors de mesure d'une surintensité du courant dans le hacheur. Ce signal d'erreur (analogique) constitue une protection pour notre carte et permet le blocage des ordres de commande, en cas de surintensité. Le schéma de la figure IV.10 montre la structure de la carte de commande rapprochée [76, 77].



**Figure IV-10** : Schéma synoptique de la carte de commande rapprochée

Ensuite, ces signaux sont acheminés à travers le circuit (ULN 2804), composé de transistors à collecteurs ouverts qui permet l'amplification et l'adaptation de ces signaux. Ceci permet une standardisation de la commande du hacheur par des signaux logiques variables de 3 à 15V.

Après l'étape d'amplification et d'adaptation des signaux de commande, le signal d'erreur attaque une bascule 'D' (CI D4013), afin de mémoriser l'erreur.

Finalement, on dispose d'un signal de commande PWM qui est combiné, à travers des portes logiques 'OU', avec le signal d'erreur issu de la bascule 'D' et dirigé vers la première entrée (IN1) du circuit driver SKHI22A, l'autre entrée (IN2) est reliée toujours à la masse pour mettre le deuxième IGBT du bras en état 'bloqué'. Un signal de reset issu d'un bouton poussoir à trois niveaux, est relié au pin 'COM' de l'ULN 2804 d'un côté, et au 'VCC' de l'autre côté. En cas d'une remise à niveau le bouton est relié à la masse et l'ULN est bloqué.

#### IV.4.1.2. Carte de mesure et de protection

Cette carte a pour rôle de protéger le hacheur élévateur lors de son fonctionnement contre les surintensités du courant, ainsi de prendre des mesures de façon continue du courant circulant dans le convertisseur pour les utiliser par la suite dans le calcul de la commande.

Pour réaliser ce circuit on utilise un capteur de courant à effet hall de type LA55\_P. Il délivre à sa sortie de mesure un courant proportionnel au courant réel dans un rapport de (1/2000). Il assure une isolation galvanique entre les circuits de puissance et de mesure. Le courant mesuré  $I_{OUT}$  passe à travers une résistance shunt de mesure  $R_M$ . Dans notre application, nous avons fixé le courant du bus continu à 20A, alors la résistance  $R_M$  à mettre est calculée de la manière suivante :

$$R_M = V_{OUT-max}/I_{OUT-max} \quad (IV-4)$$

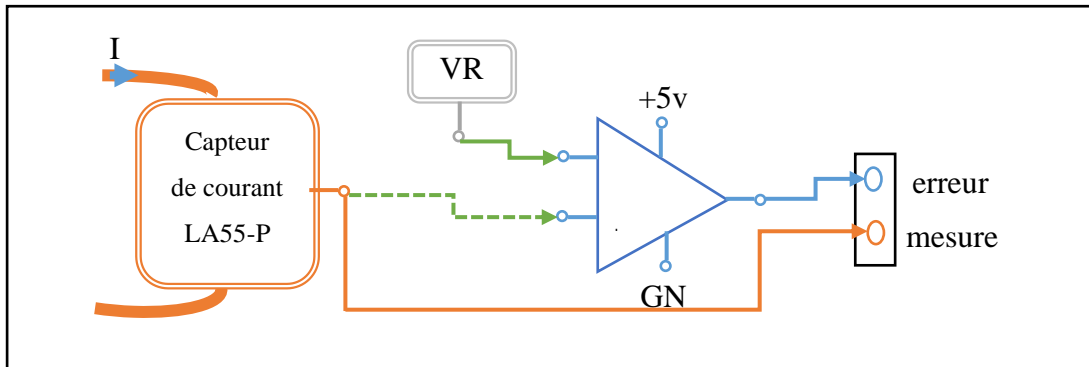
Avec :

$$V_{OUT-max} = 5V$$

$$I_{OUT-max} = (20A/2000) = 0.01 A.$$

Donc :  $R_M = 5V/0.01A = 500\Omega$ , on prend :  $R_M = 500\Omega$ .

La figure IV.11 présente le schéma synoptique de cette carte.



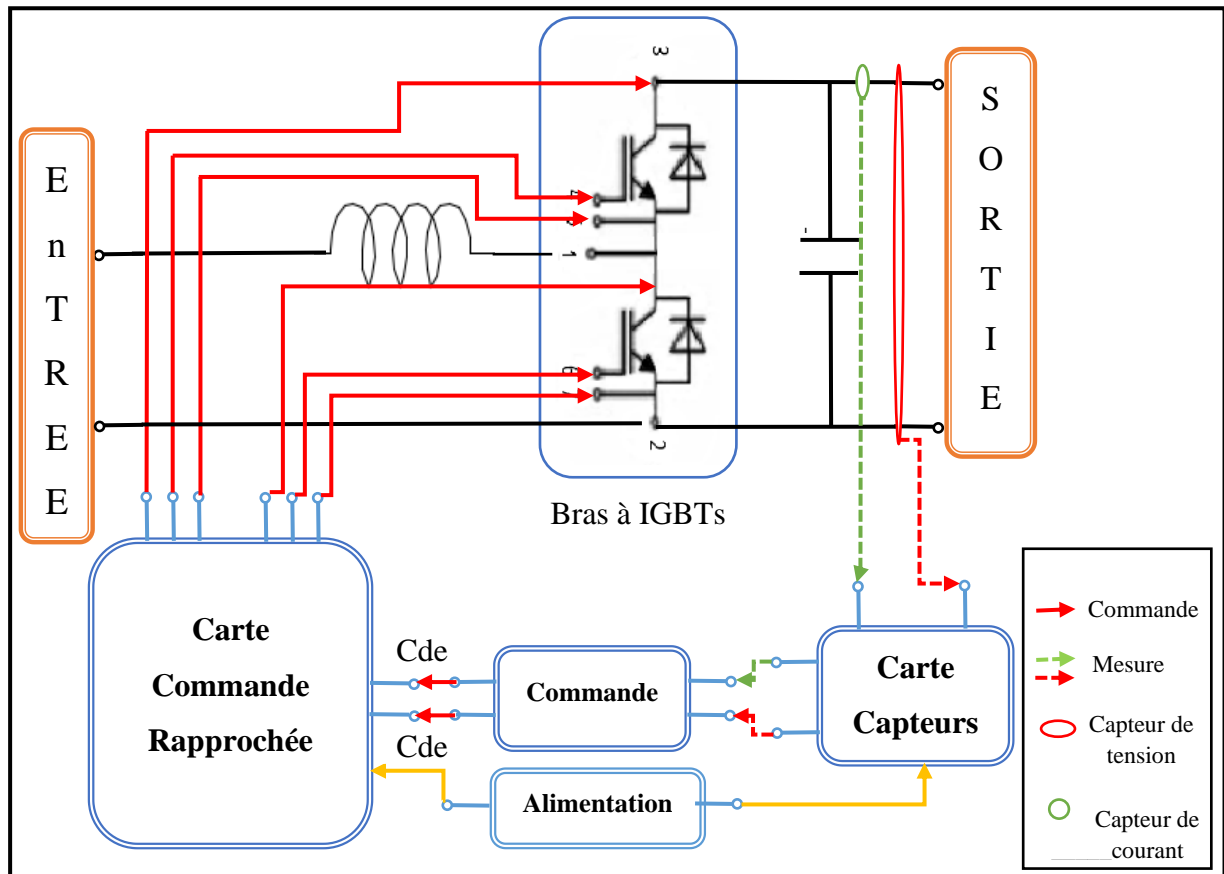
**Figure IV-11** : Schéma synoptique de la carte de capteur

On compare la tension de sortie du capteur  $V_{OUT}$  à une tension de référence  $V_{REF}$  variable entre 0 et 5V, si  $V_{OUT}$  est supérieure à  $V_{REF}$ , la sortie du comparateur  $V_S$  est égale à 5V, donc une surintensité est survenue, ce qui correspond à '1' logique à l'entrée de la carte de la commande du convertisseur. Ce signal, interprété comme étant un signal d'erreur analogique provenant du capteur, force la bascule D au niveau logique '1', ainsi la commande sera bloquée et une LED rouge s'allume indiquant une erreur.

La tension de référence  $V_{REF}$  est réglée à l'aide d'un potentiomètre, donc l'utilisateur a la possibilité de limiter le courant du bus continu suivant l'application pour protéger le hacheur et la charge contre de forts courants.

#### IV.4.2. Réalisation du convertisseur connecté aux batteries

Pour élever la tension délivrée par le pack des batteries tout en optimisant le transfert de puissance, on utilise un étage d'adaptation entre la batterie et la charge. Habituellement, cet étage est constitué d'un hacheur parallèle bidirectionnel « buck-boost », ce qui permet au courant de circuler dans les deux sens, donc la charge et la décharge des batteries.



**Figure IV-12** : Schéma synoptique du hacheur buck-boost.

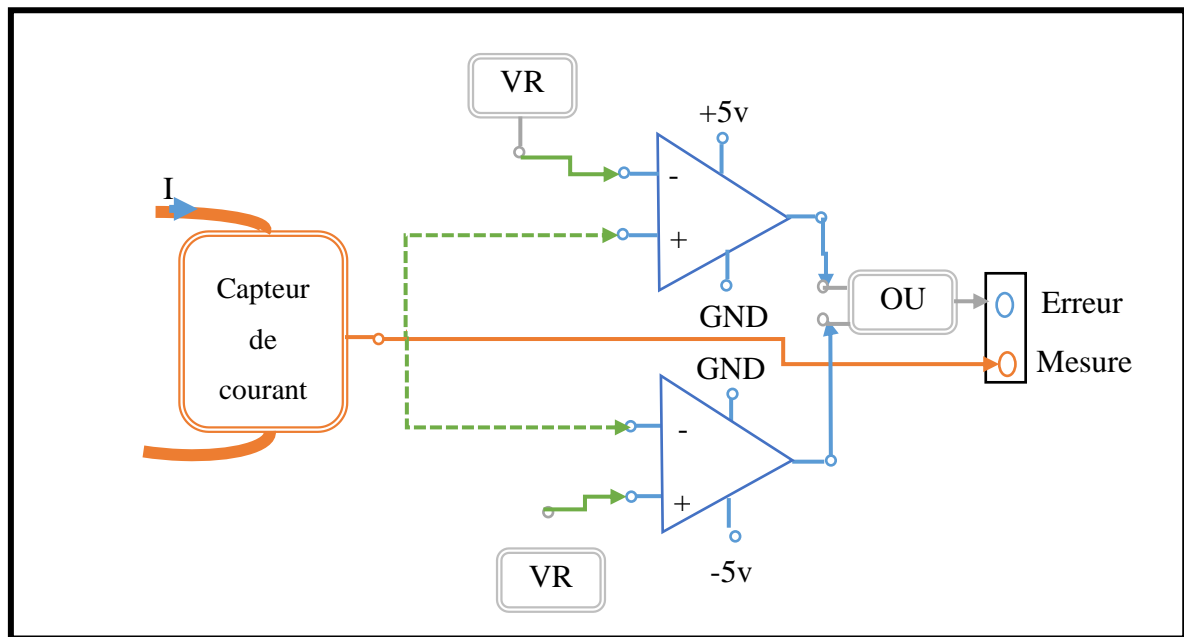
La figure IV-12 présente le schéma synoptique du hacheur buck-boost connecté aux batteries.

#### IV.4.2.1. Carte de mesure et de protection

Cette carte a pour rôle de protéger le hacheur réversible lors de son fonctionnement contre les surintensités du courant, ainsi de prendre des mesures de façon continue du courant circulant dans le convertisseur et les utiliser par la suite dans la commande. Ceci est montré dans la figure IV.13.

Pour réaliser cette carte on procède de la même manière que lors de la réalisation de la carte de mesure et protection dédiée au hacheur élévateur, sauf que la protection sera dans les deux sens positif et négatif. En effet, le courant qui circule dans les deux sens exige une protection contre les courants positifs et négatifs.





**Figure IV-13** : Schéma synoptique de la carte de mesure.

#### IV.4.3. Assemblage des convertisseurs d'adaptation au bus continu

Une fois les différentes cartes de commande, d'alimentation et de capteurs ont été réalisées, nous avons procédé au montage des deux hacheurs « boost » et « buck-boost » en tenant compte des différents aspects techniques (facilité d'utilisation, ouvertures de refroidissement à l'air, accessibilité,...) et ergonomiques (présentation didactique, minimum de câble entrants et sortants,...). Tout d'abord, les composants de puissance à savoir les bras à IGBTs, sont montés sur la partie supérieure du radiateur, à côté on trouve les cartes des capteurs. Les deux cartes de commande rapprochée sont montées sur les côtés gauche et droit du radiateur, en optimisant le câblage entre les cartes de commande rapprochée et les bras à IGBTs. On trouve aussi sur les côtés deux bobines construites de façon à satisfaire les contraintes mises sur la fluctuation du courant dans les convertisseurs. En face au radiateur, on trouve les deux condensateurs de filtrage et la carte d'alimentation. Les convertisseurs sont mis dans un boîtier en plexiglass transparent, sur la face avant on trouve les interrupteurs qui permettent d'alimenter chaque hacheur seul, plus les interrupteurs de reset. Sur la partie supérieure du boîtier, on trouve les différentes entrées et sorties des convertisseurs, plus un interrupteur pour alimenter le ventilateur.

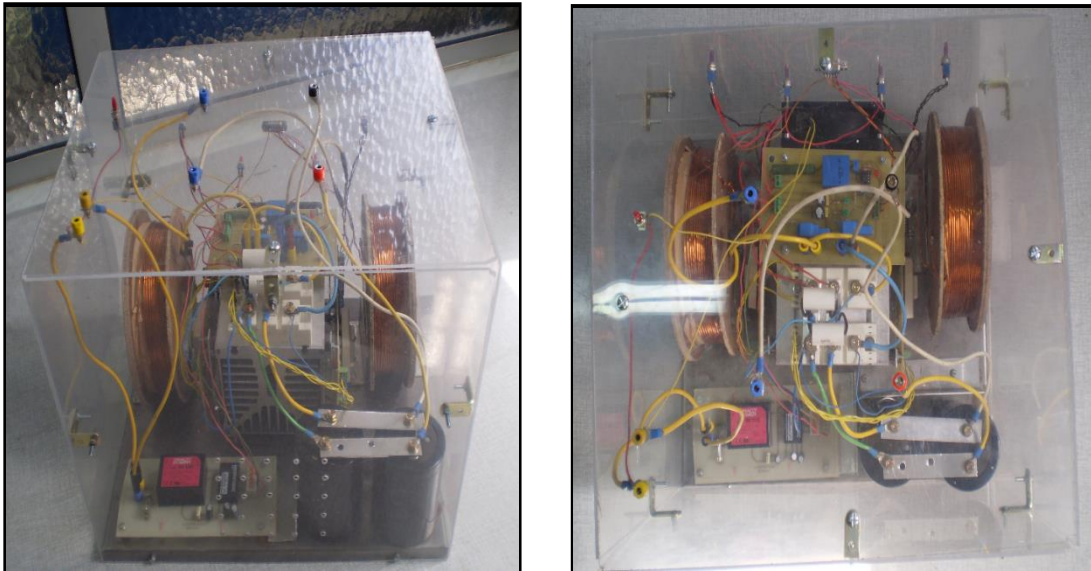


Figure IV-14 : Photographie des convertisseurs.

#### IV.4.4. Réalisation du hacheur à quatre quadrants

Pour émuler l'environnement extérieur du véhicule, nous utilisons une machine à courant continu qui sera couplée avec le moteur de traction, ce qui permettra d'exercer un couple résistant variable selon le courant imposé sur la génératrice. La réalisation d'un hacheur à quatre quadrants permet de contrôler ce courant dans la génératrice. L'architecture générale de ce convertisseur est donnée par la figure IV.15.

