HAL
open science

Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multi-physique

Tedjani Mesbahi

To cite this version:

Tedjani Mesbahi. Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multi-physique. Energie électrique. Ecole Centrale de Lille, 2016. Français. NNT : 2016ECLI0004 . tel-01334059v2

HAL Id: tel-01334059

https://theses.hal.science/tel-01334059v2

Submitted on 3 Feb 2017

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

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

N° d'ordre : *293*

CENTRALE LILLE

Présentée en vue
d'obtenir le grade de

DOCTEUR

En

Spécialité : Génie électrique

Par

Tedjani MESBAHI

DOCTORAT DELIVRE PAR CENTRALE LILLE

Titre de la thèse :

Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multi-physique

Soutenue le 25/03/2016 devant le jury d'examen :

Président	Luc LORON, Professeur, Polytech' Nantes, Saint-Nazaire
Rapporteur	Jean-Michel VINASSA, Professeur, Bordeaux INP
Rapporteur	Pascal VENET, Professeur, Université Claude Bernard Lyon 1
Membre	Richard BURKE, Lecturer Mec. Eng, University of Bath (Royaume-Uni)
Co-encadrant	Nassim RIZOUG, Enseignant chercheur, ESTACA-Laval
Co-encadrant	Patrick BARTHOLOMEUS, Maître de Conférences, Centrale Lille
Directeur de thèse	Philippe LE MOIGNE, Professeur, Centrale Lille
Invité	Jean-Michel DEPOND, Responsable Modélisation Produits, Blue Solutions
Invité	Isabelle BOUESSAY, Responsable d'UEI stockage, PSA Peugeot-Citroën
Invité	Jean-Marie LAURENT, Responsable unité mécatronique, R&D GRUAU

Thèse préparée dans les Laboratoires S2ET ESTACA'LAB-Laval & L2EP-Lille
Ecole Doctorale SPI 072 (Centrale Lille)

Remerciements

Les travaux de recherches présentés dans ce manuscrit de thèse sont le fruit d'une collaboration entre le pôle Système et Energie Embarquée dans le Transport (S2ET) du laboratoire ESTACA'LAB de Laval et l'équipe électronique de puissance EP du Laboratoire d'Electrotechnique et Electronique de Puissance (L2EP) de Lille.

Je tiens, tout d'abord, à remercier Monsieur *Philippe LE MOIGNE*, professeur à Centrale Lille, d'avoir accepté de diriger mes travaux de recherches et pour ses conseils, corrections et aides précieuses qui m'ont permet de progresser tout au long de ce travail. Je tiens à dire un grand merci à Monsieur *Patrick BARTHOLOMEUS*, maitre de conférences à Centrale Lille pour ses qualités humaines et ses conseils précieux durant toutes les phases du travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur *Nassim RIZOUG*, enseignant chercheur à l'ESTACA-Laval, pour son excellent encadrement, sa disponibilité, sa gentillesse, ses qualités humaines et pour tout ce qu'il m'a apporté durant la thèse.

J'exprime ma plus profonde gratitude à Monsieur *Luc LORON*, Professeur à Polytech' Nantes, Saint-Nazaire, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury.

Mes remerciements vont également aux rapporteurs, Monsieur *Jean-Michel VINASSA*, professeur à Bordeaux INP, et Monsieur *Pascal VENET*, professeur de l'université de Claude Bernard Lyon 1, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour les remarques constructives sur la poursuite de mes travaux.

J'adresse mes sincères remerciements à : Monsieur *Richard BURKE*, Lecturer Mec. Eng, de l'université de Bath (Royaume-Uni), Monsieur *Jean-Michel DEPOND*, Responsable Modélisation Produits à Blue Solutions, Madame *Isabelle BOUESSAY*, Responsable d'UEI stockage à PSA Peugeot-Citroën, et Monsieur *Jean-Marie LAURENT*, Responsable unité mécatronique à R&D GRUAU, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner mon travail de thèse.

Je souhaite remercier chaleureusement Monsieur *Cherif LAROUCI*, Responsable du Pôle S2ET ESTACA'LAB, pour m'avoir donné des conditions très favorables au développement et à la valorisation de mes travaux de recherches au sein de son équipe, pour ses qualités humaines et pour ses nombreux encouragements et conseils.

Mes remerciements seraient incomplets si je ne mentionnais pas l'ensemble des membres des équipes de recherche de l'ESTACA-Laval et l'équipe électronique de puissance EP du Laboratoire L2EP de Lille pour leur accueil et les moments agréables passés avec eux, en particulier *Fouad, Yann , Lyes, Mohcine, Redha, Sylvio*.

Enfin j'adresse mes remerciements les plus affectueux à mes parents, ma chère mère *Meriem* qui représente pour moi la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi, mon cher père *Mohammed Tahar* qui a consacré toute sa vie à mon éducation. Je dédie également cette thèse à ma très chère femme *Amira*, qui m'a supporté tout au long de cette thèse et pour son soutien moral.

Table des matières

Introduction générale……..……..……1

Chapitre I : Véhicule électrique et apport de la source hybride

I.1 Introduction 3

I.2 Contexte énergétique et aspects environnementaux 3

I.2.1 Défis énergétiques 3

I.2.2 Problèmes environnementaux 4

I.2.3 Evolution des normes d'émission automobile 6

I.2.4 Evolution des performances des véhicules thermiques 9

I.3 Véhicules hybrides et électriques 10

I.3.1 Véhicules hybrides 10

I.3.1.1 Architecture série 11

I.3.1.2 Architecture parallèle 11

I.3.1.3 Architecture série/parallèle 12

I.3.2 Véhicules électriques 12

I.3.2.1 Système de stockage : le maillon faible 13

I.4 Hybridation des sources d'énergie embarquées 16

I.4.1 Principe d'hybridation des sources d'énergie 16

I.4.2 Solutions d'hybridation des sources d'énergie 17

I.4.2.1 Hybridation des Piles à Combustible (PAC) 17

I.4.2.2 Hybridation des batteries 19

I.4.2.3 Bilan et choix de l'hybridation 21

I.4.3 Couplage d'une source hybride 22

I.4.3.1 Architecture en cascade avec un convertisseur DC / DC coté Supercondensateur 22

I.4.3.2 Architecture en cascade avec un convertisseur DC / DC coté batterie 23

I.4.3.3 Architectures avec deux convertisseurs en cascade 23

I.4.3.4 Architecture avec deux convertisseurs en parallèle 24

I.4.3.5 Couplage stockeurs sur la Plate-forme d'essais ESTACA-Laval 25

I.5 Hybridation Batterie Li-ion HE/ Supercondensateurs 25

I.5.1 Influence sur la masse de la source 25

I.5.2 Influence sur la durée de vie de la source 26
I.5.3 Bilan 27
I.6 Amélioration de la durée de vie de la source hybride par optimisation de la gestion d'énergie 28
1.5. Conclusion 30

Chapitre II : Modélisation multi-physique de la source hybride

II.1 Introduction 31
II.2 Source hybride Batterie Li-ion / Supercondensateurs 31
II.2.1 Batteries Li-ion 31
II.2.1.1 Principe de fonctionnement 31
II.2.1.2 Technologies des batteries Li-ion 32
II.2.1.3 Grandeurs caractéristiques des batteries Li-ion 33
II.2.1.4 Coût des batteries Li-ion 35
II.2.1.5 Batteries Li-ion et cellules choisies pour l'étude 36
II.2.2 Caractéristiques des Supercondensateurs 37
II.2.2.1 Principe de fonctionnement 37
II.2.2.2 Technologies des Supercondensateurs 39
II.2.2.3 Grandeurs caractéristiques des Supercondensateurs 40
II.2.2.4 Coût des supercondensateurs 41
II.2.2.5 Supercondensateur choisi pour l'hybridation 42
II.3 Modélisation du vieillissement des stockeurs 43
II.3.1 Mécanismes de vieillissement des batteries Li-ion 43
II.3.1.1 Mécanismes de vieillissement de l'électrode négative 43
II.3.1.2 Mécanismes de vieillissement de l'électrode positive 44
II.3.1.3 Mécanismes de vieillissement de l'électrolyte et des collecteurs de courant . 45
II.3.2 Modélisation du vieillissement des batteries Li-ion 45
II.3.2.1 Vieillissement calendaire et en cyclage 45
II.3.2.2 Modèles de vieillissement des batteries Li-ion 46
II.3.2.3 Modèle de vieillissement retenu 48
II.3.3 Modélisation du vieillissement des supercondensateurs 49
II.3.4 Synthèse 51
II.4 Modélisation multi-physique de la source hybride Batterie Li-ion / Supercondensateurs 52

II.4.1 Contraintes des modèles et de l'identification des paramètres 54
II.4.1.1 Banc de tests pour le vieillissement des batteries Li-ion 54
II.4.1.2 Protocole de test de vieillissement en cyclage des batteries Li-ion 55
II.4.1.3 Protocole de caractérisation temporelle 58
II.4.2 Modèles électriques des stockeurs 58
II.4.2.1 Modélisation électrique des batteries Li-ion 58
II.4.2.2 Identification des paramètres du modèle électrique batterie 64
II.4.2.3 Identification des paramètres du modèle choisie 67
II.4.2.4 Modélisation électrique des supercondensateurs 75
II.4.3 Modélisation thermique des stockeurs 83
II.4.3.1 Modélisation thermique des batteries Li-ion 84
II.4.3.2 Modélisation thermique des supercondensateurs 87
II.5 Identification du modèle de vieillissement des batteries Li-ion 90
II.6 Conclusion 95

Chapitre III : Nouvelles stratégies de gestion de la source hybride

III.1 Introduction 96
III.2 Etat de l'art des méthodes de gestion d'énergie 96
III.2.1 Méthodes de répartition des puissances à base d'optimisation 98
III.2.1.1 Stratégies de gestion hors ligne 98
III.2.1.2 Stratégies de gestion en ligne 99
III.2.2 Méthodes de répartition des puissances à base de règles 100
III.2.2.1 Stratégies basées sur les règles floues ou les réseaux de neurones 100
III.2.2.2 Stratégie thermostat On/Off 103
III.2.2.3 Stratégie basée sur la dynamique du véhicule 103
III.2.2.4 Stratégie basée sur le choix du chemin le moins résistif 104
III.2.2.5 Stratégie fréquentielle 105
III.2.2.6 Stratégie basée sur la limitation de puissance de la batterie 106
III.2.3 Synthèse des méthodes de gestion d'énergie 106
III.2.4 Méthodes de gestion de référence 108
III.2.4.1 Stratégie de régulation énergétique des Supercondensateurs 109
III.2.4.2 Stratégies de gestion MG1, MG2, MG3, MG4 113
III.3 Dimensionnement de la source d'énergie embarquée 114

III.3.1 Prise en compte de la masse de source pour le dimensionnement 115
III.3.2 Démarche globale de dimensionnement 116
III.3.3 Dimensionnement du pack batteries HP mono-source 117
III.3.4 Dimensionnement de la source hybride de stockage (Batterie HE + Supercondensateur) 120
III.4 Influence des méthodes de gestion d'énergie sur le dimensionnement des sources hybrides 122
III.4.1 Définition de critères de comparaison 122
III.4.1.1 Masse de la source hybride 122
III.4.1.2 Coût de la source hybride 122
III.4.1.3 Puissance efficace 123
III.4.1.4 Quantité de charge échangée et nombre de cycles 123
III.4.2 Analyse des résultats 124
III.5 Nouvelles méthodes de gestion d'énergie à limitation de puissance batterie et vieillissement 129
III.5.1 Nouvelles stratégies de gestion d'énergie 129
III.5.2 Limitation de la puissance de décharge de la batterie sur deux niveaux en fonction de l'énergie des supercondensateurs («MGD1») 130
III.5.3 Limitation de puissance de charge/décharge sur deux niveaux en fonction de l'énergie des supercondensateurs («MGD2») 131
III.5.4 Limitation de puissance en charge/décharge linéaire en fonction de l'énergie des supercondensateurs («MGD3») 133
III.5.5 Limitation de puissance de charge/décharge linéaire en fonction de l'énergie des supercondensateurs avec augmentation de la tension maximale des supercondensateurs («MGD3+») 135
III.5.6 Analyse et comparaison des contraintes de puissance 135
III.5.7 Analyse comparative du vieillissement estimé selon la méthode de gestion appliquée 140
III.5.8 Méthode active de gestion de l'énergie d'une source de stockage hybride 144
III.6 Conclusion 146
Conclusion générale et perspectives 148
Annexes 152
Références bibliographiques 168

Liste des figures

Figure. I. 1 : Réserves énergétiques mondiales[10] 4
Figure. I. 2: Principe des gaz à effet de serre [14] 5
Figure. I. 3:Impacts environnementaux liés aux changements climatiques [16] 6
Figure. I. 4 : Comparaison des valeurs limites d'émissions des voitures dans l'Union Européenne, au Japon et aux Etats-Unis [7]..... 8
Figure. I. 5: Hybride série 11
Figure. I. 6: Hybride parallèle 12
Figure. I. 7: Hybride série-parallèle 12
Figure. I. 8 : Diagramme de Ragone permettant de comparer les performances énergétiques et en puissance des différentes batteries..... 14
Figure. I. 9: Diagramme de Ragone [7]..... 16
Figure. I. 10: Principe d'hybridation des sources de stockage hybrides 17
Figure. I. 11: Principe d'hybridation PAC / Source de puissance..... 18
Figure. I. 12: Principe des systèmes de stockage inertiel [71] 19
Figure. I. 13: Principe d'hybridation Batterie / Source de puissance..... 20
Figure. I. 14: Architecture en cascade avec un convertisseur pour le SC 22
Figure. I. 15: Architecture en cascade avec un convertisseur pour la batterie 23
Figure. I. 16: Architecture en cascade avec deux convertisseurs en cascade..... 24
Figure. I. 17: Architecture parallèle avec deux convertisseurs 24
Figure. I. 18 : Architecture utilisée sur le banc expérimental ESTACA-Laval 25
Figure. I. 19: Masse d'une source hybride (batterie HE+SupCaps) et d'une batterie HP selon l'autonomie [7]..... 26
Figure. I. 20: Evolution de la capacité (A) et de la résistance interne (B) durant le cyclage... 27
Figure. I. 21 : Démarches effectuées dans notre laboratoire pour développer des systèmes de stockage 28
Figure. I. 22 : Développement d'une stratégie de gestion optimale – Méthodologie 29

Figure. II. 1: Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion[92] 32
Figure. II. 2: Comparatif des différentes technologies de batterie li-ion [30]..... 32
Figure. II. 3: Tension à vide ($VOCV$) en fonction du SOC des batteries (Li-ion /NMC 100Ah) à différentes températures [93]..... 34
Figure. II. 4: Tendance coût moyen des batteries Li-ion 2010-2020 [99] 36
Figure. II. 5: Schéma de principe du supercondensateur déchargé et chargé [103]..... 38
Figure. II. 6 : Évolution du marché de supercondensateurs MAXWELL et secteurs d'applications [113]..... 42
Figure. II. 7: Sources principales du vieillissement de la cathode [95]..... 44
Figure. II. 8: Évolution de la perte de capacité en vieillissement calendaire (à 50°C pour les SOC de 20%, 50%, 80% et 100%) [30] 45
Figure. II. 9: Évolution de la résistance interne (R_0) et de la capacité en fonction du nombre de cycles [117] 46