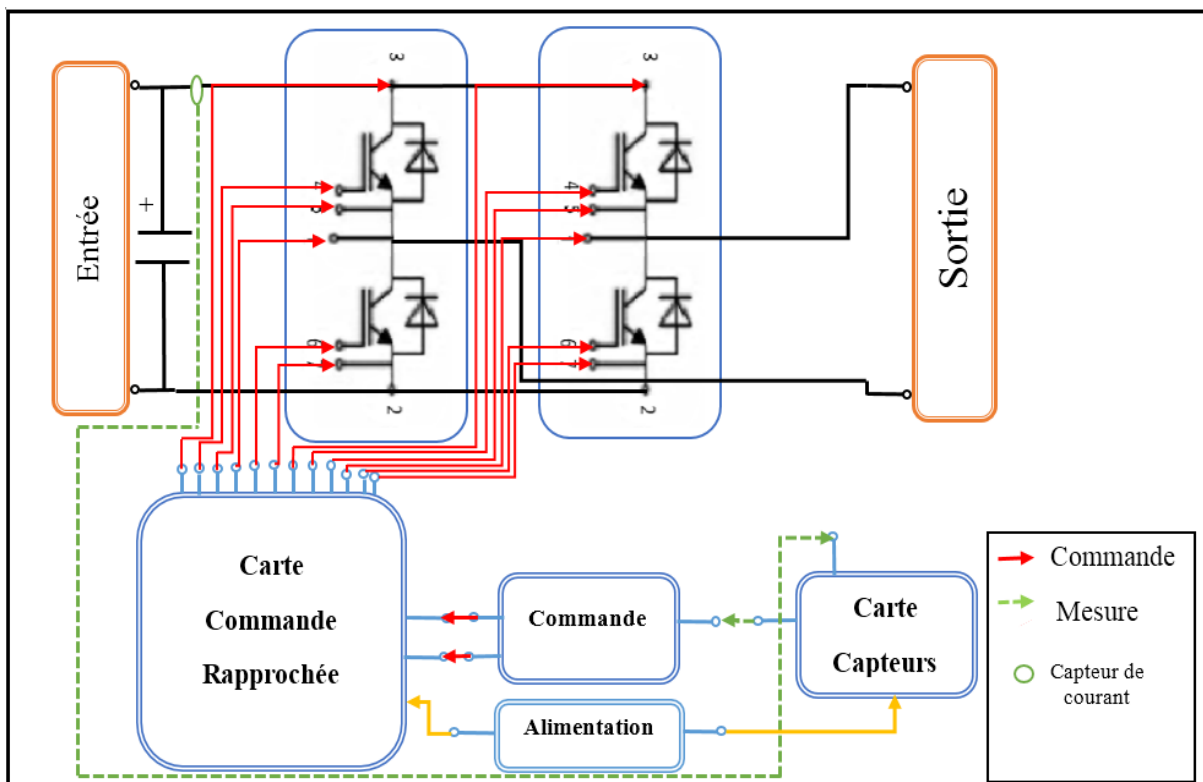


Figure IV-15 : Architecture générale du hacheur quatre quadrants

Ainsi, nous procédons de la même manière de réalisation de la carte de commande rapprochée, de protection et d'assemblage du hacheur.

La figure IV.16 donne une photographie du convertisseur réalisé

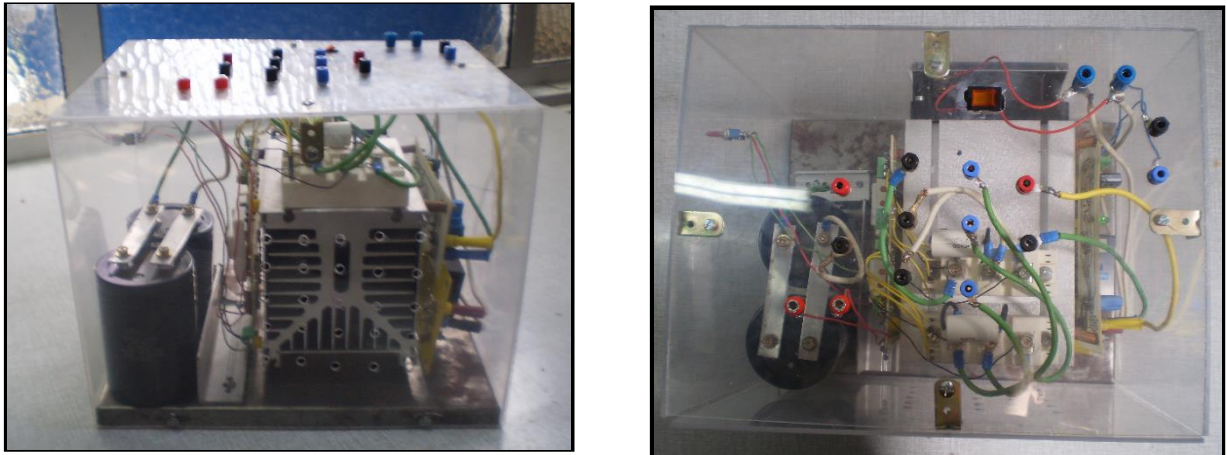


Figure IV-16 : Photographie du hacheur à quatre quadrants réalisé.

## IV.5. Implémentation des techniques de gestion de l'énergie

### IV.5.1. Construction du cycle NEDC par la régulation de la MCC

Dans cette partie, nous désirons produire le cycle européen de conduite (NEDC). La vitesse réelle de la machine sera captée à travers la génératrice tachymétrique et affichée sur l'oscilloscope. La figure IV.17 montre le schéma de commande implémenté sur PC (la commande par boucles de régulation en cascade) :

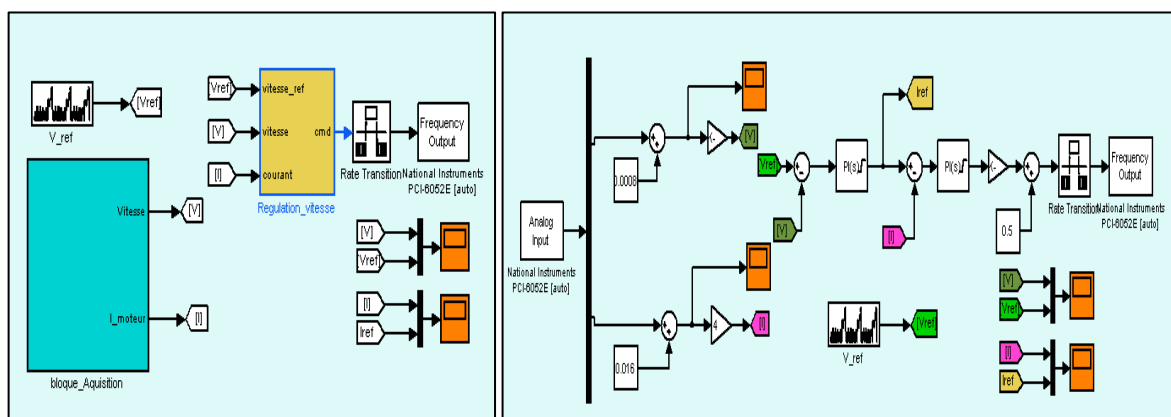
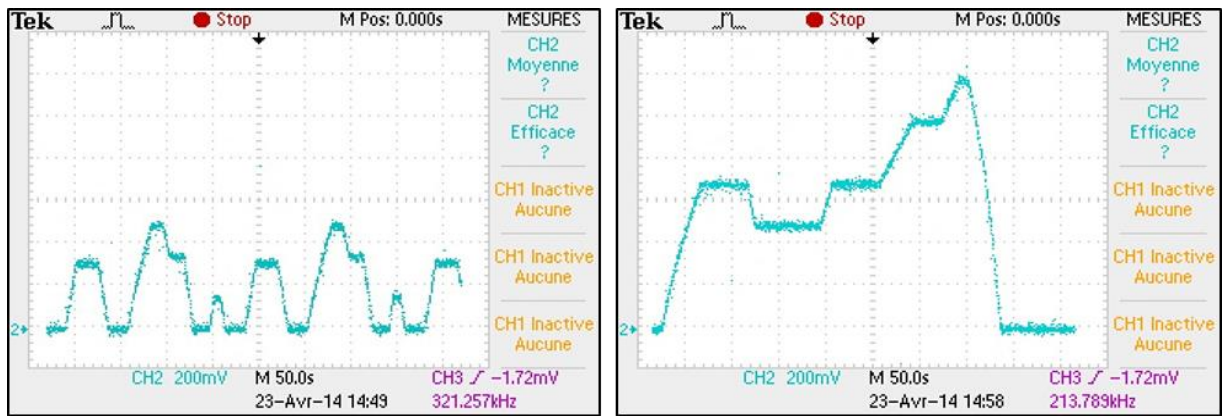


Figure IV-17 : Schéma de la régulation de la vitesse d'une MCC.

La fréquence d'acquisition est fixée à 10 kHz. Elle vérifie la condition de Shannon qui exige que la fréquence d'échantillonnage d'un signal doit être supérieure ou égale au double de sa fréquence maximale.

La figure IV-18 montre la vitesse mesurée :



**Figure IV-18** : Régulation de la MCC pour un cycle de vitesse NEDC. (Parcours urbain du cycle (à gauche) et parcours extra urbain du cycle (à droite)).

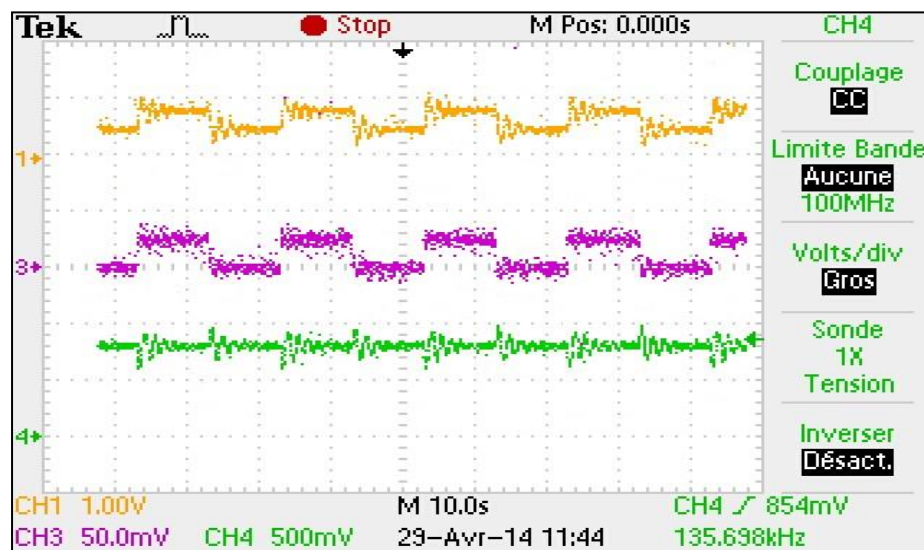
Puisque le cycle européen s'étale sur 1200s et l'écran de l'oscilloscope ne capte que 400s à la fois, la capture du cycle a été divisée en trois parties, deux d'entre elles sont identiques. Nous pouvons constater de la figure IV-18 que la régulation de la vitesse donne de bons résultats. En effet, la courbe donnée par la figure à gauche représente une moitié du parcours urbain du cycle européen où des vitesses faibles sont appliquées alors que l'autre courbe montre le parcours extra urbain du cycle où la vitesse du moteur atteint 1200 tr/mn.

#### IV.5.2. Test de l'émulateur de l'environnement extérieur du VE

##### IV.5.2.1. Cas d'un créneau de couple résistant

Tout d'abord, un simple test a été effectué en implémentant un créneau de courant de référence qui sera fourni par la génératrice et cela pour une vitesse du moteur de traction régulée (la référence fixe).

Les résultats obtenus sont donnés par la figure IV.19 :



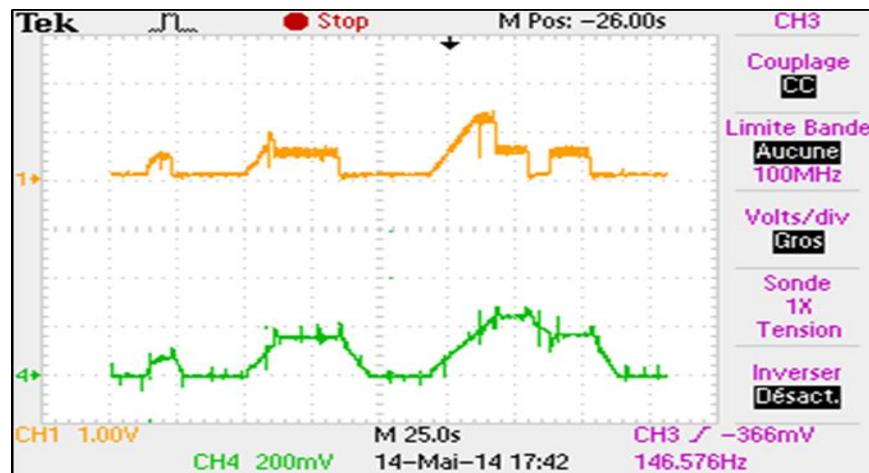
**Figure IV-19** : Vitesse (verte) et courant (jaune) du moteur de traction, courant fourni par la génératrice (violette).

A partir de cette figure IV.19 précisément de la courbe de vitesse (vert), nous pouvons remarquer que la régulation de la vitesse se fait d'une manière rapide, malgré la présence de fluctuations lors du changement du couple résistant exercé par la génératrice. Ces fluctuations sont aussi repérées sur la courbe (jaune) qui représente le courant absorbé par le moteur de traction. En effet, la réponse du système est immédiate ce qui engendre de faibles dépassements à chaque période.

#### IV.5.2.2. Cas d'un couple résistant réel

Un test est effectué par l'implémentation du modèle de la dynamique du véhicule étudié auparavant sur la carte PCI6052E. Ceci nous permet de récupérer le couple résistant de référence qui va être exercé par la génératrice à courant continu sur le moteur de traction. Ce couple est l'image du courant de référence qui doit être fourni par cette machine.

Le courant fourni par la génératrice ainsi que le cycle de vitesse suivi par le moteur de traction sont donnés par les figures IV.20 et IV.21.



**Figure IV-20** : Courant dans la génératrice (image du couple émulé) (Jaune) et la vitesse du moteur (verte) avec le cycle NEDC (parcours urbain).



**Figure IV-21** : Courant dans la génératrice (image du couple émulé) (Jaune) et la vitesse du moteur (verte) avec le cycle NEDC (parcours extra-urbain).