Figure. II. 10: Modèle de vieillissement de batterie retenu 48
Figure. II. 11: Profil de courant et réponse en tension (A). Évolution de capacité et de résistance interne de supercondensateurs (Batscap 650F) en fonction du nombre de cycles à 50°C (B)[141] 50
Figure. II. 12: Modèle de vieillissement de supercondensateur retenu 50
Figure. II. 13: Evolution des paramètres électriques de cellules supercondensateurs : Capacité (A), Résistance interne (B) [144] 51
Figure. II. 14: Entrées/sorties du modèle de vieillissement des stockeurs utilisé 52
Figure. II. 15: Synoptique du modèle multi-physique (électrique, thermique et vieillissement) du stockeur hybride 53
Figure. II. 16: Banc de test ESTACA-Laval 55
Figure. II. 17: Schéma de déroulement des tests de vieillissement en cyclage [7] 56
Figure. II. 18: Organigramme des séquences d'essais de vieillissement en cyclage [7] 56
Figure. II. 19: Profil de courant de cyclage superposé avec le profil de courant réel pour les deux technologies *Kokam* Ko40HP (A mono-source) et Ko40HE (B source hybride) [7] 57
Figure. II. 20: Courant et tension des cellules de batteries HP (A) et HE (B) pendant la recharge à CC/CV [7] 57
Figure. II. 21: Profil de courant et de tension d'une cellule de batterie durant le cycle charge/décharge de caractérisation [7] 58
Figure. II. 22: Modèle type R-E 61
Figure. II. 23: Modèle dynamique de cellule de batterie 63
Figure. II. 24: Identification fréquentielle [178] 64
Figure. II. 25: Diagramme de Nyquist d'une batterie Li-ion (*40 Ah*) en fonction du SOC [93] 65
Figure. II. 26 : Test de batterie neuve : Profil du courant (A).Tension batterie (expérimental/modèle) (B). Erreur relative tension (C) 68
Figure. II. 27: Tension à vide de batterie $VOCV$ (A).Tension aux bornes de la résistance interne équivalente $R\Omega$ (B). Tension aux bornes des circuits $Rn\ Cn$ (C) 69
Figure. II. 28: SOC en fonction du temps (A) -Tension à vide VOCV (B) et Résistance interne équivalente RΩ (C) en fonction du SOC. 70
Figure. II. 29 : Profil du courant (A) et Tension batterie (neuve / a - 20% Cnom) (B) 71
Figure. II. 30: comparatif expérimental/modèle sur Batterie à - 20% Cnom : Courant (A) et Tension batterie (B). Erreur relative tension (C) 72
Figure. II. 31: Batterie a - 20% Cnom : Tension à vide de batterie $VOCV$ (A).Tension aux bornes de la résistance interne équivalente $R\Omega$ (B). Tension aux bornes des circuits $Rn\ Cn$ (C) 73
Figure. II. 32: Batterie neuve modèle R-E: Courant batterie (A). Tension batterie (expérimental/modèle) (B). Erreur relative tension (C) 74
Figure. II. 33 :Test batterie vieillie a - 20% **Cnom** : Courant (A). Tension batterie (expérimental/modèle) (B). Erreur relative tension (C) 75
Figure. II. 34: Modèle « constructeur RC » 76
Figure. II. 35 :Modèle proposé par Zubieta et al 77
Figure. II. 36: Modèle à 3 branches [178] 77
Figure. II. 37: Modèle par approximation de la réponse fréquentielle 78

Figure. II. 38: Modèle de Belhachemi 78
Figure. II. 39: Modèle multi-pores [184] 79
Figure. II. 40 : Modèle de supercondensateur retenu [84] 80
Figure. II. 41 : Variation de la capacité d'un supercondensateur en fonction de la tension ... 81
Figure. II. 42: Comparaison expérimental/modèle : en Temporel (A), en Fréquentiel (B) [84] 81
Figure. II. 43: Caractérisation des supercondensateurs : Courant supercondensateur (A). Tension supercondensateur (expérimental/modèle) (B). Erreur relative tension (C) 82
Figure. II. 44: Modèle thermique utilisé [187] 86
Figure. II. 45: Profil du courant (A). Comparaison expérimental /simulation modèle électrique identifié (B) .Comparaison expérimental/simulation du modèle thermique identifié (C) 87
Figure. II. 46: Validation du modèle thermique de supercondensateurs [40] 88
Figure. II. 47: Courant et réponse en tension du supercondensateur (A). Réponses thermique expérimentale et du modèle (B)[40] 88
Figure. II. 48: Profil du courant (A). Comparaison expérimental /simulation modèle électrique identifié (B) .Comparaison expérimental/simulation du modèle thermique identifié (C) 89
Figure. II. 49: Profil de courant de cyclage des batteries Ko40HE suivi d'un cycle de caractérisation 90
Figure. II. 50: Evolution de la capacité durant le cyclage (A). La résistance interne (B) 92
Figure. II. 51: Echantillonnage pour identification du modèle de vieillissement : Profil du courant (A). Tension batterie (B). Réponses thermique (C) 93
Figure. II. 52: Comparaison expérimental/modèle du vieillissement. Dégradation de capacité (A). Erreur relative (B) 93
Figure. II. 53: Comparaison expérimental /modèle du vieillissement. Augmentation relative de résistance interne (A). Erreur relative (B) 94

Figure III. 1: Principe de gestion d'énergie d'une source hybride 98
Figure III. 2 :Principe de la logique floue [54] 101
Figure III. 3 : Principe de la stratégie thermostat 103
Figure III. 4: Principe de décomposition des puissances de la stratégie basée sur la dynamique du véhicule 104
Figure III. 5: Principe de la stratégie énergétique fréquentielle 105
Figure III. 6 : Stratégie basée sur la limitation de la puissance batterie 106
Figure III. 7 : Principe de gestion de l'énergie d'une source hybride avec régulation de la source de puissance 108
Figure III. 8: Recharge des supercondensateurs à l'arrêt du véhicule 110
Figure III. 9 : Régulation de l'état énergétique des supercondensateurs par recharge à l'arrêt 110
Figure III. 10: Régulation énergétique des supercondensateurs par boucle de régulation 111
Figure III. 11 : Régulation de l'état énergétique des supercondensateurs à l'aide d'un contrôleur PI 112
Figure III. 12: Boucle de régulation des supercondensateurs avec gain et filtre passe bas 112

Figure III. 13: Impact de la masse de source sur la puissance et l'énergie du pack de batteries (en haut) et de supercondensateurs (en bas) 116
Figure III. 14: Algorithme de dimensionnement des batteries « mono source » [7] 119
Figure III. 15: Algorithme de dimensionnement d'une source hybride [7] 121
Figure III. 16: Evolution de la masse (A) et du coût (B) de la source en fonction de l'autonomie désirée 124
Figure III. 17: Masse et coût des sources pour trois valeurs d'autonomie (150, 193 et 364km) 126
Figure III. 18 : Evolution de la masse avec batteries HP seules, hybride (MG2/MG4) 126
Figure III. 19: Evolution de la puissance efficace et de la quantité de charge échangée des batteries Li Ion en fonction de l'autonomie désirée 127
Figure III. 20: Evolution de la puissance efficace et du nombre de cycles de charge/décharge des supercondensateurs en fonction de l'autonomie désirée 128
Figure III. 21: Variation des limites de partage de puissance avec «MGD1» 130
Figure III. 22 : Evolution de la puissance limite des batteries en fonction de l'état énergétique du supercondensateur (méthode MGD1) 131
Figure III. 23: Variation des limites de partage de puissance entre deux niveaux en fonction de l'état de charge de supercondensateurs «MGD2» 132
Figure III. 24 : méthode MGD2 : puissances limite des batteries en fonction de l'état énergétique du supercondensateur 133
Figure III. 25: Variation de limites de partage de puissance par une fonction linéaire continue «MGD3» 134
Figure III. 26: Méthode MGD3 : Evolution linéaire de la puissance limite des batteries en fonction de l'état énergétique du supercondensateur 134
Figure III. 27 : Masse de la source hybride obtenue avec la méthode de référence MG4 135
Figure III. 28: Puissance efficace batterie (A), Gain en pourcentage par rapport MG4 (B) .. 136
Figure III. 29: Quantité de charge Batterie échangée (A), Gain en pourcentage par rapport MG4 (B) 137
Figure III. 30: Evolution de la puissance efficace des supercondensateurs en fonction de l'autonomie désirée 138
Figure III. 31: Evolution du nombre de cycles de charge/décharge supercondensateurs en fonction de l'autonomie désirée 139
Figure III. 32: Puissance efficace de batteries avec les méthodes MG2, MG4 et MGD3 139
Figure III. 33: Quantité de charge Batteries échangée avec les méthodes MG2, MG4 et MGD3 140
Figure III. 34: Couplage multi-physique des modèles de la source hybride 141
Figure III. 35: Dégradation de la capacité des batteries et des supercondensateurs avec la méthode de référence MG4 142
Figure III. 36: Dégradation de la capacité de batteries et de supercondensateurs avec les méthodes développées. MGD1 (A), MGD2 (B), MGD3 (C), MGD3+ (D) 143
Figure III. 37: Méthode active - Algorithme de gestion de l'énergie 145
Figure III. 38: Dégradation de la capacité batteries et supercondensateurs avec la méthode active basée sur MGD3 et la référence MG4 146

Figure. A. 1: Cycle de conduite NEDC[261] 152
Figure. A. 2: Cycle de conduite WLTC 153
Figure. A. 3: Cycle de conduite ARTEMIS 154
Figure. A. 4: Forces sur un véhicule en roulage..... 155
Figure. A. 5: Puissance et énergie consommés par le véhicule..... 156

Figure B. 1 : Schéma synoptique du banc de test (600A, 60V, 40kHz)..... 157
Figure B. 2: Convertisseur 4 bras (600A, 60V, 40kHz)..... 158
Figure B. 3: Module tampon (100AH, 34V, 500A/200A) 158
Figure B. 4 Interface IHM pour pilotage et surveillance du banc de test 159

Figure C. 1: Organigramme de l'algorithme d'optimisation hybride (PSO / NM) [179]..... 161
Figure C. 2: Schéma vectoriel du déplacement d'une particule..... 163
Figure C. 3 : Schéma du principe d'optimisation des paramètres du modèle [179] 164

Figure E. 1 : Caractéristiques techniques des batteries kokam [80]..... 166
Figure E. 2 : Caractéristiques techniques des supercondensateurs BCAP0350 E270T11 (350F/2.7V)[114] 167

Liste des tableaux

Tableau. I. 1: Engagement de réduction des émissions de gaz effet de serre fixés par le protocole de Kyoto [19] 7
Tableau. I. 2: Calendrier de mise en place des normes d'émission US [24] 8
Tableau. I. 3:Autonomie de véhicules commercialisés [42] 13
Tableau. I. 4: Propriétés de batteries utilisées dans les véhicules électriques [32] 14
Tableau. I. 5 : Données fabricant Kokam des éléments UHP[7][80] 20

Tableau. II. 1: Coût des matières premières des batteries Li-ion [91] 35
Tableau. II. 2: Données fabricants des batteries Li-ion testées [7][80] 37
Tableau. II. 3 : Caractéristiques générales des batteries Li et supercondensateurs [101][105] 38
Tableau. II. 4: Données fabricants supercondensateur MAXWELL BCAP0350 E270T11 (350F/2.7V) [7][114] 43
Tableau. II. 5: Classification des modèles de vieillissement [30] 46
Tableau. II. 6: Exemples de modèles « circuits électriques équivalents » [95] 61
Tableau. II. 7 : Avantages et inconvénients des familles de modèles de batterie 62
Tableau. II. 8 : Avantages et inconvénients des méthodes d'identification 66

Tableau III. 1 : Classification des différentes stratégies de gestion d'énergie[82][234][235] . 97
Tableau III. 2 : Synthèse des méthodes de gestion d'énergie 107
Tableau III. 3 : Méthodes sélectionnées pour la suite de l'étude 113
Tableau III. 4 : Paramètres de simulation des méthodes de gestion 129
Tableau III. 5 : Paramètres de simulation de MGD1 131
Tableau III. 6 : Paramètres de simulation de méthode de gestion MGD2 133

Tableau. A. 1: Paramètres du véhicule électrique urbain de type *Bluecar* [7][264][265] 154

Tableau D. 1 : Paramètres du modèle multi-physique de batterie Li-ion 165
Tableau D. 2 : Paramètres du modèle multi-physique de supercondensateur 165

Liste des abréviations

Symboles

C_{bat}	Capacité énergétique d'une batterie
i	Intensité du courant électrique
C_{sc}	Capacité énergétique d'un supercondensateur
V_{sc}	Tension de supercondensateur
E_{sc}	Energie stockée dans un supercondensateur
S	Surface d'interaction (électrode / électrolyte) d'un supercondensateur
d	Epaisseur du diélectrique d'un supercondensateur
ε_r	Permittivité relative
ε_0	Permittivité absolue du vide
V_{sc_max}	Tension maximale de supercondensateur
R_{SC}	Résistance équivalente série d'un supercondensateur
m	Masse d'un supercondensateur
E_{sc_max}	Energie maximale d'un supercondensateur
C_{sc}^{neuve}	Capacité totale neuve d'un supercondensateur
$\|Z\|$	Module de l'impédance d'une batterie
φ	Déphasage de l'impédance d'une batterie
R_{Ω}	Somme des résistances internes d'une batterie
R_{dl}	Résistance de phénomène de transfert de charge et de double couche des basses fréquences
C_{dl}	Capacité de phénomène de transfert de charge et de double couche des basses fréquences
Z_w	Impédance de Warburg
R_{dif}	Résistance de phénomène de diffusion
C_{dif}	Capacité de phénomène de diffusion
R_E	Résistance représente les pertes de l'énergie dans un supercondensateur
C_E	Capacité représente l'énergie stockée dans un supercondensateur
P_j	Puissance perdue
R_{eq}	Résistance énergétique équivalente d'un supercondensateur
C_{eq}	Capacité énergétique équivalente d'un supercondensateur
$Cp_{saurf\ sep}$	Capacité thermique d'un élément (cellule) de batterie par unité de surface de séparateur
U_{ocv}	Tension à vide d'un élément (cellule) de batterie
$h_{surf\ sep}$	Coefficient de transfert thermique
T_{amb}	Température de l'air ambiant
R_{int}	Résistance interne globale d'un élément (cellule) de batterie
P_{th}	Puissance thermique injectée
R_{th}	Résistance thermique d'un élément (cellule) de batterie
C_{th}	Capacité thermique d'un élément (cellule) de batterie

a_{bat}	Dégradation de capacité ou de résistance interne d'un élément (cellule) de batterie
T_0	Température initiale (modèle de vieillissement de batterie ou de supercondensateur)
V_0	Tension initiale (modèle de vieillissement de batterie ou de supercondensateur)
ΔT	Constante de variation de température (modèle de vieillissement d'une batterie)
ΔV	Constante de variation de tension (modèle de vieillissement de batterie ou de supercondensateur)
E_{dech}^{i}	Capacité liée directement à l'énergie de batterie durant le cyclage
E_{dech}^{0}	Capacité initiale de l'énergie de batterie au démarrage de cyclage
ΔC^{i}	Variation de la capacité d'un élément (cellule) de batterie durant le cyclage
E_{cha}^{i}	Energie de la batterie en charge durant le cyclage
R^{i}	Résistance interne d'un élément (cellule) de batterie durant le cyclage
R^{0}	Résistance interne initiale d'un élément (cellule) de batterie au démarrage de cyclage
a_{scp}	Dégradation de capacité ou de résistance interne d'un élément de supercondensateur
P_V	Puissance requise pour la propulsion du véhicule électrique
P_{Bat}	Puissance de batterie
P_{sc}	Puissance de supercondensateur
F_c	Fréquence de coupure
P_{acc}	Puissance requise pour l'accélération du véhicule
P_{res}	Puissance résistive globale
K_d	Coefficient de distribution de puissance
ΔP_V	Variation de la puissance issue de l'intégration de la source dans le véhicule
ΔE_{V_cons}	Variation de l'énergie issue de l'intégration de la source dans le véhicule
M_{SSE}	Masse du système de stockage d'énergie
V_{veh}	Vitesse du véhicule
g	Constante de champ de gravitationnel (9.81 m/s^2)
C_0	Coefficient de résistance au roulement curviligne
C_1	Coefficient de résistance au roulement rectiligne
ΔP_{V_cons}	Variation de la puissance consommée en fonction de masse
ΔP_{V_rec}	Variation de la puissance récupérée en fonction de masse
$\partial_{P_W}^{cons}$	Facteur de variation de la puissance consommée des batteries en fonction de masse
$\partial_{P_W}^{rec}$	Facteur de variation de la puissance récupérée des batteries en fonction de masse
∂_{E_W}	Facteur de variation de l'énergie consommée des batteries en fonction de masse
∂_{Sc}^{cons}	Facteur de variation de la puissance consommée des supercondensateurs en fonction de masse