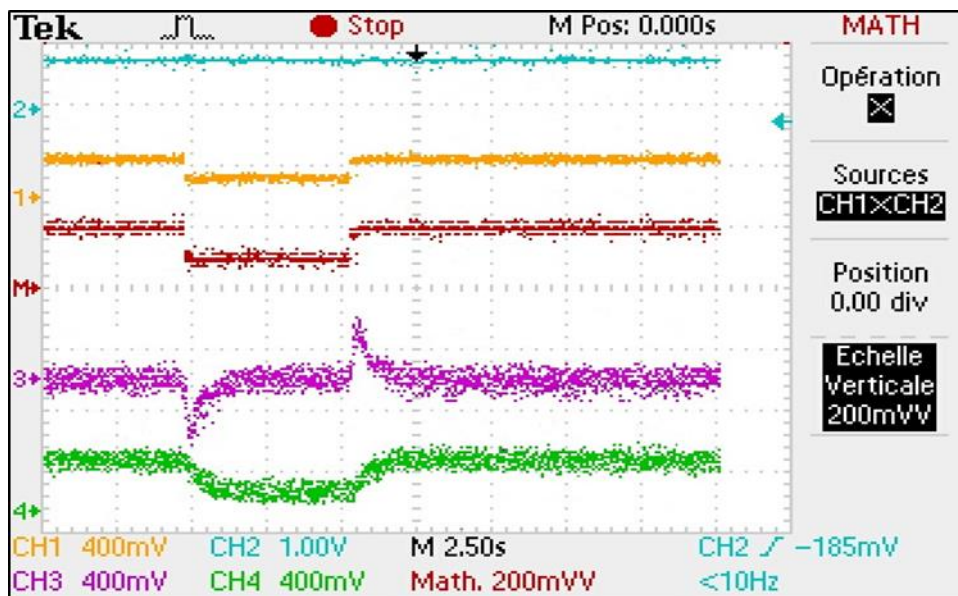
Les deux figures IV.20 et IV.21 montrent les résultats donnés par le test de l'émulateur de l'environnement du véhicule électrique. Nous remarquons que la régulation de la vitesse du moteur de traction donne de bons résultats malgré la présence d'un couple résistant, vu que la courbe de vitesse (en vert) est similaire à celle donnée par la simulation au chapitre précédent. Le courant circulant dans la génératrice qui est l'image du couple résistant est donnée par la courbe en jaune. Ce dernier est identique à celle donnée par la simulation, ainsi nous constatons la présence de quelques problèmes, où la génératrice ne peut pas fournir le couple de référence donné par le modèle à des petites vitesses. Un autre problème est rencontré au cours de ce test, c'est durant la phase de freinage où il est nécessaire de fournir un courant négatif, mais notre structure ne permet pas ceci. Le remède à ces problèmes est de connecter le système au réseau, ce qui permet de générer un couple résistant à n'importe quel point de fonctionnement.

### IV.5.3. Test de la technique de séparation fréquentielle

#### IV.5.3.1. Cas d'une charge résistive

Pour s'assurer que la technique de séparation fréquentielle donne de bons résultats, un test expérimental a été effectué en utilisant comme charge une résistance variable de  $42 \Omega$ . La variation de la charge entre des valeurs déterminées permet de générer un échelon de courant, ainsi que de voir la réponse des deux sources d'énergie.

Les résultats obtenus sont montrés sur la figure IV.22.



**Figure IV-22** : Résultats de la technique de séparation fréquentielle pour une charge résistive. Tension du bus (bleue), courant de la charge (jaune), puissance de la charge (rouge), courant des batteries (violette) et courant de la P&C (verte).

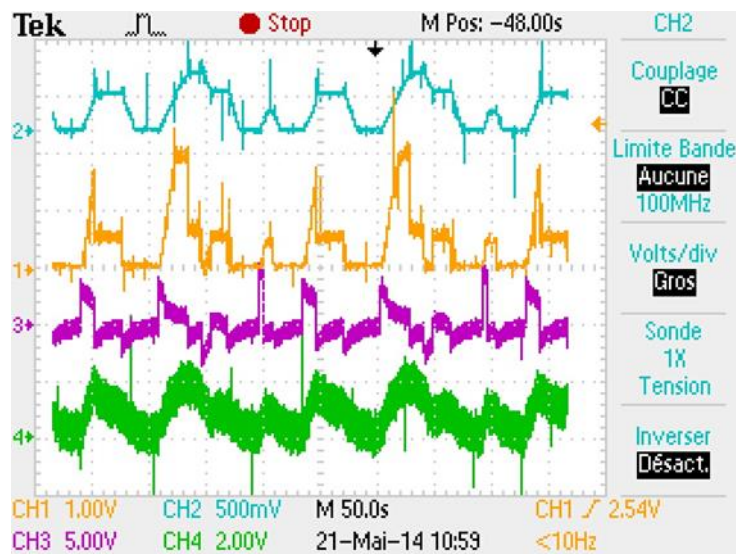
D'après les résultats obtenus, nous remarquons que la tension du bus continu (en bleue) est bien régulée et prend la valeur 80V tout au long du test. Nous constatons aussi que le courant

de la charge (en jaune) varie brusquement lors de la variation de la charge, ce qui confirme que cette technique assure bien la demande de courant (c.à.d. la puissance). Nous pouvons constater aussi à partir de ces résultats que le courant demandé par la charge (en jaune) est la somme du courant de la batterie (violette) et de celui de la PàC (verte) avec un rapport de  $(1-d)$  qui représente le gain du convertisseur. La batterie assure le pic de courant au moment de la variation de la charge et la PàC fournit le courant au régime permanent. La puissance de la charge est calculée à l'aide de l'option « MATH » sur l'oscilloscope et affichée en rouge.

#### IV.5.3.2. Cas d'une charge réelle (dynamique d'un véhicule)

Après le test et la validation des différentes parties de l'émulateur de la chaîne de traction électrique, nous passons aux tests sur le banc complet. Tout d'abord, nous commençons par l'implémentation de la technique de séparation fréquentielle en appliquant le cycle européen NEDC sur le moteur de traction. En même temps la génératrice exerce le couple résistant issu par le modèle dynamique du véhicule.

Les résultats obtenus par l'émulation sont représentés sur les figures : IV.23 ; IV.24 ; IV.25 et IV.26. La constante du temps du filtre de la séparation fréquentielle est fixée à  $T = 20$  s .



**Figure IV-23** : Résultat expérimental de la gestion de l'énergie par séparation fréquentielle avec le cycle NEDC (parcours urbain) : la vitesse (bleue) ; courant de l'émulateur (jaune) ; courant PàC (verte) et le courant de la batterie (violette).

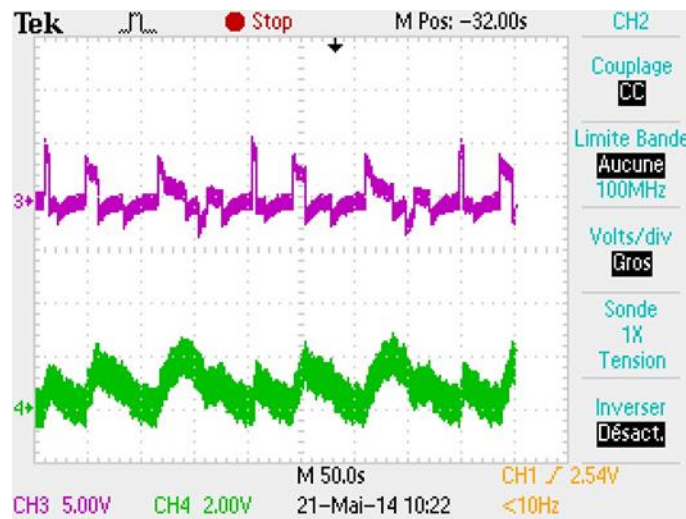


Figure IV-24 : courants fournis par les deux sources : la P&C (verte) et la batterie (violette).

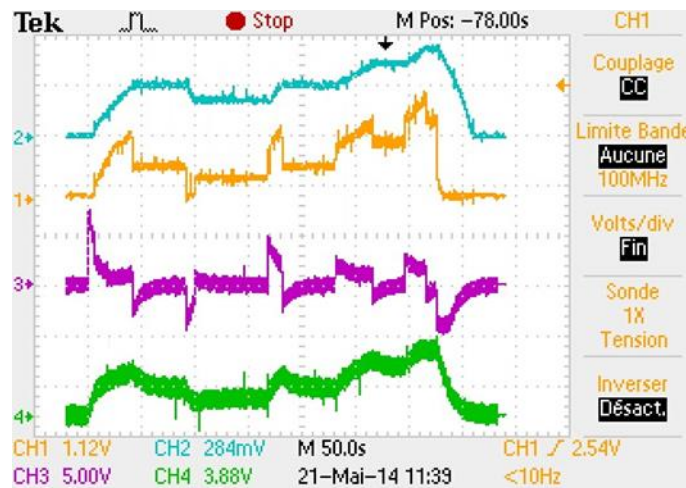


Figure IV-25 : Résultat expérimental de la gestion de l'énergie par séparation fréquentielle avec le cycle NEDC (parcours extra-urbain) : la vitesse (bleue) ; courant de l'émulateur (jaune) ; courant P&C (verte) et le courant de la batterie (violette).

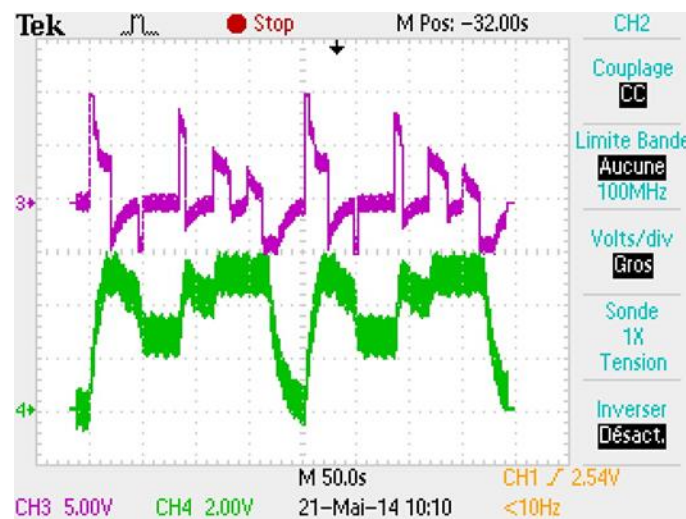


Figure IV-26 : Courants fournis par les deux sources : la P&C (verte) et la batterie (violette).



D'après les allures des courants fournis par les deux sources, nous constatons que la batterie fournit les courants transitoires ou bien impulsionnels dont la dynamique est plus forte que celle fixée par le filtre (20 s). Tandis que la PàC fournit les courants de basse fréquence. Ces constatations valident le principe de la gestion par séparation fréquentielle. Nous remarquons aussi que le courant fourni par la batterie peut être négatif bien que notre émulateur ne puisse pas récupérer l'énergie. Ces courants sont donc fournis par la PàC et absorbés par la batterie. Ce phénomène apparaît lorsque la puissance demandée par la charge est plus faible que la puissance fournie par la PàC, et dans ce cas, la batterie absorbe la différence de puissance.

## IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques résultats expérimentaux. Après une étape de description du banc d'essais réalisé afin de valider l'étude faite auparavant, nous avons effectué des expériences. Nous avons aussi introduit la notion d'émulation avec la citation de ces avantages. La réalisation d'un émulateur de PàC en utilisant un hacheur abaisseur a été vérifié par des simulations et confirmé expérimentalement que cet émulateur peut décrire le comportement électrique d'une PàC réelle, avec les mêmes performances et à moindre coût. Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de valider une technique de gestion de l'énergie, parmi celles appliquées au système constitué d'un véhicule hybride à deux sources d'énergie (PàC-batteries).

Cette partie nous a permis de valider les simulations faites dans les chapitres précédents par la confirmation des différents résultats obtenus en simulation et en pratique.

Cette technique qui a été validée permet une bonne répartition de la puissance demandée par le moteur sur les deux sources d'énergie, mais elle ne prend pas en considération le taux de charge des batteries, ce qui conduit à la chute de leur tension. Par la suite, la régulation de la tension du bus devient impossible et le moteur ne suit pas la vitesse du cycle. La seule solution est de recharger les batteries extérieurement à l'aide d'une alimentation stabilisée. Concernant l'implémentation de cette technique, elle est facile à implémenter et ne nécessite pas la connaissance du cycle de conduite à priori et consomme moins de temps de calcul, ce qui la rend parfaite pour une stratégie en ligne.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail accompli dans cette thèse porte sur la traction électrique et la gestion d'énergie dans un système alimenté par plusieurs sources d'énergie au niveau du LMSE (Laboratoire de Modélisation des Systèmes Énergétiques), notre travail avait pour objectif d'établir une loi de gestion d'énergie optimale, permettant d'améliorer les performances du véhicule en termes d'accélération et longévité de la PàC, en minimisant autant que possible la consommation d'hydrogène. Dans ce volet, la commande optimale sous contraintes a été adoptée au vu de son efficacité et de son adaptabilité aux systèmes à multi-paramètres dont l'identification est imprécise. Elle a permis d'établir une gestion optimale de l'énergie provenant de la PàC et de l'élément de stockage en tenant compte des contraintes subies par celle-ci.

Un élément clé de l'étude était de constituer un projet en simulation complet allant de la caractérisation des éléments jusqu'à la gestion d'énergie passant par la modélisation. A ce propos, la modélisation, le dimensionnement et la simulation des différents composants de la chaîne de traction et d'alimentation du véhicule électrique, nous ont permis de définir les caractéristiques électriques des sources d'énergie utilisées, la forme et l'ordre de grandeur de la puissance demandée par le véhicule. Un modèle simple de la pile a été mis au point dans le but de caractériser la tension de la pile en fonction de la puissance demandée. Ce modèle calcule la tension en fonction du courant débité ainsi que de la température de la pile mais aussi des pressions partielles de l'oxygène et l'hydrogène présents respectivement dans la cathode et l'anode de la pile.

L'architecture générale du banc d'essais est donnée comme suit : les deux sources choisis sont connectées par deux convertisseurs DC-DC au bus continu. Ces convertisseurs ont permis de réguler la tension du bus continu et de gérer le transfert de la puissance vers la charge. Le bus alimente le moteur de traction à travers un hacheur à quatre quadrants, ce qui permet de contrôler sa vitesse. Dans le but d'émuler l'environnement extérieur du VE, une génératrice du même type a été couplée avec le moteur principal d'un côté et branchée avec un autre hacheur à quatre quadrants de l'autre côté ce qui permet sa commande. La gestion de l'énergie constitue une tâche primordiale vis-à-vis du bon fonctionnement d'un VE, de ce fait et dans le cadre de ce travail de thèse plusieurs types de stratégies de gestion d'énergie ont été étudiées et simulées sous l'environnement Simulink/MATLAB, c'est le cas de la technique basée sur la commande optimale, la technique dite MEPT, la séparation fréquentielle, la technique dite « thermostat », et la stratégie de minimisation de consommation équivalente. Ces techniques donnent des

résultats qui diffèrent en termes de performances, mais permettent une répartition de la puissance demandée par la charge sur les deux sources de manière convenable.

Enfin, une stratégie en ligne basée sur l'ECMS a été développée et affinée dans la simulation. La performance de cette stratégie repose sur la gestion en ligne d'une variable appelée coefficient de pénalité, qui mesure le coût de l'énergie électrique dans la consommation totale du véhicule. Ce coefficient joue un rôle déterminant dans le choix de la commande générée par l'optimisation, de manière à ajuster la recharge ou la décharge de l'élément de stockage en temps réel. Plus important encore, la gestion du coefficient de pénalité est critique pour la performance de l'ECMS et sa robustesse par rapport aux contraintes du SoC. Par conséquent, il y a beaucoup de travail impliquant l'ajustement en ligne de ce coefficient. L'ECMS s'adapte parfaitement aux contraintes imposées par le dimensionnement des éléments du système hybride. Une étude plus approfondie doit être faite pour assurer le bon fonctionnement de cet algorithme, la diminution de la consommation atteint un bon pourcentage en comparaison avec le cas sans hybridation, et qui offre une base de comparaison pour évaluer les stratégies de gestion en ligne.