∂_{Sc}^{rec}	Facteur de variation de la puissance récupéré des supercondensateurs en fonction de masse
ΔE_{Sc}^{W}	Variation de l'énergie des supercondensateurs en fonction de masse
N_{P_Sc}	Nombre de branches de supercondensateurs (parallèles)
N_{P_B}	Nombre de branches de batteries (parallèles)
N_{S_Sc}	Nombre d'éléments de supercondensateurs en série
N_{S_B}	Nombre d'éléments de batteries en série
$P_{V_{cons}}$	Puissance consommée du véhicule
$P_{V_{rec}}$	Puissance récupérée du véhicule
$E_{V_{cons}}$	Energie consommée du véhicule
W_{el_Sc}	Masse d'un élément de supercondensateur
W_{el_B}	Masse d'un élément de batterie
$R_{0_{el_B}}$	Résistance interne d'un élément (cellule) de batterie
$U_{el_B_nom}$	Tension nominale d'un élément de batterie
$U_{el_B_min}$	Tension minimale d'un élément de batterie
$P_{el_B}^{C}$	Puissance maximale de charge d'une cellule de batterie
$P_{el_B}^{D}$	Puissance maximale de décharge d'une cellule de batterie
E_{el_B}	Energie maximale d'une cellule de batterie
C_{el_Sc}	Capacité nominale d'un élément de supercondensateur
U_{Bus}	Tension du bus continu
$Coût_{el_B}$	Coût d'un élément de batterie
$Coût_{el_Sc}$	Coût d'un élément de supercondensateur
P_{eff_Bat}	Puissance efficace d'une batterie
P_{eff_Sc}	Puissance efficace d'un supercondensateur
Ah_{Bat}	Quantité de charge échangée dans une batterie
$N_{ch/déc}$	Nombre de cycles de charge/décharge de supercondensateurs
ΔE_{sc}	Energie dimensionnant du pack de supercondensateurs
$P_{bat_disch_limit}$	Limite de partage de puissance dans la phase de traction (phase de décharge)
$P_{bat_char_limit}$	Limite de partage de puissance dans la phase de récupération (phase de charge)
Esc_{disch_high}	Limite haute de l'énergie de supercondensateurs
Esc_{disch_low}	Limite basse de l'énergie de supercondensateurs
$P_{rec_33_\%}$	Puissance récupérée de 33%
K_{sc}	Coefficient de partage de puissance

Notations

Ni-Mh	Nickel-hydrure métallique
Li-ion	Lithium-ion
NCA	Nickel-cobalt-aluminium
NMC	Nickel-manganèse-cobalt
LMS	Lithium manganèse spinelle
LFP	Lithium phosphate de fer
SOC	Stat of charge (état de charge de batterie)

OCV	Open Circuit Voltage (tension en circuit ouvert)
SOH	State of Health (Etat de santé de batterie)
DOD	Depth Of Discharge (Profondeur de décharge)
SEH	Source d'Energie Hybride
PSO	Optimisation par essaims particulaires
NM	Nelder-Mead
VE	Véhicule Electrique
VEH	Véhicule Electrique Hybride
HP	Haute densité de puissance
HE	Haute densité d'énergie
UHP	Très haute densité de puissance
TCO	Coût total de possession (Cost of Ownershi)
PAC	Piles à combustible
NEDC	New European driving cycle
ARTEMIS	Assesment and Reliability of Transport Emission Models Inventory Systems
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
MG1	Stratégie de gestion fréquentielle d'énergie associée avec la méthode de recharge à l'arret
MG2	Stratégie de gestion fréquentielle d'énergie associée avec la méthode de régulation énergétique des supercondensateurs par un contrôleur PI
MG3	Stratégie de gestion basée sur la limitation de puissance de batterie associée avec la méthode de recharge à l'arret
MG4	Stratégie de gestion basée sur la limitation de puissance de batterie associée avec la méthode de régulation énergétique des supercondensateurs par un contrôleur PI
MGD1	Stratégie de gestion devloppée basée sur la variation de limites de partage de puissance avec la restriction de l'énergie récupérée
MGD2	Stratégie de gestion devloppée basée sur la variation de limites de partage de puissance entre deux niveaux
MGD3	Stratégie de gestion devloppée basée sur la variation de limites de partage de puissance par une fonction linière continue
MGD3+	Stratégie de gestion devloppée basée sur la variation de limites de partage de puissance par une fonction linière continue avec une augmentation de la tension des supercondensateurs

Introduction générale

La première conférence des Nations Unies sur l'environnement s'est tenue à Stockholm en 1972. C'est à cette occasion que les états ont décidé de faire de la protection de l'environnement un enjeu majeur à l'échelle internationale. Mais ce n'est qu'en 1992, lors du sommet de la Terre à Rio, qu'a été mise en place la convention sur le climat prenant en considération l'incidence des gaz à effet de serre produits par l'homme sur le réchauffement climatique. La prise en compte de ce phénomène dans le cadre des Nations Unies a été historique car, à la différence de certains problèmes écologiques qui sévissent à l'échelle d'une région ou d'un pays, ce phénomène fait peser une menace globale sur la planète [1]. La solution à ce problème ne pourra se régler qu'à l'échelle mondiale. Dans ce contexte international de lutte contre le réchauffement climatique, l'étape suivante a été le protocole de Kyoto élaboré en 1997 et fixant une limitation de la pollution atmosphérique et des gaz à effet de serre. A titre d'exemple, l'Union européenne exige une stratégie sur la base de ce protocole pour ses Etats membres, plus connue sous le nom de stratégie 20/20/20. Ces chiffres représentent : 20% de réduction des émissions de gaz à effet de serre, 20 % de réduction de la consommation d'énergie grâce à l'efficacité énergétique et 20% de participation des sources d'énergie renouvelables dans la couverture des besoins énergétiques d'ici à 2020 [2][3]. Dans le cadre de la COP21 qui s'est déroulé à Paris en décembre 2015, la prise de conscience des dangers du dérèglement climatique a permis de définir des objectifs ambitieux comme la décision symbolique de ne pas dépasser la barre des 1,5 degrés de hausse de température et l'obligation de transparence des états sur tout ce qui concerne leurs décisions sur ce sujet[4].

La mise en œuvre de tels objectifs, qui se combine avec l'épuisement progressif des ressources fossiles et les besoins en énergie grandissants dans les pays émergeants, demande des investissements importants afin de définir, optimiser et maîtriser les paramètres mis en jeu. Le secteur du transport, qu'il soit terrestre, maritime ou aérien, est au cœur de ces préoccupations, car il est considéré comme le premier contributeur au dérèglement climatique avec 27% des émissions mondiales de gaz à effet de serre [5].

L'amélioration du rendement des moteurs thermiques, la réduction des émissions par post-traitement, l'utilisation de biocarburants, l'optimisation des stratégies de commande désormais numériques, ont permis d'importants progrès, mais atteignent aujourd'hui leurs limites. Les industriels dans le domaine du transport entament des mutations technologiques sans précédent. En ce qui concerne le domaine de l'automobile, les voix de progrès sont entre autres liées à l'électrification partielle ou totale des véhicules. Ces solutions ont beaucoup d'avantages par rapport à celles utilisant seulement le moteur à explosion.

Néanmoins, le système de stockage d'énergie utilisé dans les véhicules électriques ou hybride reste toujours le maillon faible : très coûteux, limité en autonomie, lent à la recharge, etc… Aujourd'hui, l'axe principal de progrès pour le développement des véhicules électriques est sans nul doute basé sur le développement de systèmes de stockage d'énergie embarquée apportant des solutions pour l'amélioration de l'autonomie, de la masse et de la durée de vie de ces stockeurs.

Actuellement, la technologie retenue pour les véhicules électriques ou hybride de nouvelle génération est basée sur les solutions dites Lithium-ion. Elle offre actuellement des caractéristiques satisfaisantes, mais son énergie massique (≈140Wh/kg) ne pourra jamais concurrencer l'énergie massique des hydrocarbures (≈12000 Wh/kg) [6]. De plus, la plupart des applications « traction électrique » requièrent une forte puissance (accélérations rapides, variations de vitesse et freinages), ce qui n'est pas toujours admissible par les batteries actuelles et peut de plus limiter leur longévité.

L'hybridation des sources a pour avantage de pouvoir combiner les avantages de deux technologies (ou plus), avec une énergie spécifique élevée pour la première et une puissance spécifique importante pour la seconde. Elle permet d'améliorer les performances du système de stockage d'énergie embarquée en termes de temps de recharge, de masse, de coûts, et même

de durée de vie [7]. Dans le secteur du transport, il existe différentes solutions technologiques connues telles que les piles à combustible, les batteries, les supercondensateurs, …, permettant de réaliser cette hybridation par association de deux modules de stockage.

Ces travaux ont été effectués au sein du pôle **Système et Energie Embarquée dans le Transport (S2ET)** du laboratoire **ESTACA'LAB** de **Laval** en collaboration avec l'équipe électronique de puissance **EP** du **Laboratoire d'Electrotechnique et Electronique de Puissance (L2EP)** de **Lille**. Ils se situent dans la continuité des travaux de *R.SADOUN* [7] qui a montré l'intérêt des sources de stockage hybride en ce qui concerne leur dimensionnement. Les tests de cyclage ont de plus mis en évidence le meilleur comportement en vieillissement de la source hybride relativement à une batterie seule pour l'application véhicule électrique urbain.

L'objet du travail présenté est de montrer que l'hybridation ne consiste pas qu'à connecter entre elles deux sources complémentaires en énergie et en puissance. La gestion intelligente de l'énergie embarquée des sources de stockage hybride est primordiale pour permettre leur développement, afin de gérer efficacement les échanges énergétiques entre les deux sources présentes à bord du véhicule. *L'objectif final des travaux développé dans le troisième et dernier chapitre est de montrer que la gestion d'énergie entre les deux stockeurs d'une source hybride a un effet non négligeable sur son dimensionnement (volume, masse…), mais aussi sur sa durée de vie.*

Le contexte de l'étude est ainsi introduit dans le premier chapitre, en prenant notamment en compte les contraintes de l'application, les limitations énergétiques des systèmes de stockage et les choix technologiques effectués. Afin de pouvoir tester l'influence de la gestion de l'énergie sur la durée de vie des systèmes, un modèle de vieillissement multi-physique (électrique, thermique, vieillissement) des deux composants de stockage est développé dans le deuxième chapitre. Il est étayé par de nombreux essais et vérifications expérimentales prenant en compte les aspects électriques, thermiques et vieillissement.

Enfin, dans le troisième chapitre, les méthodes de gestion les plus adaptées à notre problématique sont sélectionnées parmi celles présentes dans la littérature, ce qui permet de définir quelques méthodes de référence. Elles font alors l'objet d'une étude plus approfondie selon différents critères liés au dimensionnement, mais également aux contraintes électriques, et sont comparées entre elles par simulation. Enfin, de nouvelles méthodes, variantes des méthodes de références sont proposées. Elles sont alors comparées entre elles à l'aide du modèle multi-physique développé précédemment, afin d'évaluer les gains potentiels en masse et durée de vie du stockeur hybride, mais aussi de faire émerger des paramètres d'action sur ces méthodes de gestion pour l'optimisation du stockeur.

CHAPITRE I : Véhicule électrique et apport de la source hybride

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous évoquons tout d'abord le contexte énergétique et écologique mondial lié à l'utilisation de ressources d'énergie fossile pour le transport. Nous introduisons ensuite l'apport des véhicules électriques et hybrides et nous faisons un bref survol de leurs architectures. Nous nous focalisons sur la problématique du stockage de l'énergie car c'est le principal verrou technologique limitant le développement de ces solutions en termes de puissance, d'autonomie et de durée de vie. La solution de stockage actuellement rencontrée est un système dit « mono-source » à base d'accumulateur électrochimique. Ce dernier ayant des limites qui ne permettent pas de répondre au mieux aux besoins de l'application dans certains cas, la notion d'hybridation des sources de stockage sera introduite avec le challenge de diminuer la masse et d'augmenter la durée de vie de la source embarquée. Nous nous intéresserons en particulier à l'utilisation des supercondensateurs comme source secondaire de puissance associée à une batterie Li-ion comme source principale. Enfin, nous présenterons la démarche développée pour l'optimisation de la gestion de l'énergie et l'amélioration de la durée de vie de cette source hybride. La prise en compte de cette durée de vie impose l'utilisation d'un outil de comparaison des différentes stratégies de gestion du système hybride prenant en compte les paramètres ayant le plus d'influence et impliquera le développement d'un modèle multi-physique de cette source hybride afin d'étudier l'impact des stratégies de gestion d'énergie sur ses performances en terme de durée de vie.

I.2 Contexte énergétique et aspects environnementaux

Le défi énergétique représente l'un des verrous pour le développement des moyens de transport efficaces, moins polluants, et économiquement viables avec une utilisation rationnelle des ressources naturelles mondiales. Pour cela, des contraintes d'ordre écologique et économique doivent être respectées.

I.2.1 Défis énergétiques

La demande énergétique au niveau mondial, est en forte croissance sous l'effet de la démographie et de la croissance économique. Elle est principalement tirée par les pays émergents, notamment la Chine et à moyen terme l'Inde. Les énergies fossiles[1], et au premier rang desquelles se place le pétrole, assurent aujourd'hui plus de 80 % de l'offre mondiale en énergie. Cette situation se traduit par une dépendance mondiale de nos modes de vie aux énergies carbonées et pose la question de sa soutenabilité, tant sur le plan environnemental que sur celui de l'approvisionnement en matières premières [8]. Le pic de production de pétrole, ou *peak oil*, qui représente l'instant où la production pétrolière atteindra son maximum semble pour bientôt. A partir de ce point, la production mondiale ne pourra que décroître et les tensions entre les états augmenteront inexorablement. Personne ne peut vraiment prédire l'instant où cela arrivera et quelle sera l'ampleur des problèmes. Cela dépendra des mesures que prendront les nations pour gérer ce problème [9]. La Figure .I. 1 représente la carte des réserves énergétiques mondiales.