En perspective, il serait intéressant de :

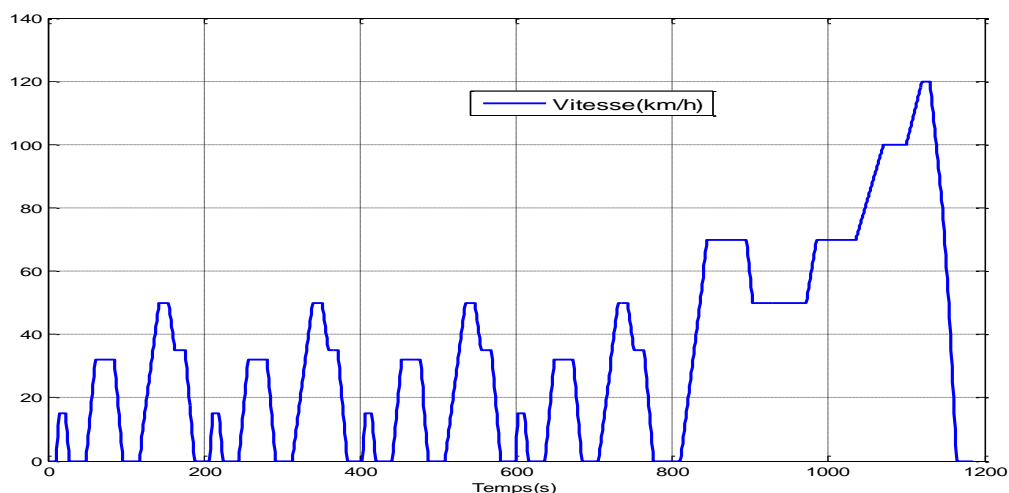
- Utiliser d'autres types de convertisseurs statiques, qui permettent un rapport d'élévation important et qui respectent les contraintes liées aux sources d'énergie ; tels que : les hacheurs multiniveaux, les hacheurs entrelacés, les hacheurs en cascades...
- Tester ces techniques de gestion sur une plateforme composée d'éléments réels ;
- Rechercher encore des stratégies de gestion et de supervision optimale et en ligne à la fois du système multi-sources.
- Enrichir le travail par l'étude de l'influence du taux d'hybridation de chaque structure étudiée.

# **ANNEXES**

## Annexe A : Les cycles de conduite considérés

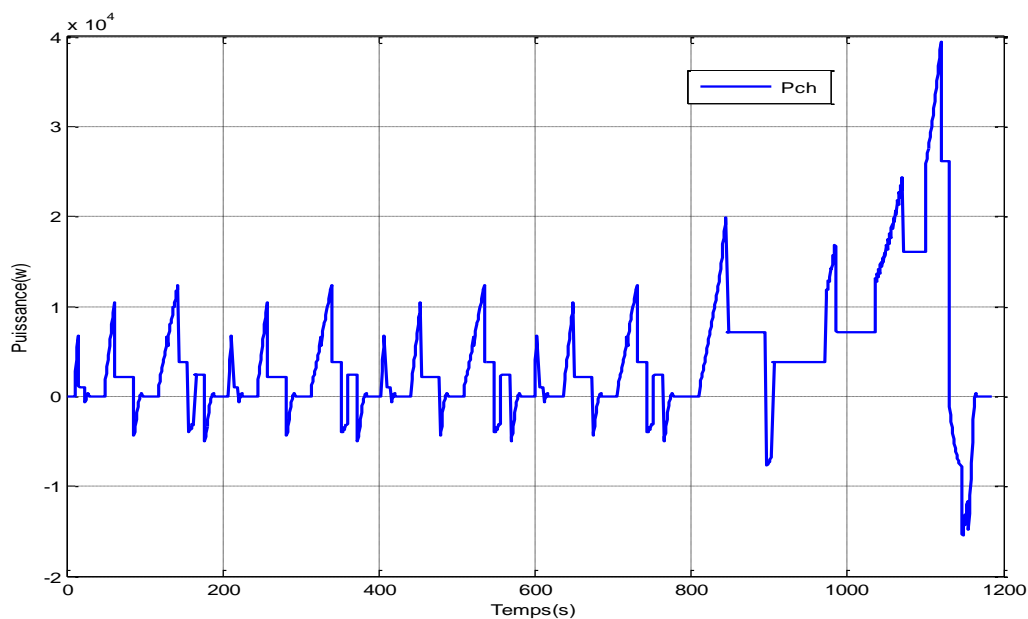
On a considéré plusieurs cycles de conduite [78, 79]:

**The New European Driving Cycle (NEDC)** (fig A.1) : est actuellement utilisé en Europe et dans certains pays (Pologne, Russie, Turquie, Arabie Saoudite, Chine, Hong Kong, Inde, Singapour, etc.). Le cycle se compose de 4 km de circulation urbaine (à 18,7 km/h de moyenne) et de 7 km en extra- ou périurbain (à 62,6 km/h de moyenne). Le cycle urbain a été construit à partir de mesures de cinématiques de véhicules circulant à Paris, en 1962.



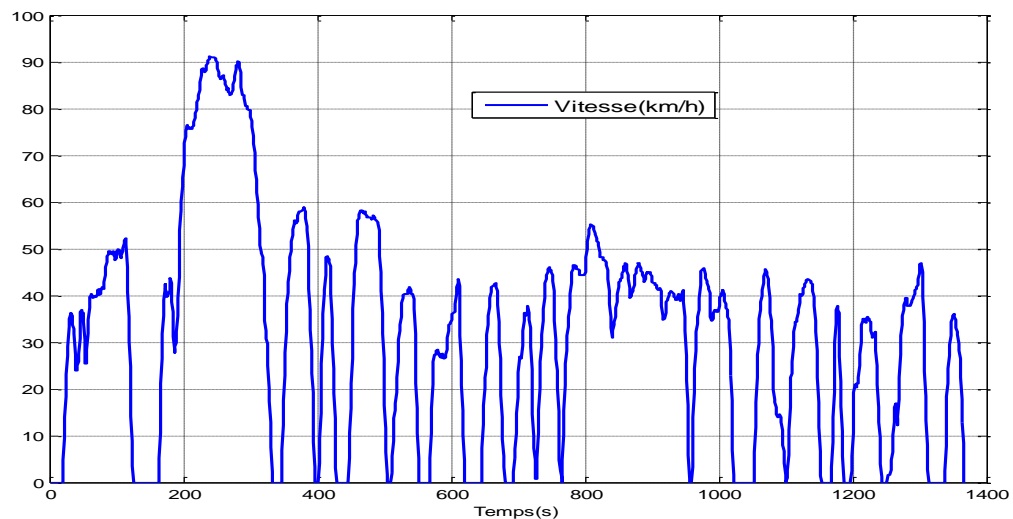
**Figure A.1** : Cycle européen de vitesse NEDC.

La puissance de charge a été calculée à partir de ce profil de vitesse en utilisant les caractéristiques mécaniques du véhicule (voir § II.3.1).

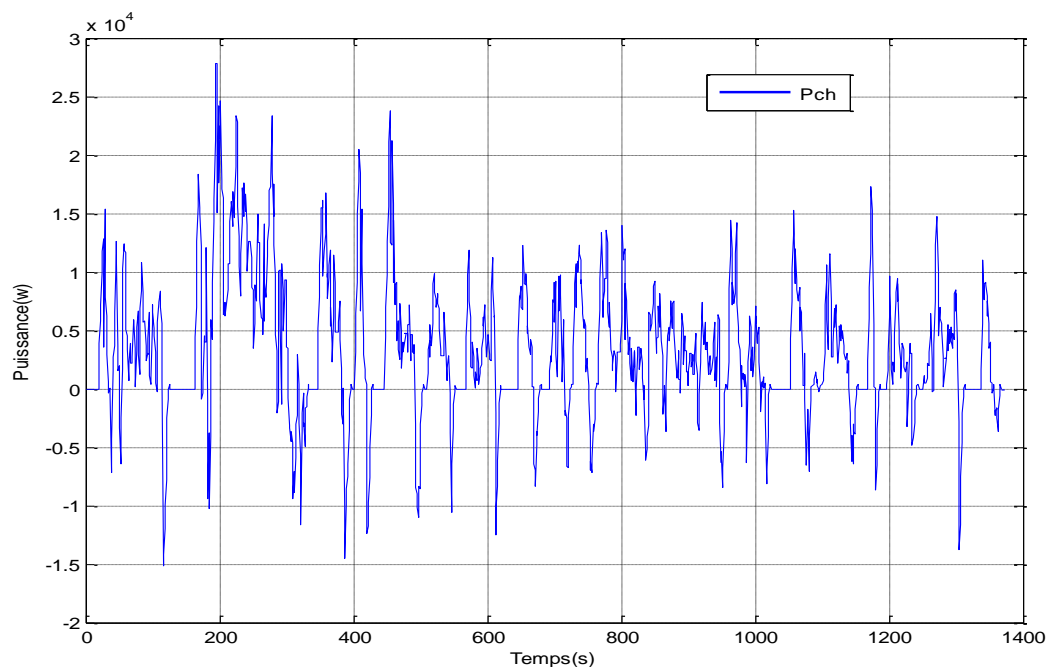


**Figure A.2** : Profil de puissance de charge demandée (cycle NEDC).

**The Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS)** (fig. A.3) : Le cycle de conduite urbain UDDS est le cycle de conduite, habituellement mesuré à l'aide d'un dynamomètre, qui détermine la consommation en carburant d'un véhicule léger en ville. Le cycle en question est une simulation d'une route urbaine qui fait environ 12,1 km (7,4 mi) de longueur et représente un parcours d'une durée de 1 369 secondes (soit environ 23 minutes). Le cycle est constitué de multiples arrêts, et la vitesse maximale qui est atteinte est de 91,3 km/h (56,7 mi/h). La vitesse moyenne du cycle est de 31,5 km/h (19,6 mi/h).

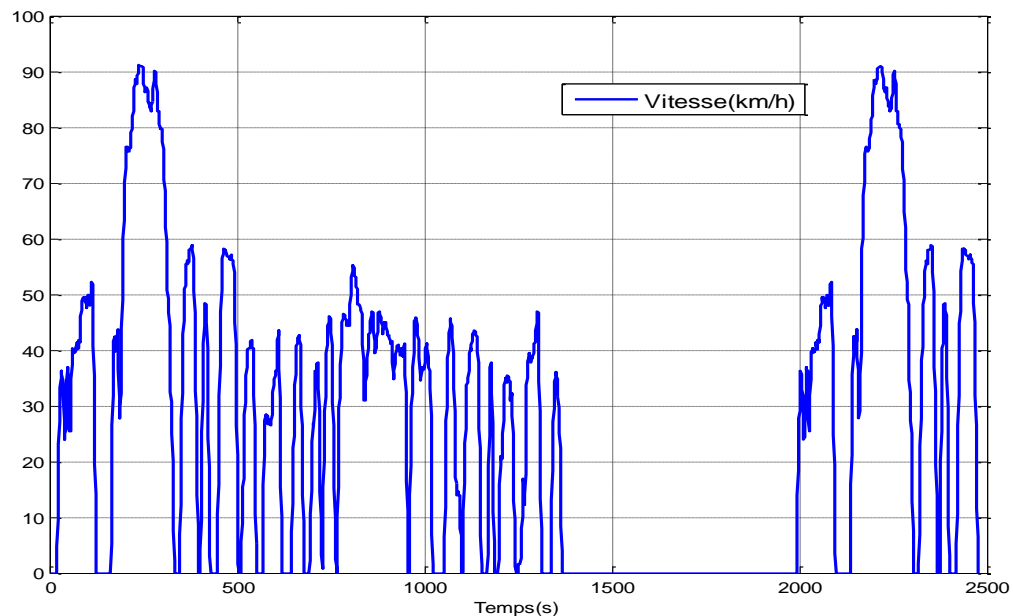


**Figure A.3** : Le cycle Américain UDDS.

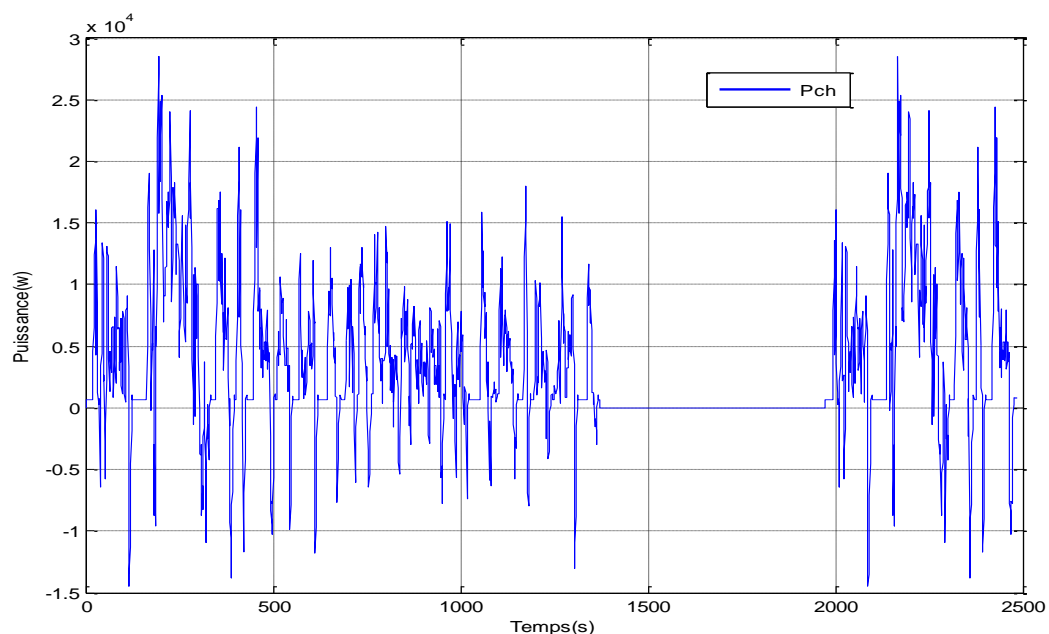


**Figure A.4** : Profil de puissance de traction du cycle UDDS.

**The Federal Test Procedure (FTP)** (fig. A.5): Le cycle U.S. FTP-75 est utilisé en Amérique du Nord pour la certification des émissions et de l'économie en carburant des véhicules légers. Le cycle est aussi traditionnellement utilisé pour évaluer les émissions lors des démarrages à froid et à chaud ainsi que la consommation de carburant. Il représente les conditions de conduite urbaine à basse vitesse, avec des accélérations et des décélérations modérées.



**Figure A.5** : Le cycle de conduite FTP.

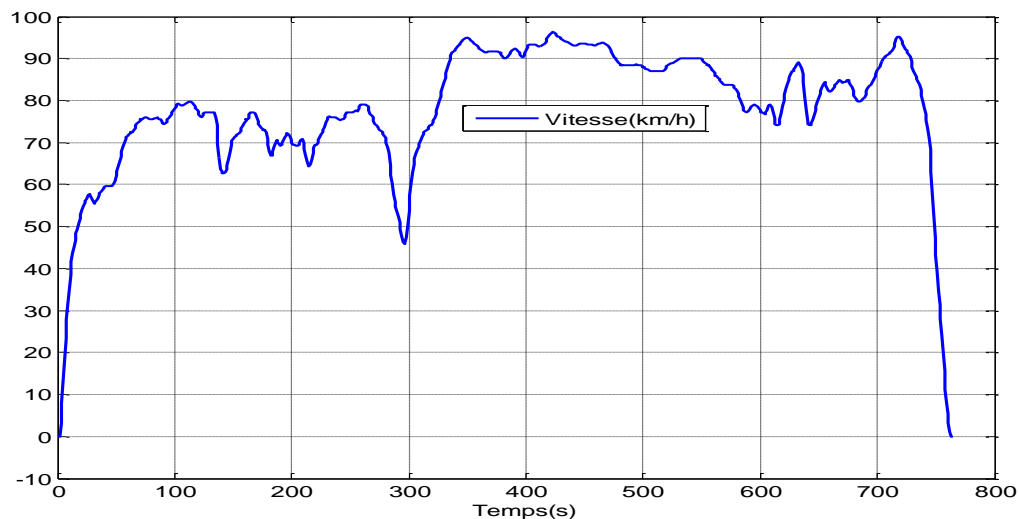


**Figure A.6** : Profil de puissance de traction pour le cycle FTP.

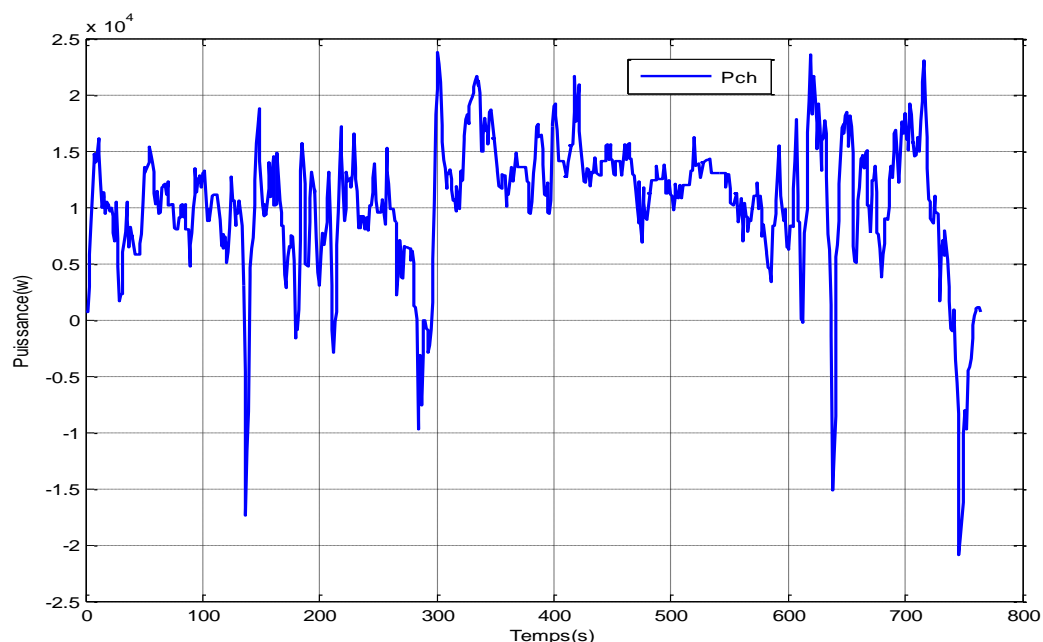


Le cycle FTP-75 comprend les éléments suivants : (i) phase de démarrage à froid, 505 secondes (un peu plus de 8 minutes) ; (ii) phase transitoire, 864 secondes (environ 14 minutes) ; et (iii) démarrage à chaud, 505 secondes (un peu plus de 8 minutes).

**The Highway Fuel Economy Test (HWFET)** (fig. A.7): L'essai d'économie de carburant sur route (HWFET) simule la conduite à plus grande vitesse sur route. Il faut 765 secondes (environ 13 minutes) pour le compléter, sur une distance parcourue totale de 16,5 km. La vitesse maximale du cycle est de 96,5 km/h. L'essai est précédé d'un cycle de réchauffement.



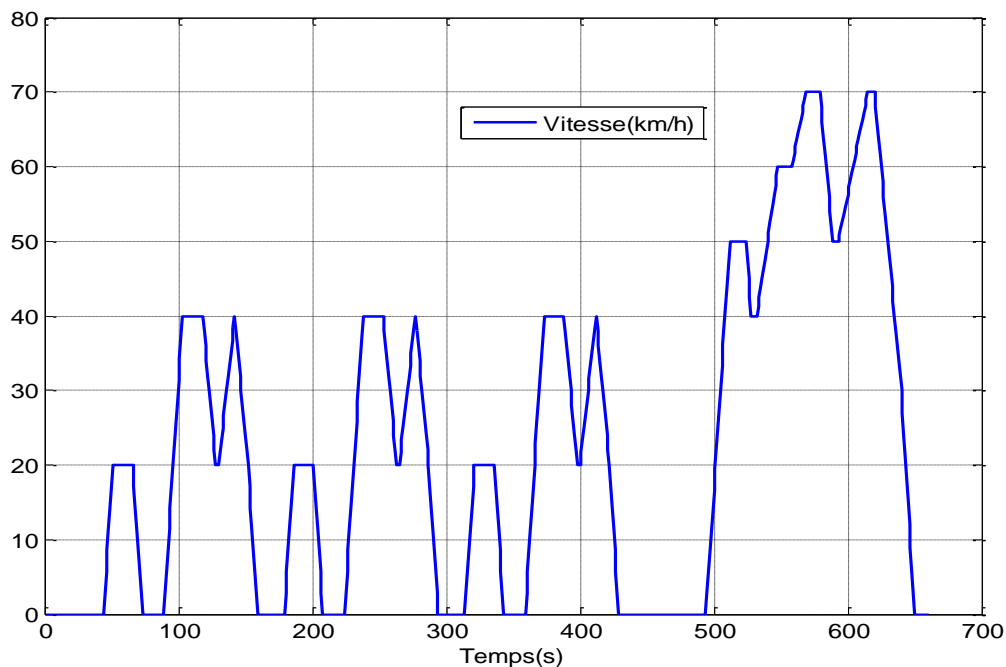
**Figure A.7** : Le cycle de conduite HWFET.



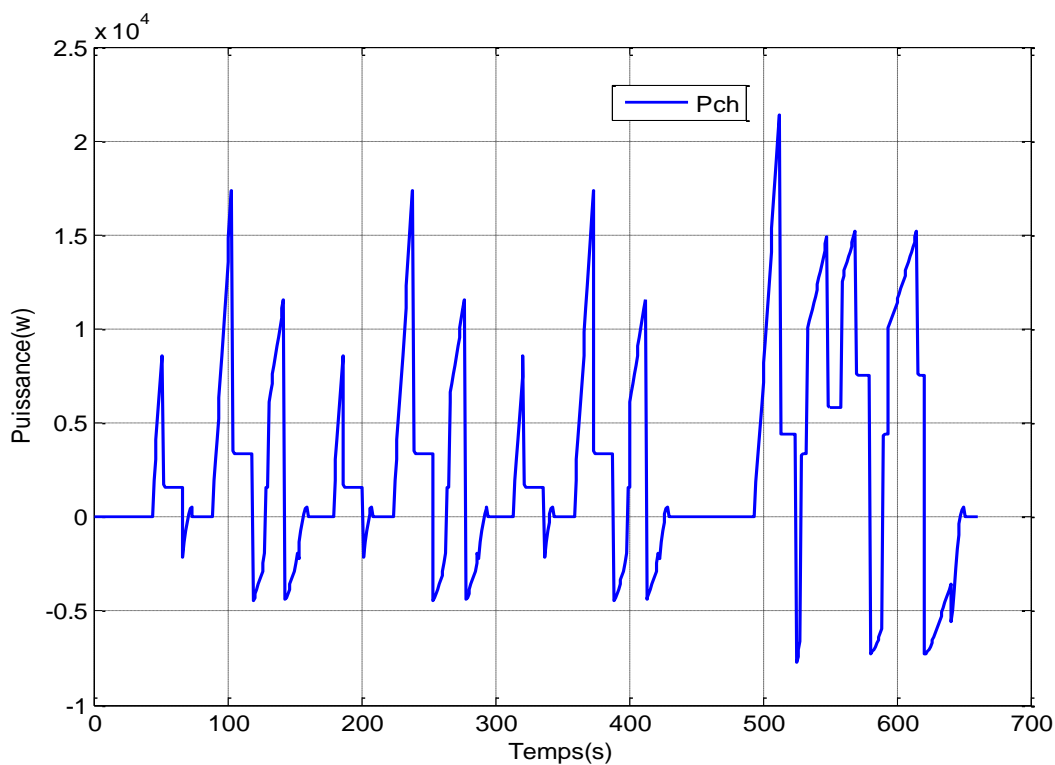
**Figure A.8** : Profil de puissance demandée pour le cycle FTP.

**Le cycle de conduit japonais (1015)** (Fig. A.9) Le cycle Japonais 10-15 mode (norme japonaise) est utilisé pour la certification des émissions et de la consommation de carburant au

Japon. Il représente à la fois un cycle urbain et autoroutier, comprenant des phases de ralenti, des accélérations, des décélérations et des phases de stabilisé. Les mesures sont effectuées moteur chaud, après une procédure de chauffe moteur standard, il faut 660 secondes (11 minutes), sur une distance parcourue totale 4.16 km, avec une vitesse moyenne de 22.7 km/h [80].



**Figure A.9** : Le cycle de conduite japonais (1015).



**Figure A.8** : Profil de puissance demandée pour le cycle 1015.

## ANNEXE B : Les programmes développés

### 1. Programme MPLAB de l'émulateur de la PàC

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <p30f4011.h>
#include <dsp.h>
#include "table.h"
//-----La configuration du DSPIC-----
    _FOSC(CSW_FSCM_OFF & XT_PLL16);
    _FWDTC(WDT_OFF);
    _FBORPOR(PBOR_ON & BORV_20 & PWRT_64 & MCLR_EN);
//----- la déclaration des constantes -----
    #define FCY 3200000 // xtal = 8Mhz; PLLx16 ->
    #define FPWM 10000 // la frequence de la MLI 10 kHz
//----- la declaration de variables -----
    unsigned int I=0,V=0;
    unsigned int periode_pwm;
    fractional cmd,l1;
    unsigned long duty_cycle;
    tPID fooPID;
    fractional abcCoefficient[3] __attribute__ ((section (".xbss, bss, xmemory")));
    fractional controlHistory[3] __attribute__ ((section (".ybss, bss, ymemory")));
    fractional kCoeffs[] = {0,0,0};
//----- Les prototpes des fonctions utilisées -----
    void __attribute__((__interrupt__)) _ADCInterrupt(void);
    void Init_ports(void);
    void Init_ADC(void);
    void Init_MCPWM(void);
//----- définitions des fonctions -----
void Init_ports(void)
{
    TRISB = 0xFFFF;
    TRISC = 0;
    TRISD = 0;
    TRISE = 0xFFFF; //configurer comme entrée
    TRISF = 0;
}
void Init_MCPWM(void)
{
    periode_pwm=FCY/FPWM -1;
    PTPER = periode_pwm;
    duty_cycle=periode_pwm;
    PDC1 = duty_cycle;/
    PTMR = 0;
    PTCON = 0x8000;
    OVDCON = 0x0300;//0xff00
    SEVTCMP = 0;
    PWMCON1 = 0x0f01; //sorties indépendantes et L1 est utilise PWMCON2 =
0x0000;
}
void Init_ADC(void)

```

```

{
    ADCON1=0x00EC;           //type de codage de ADC : entier
    ADCON2=0x0104
    ADCON3=0x1F3F;//31Tad;32Tcy
    ADCHS =0x0002;// I:AN0+avec CH1,V:AN2+avecCH0
    ADPCFG=0x0000;
    ADCSSL=0x0000;
    IFS0bits.ADIF = 0;           // Adc interruption flag Off
    IEC0bits.ADIE = 1;         // Adc interruption On
    ADCON1bits.ADON = 1;       // active le module ADC
}
//----- les programmes d'interruptions -----
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _ADCInterrupt(void)
{
    IFS0bits.ADIF = 0;
V=ADCBUF0;//aquisition de la tension en entier
    I=ADCBUF1<<6;//aquisition du courant en entier
    I1=Ia_PV[V];
    fooPID.controlReference=I1;
    I=I+0x8000;
    fooPID.measuredOutput = I;
    PID(&fooPID);
    cmd=fooPID.controlOutput;
    if (cmd > Q15(0.95)) cmd=Q15(0.95);//ou cas ou il y'a de la saturation
    if (cmd < Q15(0.05)) cmd=Q15(0.05);//ou cas ou il y'a de la saturation
    duty_cycle=(cmd>>2);//decalage!!
    PDC1 = duty_cycle;
}
//----- le programme principal -----
int main(void)
{
    Init_ports();
    Init_MCPWM();
    Init_ADC();
    fooPID.abcCoefficients = &abcCoefficient[0]; //allocation dynamique
fooPID.controlHistory = &controlHistory[0];//
    PIDInit(&fooPID);
    kCoeffs[0] = Q15(0.01);//coefficient Kp
    kCoeffs[1] = Q15(0.0002);//coefficient Ki
    kCoeffs[2] = Q15(0); //coefficient Kd
    PIDCoeffCalc(&kCoeffs[0], &fooPID);
    while(1){}
}
//*****
//                               Fin du programme
//*****

```

## 2. Le programme du modèle de la PàC sur MATLAB