[1] Le terme "énergie fossile" désigne l'énergie produite à partir de pétrole, de charbon ou de gaz naturel. Ces matières premières sont issues de la transformation de matières organiques et composées de carbone.

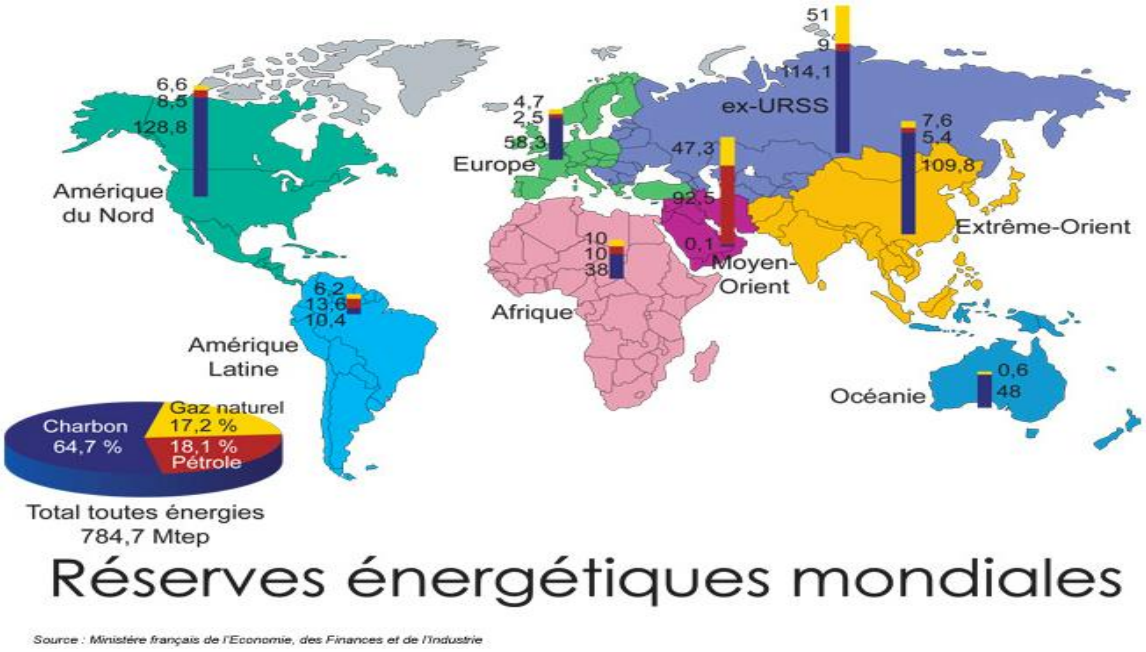


Figure. I. 1 : Réserves énergétiques mondiales[10]

En plus de l'épuisement annoncé des ressources pétrolières, leur approvisionnement est soumis à de fortes incertitudes et peut très rapidement se trouver perturbé par des événements d'origine naturelle (tempêtes, typhons), technique (catastrophe industrielle), mais aussi géopolitique, voire même terroriste [8]. Depuis 2002, la hausse des prix du pétrole est comparable à celle qu'avaient provoquée les chocs pétroliers de 1973[2] et 1979. Le prix du baril de Brent a été multiplié par 5, dépassant pour la première fois 100 dollars en janvier 2008 [11]. Avec la crise économique qui est encore perceptible et l'arrivée sur le marché d'hydrocarbures obtenu par de nouvelles technologies d'extraction, ce problème a été momentanément relégué au second plan mais n'est que temporaire.

Par ailleurs, le secteur des transports est très sensible aux perturbations d'approvisionnement pétrolier car il n'utilise actuellement que cette source d'énergie [7]. Compte-tenu des tensions géopolitiques qui pourraient se produire dans un avenir plus ou moins proche, la réduction de la consommation d'énergie pétrolière est devenue indispensable afin de limiter son impact sur ce secteur stratégique.

I.2.2 Problèmes environnementaux

En plus de l'accroissement continu de la consommation d'énergie, le secteur des transports dans ses branches terrestres, maritimes et aériennes est fortement responsable des émissions de polluants tels que le SO2 le CO2. En effet, ces émissions sont proportionnelles à la consommation de carburants fossiles qui représente actuellement 95% de l'approvisionnement mondial en énergie utilisée dans le secteur des transports [7][12]. Par ailleurs, les polluants provenant des transports, en particulier pour la branche routière, sont classés selon deux catégories ; d'une part, les polluants primaires, qui sont émis directement à l'échappement, d'autre part, les polluants secondaires, qui résultent de la transformation chimique des premiers

[2] Le 17 octobre 1973, l'Organisation des pays arabes exportateurs de pétrole annonce qu'elle réduira de 5% par mois son débit de pétrole, tant que les États-Unis ne changeront pas leur politique au Moyen-Orient (la guerre du Kippour entre Israël et les pays arabes).

dans l'atmosphère [13]. En plus des gaz, le transport routier est à l'origine d'émissions de polluants sous forme de particules fines de métaux lourds, de nuisances sonores... Ces polluants ont un impact direct sur la santé publique et sont responsables des changements climatiques dus à l'effet de serre (cf. Figure. I. 2).

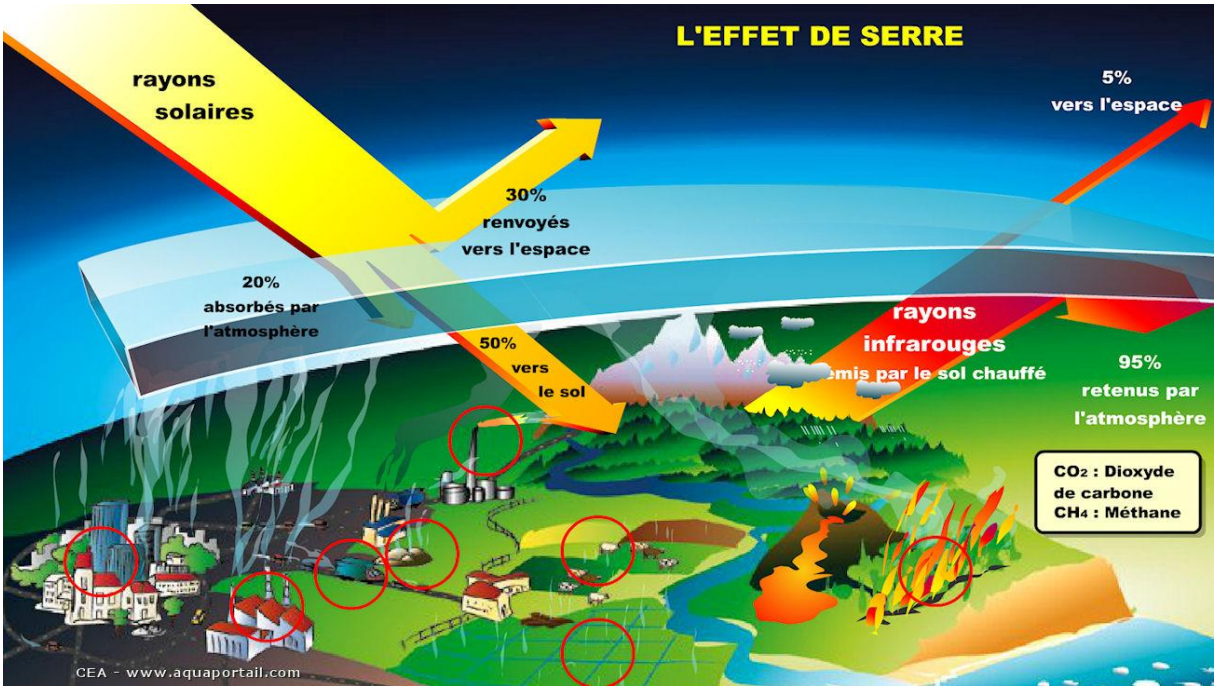


Figure. I. 2: Principe des gaz à effet de serre [14]

L'effet de serre est un phénomène naturel sans lequel la vie ne pourrait exister sur notre planète. Cependant, depuis l'ère industrielle, l'activité humaine tend à fortement augmenter ce phénomène, essentiellement par l'accroissement des rejets de CO2, au risque de provoquer un bouleversement climatique. Ce phénomène agit comme le verre d'une serre, c'est à dire que les gaz à effet de serre emprisonnent la chaleur produite par le soleil. La plus grande partie de l'énergie solaire traverse directement l'atmosphère (couche d'air qui entoure la terre) pour réchauffer la surface de la terre. Lorsque les rayons du soleil atteignent la Terre, 30 % d'entre eux sont directement réfléchis vers l'espace par les hautes couches de l'atmosphère. Ces dernières en absorbe 20 % et les 50 % restants atteignent le sol [11]. Les gaz à effet de serre permettent de conserver une partie de cette chaleur et l'empêche de repartir vers l'espace [12]. Sans l'effet de serre, la température moyenne de la Terre serait de – 18 °C, contre + 15 °C actuellement. Mais si la concentration des gaz à effet de serre est trop élevée, ce fonctionnement est perturbé et la chaleur reste piégée par l'atmosphère et la planète se réchauffe [12].

Les derniers rapports du GIEC[3] renforcent la certitude de l'existence d'une augmentation de l'effet de serre due à l'activité humaine. Il donne des prévisions d'augmentation de la température moyenne du globe et d'élévation du niveau moyen des mers sur le globe. Ainsi, selon les scénarios plus ou moins pessimistes, la température moyenne sur la terre s'élèverait en 2100 de 1,8° à 4° [15]. Par conséquent, la fonte des glaciers et la dilatation des océans sous l'effet de la chaleur provoqueront une élévation du niveau de la mer estimé entre 29 et 82 cm. Actuellement, de nombreuses régions côtières sont déjà confrontées à des

[3] GIEC : Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (The Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC) a été créé en 1988 par deux institutions des Nations unies : l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE).

phénomènes de submersion, d'accélération de l'érosion, d'intrusion d'eau de mer dans les nappes d'eau douce. Une autre conséquence du changement climatique est la diminution des ressources en eau douce qui va frapper certaines régions sèches des latitudes moyennes et tropicales. L'effet va se traduire par des déplacements massifs des populations du littoral (74 % de la population mondiale) vers l'intérieur des terres pour ne pas être submergé par la montée des eaux. Cependant, à cause des sécheresses et des inondations, les habitants des régions sinistrées risquent de souffrir de famine [12]. Sur le plan de la santé publique, le changement climatique influe sur les déterminants sociaux et environnementaux de la santé : air pur, eau potable, nourriture en quantité suffisante, sécurité du logement. Le schéma suivant (cf. Figure. I. 3) décrit les impacts environnementaux liés aux changements climatiques.

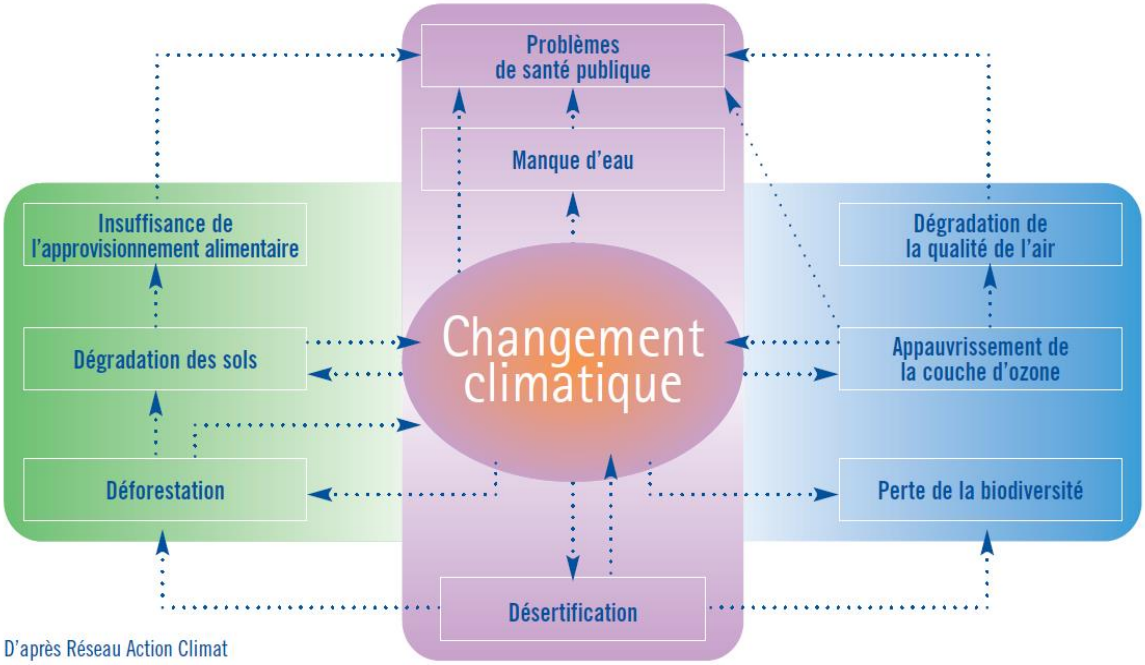


Figure. I. 3:Impacts environnementaux liés aux changements climatiques [16]

I.2.3 Evolution des normes d'émission automobile

Dans le sillage du sommet mondial sur l'environnement et le développement organisé en 1992 à Rio de Janeiro au Brésil, des conventions internationales ont été adoptées pour fixer un cadre et pour définir les actions à mener en vue d'agir contre les problèmes environnementaux globaux : réchauffement du climat, érosion de la biodiversité, sécheresse et désertification[17]. Par la suite, le protocole de Kyoto a été élaboré en 1997 pour servir de cadre international à la lutte contre le réchauffement de la Terre. Il avait fixé pour objectif la réduction moyenne de 5.2% des émissions des gaz à effet de serre sur la période 2008-2012 pour les ramener à leur niveau de 1990 [18]. L'essentiel de l'effort repose sur les pays développés et les pays d'Europe de l'Est à économie en transition. Les pays en développement, y compris les pays dits émergents comme la Chine, le Brésil, l'Inde ou l'Argentine sont dispensés d'engagements contraignants. Le protocole de Kyoto est entré en vigueur en février 2005 après sa ratification par la Russie à la fin de l'année 2004. L'Australie a ratifié le protocole en décembre 2007, ce qui porte à 175 le nombre de pays qui ont adhéré au protocole et sont donc tenus de l'appliquer entre 2008 et 2012. Les Etats-Unis sont le seul grand pays développé qui n'ait pas ratifié ce protocole, comme quelques pays du Sud [18].

Le Tableau. I. 1 présente l'engagement de réduction des émissions de gaz à effet de serre visé par le protocole de Kyoto.