```

function Vpac=pileac (pO2,pH2, lambda, Tpac, pca, i)
c1=10;
tm=0.0125;
b11=0.005139;
b12=0.00326;
b1=b11*lambda-b12;
b2=350;
sigma=b1*exp (b2*(1/303-1 /Tpac ));
R=tm/sigma;
psat=10^(-1.69*10^(-10)*Tpac^4+3.85*10^(-7)*Tpac^3-3.39*10^(4)*Tpac^2+0.1-20.92);
if (pO2/0.1173+psat)<2
    c2=(7.16*10^(-4)*Tpac-0.622)*(pO2/0.1173+psat)+(-1.45*10^(-3)*Tpac-1.68);
else
    c2=(8.66*10^(-5)*Tpac-0.068)*(pO2/0.1173+psat)+(-1.6*10^(-4)*Tpac-0.54);
end
imax=2.2;
c3=2;
va=(-1.618*10^(-5)*Tpac+1.618*10^(-2))*(pO2/0.1173+psat)^2+(1.8*10^(-4)*Tpac-0.166)*(pO2/0.1173+psat)+(-5.8*10^(-4)*Tpac+0.5736);
v0=0.279-0.85*10^(-3)*(Tpac-298.15)+4.3085*10^(-5)*Tpac*[log((pca-psat)/1.01325)+1/2*log(0.1173*(pca-psat)/1.01325)];
E=1.229-0.85*10^(-3)*(Tpac-298.15)+4.3085*10^(-5)*Tpac*[log((pH2)/1.01325)+1/2*log(pO2/1.01325)];
vact=v0+va*(1-exp(-c1*i));
vohm=i*R;
vconc=i*(c2*i/imax)^(c3);
vpac=314*(E-vact-vohm-vconc);
end

```

## ANNEXE C : La carte d'acquisition PCI-6052E

### 1. Introduction

La carte PCI-6052E permet de faire l'acquisition et l'envoi des signaux analogiques et numériques en temps réel. Ainsi, on peut contrôler le banc d'essais et visualiser les différentes grandeurs captées sur PC. Cette carte a plusieurs spécificités qui seront détaillées par la suite.

### 2. Caractéristiques principales de la carte

#### 2.1. Module analogique

##### 2.1.1. Caractéristiques des entrées analogiques

- Nombre de canaux : 16, 8 en mode différentiel ;
- Type de convertisseur A/N : successive, approximation ;
- Taux d'échantillonnage maximal : 333 kS/s ;
- Résolution : 16 bits, 1 à 65536 ;
  - Intervalles des signaux d'entrée :

intervalles	Intervalle de l'entrée	
	Bipolaire	Unipolaire
20 V	±10 V	—
10 V	±5 V	0 à 10 V
5 V	±2.5 V	0 à 5 V
2 V	±1 V	0 à 2 V
1 V	±500 mV	0 à 1 V
500 mV	±250 mV	0 à 500 mV
200 mV	±100 mV	0 à 200 mV
100 mV	±50 mV	0 à 100 mV

**Tableau C-0-1** : intervalle de variation des signaux d'entrée

##### 2.1.2. Caractéristiques des sorties analogiques

- Nombre de canaux : 2 ;
- Résolution : 16 bits, 1 à 65536 ;
- Taux d'échantillonnage maximal : 333 kS/s ;
- La taille du buffer (FIFO) : 2048 échantillons ;
- Transfert de données : DMA, interruptions, I/O programmées ;
- Intervalle de tension : ±10 V, 0 to 10 V, ±AOEXT REF, 0VtoAO EXT REF ;
- Couplage de sortie : continu ;
- Impédance de sortie : 0.1  $\Omega$  max ;
- Courant de sortie : ±5 mA max ;
- Protection : un mini circuit vers la terre.

## 2.2. Module numérique

### 2.2.1. Entrées/ sorties numériques

- Nombre de canaux : 8 ;
- Compatibilité : 5V TTL/CMOS ;

### 2.2.2. Entrées / sorties des compteurs

- Nombre de canaux :
  - Timers/ up/down counter : 2 ;
  - Frequency scaler : 1.

AI 8	34	68	AI 0
AI 1	33	67	AI GND
AI GND	32	66	AI 9
AI 10	31	65	AI 2
AI 3	30	64	AI GND
AI GND	29	63	AI 11
AI 4	28	62	AI SENSE
AI GND	27	61	AI 12
AI 13	26	60	AI 5
AI 6	25	59	AI GND
AI GND	24	58	AI 14
AI 15	23	57	AI 7
AO 0	22	56	AI GND
AO 1	21	55	AO GND
AO EXT REF	20	54	AO GND
P0.4	19	53	D GND
D GND	18	52	P0.0
P0.1	17	51	P0.5
P0.6	16	50	D GND
D GND	15	49	P0.2
+5 V	14	48	P0.7
D GND	13	47	P0.3
D GND	12	46	AI HOLD COMP
PFI 0/AI START TRIG	11	45	EXT STROBE
PFI 1/AI REF TRIG	10	44	D GND
D GND	9	43	PFI 2/AI CONV CLK
+5 V	8	42	PFI 3/CTR 1 SRC
D GND	7	41	PFI 4/CTR 1 GATE
PFI 5/AO SAMP CLK	6	40	CTR 1 OUT
PFI 6/AO START TRIG	5	39	D GND
D GND	4	38	PFI 7/AI SAMP CLK
PFI 9/CTR 0 GATE	3	37	PFI 8/CTR 0 SRC
CTR 0 OUT	2	36	D GND
FREQ OUT	1	35	D GND

**Figure C.1:** l'architecture des pins de la carte PCI-6052<sup>E</sup>.

## ANNEXE D : Les batteries «Valve regulated rechargeable lead acid battery»

### 1. Les batteries

Les batteries utilisées dans notre projet sont de type :

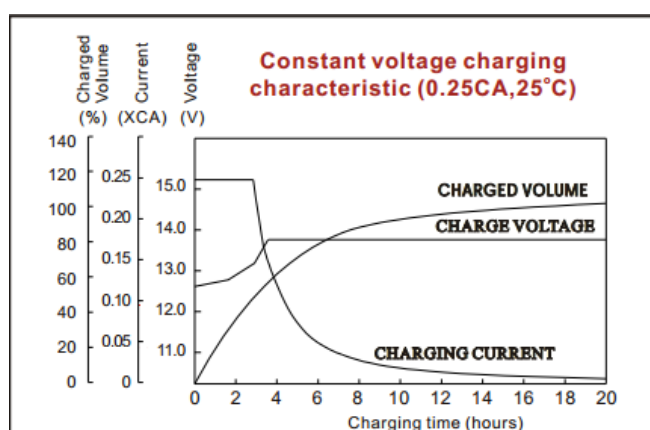
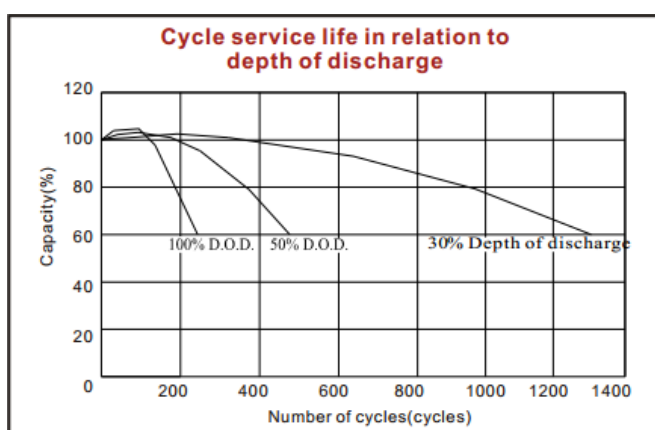
a) La batterie 6FM100EX 12V 100AH :



**Figure D.1** : photographie de la batterie 6FM100EX 12V 100AH

Cette batterie a les caractéristiques suivantes :

- Une tension nominale de 12 V ;
- Le nombre des cellules 6 ;
- La capacité de stockage 100Ah ;
- La résistance interne  $5.2\ m\Omega$  ;
- Le courant de décharge maximal 900A (5s) ;
- Le courant de charge maximal 30A ;
- Le courant de court-circuit 2100A.





b) La batterie SP 12-12 12V 12Ah :



**Figure D.2** : photographie de la batterie SP 12-12 12V 12Ah.

Cette batterie a les caractéristiques suivantes :

- Une tension nominale de 12 V ;
- La capacité de stockage 12Ah ;
- La résistance interne  $17\text{ m}\Omega$  ;
- Le courant de charge maximal 4.8A ;
- Le courant de court-circuit : 600 A.

## 2. Le radiateur

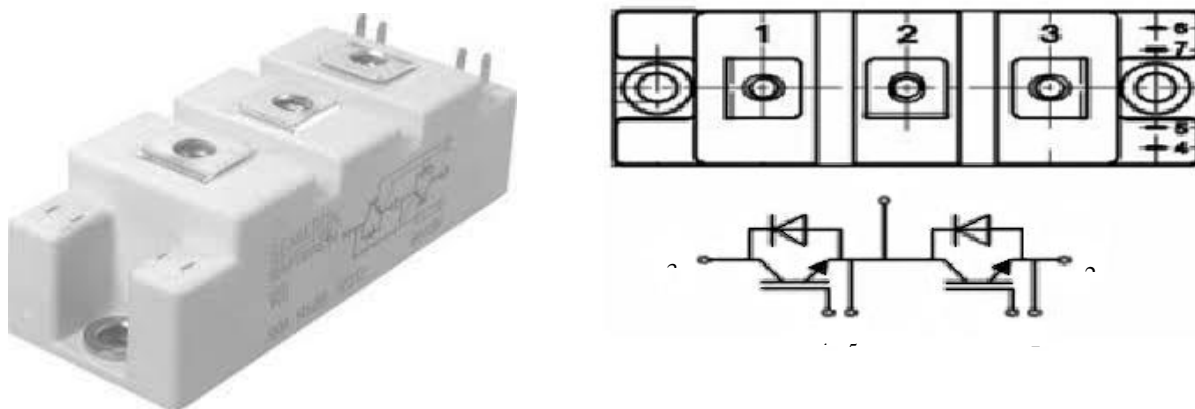
L'importance de dissiper la chaleur due aux pertes par commutation et par conduction dans les composants semi-conducteurs est primordiale. Sachant que cette élévation de température constitue, dans la majorité des cas, la cause principale de l'endommagement des composants, et donc celui du convertisseur. Pour cette raison, on a placé les composants de puissance (bras d'IGBT) sur un radiateur dissipateur en aluminium représenté sur la figure C.3. L'aluminium est un bon conducteur de chaleur à prix raisonnable, et facile à usiner, permettant le transfert de la chaleur par conduction. En outre, le radiateur est équipé d'un ventilateur de type axial aspirant, permettant le refroidissement du convertisseur à l'air forcé. Il est à noter que le radiateur est de type P3/180, c'est à dire de profil P3 et de longueur 180 mm, et le ventilateur peut être alimenté sous une tension 220V/50 ou 60 Hz [76].



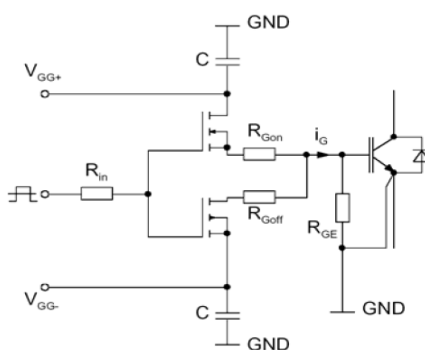
**Figure D.3** : Photographie du radiateur P3/180 [76].

## 3. Module d'IGBTs

La figure C.4 donne une photographie du module SKM75GB123D à IGBT ainsi que le schéma du câblage. Ce module est composé de deux IGBTs intégrant des diodes en antiparallèle et montés en série afin de réaliser un bras. Ces IGBTs peuvent supporter une tension continue maximale de 1200VDC et un courant nominal de 75A à  $T=25^{\circ}\text{C}$  et 60A à  $T=80^{\circ}\text{C}$  [76].



**Figure D.4 :** Module IGBT SKM75GB123D [76].



**Figure D.5 :** Etage de sortie du circuit de commande [76].

Les IGBTs sont commandés à la fermeture par un ordre de grille  $V_{ge}=15\text{V}$ , et à l'ouverture par  $V_{ge}=-7\text{V}$ . Ces deux commandes sont délivrées par le driver SKHI22A à travers des résistances additionnelles de grille  $R_{gon}$  et  $R_{off}$ . Ces résistances sont soudées sur la carte de commande rapprochée. Le rôle des résistances de grille est de limiter la vitesse d'établissement du courant, et par suite les surtensions induites par les inductances parasites (celles du câblage notamment). En effet, on peut en première approximation faire correspondre la mise en conduction d'un IGBT à une charge d'un réseau RC. Le choix d'une valeur importante de  $R_g$  a pour effet de protéger l'IGBT contre les surtensions destructives à l'ouverture en cas de court-circuit, en contrepartie ceci augmente les pertes aux commutations [76].

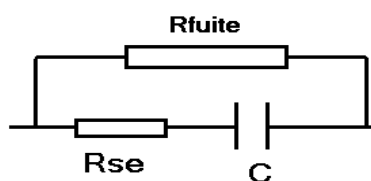
La commande des IGBTs est réalisée en imposant une tension entre grille et émetteur. Dans nos convertisseurs les IGBTs sont commandés par un driver de type SKHI22A.

Au premier ordre, la charge d'un IGBT ressemble à la charge d'un circuit RC. La résistance est fixée par l'opérateur, c'est la résistance de grille, tandis que la capacité est déterminée par le composant lui-même. L'IGBT est passant lorsque la tension de grille dépasse un certain seuil ( $V_{GE(th)} = 5,5 \text{ V}$  typiquement pour le SKM75GB123D), mais l'augmentation de la tension de grille diminue la tension  $V_{cesat}$  pour un courant donné, et donc les pertes. Ainsi, ces modules ont une commande de grille optimisée à 15V. La dynamique de l'IGBT est ainsi déterminée par le choix de la résistance de grille, et le choix des tensions de commande. Le driver SKHI 22A délivre une tension +15V/-7V, ce qui confère à l'IGBT une bonne dynamique à la fermeture et à l'ouverture, et réduit les pertes aux commutations [76].

#### 4. Les condensateurs de filtrage

Le filtrage des différentes tensions redressées (tension du bus continu pour l'onduleur, tension de sortie pour le hacheur survolteur et tension d'entrée pour le hacheur quatre quadrants) est assuré par deux condensateurs électrolytiques de type SKC3M340A et de valeur  $3300\mu\text{F}/400\text{V}$  montés en parallèle, soit une capacité équivalente de  $6600\mu\text{F}/200\text{V}$ , avec un courant admissible de 10.1A à 40°C et 8.2A à 85°C. La capacité du condensateur est déterminée en fonction de la qualité de filtrage désirée et du courant efficace admissible [76].

Le courant admissible constitue un paramètre très important pour le choix du condensateur. En effet, la température du cœur du condensateur doit être maintenue la plus basse possible pour augmenter la durée de vie, qui est du type  $K * 2^{(T_{max}-T_{hs})/10}$  où  $T_{max}$  est la valeur maximale de la température admissible, où  $T_{hs}$  est la température maximale atteinte effectivement par le condensateur (*hot spot temperature*). Le modèle simplifié équivalent du condensateur, représenté sur la figure C.6, étant une capacité (C) en série avec une résistance ( $R_{se}$ ) et les deux en parallèle avec une résistance de fuite ( $R_{fuite}$ ), la puissance dissipée est celle dissipée dans la résistance en série. Certains fabricants proposent d'augmenter le courant admissible en dissipant la chaleur par le fond, fixé sur un radiateur, ou bien en faisant circuler un flux d'air autour du condensateur [76].



**Figure D.6 :** Modèle électrique du 1er ordre d'un condensateur électrolytique [76].

Il existe différentes technologies de condensateurs, mais à l'heure actuelle, les condensateurs électrochimiques paraissent être les plus adaptés aux montages d'électronique de puissance dans les gammes de puissance et de tension des IGBTs, du fait de leur valeur capacitive et de leur tension élevée [76].

### 5. Les condensateurs de découplage (snubbers)

Afin de limiter les surtensions dues à l'inductance parasite des câblages, lors des commutations, des condensateurs sont placés auprès des composants de puissance aux bornes du bus continu. Ainsi, ceci permet d'absorber les courants harmoniques HF et de réduire les pertes dans l'onduleur. Ces condensateurs constituent également une protection contre les surtensions lors l'extinction des court-circuit [76].



**Figure D.7 :** Condensateurs de découplages. [76]

### 6. Circuit de commande des IGBTs (driver SKHI22A)

Le driver SKHI22A, dont le boîtier est donné par la figure C.8, est un circuit de commande fabriqué par SEMIKRON, qui assure des opérations d'amplification, d'isolation des signaux de commande et de protection. Ce circuit délivre un signal de commande entre +15V et -7V, ce qui confère à l'IGBT une bonne dynamique à la fermeture et à l'ouverture, et réduit les pertes par commutations. Ce driver peut être aussi utilisé pour la commande des thyristors. Il est composé de deux parties complémentaires permettant le contrôle des deux interrupteurs du même bras [76].



**Figure D.8 :** Driver SKHI22A [76].

Le schéma synoptique donné par la figure C.9, montre les différentes fonctions assurées par ce driver notamment l'isolation galvanique entre l'étage de commande et celui de puissance. Notons une autre particularité importante et essentielle pour la protection des IGBTs, les retards générés au niveau des signaux de commande, afin d'éviter le chevauchement des commandes. En outre, le driver SKHI22A présente les avantages suivants [76] :

- ✓ Un seul circuit de commande pour un bras d'IGBTs, ou deux bras mis en parallèles ;
- ✓ Ajustage externe du retard entre les commandes des interrupteurs complémentaires et gestion du court-circuit ;
- ✓ Résistances de grille externes au module permettant de différencier  $R_{gon}$  et  $R_{goff}$  au gré de l'application ;
- ✓ Isolation par transformateur autorisant des  $dV/dt$  élevées et rendant la commande moins sensible au bruit ;
- ✓ Isolement entre commande et IGBT jusqu'à 4kV ;
- ✓ Courant crête de la grille IG(crête) jusqu'à 8A ;
- ✓ Signal d'erreur mémorisé et envoyé à l'électronique de commande ;
- ✓ Entrée compatible avec CMOS avec une grande immunité au bruit ;
- ✓ Ne tolère pas le passage de la commande si les deux entrées sont activées à l'état haut.

La figure C.9 montre aussi que le bloc d'isolation divise le circuit du driver SKHI22A en deux étages nommés coté primaire, regroupant les entrées, et coté secondaire, représentant les sorties du driver [76].

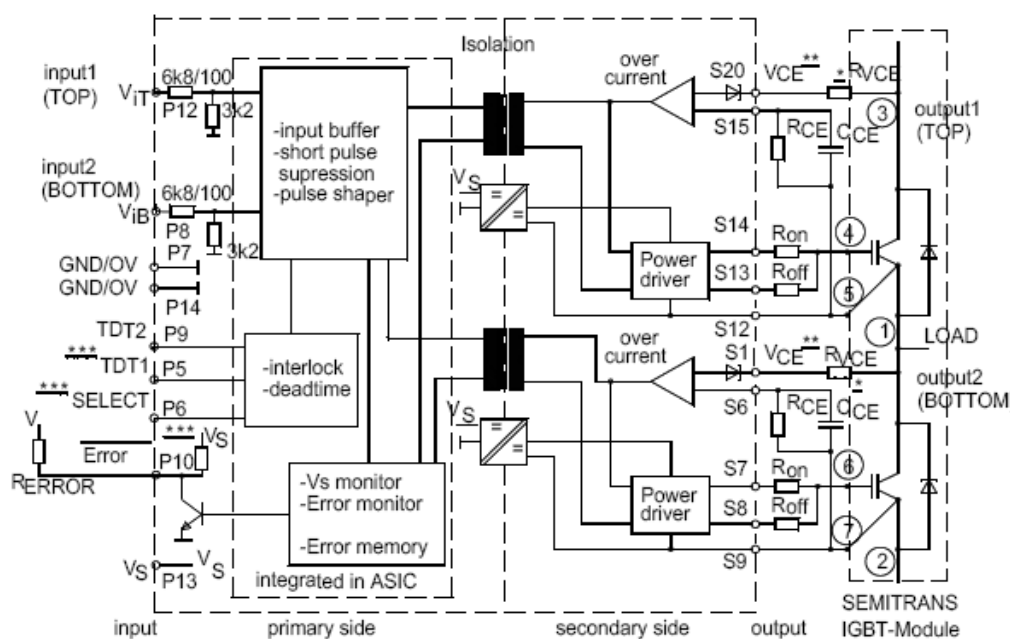
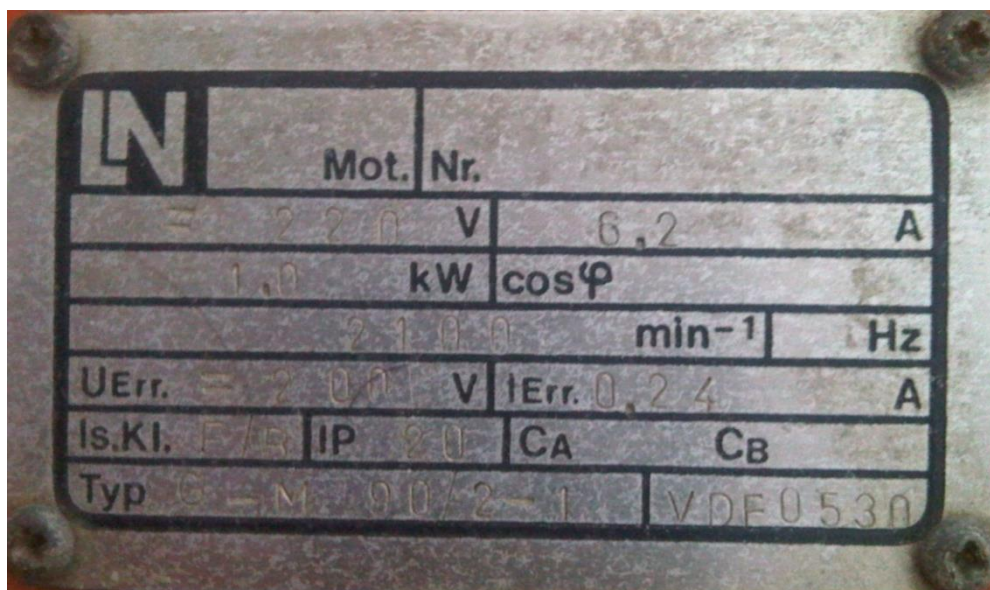


Figure D.9 : Schéma interne du driver SKHI22A [76].

## ANNEXE E : Identification des paramètres de la MCC

Les machines utilisées sont des machines MCC de 1kw dont la plaque signalétique est donnée par la figure suivante :



**Figure E.1** : plaque signalétique de la MCC

### 1. Les paramètres électriques

#### 1.1. Mesure de la résistance de l'induit

La mesure de la résistance est faite à chaud par l'application de tension continue réduite sur l'induit de la machine. On a trouvé :

$$R = 5 \Omega$$

On a effectué un essai en alternative pour déterminer l'impédance de l'induit.

#### 1.2. Mesure de l'inductance de l'induit

On a effectué un essai en alternative pour déterminer l'impédance de l'induit.

Tension(V)	Courant(A)	Impédance (ohm)
8.33	0.515	17.218
14.98	0.877	
29.9	1.625	

**Tableau E-1** : détermination de l'impédance

Avec la connaissance de la fréquence qui est 50 Hz et la résistance on peut écrire :

$$L_i = \frac{1}{100\pi} \sqrt{Z^2 + R_i^2} = 53.3 \text{ mH} \quad (\text{E.1})$$

### 1.3. Détermination du coefficient de couple et de la force électromotrice $K_e$

Pour cela on alimente l'inducteur de la machine par son courant nominal qui est 4A, puis on alimente l'induit de la machine par différentes valeurs de tension et on mesure le courant et la vitesse. Le tableau présente les valeurs trouvées :

Tension (V)	Courant (A)	Vitesse (tr/mn)
144.4	0.8	1250
171.6	0.84	1500
199.5	0.88	1750
226.58	0.935	2000

**Tableau E-2** : détermination du coefficient de couple

Le coefficient de couple se calcule par la relation :

$$K_e = K_c = \frac{V - R_i I}{\Omega} = 1.0787 \text{ V.s/rad} \quad (\text{E.2})$$

## 2. Les paramètres mécaniques

Les paramètres mécaniques à déterminer sont : les coefficients de frottements visqueux et sec et le moment d'inertie.

### 2.1. Coefficients de frottements visqueux et secs

La machine à courant continu est alimentée sous tension variable afin d'entraîner la machine asynchrone. La puissance  $P$  et le courant  $I$  absorbés sont mesurés, ainsi que sa vitesse de rotation  $\Omega$ . Alors on peut écrire :

$$\frac{P_0}{\Omega} = \frac{P - R_i I^2}{\Omega} = C_s + f_r \cdot \Omega \quad (\text{E.3})$$

Avec :

$P_0$  : Puissance due aux pertes par frottements visqueux.

$C_s$  : Couple de frottements secs.

$R_i$  : Résistance de l'induit de la machine à courant continu.

On obtient alors la caractéristique  $\frac{P_0}{\Omega} = f(\Omega)$  qui est une droite de pente  $f_r$ . Après le calcul, on a trouvé :

$$f_r = 0.0027 \text{ N.m.s/rad}$$

$$C_s = 0.48 \text{ N.m}$$



**Figure E.4** : Courbe de ralentissement de l'ensemble.

## 2.2. Moment d'inertie

L'ensemble des machines est entraîné à vide à sa vitesse nominale, puis on coupe brusquement l'alimentation et on relève l'allure de la vitesse. Dans ces conditions, l'équation mécanique s'écrit :

$$C_s + f_r \cdot \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

Après la résolution de cette équation avec les conditions de la figure. D.2, on trouve que :

$$J = 0.0168 \text{ kg.m}^2$$



**RÉFÉRENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] M. Mohammedi, «*Modélisation d'un véhicule électrique hybride et de la dégradation de ses batteries incluant sa validation expérimentale*». Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2016.
- [2] K. Anoune, M. Bouya, A. Astito et A. Abdellah, «Sizing methods and optimization techniques for PV-wind based hybrid renewable energy system: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, pp. 652-673, 2018.
- [3] T. Alexander, K. Manfred et R. Fabian, «Sustainable hydrogen society – Vision, findings and development of a hydrogen economy using the example of Austria,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, n° 14, pp. 2059-2079, 2022.
- [4] L. Xueqin, Q. Yan, W. Yudong, Q. Chao et L. Gang, «A comprehensive review on hybrid power system for PEMFC-HEV: Issues and strategies,» *Energy Conversion and Management*, vol. 171, pp. 1273-1291, 2018.
- [5] A. Benmouna, «*Gestion énergétique reconfigurable d'un véhicule électrique basée sur l'identification en ligne des sources embarquées*». Thèse de doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté, 2019.
- [6] L. Yang, W. Yinghong, H. Chao, M. Carlo, F. Shien-Ping et C. Paul K, «Plasma modified and tailored defective electrocatalysts for water electrolysis and hydrogen fuel cells,» *International Journal of Energy Research*, vol. 4, n° 14, 2022.
- [7] «Comment produire l'hydrogène?,» Air Liquide, 2021. [En ligne]. Available: <https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-produire-lhydrogene>.
- [8] K. Kevin et S. Nathan Jinlei, «12 - Hydrogen utilization: benefits of fuel cell–battery hybrid vehicles,» *New Dimensions in Production and Utilization of Hydrogen*, Elsevier, 2020, pp. 299-319.

- [9] C. Chan, «The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles,» *Proceedings of the IEEE Journal*, vol. 95, pp. 704-718, 2007.
- [10] A. Muhammad et I. S. Haruna, «Hybrid Electric Vehicles: A mini Overview,» *Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology*, vol. 5, n° 11, pp. 27-36, 2021.
- [11] G. Souffran, « *Dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique de ses profils de mission* ». Thèse de doctorat, Université De Nantes, 2012.
- [12] Hankache.W, « *Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible* ». Thèse de doctorat, 2008.
- [13] W. Zuo, R. Li, C. Zhou, Y. Li, J. Xia et J. Liu, «Battery-supercapacitor hybrid devices: recent progress and future prospect,» *Advanced science*, vol. 4, n° 17, 2017.
- [14] L. Shuai, W. Li et W. Huai, «Review on reliability of supercapacitors in energy storage applications,» *Applied Energy*, vol. 278, p. 115436, 2020.
- [15] G. Marsala, « *Modélisation et réalisation d'un émulateur de système de piles à combustible : développement des stratégies et des lois de commande* ». Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008.
- [16] J. Bernard, « *Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande* », Thèse de doctorat,, université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2007.
- [17] R. Saisset, « *Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [18] B. Soltani et N. Benchouia, «Vehicle Embedded By A Fuel Cell System: A Review,» *Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism*, vol. 5, pp. 473-502, 2021.

- [19] Q. Xun et Y. Liu, «Evaluation of fluctuating voltage topology with fuel cells and supercapacitors for automotive applications,» *International Journal of Energy Research*, vol. 43, n° 19, pp. 4807-4819, 2019.
- [20] P. Thounthong, « *Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs* », *Thèse de doctorat*, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005.
- [21] J. Larminie et A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, New York: John Wiley and Sons, Inc, 2003.
- [22] J. C. Kurnia, B. A. Chaedir, A. P. Sasmito et T. Shamim, «Progress on open cathode proton exchange membrane fuel cell: Performance, designs, challenges and future directions,» *Applied Energy*, vol. 283, p. 116359, 2021.
- [23] Y. Ahoutou, A. Ilinca et M. Issa, «Electrochemical Cells and Storage Technologies to Increase Renewable Energy Share in Cold Climate Conditions -A Critical Assessment,» *Energies*, vol. 15, n° 14, p. 1579, 2022.
- [24] N. Leclerc, S. Legeai, M. Balva, C. Hazotte, J. Comel et F. Lopicque, «Recovery of Metals from Secondary Raw Materials by Coupled Electroleaching and Electrodeposition in Aqueous or Ionic Liquid Media,» *Metals*, vol. 8, n° 17, p. 556, 2018.
- [25] D. Candusso, « *Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation d'un véhicule électrique* », *Thèse de doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.
- [26] L. Jiří, M. Josef, V. Jiří, Č. Ondřej et S. Marie, «Supercapacitors: Properties and applications,» *Journal of Energy Storage*, vol. 17, pp. 224-227, 2018.
- [27] Z. Ziyu, D. Tao, Z. Quan, S. Yuge, Q. Ming, Z. Ziyu, J. Yuntao, L. Li, W. Kang et C. Fangde, «A review of technologies and applications on versatile energy storage systems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 148, p. 111263, 2021.

- [28] K. Singh, H. Bansal et D. Singh, «A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components,» *Journal of Modern Transportatio*, vol. 27, n° 12, p. 77–107, 2019.
- [29] T. Azib, « *Contribution à l'étude d'électro-générateurs à pile à combustible* », *Thèse de doctorat*, Université Paris-sud 11, 2010.
- [30] Y. Shao, M. El-Kady, J. Sun, Y. Li, Q. Zhang, M. Zhu et e. al., «Design and Mechanisms of Asymmetric Supercapacitors,» *Chemical Reviews*, vol. 118, n° 118, p. 9233–80, 2018.
- [31] D. Patel, *Investigation on Intercalation Behavior of BCN Compound for Multivalent-Ions*, Lamar University-Beaumont, 2017.
- [32] A. D. Adewoyin et M. A. Olopade, «An Investigation Of The Charge-Discharge Characteristics Of An Ultracapacitor In Comparison With Conventional Batteries Using Pscad-1d,» *Bulletin of Engineering*, vol. 10, n° 13, pp. 85-88, 2017.
- [33] S. Pelletier, O. Jabali, G. Laporte et M. Veneroni, «Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models,» *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 103, pp. 158-187, 2017.
- [34] W. Supriya, «Motors and Batteries for Electric Vehicle: A Review,» *International Journal of Research Publication and Reviews*, vol. 2, n° 18, pp. 235-239, 2020.
- [35] H. Maker, « *Optimisation et Gestion d'Energie pour un Système Hybride : Association Pile à Combustible et Supercondensateurs* ». *Thèse de doctorat*, Université de Technologie Belfort Montbéliard, 2008.
- [36] A. Florescu, «*Gestion Optimisée des flux énergétiques dans le véhicule électrique* ». *Thèse de doctorat*, Université de Grenoble- G2Elab, 2012.
- [37] A. Nouh, «*Contribution au Développement d'un Simulateur Pour les Véhicules Electriques*». *Thèse de doctorat*, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008.

- [38] E. Agamloh, A. Von Jouanne et A. Yokochi, «An overview of electric machine trends in modern electric vehicles,» *Machines* 8.2, vol. 8, n° 120, p. 20, 2020.
- [39] W. Cai, X. Wu, M. Zhou, Y. Liang et Y. & Wang, «Review and development of electric motor systems and electric powertrains for new energy vehicles,» *Automotive Innovation*, vol. 4, n° 11, pp. 3-22, 2021.
- [40] S. Xiong, Q. Song, B. Guo, E. Zhao et Z. Wu, «Research and development of on-board hydrogen-producing fuel cell vehicles,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, n° 135, pp. 17844-17857, 2020.
- [41] S. Amirdehi, B. Trajin, P. Vidal, J. Vally, D. Colin et S. Tastet, «Identification of PEM Fuel cell system model for traction chain based on profile mission measurement,» *In 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 27-32, 2020.
- [42] A. Fathy, M. A Elaziz et A. G. Alharbi, «A novel approach based on hybrid vortex search algorithm and differential evolution for identifying the optimal parameters of PEM fuel cell,» *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 1833-1845, 2020.
- [43] M. El-Sharkh, A. Rahman, M. S. Alam, P. C. Byrne, A. A. Sakla et T. Thomas, «A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications,» *Journal of Power Sources*, vol. 138, pp. 199-204, 2004.
- [44] H. F. Gharibeh, A. S. Yazdankhah et M. R. Azizian, «Energy management of fuel cell electric vehicles based on working condition identification of energy storage systems, vehicle driving performance, and dynamic power factor,» *Journal of Energy Storage*, vol. 31, p. 101760, 2020.
- [45] A. Sanchez, « *Energy Management in Electric Systems Fed by Fuel Cell Stacks* », *Thèse de doctorat*, Université de Paris-sud 11, 2011.
- [46] T. Springer, T. Zawodzinski et S. Gottesfeld, «Polymer electrolyte fuel cell model,» *Journal of Electrochemical Society*, vol. 138, n° 18, p. 2334–2342, 1991.

- [47] W. W. Yuan, K. Ou et Y. B. Kim, «Thermal management for an air coolant system of a proton exchange membrane fuel cell using heat distribution optimization,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 167, p. 114715, 2020.
- [48] M. N. Sid, « *Commande optimale d'un système de traction électrique alimenté par plusieurs sources d'énergie* », *Mémoire de magister*, Ecole Militaire Polytechnique, Bordj el Bahri, 2014.