États-Unis	**-7%**	**Allemagne**	**-21%**
Japon	-6%	Royaume-Uni	-12,5%
Canada	-6%	Italie	-6,5%
Russie	0%	Pays-Bas	-6%
Australie	+8%	France	0%
Union européenne	-8%	Espagne	+15%

Tableau. I. 1: Engagement de réduction des émissions de gaz effet de serre fixés par le protocole de Kyoto [19]

L'après Kyoto fait l'objet de discussions et de négociations internationales depuis quelques années en vue d'un autre accord. Les discussions portent notamment sur l'augmentation des engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre des pays développés et sur l'implication des pays en développement et surtout des pays émergeants. Cette implication [17] est largement basée sur des incitations financières, ce qui implique des conséquences importantes sur l'économie industrielle et le développement des nouveaux produits. Dans ce contexte, lors de la conférence climatique de Doha en 2012, les négociations ont enfin abouti à un accord. Celui-ci porte sur la période 2013-2020 et implique l'Union Européenne, l'Australie et quelques autres pays industrialisés. Le suivi du Protocole de Kyoto est évidemment positif mais il faut aller plus loin. En effet, cet accord ne va pas permettre d'atteindre une diminution suffisante des émissions puisque seules 15% des émissions globales sont concernées. De plus le Japon, le Canada, la Russie, la Nouvelle Zélande n'ont pas ratifié cette prolongation et les États-Unis n'ont jamais ratifié l'accord initial [20].

Lors de la conférence climatique COP 20 organisée du 1er au 12 décembre 2014, à Lima, au Pérou, les 195 pays ont ratifié la Convention-Cadre des Nations Unies pour le Changement Climatique (CCNUCC)[21]. Dans un contexte de forte mobilisation internationale, un accord international juridiquement contraignant permettre de maintenir l'augmentation de la température mondiale en dessous de 1,5 degré a été approuvé fin 2015 à Paris lors de la COP 21 [4].

Selon l'Organisation Mondiale de l'Environnement (OME), les principaux polluants émis par les secteurs industriels et faisant l'objet de réglementation sont les oxydes d'azote (NOx), le dioxyde de soufre (SO2), les poussières, le monoxyde de carbone (CO) et les composés organiques volatiles non méthaniques (COV non méthaniques), certains métaux et leurs composés, le plomb (Pb), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) [22]. Bien que tous les secteurs d'activité soient concernés, les émissions dues au transport et à l'automobile en particulier, ont été la cible principale des mécanismes réglementaires mis en place par différents pays [7]. A titre indicatif, la France a lancé, en janvier 2000, le programme PNLCC[4] fixant une centaine de mesures devant permettre de satisfaire les objectifs gouvernementaux pris dans le cadre du protocole de Kyoto. Plusieurs de ces mesures concernent le secteur des transports. Il s'agit de mesures existantes qu'il fallait poursuivre et/ou

[4] PNLCC : Le Programme National de Lutte contre le Changement Climatique est élaboré en 2000 par le gouvernement français et destiné à réduire les émissions de gaz à effet de serre sur la période 2000–2010. Il a été suivi, en 2004, par le Plan Climat, lui-même complété en 2006.

renforcer (diminution des consommations unitaires des véhicules neufs, développement du transport intermodal de marchandises, rattrapage de la fiscalité sur le gazole, etc…), et des mesures nouvelles, telles que la mise en place de la taxe carbone, la réduction des émissions des véhicules routiers, le développement de l'inter modalité des transports interurbains, le soutien de la Recherche & Développement [23].

Cette prise en compte de l'environnement dans le cadre législatif des transports a été uniformisée entre l'US EPA (United States Environnemental Protection Agency) et l'Union Européenne (Directive 2005/13/CE) avec plusieurs normes. Elles se nomment TIER I à IV (US) ou Euro I à IV (UE).

Catégorie de moteur	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
19KW ≤ P <37KW	TIER II			TIER III A								
37KW ≤ P <56KW	TIER II				TIER III A					TIER III B		
56KW ≤ P <75KW	TIER II				TIER III A				TIER III B		TIER IV	
75KW ≤ P <130KW	TIER II			TIER III A					TIER III B		TIER IV B	
130KW ≤ P <560KW	TIER II		TIER III A					TIER III B			TIER IV B	
P> 560KW	TIER I				TIER II			TIER IV a			TIER IV b	

Tableau. I. 2: Calendrier de mise en place des normes d'émission US [24]

L'évolution de la norme américaine (TIER) est montrée dans le Tableau. I. 2. Chaque niveau de ces normes antipollution impose une valeur limite maximale admissible des polluants suivants :

- Oxyde d'azote (NO_x)
- Monoxyde de carbone (CO)
- Hydrocarbure (HC)
- Poussières fines / particules de suie (PM)

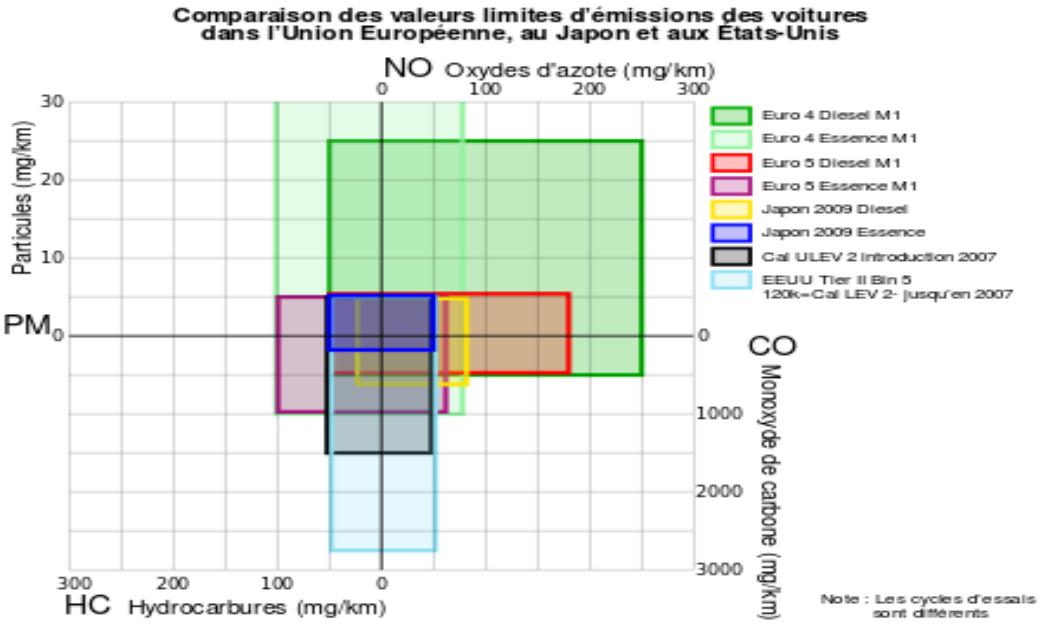


Figure. I. 4 : Comparaison des valeurs limites d'émissions des voitures dans l'Union Européenne, au Japon et aux Etats-Unis [7]

Les normes européennes fixant les limites de taux de pollution en mg/km (Euro I à VI) sont, comme toutes les normes, à chaque fois revisitées et les seuils d'émissions sont revus continuellement à la baisse[7]. Ces normes deviennent de plus en plus strictes afin d'inciter les constructeurs à poursuivre les recherches pour des solutions plus sobre en énergie. La norme Euro 1, entrée en vigueur en 1992 pour les moteurs diesel, imposait un maximum de 2,72 de CO, 0,97 de HC+NOx et 0,14 de particules fines. En 7 ans (1993 à 2000), les rejets de particules sont passés de 0,36 g/kWh (norme Euro I) à 0,1 (norme Euro III). De plus, pour tous les polluants cités précédemment, il est constaté une diminution supérieure à un rapport 5 entre les normes Euro1 et la norme Euro 6 entrée en vigueur le 1er septembre 2014[25].

I.2.4 Evolution des performances des véhicules thermiques

Les industries automobile et pétrolière ont réalisé d'énormes progrès ces dernières années pour parvenir à suivre l'évolution des normes d'émission. Dans ce contexte, une voiture particulière diesel neuve actuelle émet 94 fois moins de monoxyde de carbone (CO), 20 fois moins d'hydrocarbures et d'oxydes d'azote (HC+NOx), et 5 fois moins de particules qu'une voiture neuve d'il y a 30 ans [13]. Pour atteindre ce résultat, de nombreux efforts ont été réalisés par les constructeurs automobiles :

- Amélioration de la dynamique des véhicules (réduction du coefficient de pénétration dans l'air) pour réduire la consommation et l'émission des gaz à effet de serre.
- Adaptation des réglages moteurs : au niveau de l'injection, nouvelle calibration et nouveaux réglages des sondes.
- Montée en puissance du contrôle électronique (calculateurs haute performance, modèles embarqués, capteurs, etc.)[5].
- Choix des pièces à la conception : Impact sur la conception et les matériaux injecteurs, pistons et segments renforcés, compatibilité des matériaux utilisés (réservoir, filtres, circuits carburants, échappement).
- Ajout éventuel d'éléments : Système d'aide au démarrage à froid (Scandinavie).
- Réduction de la cylindrée pour accroitre la pression effective moyenne à un niveau de puissance bien défini afin d'améliorer l'efficacité énergétique.
- Développement de nouvelles architectures moteur (3 cylindres, 2-temps, etc.).
- Utilisation de carburants dont la molécule contient un nombre d'atomes de carbone faible relativement au nombre d'atomes d'hydrogène (rapport H/C plus élevé).
- Analyse du cycle de vie : outil de référence pour la conception des nouveaux véhicules.

Même si les performances des véhicules thermiques ont fortement progressé ces dernières années, leur impact sur la qualité de l'air et la santé publique reste préoccupant. Dans un contexte où le nombre de voitures ne cesse d'augmenter, l'électrification partielle ou totale des

[5] Ces différents équipements et logiciels garantissent un pilotage optimisé du moteur, de la boîte de vitesses et de tous les autres éléments de la chaîne de transmission afin qu'en toutes circonstances le fonctionnement du véhicule soit agréable pour l'utilisateur, fiable dans le temps, économe en carburant (faible émissions de CO2) et génère le minimum de nuisances (polluants, bruit, etc.).

chaines de traction thermique doit avoir un impact positif sur les émissions des gaz à effet de serre en local, voire plus selon le type de source primaire utilisée pour produire l'électricité.

I.3 Véhicules hybrides et électriques

I.3.1 Véhicules hybrides

De façon générale, on dénomme hybride, tout véhicule qui, en plus de sa source d'énergie primaire (énergie chimique du carburant en général), dispose d'un stockage réversible d'énergie sous une seconde forme : énergie pneumatique ou hydraulique d'un fluide sous pression, énergie cinétique d'un volant d'inertie, énergie électrique d'une batterie ou d'un supercondensateur, etc… [26]. Le véhicule hybride est aujourd'hui une option crédible, et est d'ores et déjà commercialisée malgré les contraintes intrinsèques liées à la double motorisation et au surcoût des équipements. Cette technologie d'hybridation offre des possibilités d'usage parfaitement adaptées à une utilisation urbaine de l'automobile. En ville, la conduite saccadée et à basse vitesse profite du rendement élevé de la chaine de conversion électrique [27]. Le véhicule hybride présente de nombreux avantages tout en maintenant l'autonomie qu'offre le carburant classique : diminution de la consommation de carburant et donc des émissions des gaz à effet de serre et des autres polluants atmosphériques, diminution du bruit en ville. Ces dernières années, les constructeurs automobiles ont intégré un certain nombre de fonctionnalités supplémentaires au véhicule hybride : Optimisation de la gestion d'énergie des accessoires électriques, *Stop & Start (STT)* (arrêt du moteur à l'arrêt et démarrage automatique), récupération d'énergie au freinage, assistance électrique à la traction ou booster, mode tout électrique[6] ou Zéro Emission Véhicule [28] .

On distingue plusieurs types de véhicules hybrides que l'on peut classer en fonction du niveau d'hybridation dans la chaine de traction :

- *Micro hybrid* : Dans ces véhicules, le système électrique Stop & Start (inférieur à 10kW) assure le démarrage et la coupure automatique du moteur thermique lors des phases d'arrêt, mais la récupération d'énergie au freinage est limitée. Cette solution permet un gain de consommation de carburant lors de la conduite en ville (arrêt au feu rouge, embouteillage..) de l'ordre de 10 % en usage urbain [29][30].

- *Mild hybrid* : Possède un système Stop & Start avec un moteur électrique de puissance généralement de 10 à 20 kW. Celui-ci apporte un surplus de puissance lors des phases de démarrage, d'accélération et une récupération d'énergie plus importante que pour le « *micro hybrid*» [30][31].

- *Full hybrid (Strong)* : La puissance du moteur électrique peut atteindre 150 kW dans ce type de véhicule. Cependant, la traction est essentiellement assurée par le moteur thermique mais la puissance beaucoup plus forte du moteur électrique permet une conduite tout électrique sur de courtes distances (trajets urbains). Ces véhicules possèdent une batterie de forte capacité, qui se recharge automatiquement durant les phases de fonctionnement du moteur thermique[7] [29] [30].

- *Plug-in hybrid* : Le PHEV « *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* » est simplement un véhicule hybride possédant une batterie de forte capacité qui peut être rechargée en branchant le véhicule sur le réseau électrique. Il réalise à la fois les performances d'un

[6] Le mode électrique pur correspond à une propulsion intégralement assurée par le moteur électrique.

véhicule « *full hybrid* » et d'un véhicule tout électrique. L'autonomie d'un « *plug-in hybrid* » varie ainsi entre 30 et 160 km et la réduction des émissions de CO2 peut atteindre 100 % au niveau du véhicule selon le mode de fonctionnement [7] [32].

Les véhicules hybrides peuvent être classés également suivant leur architecture. Ils se différencient suivant la nature du point de jonction entre les chaînes de traction électrique et mécanique [33][34]. On distingue alors trois concepts de véhicule hybride : série, parallèle et combiné.

I.3.1.1 Architecture série

Le nom « série » vient du fait que le moteur thermique, est directement lié en série[7] à la chaine de conversion électrique. Dans cette architecture, représentée en Figure. I. 5 le moteur électrique fournit seul la puissance aux roues. Il doit donc être dimensionné pour assurer seul la traction du véhicule. Le moteur thermique est associé à une génératrice électrique, faisant ainsi office de groupe électrogène et transformant l'énergie issue de la combustion en énergie électrique. Pour les faibles vitesses, le moteur thermique est utilisé par intermittence pour alimenter le moteur électrique ou pour recharger la batterie. Le tout électrique est utilisé en ville. Sur route le moteur thermique assure la recharge de la batterie ainsi que l'alimentation du moteur électrique [35][36].

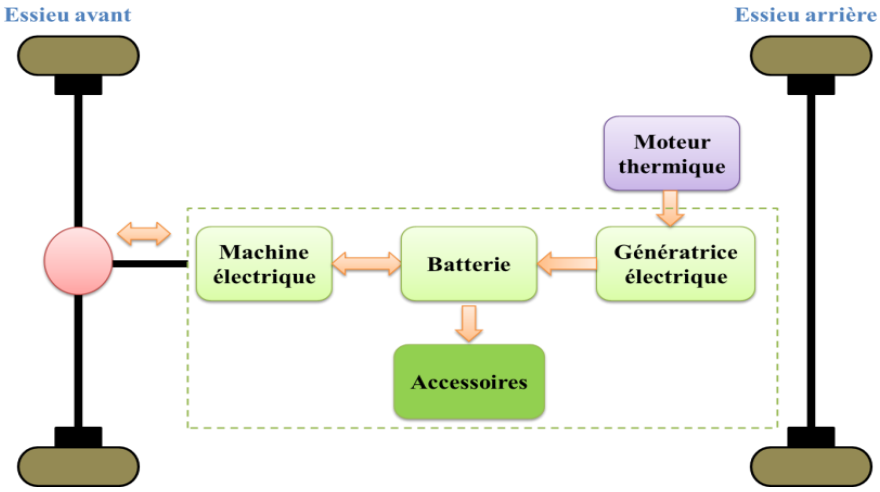


Figure. I. 5: Hybride série

I.3.1.2 Architecture parallèle

Dans l'architecture parallèle (cf. Figure. I. 6), les moteurs thermique et électrique sont tous les deux connectés directement à la transmission, donc couplés aux roues (point de jonction mécanique). Le moteur thermique est principalement utilisé pour propulser le véhicule. La machine électrique qui utilise l'énergie de la batterie permet un fonctionnement en mode *boost* et temporairement en mode tout électrique pour éviter des situations où le moteur thermique est peu efficace lors des conduites en ville. Dans l'architecture parallèle la machine électrique peut également être connectée sur un arbre différent, on parle dans ce cas d'architecture double arbre [22] [26].

[7] L'architecture série utilisée dans les camionnettes VTrux de Via Motors, la Chevrolet Volt.

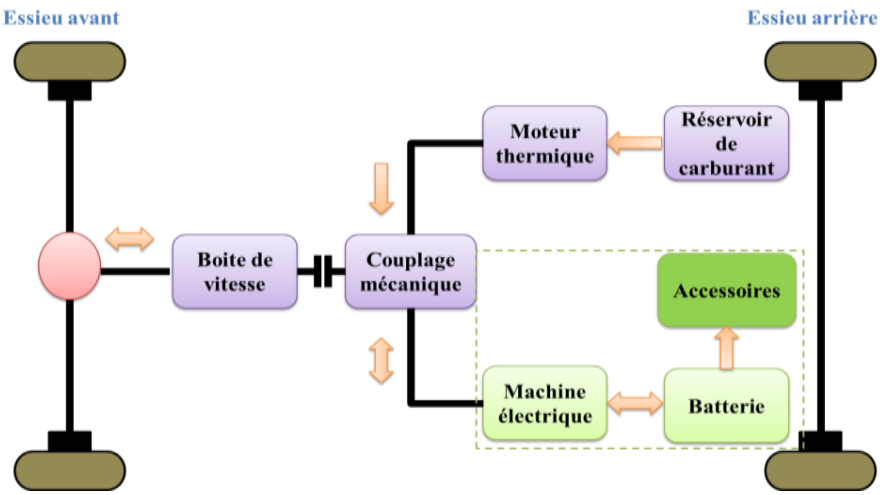


Figure. I. 6: Hybride parallèle

I.3.1.3 Architecture série/parallèle

Cette architecture, représentée en Figure. I. 7, permet de combiner les avantages des structures série et parallèle. La particularité de cette architecture est la combinaison du moteur électrique et thermique permettant la récupération de l'énergie par l'intermédiaire du générateur électrique. Dans ce cas, le véhicule peut être propulsé par le moteur thermique, ou par la machine électrique, ou par les deux pour obtenir le meilleur rendement possible en fonction des conduites (ville, route...) [37] [38][39].

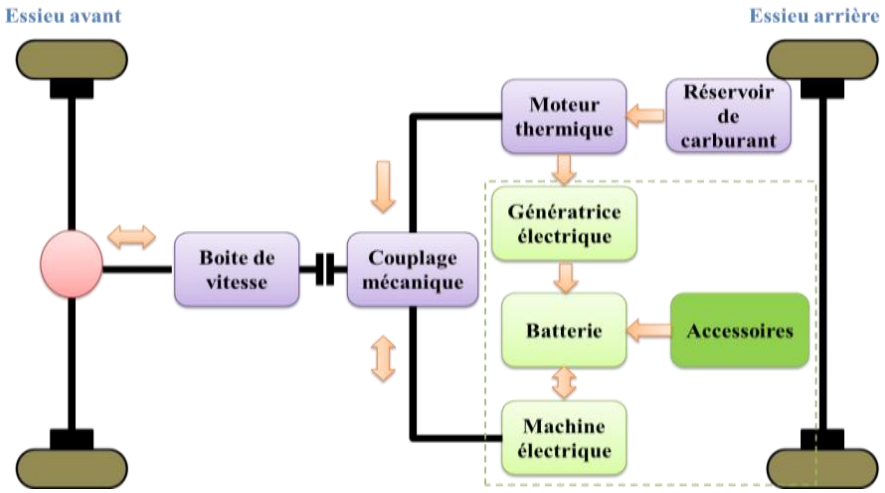


Figure. I. 7: Hybride série-parallèle

I.3.2 Véhicules électriques

La technologie du véhicule tout électrique, bien que très ancienne, reste actuellement encore peu industrialisée et dispose donc d'un très fort potentiel industriel d'amélioration. La chaine de traction classique utilisée dans ce type de véhicule est nettement plus simple que celle d'un véhicule thermique traditionnel ; elle est composée d'une machine électrique qui assure la propulsion et un accumulateur rechargeable utilisé comme source d'énergie primaire [7][40]. Le moteur électrique présente un avantage certain en circulation à faible vitesse lié au fait qu'il engendre peu de pollution locale (bruit, gaz et particules). Il offre, en outre, un couple moteur

très élevé au démarrage, la capacité de récupérer de l'énergie au freinage et un très bon rendement de la chaine de traction [41].

La faible autonomie des batteries des véhicules électriques est la principale raison de ses difficultés à s'imposer face aux véhicules thermiques depuis ses débuts au XIXème siècle. L'utilisation de ce type de véhicule ne concerne qu'un nombre limité d'utilisateur. Les distances quotidiennes sont limitées, et le kilométrage annuel doit être suffisant pour compenser le coût initial de la batterie [42].

Actuellement les véhicules électriques sont exclusivement urbains, leur autonomie est comprise entre 70 et 120 km avec des technologies de batteries d'anciennes générations (plomb-acide et nickel-cadmium) et 150 à 395 km avec des technologies plus avancées (nickel-métal-hydrure et lithium-ion) [43]. Le Tableau. I. 3 résume « l'autonomie constructeur » des principales voitures électriques actuellement commercialisées :

Modèle	**Autonomie constructeur**
Bolloré Bluecar	250 km
Citroën C-Zero	160 km
Lumeneo Smera	150 km
Nissan LEAF	175 km
Peugeot iOn	130 km
Renault Fluence ZE	160 km
Renault kangoo Express ZE	160 Km
Renault Twizy	100km
Renault Zoé	210 km
Smart électrique	135 Km
Tazzari Zero	140 km
Tesla Model S (40 kWh)	A partir de 250 km
Tesla Model X (40 kWh)	A partir de 260 km
Tesla Roadster	395 km

Tableau. I. 3:Autonomie de véhicules commercialisés [42]

I.3.2.1 Système de stockage : le maillon faible

La diffusion des technologies électriques ou hybrides rechargeables ne pourra se faire que si les performances énergétiques et le confort de conduite reste équivalent à celui des véhicules thermiques traditionnels tout en maintenant un prix compétitif.

Même si le coût d'utilisation d'un véhicule électrique reste modéré, son achat est actuellement encore de 25% plus élevé par rapport à celui des véhicules classiques fonctionnant à l'essence ou au diesel, aides de l'état déduites. De plus, le coût du système de stockage d'énergie peut atteindre 50% du coût global. Enfin, la densité énergétique du carburant utilisé dans un véhicule traditionnel (9400Wh/L, 34MJ/L) est hors de portée de celle des meilleures batteries de traction (100-150 Wh / L, 0,36 à 0,54 MJ / L) [44]. Pour ces raisons, le système de stockage reste le maillon faible du véhicule électrique, tant qu'il sera concurrencé par des carburants traditionnels à un coût accessible.

Il existe plusieurs systèmes de stockage d'énergie électrique adaptés au transport [45][46]. Les caractéristiques des technologies les plus répandues (batteries électrochimiques) dans ce secteur sont présentées dans le Tableau. I. 4.

Technologie batterie	Energie massique (Wh/Kg)	Puissance massique (W/Kg)	Nombre cycles à 80% de décharge	Cout en euro/KWh
PB-Acide	40-50	140-250	800-1500	100-190
Ni-Mh	60-80	500-1400	500-2000	400-2000
Li-Ion	70-130	600-3000	800-1500	700-2000

Tableau. I. 4: Propriétés de batteries utilisées dans les véhicules électriques [32]

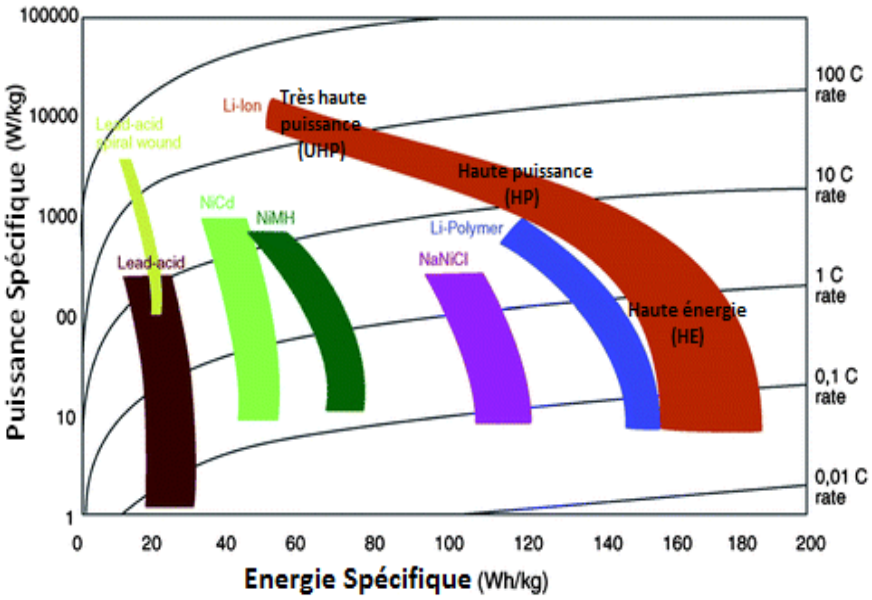


Figure. I. 8 : Diagramme de Ragone permettant de comparer les performances énergétiques et en puissance des différentes batteries

La batterie Li-ion est de loin la technologie la plus performante en termes de puissance et énergie spécifiques. Sa durée de vie est équivalente à celle des autres technologies. C'est pour ces raisons qu'elle s'est énormément développée ces dernières années[47]. La Figure. I. 8 représente ces différentes technologies sur un diagramme de Ragone. Sur cette figure on remarque bien la suprématie des batteries Li-ion par rapport aux autres technologies.

Suivant l'énergie spécifique et la puissance spécifique, on peut distinguer trois types de composants Li-ion :

- Li-ion haute densité d'énergie (HE) : caractérisé par une forte énergie spécifique, mais un faible courant de charge/décharge.
- Li-ion haute puissance (HP) : caractérisé par une énergie plus faible que la précédente, mais un courant de charge/décharge plus élevé.
- Li-ion très haute puissance (UHP) : caractérisé par une énergie spécifique très faible et des très forts courants de charge/décharge. Cette technologie récente est très proche des performances des supercondensateurs, avec plus d'énergie et une durée de vie moins importante

Aujourd'hui, les batteries les mieux adaptées aux applications automobiles sont incontestablement les Li-ion hautes puissances [43]. Cette technologie est actuellement au cœur de l'offre en matière de système de stockage pour le transport. Toutefois, son coût est encore très élevé et les constructeurs comptent surtout sur l'augmentation des volumes de production

pour le réduire [48]. A titre d'exemple, pour la Peugeot-Ion, les 16 kWh de batterie représentent 9000€ HT, ce qui rend improbable, à court terme, un prix de vente public, hors prime d'état, inférieur à 20000€ [49].

Cette solution à base de batteries Li-ion HP pose également un problème en termes d'autonomie. Celle-ci n'est pas encore jugée satisfaisante pour les utilisateurs avec seulement 100 à 250 kilomètres selon le véhicule et le cycle de conduite effectué. A cela s'ajoute le problème de la recharge qui est, à cause de la faible autonomie, jugé trop fréquent et toujours trop long (5h à 10 h dans les conditions optimales [50]).

Cependant dans certaines conditions, pour des parcours de type urbain et des circuits adaptés, cette solution peut convenir. Lors de parcours en ville la part d'énergie récupérable lors du freinage n'est pas négligeable. En effet, le nombre de démarrage-freinage est très important et les vitesses étant relativement faibles, la part de la puissance liée au déplacement reste modeste puisque les pertes aérodynamiques sont faibles [40]. Cependant cette récupération d'énergie peut être difficile dans certaines conditions même pour des batteries Li-ion HP. Pour des états de charges très élevées ou très faible, les performances sont dégradées : les rendements diminuent fortement et les courants de charges répétés peuvent avoir un impact à long terme sur l'état de santé de la batterie.

La limitation de la durée de vie des batteries Li-ion HP est un gros point faible des véhicules électriques actuels. Les constructeurs garantissent actuellement les batteries, dans les conditions nominales d'utilisation, pour environ 150.000 kilomètres. On considère que la batterie est en fin de vie dans un véhicule électrique lorsqu'elle a perdue 20% de sa capacité de stockage en énergie. Elle peut ensuite avoir une seconde vie dans des applications de stockage stationnaire [49].

L'impact de la température sur les performances énergétiques et sur la durée de vie des batteries Li-ion HP est un autre problème qui touche les véhicules électriques. En effet, le paramètre température est celui qui influe le plus sur le comportement de la batterie en terme de charge et décharge. La chaleur peut améliorer l'efficace, mais peut être également source de vieillissement accéléré lorsque celle-ci est utilisée (cyclage) ou stockée (vieillissement calendaire) [51]. D'un autre côté, l'excès de froid dégrade les performances du véhicule en termes d'accélération et autonomie.

Compte tenu de ce qui vient d'être énoncé, la solution basée sur l'utilisation de la technologie Li-Ion HP n'est pas encore satisfaisante. Le principal axe de progrès dans ce domaine est sans nul doute basé sur le développement de nouveaux accumulateurs à très grande capacité énergétique et à très grande durée de vie. Dans ce contexte, la recherche de nouveaux matériaux pour la constitution d'électrodes[8] peu coûteuses, table électro chimiquement et dont les ressources sont disponibles en quantité suffisante pour permettre une production de masse est devenu stratégique. Il faut en plus que cette production ait un faible impact sur l'environnement.

La Figure. I. 9 présente un diagramme de *Ragone* pour les principaux systèmes de stockage et de conversion de l'énergie. Il permet de comparer la densité de puissance en fonction de la densité d'énergie de ces différents systèmes [52]. A titre d'exemple, nous avons placé sur ce diagramme les performances d'une batterie d'un véhicule électrique urbain qui posséderait une autonomie de 300km (50kWh) avec une puissance de motorisation de 40kW et une masse de batterie variant entre 100 et 300kg [7]. On peut constater qu'il n'existe pas de système de stockage d'énergie embarquée capable d'assurer à la fois l'autonomie nécessaire à et le besoin en puissance pour l'accélération et la récupération intégrale au freinage du véhicule.