- [49] J. Lachaize, « *Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Combustible (PAC) destinés à la traction* », *Thèse de doctorat*, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [50] A. Prasanthi, H. Shareef, M. Asna, A. Ibrahim et R. Errouissi, «Optimization of hybrid energy systems and adaptive energy management for hybrid electric vehicles,» *Energy Conversion and Management*, vol. 243, p. 114357, 2021.
- [51] J. Hou et Z. Song, «A hierarchical energy management strategy for hybrid energy storage via vehicle-to-cloud connectivity,» *Applied energy*, vol. 257, p. 113900, 2020.
- [52] D. Hernandez et Y. Denis, «Energy Management System Industrialization for Off-Grids Power Systems Based on Data-Driven Machine Learning Models.,» *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 35, n° 15, pp. 3677-3687, 2021.
- [53] G. Du, Y. Zou, X. Zhang, Z. Kong, J. Wu et D. He, «Intelligent energy management for hybrid electric tracked vehicles using online reinforcement learning,» *Applied Energy*, vol. 251, p. 113388, 2019.
- [54] Z. Ma et S. Zou, *Optimal Control Theory*, Springer, 2021.
- [55] W. Dixon, Reinforcement Learning for Approximate Optimal Control. In *Encyclopedia of Systems and Control*, vol. 19, Springer International Publishing, 2021, pp. 1863-1868.
- [56] M. Colombo et C. Wright, «First principles in the life sciences: the free-energy principle, organicism, and mechanism,» *Synthese*, vol. 198, n° 114, pp. 3463-3488, 2021.

- [57] D. Capecchi, «Physics in General. In: Epistemology and Natural Philosophy in the 18th Century. History of Mechanism and Machine Science,» *Springer, Cham.*, vol. 39, p. 410, 2021.
- [58] L. Pontryagin, V. Boltyanskii, R. Gamkrelidze et E. Mishchenko, *The Mathematical Theory of Optimal Processes*, Interscience, 1962.
- [59] R. Gamkrelidze, «History of the discovery of the Pontryagin maximum principle,» *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*, vol. 304, n° 11, pp. 1-7, 2019.
- [60] A. Zorn, *Multipoint Optimal Control with Applications to Space Flight*, vol. 38, Stanford University, 2019, pp. 973-995.
- [61] M. Gomoyunov, «Dynamic Programming Principle and Hamilton--Jacobi--Bellman Equations for Fractional-Order Systems,» *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 58, n° 16, pp. 3185-3211, 2020.
- [62] W.-D. Greenwell, «*Real-Time Power Management of a Fuel Cell/Ultracapacitor Hybrid*». *Thèse de doctorat*, the Graduate School of Clemson University, 2008.
- [63] M. N. Sid , M. Becherif, K. Marouani et H. Alloui, «Commande Optimale et Gestion de l'Énergie Électrique Association Pile à Combustible / Supercondensateurs : Application au Véhicule Hybride,» *International Conference on Electrical Energy and Systems*, Annaba, Algeria, 2015.
- [64] M.-N. Sid, K. Marouani, M. Becherif et H. Alloui, «« Optimal Energy Management Control Scheme for Hybrid Fuel cell Vehicle,»,» *22nd Mediterranean Conference on Control & Automation*, Palermo - ITALY, 2014.
- [65] M.-N. Sid, K. Nounou, M. Becherif, K. Marouani et H. Alloui, «« Energy Management Strategy of Fuel Cell/Supercapacitor hybrid vehicles based on Optimal Control theory,»,» *21th International Conference on Electrical Machines (ICEM). Berlin-Germany*, 2014.



- [66] D. Feroldi, « Control and design of PEM fuel cell-based systems», Thèse de Doctorat, vol. 223, Université Polytechnique de Catalunya, 2009, p. 119857.
- [67] M. N. Sid, H. Alloui, K. Marouani et M. Becherif, «Gestion Optimale de l’Energie d’un Système Multi-sources : Application au véhicule électrique,» *Revue des Energies Renouvelables. SIENR’14*, 183 – 192., Ghardaïa, Algeria, 2014.
- [68] M. N. Sid, M. Becherif et A. Aboubou, «Maximum efficiency point tracking based energy management approach,» *International Conference on Emerging and Renewable Energy : Generation and Automation, ICEREGA’20*, 2020.
- [69] N. Ouddah, L. Adouane et R. Abdrakhmanov, «From offline to adaptive online energy management strategy of hybrid vehicle using Pontryagin’s minimum principle,» *International Journal of Automotive Technology*, vol. 19, n° 13, pp. 571-584, 2018.
- [70] C. Zheng, C. Oh, Y. Park, W. Lim et G. Xu, «Optimization, PMP-Based Power Management Strategy of Fuel Cell Hybrid Vehicles Considering Multi-Objective,» *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, vol. 14, pp. 845-853, 2013.
- [71] Y. Liu, J. Liu, Y. Zhang, Y. Wu, Z. Chen et M. Ye, «Rule learning based energy management strategy of fuel cell hybrid vehicles considering multi-objective optimization,» *Energy*, vol. 207, p. 118212, 2020.
- [72] Y. Liu, J. Liu, D. Qin, G. Li, Z. Chen et Y. Zhang, «Online energy management strategy of fuel cell hybrid electric vehicles based on rule learning,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 260, p. 121017, 2020.
- [73] B. Nguyễn, T. Vo-Duy, C. Antunes et J. Trovão, «Multi-objective benchmark for energy management of dual-source electric vehicles: An optimal control approach,» *Energy*, vol. 223, p. 119857, 2021.

- [74] W. Zhang, J. Li, L. Xu et M. Ouyang, «Optimization for a fuel cell/battery/capacity tram with equivalent consumption minimization strategy,» *Energy Conversion and Management*, vol. 134, pp. 59-69, 2017.
- [75] M. N. Sid, M. Becherif, A. Aboubou et A. Benmouna, «Power control techniques for fuel cell hybrid electric vehicles: A comparative study,» *Computers & Electrical Engineering*, vol. 97, n° 1107602, 2021.
- [76] H. Benkadi et M. Allouche, «Amélioration de la fiabilité d'un variateur de tension et de fréquence, de puissance». *Mémoire de fin d'étude*, Ecole Militaire Polytechnique, 2011.
- [77] K. Marouani, «Amélioration de la Fiabilité d'un Variateur de Tension et de Fréquence de Puissance», Batna: International Conference on Industrial Engineering and Manufacturing (ICIEM-2012), Mai 2012.
- [78] M. Davari, J. Jerrelind et A. Trigell, «Energy efficiency analyses of a vehicle in modal and transient driving cycles including longitudinal and vertical dynamics,» *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 53, pp. 263-275, 2017.
- [79] W. Yang, J. Ruan, J. Yang et N. Zhang, «Investigation of integrated uninterrupted dual input transmission and hybrid energy storage system for electric vehicles,» *Applied Energy*, vol. 262, p. 114446, 2020.
- [80] R. Nicolas, «car-engineer.com,» réseau Automobilité & Avenir, 3 Juin 2014. [En ligne]. Available: <http://www.car-engineer.com/fr/les-differents-cycles-de-conduite/>.

**CONTRIBUTIONS  
SCIENTIFIQUES**

**PUBLICATIONS INTERNATIONALES**

- ❖ **M. N. Sid** et al. "Gestion de l'Énergie d'un système hybride pile à combustible/batterie basée sur la commande optimale." *Mediterr. J. Model. And Simulation* (2015): 010-024.
- ❖ **M. N. Sid**, M. Becherif, A. Aboubou et A. Benmouna, «Power control techniques for fuel cell hybrid electric vehicles: A comparative study, » *Computers & Electrical Engineering* (2021): 97(107602).

**COMMUNICATIONS INTERNATIONALES**

- ❖ **M. N. Sid**, M. Becherif and A. Aboubou, «Maximum efficiency point tracking based energy management approach, » *International Conference on Emerging and Renewable Energy: Generation and Automation, ICEREGA'20*, 2020.
- ❖ **M.N. Sid**, M. Becherif, K. Marouani and H. Alloui « Commande Optimale et Gestion de l'Énergie Électrique Association Pile à Combustible / Supercondensateurs : Application au Véhicule Hybride,». *International Conference on Electrical Energy and Systems*. Annaba-Algeria. October 2015.
- ❖ **M. N. Sid**, M. Becherif, A. Aboubou, « Energy Management Of Fuel Cell/Battery Hybrid Sources System Based On Optimal Control, ». *First International Conference on Electrical Engineering (ICEEB)*. Biskra. December 2014.
- ❖ **M. N. Sid**, M. Becherif, A. Aboubou, « Optimal Control based Energy Management Strategy of Fuel cell/Supercapacitors Hybrid Vehicles, ». *Third International Conference on Information Processing and Electrical Engineering (ICIPEE)*. Tebessa. November 2014.
- ❖ **M. N. Sid**, M. Becherif, A. Aboubou, « MEPT Based Energy Management Strategy Of Fuel Cell -Super Capacitor For Hybrid Electric Vehicle, ». *Second International Conference on Electro-Energy (ICEE)*. Skikda. November 2014.
- ❖ **M.N. Sid**, H. Alloui, K. Marouani et M. Becherif « Gestion Optimale de l'Énergie d'un Système Multi-sources : Application au véhicule électrique,». *Revue des Energies Renouvelables*. SIENR'14 Ghardaïa, (October 2014) 183 – 192.
- ❖ **M.N. Sid**, K. Nounou, M. Becherif, K. Marouani and H. Alloui « Energy Management and optimal control Strategies of Fuel Cell/Supercapacitor hybrid vehicle, ». *21th International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Berlin-Germany. September 2014.
- ❖ **M.N. Sid**, M. Becherif, K. Marouani and H. Alloui « Gestion de l'Énergie d'un Système Hybride Pile à Combustible/Batterie basée sur la Commande Optimale,». *International Conference of Modeling and Simulation 2014 (ICMS)*. Blida-Algeria. September 2014.

## Résumé :

Les véhicules hybrides à pile à combustible utilisent l'hydrogène pour générer l'énergie électrique nécessaire à la traction. Ils présentent l'avantage d'être propres (pas d'émission de gaz), silencieux, rendement très élevé .... Mais l'utilisation de la PàC seule comme source d'énergie souffre de problèmes de : temps de réponse important, démarrage lent, pas de récupération, et peut même dégrader sa durée de vie, d'où l'intérêt de l'hybridation avec une deuxième source d'appoint. Ce système hybride nécessite une gestion adéquate de l'énergie, afin de répondre aux besoins de la charge tout en respectant les contraintes imposées.

Ce travail porte, sur la gestion de l'énergie dans un véhicule hybride composé d'une pile à combustible et un élément de stockage afin d'assurer la puissance électrique nécessaire à la traction électrique. L'objectif visé est la minimisation de la consommation d'hydrogène sur un cycle donné. Le problème est formulé en tant que problème d'optimisation globale sous contraintes. Une modélisation et un dimensionnement du système hybride et ses différents éléments sont effectués suivis par des simulations des techniques de gestion choisies. Des essais ont été validés sur un banc d'essais expérimental à échelle réduite.

**Mots clés :** PàC, Gestion de l'énergie, Véhicule hybride, Optimisation, ES.

## Abstract:

The Fuel cell electrical vehicles use hydrogen to generate the electric power necessary to traction. They have the advantage of being clean (zero gases emission), silent, cleaning and efficient.... But the use of FC alone as energy source suffers from many problems: limit dynamic response, slow starting, it cannot capture the braking energy regeneration, and have a shortening lifetime, where the interest in hybridization with an auxiliary source. This hybrid system requires an adequate energy management, in order to meet the needs for the load while respecting the imposed constraints.

The aim of our work, is the power distribution management between a fuel cell stack and a storage element in order to ensure the power demand in a hybrid vehicle. The goal is to minimize the hydrogen consumption on a given cycle. The problem is formulated as a global optimization problem under constraints. A modeling and a dimensioning of the hybrid system and its various elements are carried out followed by simulations of the energy management strategies selected. Tests were validated on an experimental test bench on reduced scale.

**Keys words:** FC, Energy management, Hybrid Vehicle, Optimization, Storage element.

## ملخص:

المركبات الكهربائية ذات البطاريات الهيدروجينية والتي تستعمل الطاقة الهيدروجينية اللازمة للجر الكهربائي، تقدم امتيازات متعددة: نظيفة (بدون غازات سامة)، صامتة، وذات كفاءة عالية، على الرغم من كل الإيجابيات إلا أن استعمال البطاريات الهيدروجينية كمصدر وحيد للطاقة، يمكن أن يؤثر سلباً عليها بسبب بطء استجابتها، لذلك تفرق بمصدر ثاني للطاقة. كما يتطلب هذا النظام الهجين إدارة الطاقة المناسبة، لتلبية متطلبات الجر مع احترام العوائق.

هذا العمل يتمحور حول تسيير الطاقة المثالي في هذا النوع من الأنظمة الهجينة، لغرض تلبية طلبات المركبة مع مراعاة العوائق التي تفرضها مصادرها. هذا التسيير يستوجب استعمال محولات الطاقة. والهدف من ذلك هو تقليل استهلاك الهيدروجين على دورة معينة. وضعت هذه المشكلة باعتبارها مشكلة إيجاد الحل الأمثل العام. تمت نمذجة وتصميم النظام الهجين ومكوناته المختلفة تليها تقنيات إدارة المحاكاة التي تم اختيارها. قمنا بعدة اختبارات على لوح تجارب انجز على مستوى المخبر على نطاق صغير.

**كلمات مفتاحية:** بطاريات هيدروجينية، تسيير الطاقة، المركبات الكهربائية الهجينة، التسيير المثالي، عنصر تخزين.