[8] A titre d'exemple, les nouveaux matériaux en cours de développement pour les batteries Li-ion : les oxydes mixtes $M_yV_2O_{5+\delta}$ et les bronzes $M_yV_2O_5$ et les oxydes lamellaires de type birnessite préparés par voie sol-gel, les nanomatériaux TiO_2 et MnO_2 de structure rutile.

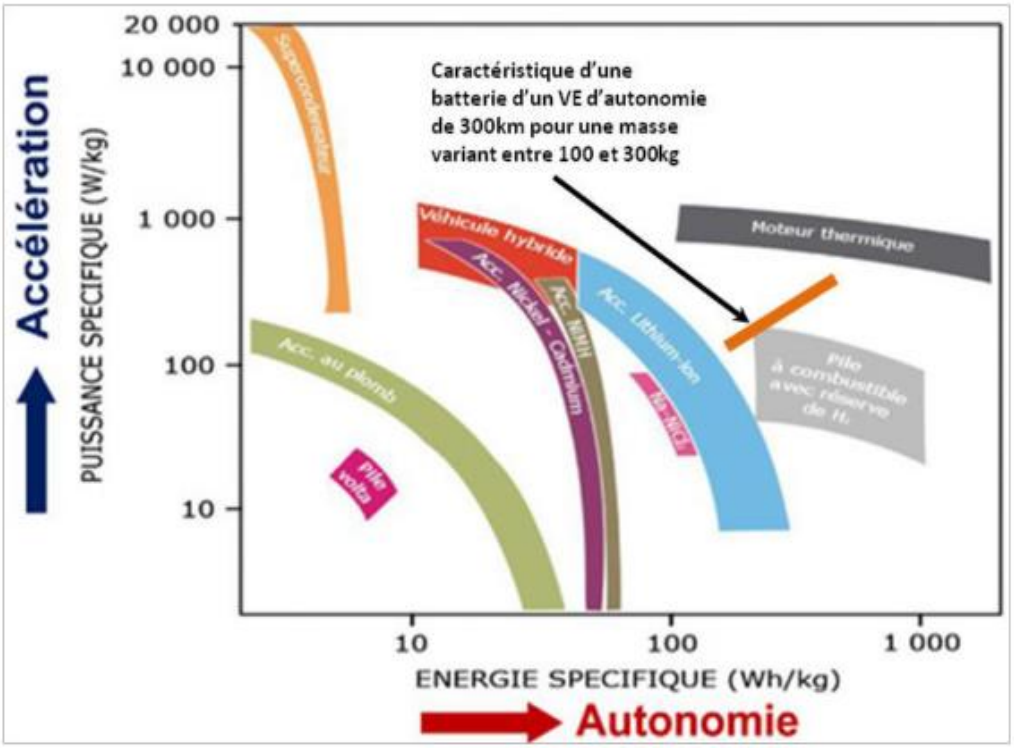


Figure. I. 9: Diagramme de *Ragone* [7]

En attendant que la batterie idéale existe, il faut trouver des solutions alternatives. L'hybridation des sources en fait partie. C'est ce que nous décrivons dans le paragraphe suivant.

I.4 Hybridation des sources d'énergie embarquées

Par analogie avec les véhicules thermiques hybrides, l'hybridation n'intervient pas au niveau de la motorisation mais en amont au niveau des sources de stockage d'énergie [53]. Le principe consiste à combiner deux technologies de stockage complémentaires (énergie spécifique élevée pour la première, puissance spécifique importante et disponible sur des durées adaptées, pour la seconde). Elle permet en particulier, de dissocier les dimensionnements en puissance moyenne et en puissance transitoire. Un véhicule à pile à combustible ou à batteries électrochimiques utilise ainsi en complément une source secondaire d'énergie électrique réversible en puissance, telle que des supercondensateurs ou une batterie haute puissance afin d'améliorer les performances du stockeur d'énergie et l'adapter aux besoins spécifiques du transport.

I.4.1 Principe d'hybridation des sources d'énergie

La densité énergétique[9] et la densité de puissance[10] sont des critères principaux pour choisir le système de stockage d'un véhicule électrique [54]. Le diagramme de *Ragone* (cf. Figure. I. 9) illustre les performances en termes d'énergie spécifique et de puissance spécifique des différentes technologies de stockage d'énergie électrique. On peut remarquer que les piles

[9] La densité énergétique, ou énergie spécifique, représente la quantité d'énergie (Wh/m³) qu'il peut restituer par rapport à son volume.

[10] La densité de puissance en pointe, ou puissance spécifique, correspond à la puissance maximale rapportée à la masse de l'accumulateur, et s'exprimes-en (W/kg).

à combustible et les batteries possèdent une grande densité d'énergie mais une faible densité de puissance. A l'autre extrémité du diagramme, on trouve les supercondensateurs qui possèdent de grandes densités de puissance mais de faibles densités d'énergie [55]. On peut également remarquer qu'il n'existe pas dans ce diagramme de systèmes ayant intrinsèquement de bonnes performances sur les deux axes à la fois. Or pour une application comme le véhicule électrique utilisant une seule source d'énergie (solution mono-source), cela pose problème. On est en général amené à sur-dimensionner le dispositif de stockage, ou à limiter les performances en transitoire, ce qui impose de faire des compromis au niveau du volume et de la masse.

Une solution alternative est d'associer deux sources entre elles : la première de forte densité d'énergie et la seconde de forte densité de puissance afin de permettre de combler une partie du vide laissé dans le diagramme de *Ragone*. On synthétise ainsi un nouveau système de stockage, dit « hybride » [56].

Cette solution d'hybridation des sources permet d'exploiter les performances de deux systèmes de stockage et donne des degrés de liberté lors de la conception de ce stockeur [44]. On peut ainsi avoir pour objectif de maitriser différents critères comme le volume, la masse, le coût d'investissement ou d'utilisation, ou encore sa durée de vie [4]. Le principe d'hybridation des sources de stockage est illustré en Figure.I.10. Il est formé de deux sources et d'un système de gestion réalisé à base de convertisseurs d'électronique de puissance permettant de gérer les flux de puissance entre les deux sources.

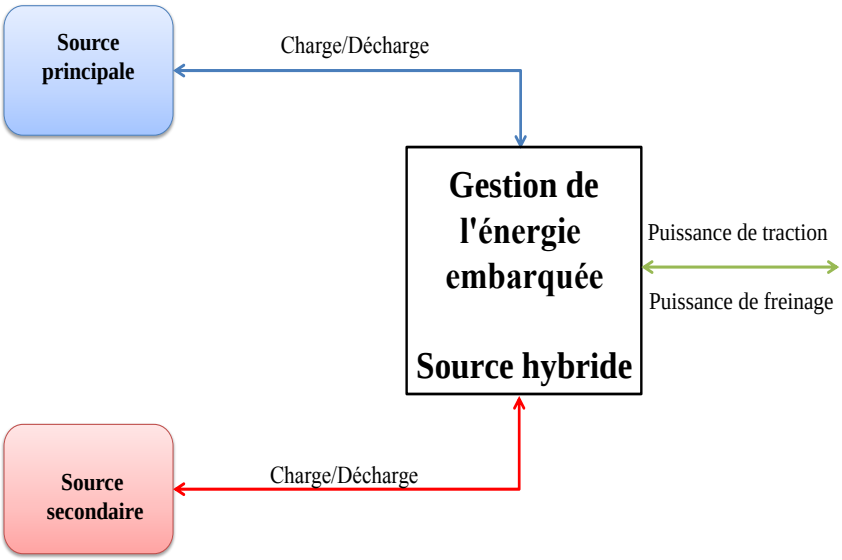


Figure. I. 10: Principe d'hybridation des sources de stockage hybrides

I.4.2 Solutions d'hybridation des sources d'énergie

L'hybridation des sources consiste à combiner deux sources ou plus. Ceci permet de proposer un très grand nombre de solutions tant au point de vue de la structure que de la gestion des flux d'énergie. En conséquence, le comportement global du système dépend à la fois du positionnement et du choix des dispositifs de stockage au sein de la source hybride [57]. Des solutions pour hybrider les sources d'énergie couramment rencontrées en traction comme les piles à combustible et les batteries électrochimiques sont résumées ci-après.

I.4.2.1 Hybridation des Piles à Combustible (PAC)

Les piles à combustible ou PAC présentent les énergies spécifiques les plus élevées parmi les dispositifs électrochimiques existants. Néanmoins, leur puissance spécifique reste très limitée (quelques dizaines de W.kg-1), et leur non-réversibilité en courant interdit la récupération d'énergie. Elles doivent donc dans la plupart des cas être hybridées avec un dispositif de stockage de plus forte puissance, tel que les supercondensateurs, les batteries ou les volants d'inertie [58][59]. Cette hybridation offre de bonnes performances en termes d'autonomie, de puissance disponible et de continuité de service. Il existe une multitude de possibilités de couplage entre les piles à combustible et les sources de stockage de puissance [60][61][62][63][64][65]. Le principe de couplage « PAC / source de puissance » est illustré sur la Figure. I. 11.

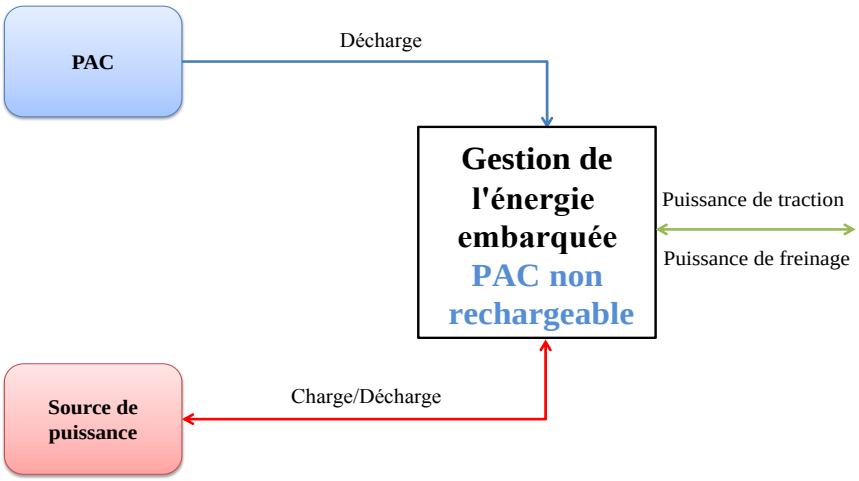


Figure. I. 11: Principe d'hybridation PAC / Source de puissance

Dans un véhicule électrique ou hybride, le système de stockage à base de supercondensateurs ou de batteries associées aux PAC est essentiellement destiné à fournir le complément de puissance pendant les fortes accélérations, lorsque la pile atteint sa puissance maximale, et récupérer l'énergie de freinage. Avec cette hybridation, il est possible non seulement de compenser la faiblesse de la puissance spécifique, mais aussi de compenser les constantes de temps élevées des piles à combustible [66][59]. Cette limitation dynamique est due principalement au système d'alimentation hydraulique (pompes, valves, et, dans certains cas, au reformeur de l'hydrogène)[67][68].

Un autre candidat pour répondre à l'hybridation des PAC est le volant d'inertie, qui présente une marge de progression importante en terme de performances au niveau de véhicules [69]. Le système de stockage inertiel, comme illustré sur la

Figure. I. 12 est constitué d'une machine électrique tournante assurant la conversion réversible « électrique-mécanique », couplée à un convertisseur d'électronique de puissance assurant le contrôle de la machine et l'adaptation des grandeurs électriques. Une masse tournante couplée mécaniquement à la machine permet le stockage énergétique requis, le tout dans une enceinte de confinement sous très basse pression afin de minimiser les pertes. Des matériaux à haute résistance à la traction (due à la force centrifuge) capables de vitesses périphériques élevées sont utilisés pour réaliser la partie mobile du volant d'inertie. Actuellement, les meilleurs matériaux sont les composites à fibres de carbone (structures bobinées) capables d'atteindre des vitesses périphériques de 1500 m/s correspondant à une énergie de 100, voire 150 Wh/kg [70].

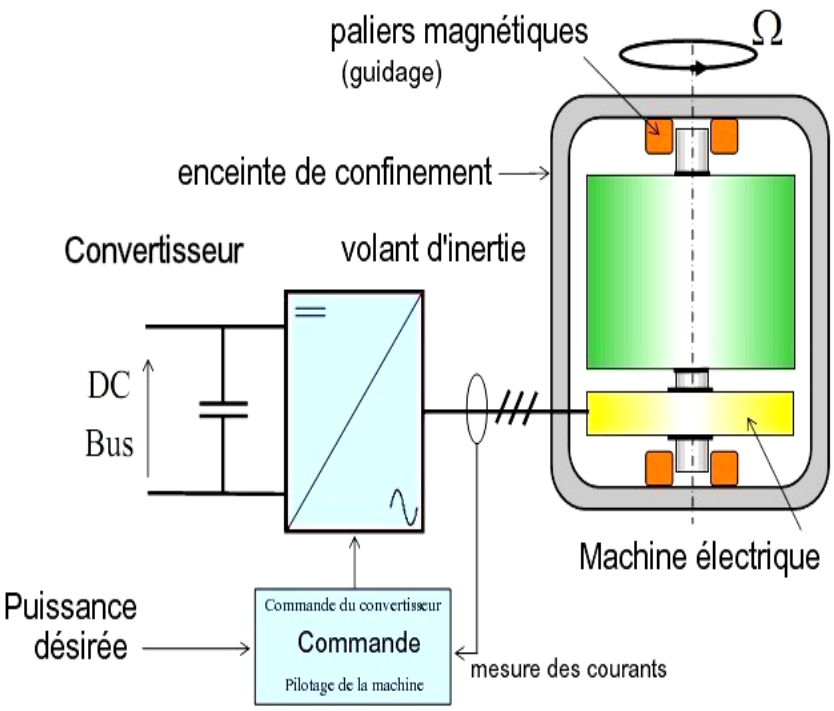


Figure. I. 12: Principe des systèmes de stockage inertiel [71]

L'assemblage et l'intégration du volant d'inertie, moto-générateur, paliers, enceinte à vide de confinement, convertisseur statique et l'électronique de commande reste encore une procédure complexe qui conduit à un coût élevé [40]. De plus, l'utilisation d'un volant d'inertie à bord d'un véhicule induit des problèmes de sécurité: une importante masse en rotation embarquée dans un véhicule peut avoir de graves conséquences lors d'un accident [72][73]. Par ailleurs, la masse importante de ce volant d'inertie pose quelques problèmes pour une application transport. Elle augmente la masse totale du véhicule et donc sa consommation et impose également un surdimensionnement de plusieurs organes tels que le système de freinage [69]. Pour ces raisons, l'hybridation des PAC avec un volant d'inertie, n'est pas envisagée actuellement pour les véhicules légers et est limitée aux véhicules lourds ou aux applications ferroviaires[40][74].

I.4.2.2 Hybridation des batteries

Comme vu auparavant, l'hybridation au sens énergétique se définit comme l'association de deux sources présentant des propriétés complémentaires [75]. Dans ce contexte, les performances en puissance des batteries à Haute densité de Puissance (HP) ou des supercondensateurs, donne à ces composants la possibilité d'être associés avantageusement avec les batteries à Haute densité d'Energie (HE) pour réaliser une source de stockage hybride. La particularité des batteries HE est qu'elles peuvent offrir une énergie spécifique beaucoup plus importante que celle des batteries HP et des supercondensateurs [76][77]. Elles ont cependant l'inconvénient d'être « peu » réversible en courant et d'avoir de mauvais rendement à fort courant de décharge. Le principe d'hybridation Batteries / Sources de puissance est illustré sur la Figure. I. 13.

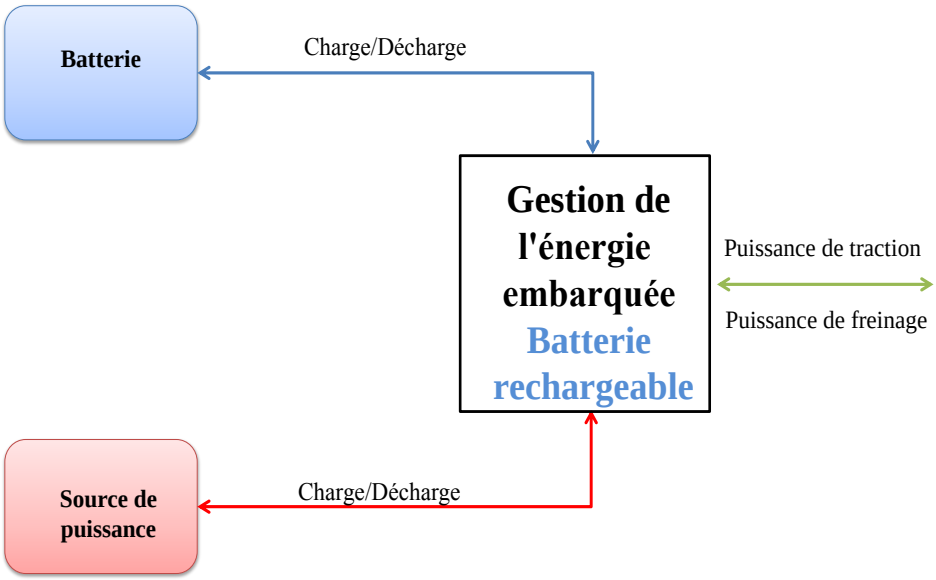


Figure. I. 13: Principe d'hybridation Batterie / Source de puissance

Dans le domaine du transport, l'hybridation des batteries avec des supercondensateurs offre de bonnes performances en termes d'autonomie, de puissance disponible, de continuité de service. Cette hybridation permet d'obtenir un système de stockage électrique ayant une forte densité de puissance et une forte densité d'énergie [78] [75]. De ce fait, on aboutit à de meilleures performances, notamment en termes de dimensionnement ou de durée de vie, qu'un système composé de batteries seules, comme c'est le cas dans la plupart des véhicules électriques actuels [79].

Une nouvelle technologie de batterie Li-ion, de type Ultra Haute Puissance (UHP), est apparue très récemment sur le marché des batteries de traction électrique. Cette technologie concurrence directement les supercondensateurs en terme de puissance massique, mais possède des énergies massiques bien plus élevées [7]. Le Tableau. I. 5 présente les caractéristiques des batteries UHP du fabricant *DowKokam*.

Batteries	**Ko40HP**
Fabricant	DowKokam
Tension nominale (V)	3.7
Capacité nominale (Ah)	0,45
Résistance interne (mΩ)	17
Courants Max charge/décharge	22,5/22,5
Energie spécifique (Wh /Kg)	119
Masse (kg)	0,014
Volume (l)	0 ,0073
Coût (€)	4,6

Tableau. I. 5 : Données fabricant Kokam des éléments UHP[7][80]

Selon *R. SADOUN* [7], l'utilisation des batteries UHP à la place des supercondensateurs dans une source de stockage hybride en traction électrique permettrait d'obtenir une source d'énergie embarquée ayant une forte densité de puissance et une forte densité d'énergie. Elle permettrait également de réduire la masse de source de 10% par rapport celle de la source hybride batteries/supercondensateurs, ainsi que le volume et le coût de la source d'énergie

embarquée de 20% et 22% respectivement. Ceci s'explique par la densité d'énergie des batteries UHP plus importante que celle des supercondensateurs. Par contre, leur fiabilité et leur durée de vie face aux supercondensateurs reste à valider et devra faire ultérieurement l'objet de travaux expérimentaux pour mieux cerner les performances de ce stockeur électrochimique pour ce contexte applicatif en prenant en compte l'ensemble des contraintes et facteurs.

I.4.2.3 Bilan et choix de l'hybridation

L'hybridation des technologies de stockage répondant aux critères techniques et économiques varient considérablement selon le cahier des charges de l'application.

Pour ce qui concerne le véhicule électrique, les paramètres clés pour ce choix sont :

- Les performances en termes de densité de puissance et densité d'énergie.
- La durée de vie, la fiabilité, la sécurité d'utilisation.
- Le coût en investissement mais aussi en fonctionnement.

Dans ce contexte, comme nous l'avons déjà vu, les deux principales solutions envisageables pour constituer la source principale d'énergie sont la batterie Li-Ion et la pile à combustible.

Néanmoins, la mise en application des systèmes à base pile à combustible reste encore marginale. Ceci peut s'expliquer par le fait que le stockage à bord d'hydrogène sous forme gazeuse dans des réservoirs haute pression (350 ou 700 bar) ou sous forme liquide à -253°C dans des réservoirs cryogéniques requiert un niveau de sécurité très élevé car l'hydrogène est un gaz volatile, corrosif et très inflammable à partir de 4 % du volume d'air [81]. De plus, l'utilisation de l'hydrogène comme source de combustible entraîne des dépenses importantes. Elle reste pour l'instant une source couteuse face à ces concurrentes [82][75]. Par ailleurs, la présence de métaux rares pour la fabrication des PAC comme le platine, pour lequel l'Afrique du Sud assure 70% de la production mondiale, représente un véritable obstacle au développement de ces technologies [83].

Aussi, la meilleure solution pour réaliser la source d'énergie est actuellement la batterie Li-ion Haute Energie (HE), qui permet d'offrir une autonomie intéressante aux véhicules électriques de dernière génération grâce à sa grande densité énergétique (≈140Wh/kg) [7].
Néanmoins, l'application de traction électrique nécessite à la fois une forte autonomie mais également un besoin en puissance important causé par les accélérations et les freinages du véhicule. Un surdimensionnement du pack des batteries Li-ion HE est alors nécessaire pour répondre à la demande de puissance, provoquant une augmentation du coût et de la masse globale du système de stockage d'énergie électrique. De plus, le nombre élevé d'accélérations et de freinages effectués durant la conduite du véhicule, assimilés à des cycles de décharge et charge partielles, diminuent la durée de vie des batteries [53]. L'hybridation de la batterie Li-ion HE avec une source de puissance doit pouvoir permettre d'atténuer ces problèmes. Parmi les composants candidats, on a identifié les volants d'inertie, les batteries HP, les batteries UHP et les supercondensateurs. Différentes solutions d'hybridation sont donc possibles et doivent faire l'objet d'études poussées pour aboutir à un dimensionnement complet (performances, masse, cout, durée de vie…). Dans ce contexte, on peut citer le projet de recherche européen *SuperLIB* lancé au printemps 2011 et rassemble plusieurs partenaires (AVL, Bosch, European Batteries, IFPEN, Institut Fraunhofer, Fiat, Valeo, Volvo, Université de Bruxelles). Ce projet vise à améliorer la performance des batteries pour l'automobile via une combinaison de deux types différents de cellules Li-ion, *High Power (HP)* et *High Energy (HE)* intégrées au sein d'un pack batterie unique[73][74]. Cette hybridation des batteries avec une stratégie de gestion intelligente permet l'amélioration de façon significative de la durée de vie, la fiabilité et le

rapport coût / performance du système de stockage d'énergie embarquée, en plus, elle donne la possibilité de réaliser des charges rapides de la batterie sans dégrader sa durée de vie [74][75][76][77].

Le supercondensateur est le composant le plus puissant avec la durée de vie la plus longue. C'est cette solution que nous développons dans ce manuscrit sur l'hybridation des batteries Li-ion HE. Ce choix a été fait dans la continuité des travaux antérieurs de thèse de *R. SADOUN* [7] et *N.RIZOUG* [84], dans le cadre de la collaboration entre le L2EP et l'ESTACA-Laval. Des retours d'expérience sur des applications industrielles couplant des batteries Li-ion et des supercondensateurs existent, ainsi que quelques prototypes de véhicule électrique et hybride comme le véhicule "*B0*" développé par le groupe *Bolloré* en 2008, le *AFS Trinity plug-in hybrid prototype* proposé par la société américaine *AFS Trinity Power Corporation* en 2010.

Il n'en reste pas moins que d'autres couple puissance/énergie mériteraient des études poussées et comparatives en terme de dimensionnement afin de définir la solution optimale du moment et les tendances à venir selon les perspectives d'évolution des batteries Li-ion.

I.4.3 Couplage d'une source hybride

Différentes architectures électriques sont possibles pour associer ces sources d'énergie [85] et gérer les flux de puissances des deux sources : elles peuvent être en parallèle, ou en cascade, et avec un ou deux convertisseurs. Le choix de l'architecture est principalement justifié par la simplicité de la réalisation du système et le coût global qu'elle entraîne [56]. La partie suivante, présente succinctement les architectures les plus fréquemment rencontrées dans le domaine de l'automobile pour ces sources hybrides.

I.4.3.1 Architecture en cascade avec un convertisseur DC / DC coté Supercondensateur

La batterie est connectée directement au bus continu alors que le pack supercondensateurs est lui connecté via un convertisseur DC/DC (cf. Figure. I. 14) [86]. Cette solution présente un intérêt en termes de volume et de coût puisqu'elle ne comporte qu'un seul convertisseur d'interface. Le contrôle énergétique est relativement simple. La tension du bus continu est stabilisée par la batterie, mais ne permet pas de contrôler directement son courant en cas de forte demande de puissance ou de court-circuit de la charge [56].

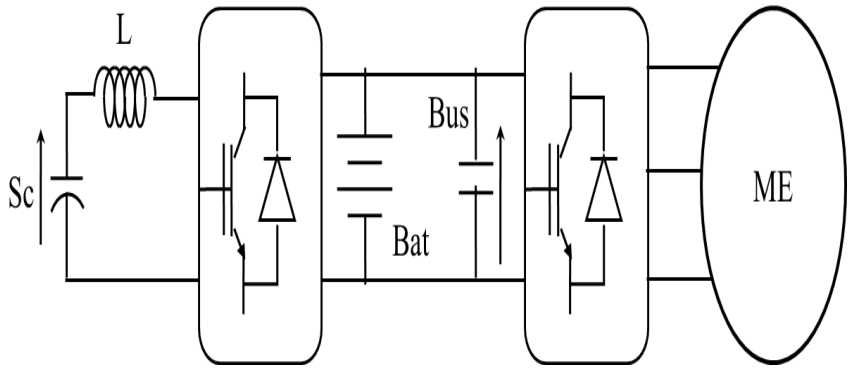


Figure. I. 14: Architecture en cascade avec un convertisseur pour le SC

I.4.3.2 Architecture en cascade avec un convertisseur DC / DC coté batterie

Dans cette configuration, la connexion directe du pack de supercondensateurs au bus continu est présentée dans la Figure. I. 15 permet de protéger la batterie et limiter le transit de puissance traversant le convertisseur. Par contre la tension du bus continu est bien plus variable que dans le cas précédent car, si on souhaite exploiter au mieux l'énergie des supercondensateurs [87][88]. Généralement, cette topologie est utilisée pour l'assistance au démarrage des véhicules thermiques mais, pour les raisons évoquées précédemment, elle est inadaptée pour une alimentation de véhicule électrique.

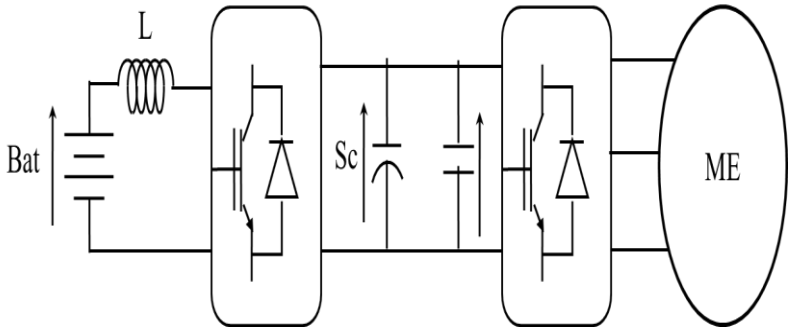
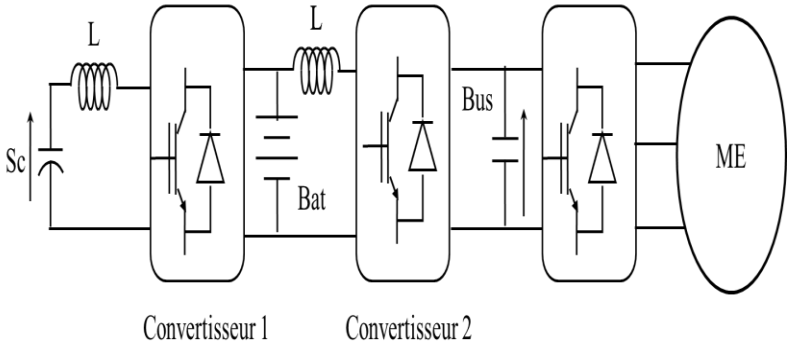


Figure. I. 15: Architecture en cascade avec un convertisseur pour la batterie

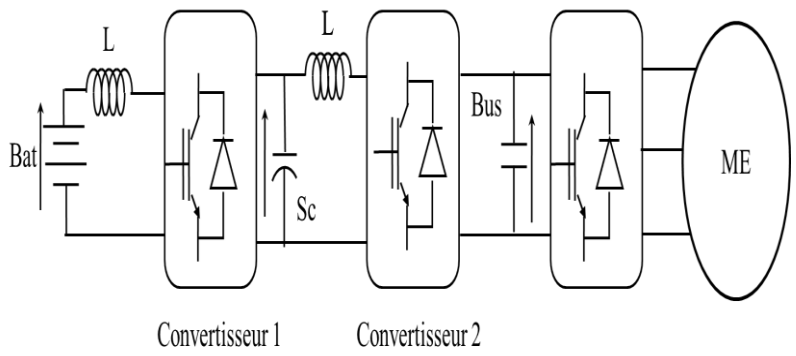
I.4.3.3 Architectures avec deux convertisseurs en cascade

La Figure. I. 16 présente les topologies utilisant deux convertisseurs en cascade. Dans ce cas, le deuxième convertisseur permet de limiter les variations de tension du bus continu. Pour la première version (A), la batterie est disposée en dernière position par rapport à la charge. Le convertisseur 1 doit gérer les pics de puissance vus par les supercondensateurs. Le convertisseur 2 voit la totalité de puissance le traverser. La puissance apparente des deux convertisseurs est donc importante. De plus, cette solution présente peu d'intérêt car la variation de tension de la batterie est relativement faible.

L'utilisation de deux convertisseurs est plus justifiée pour la seconde version (B). D'une part, le convertisseur 1 ne voit que la puissance limitée de la batterie, et d'autre part le convertisseur 2 voit la même puissance transitée que pour la solution précédente. Par contre, du fait de la forte variation de la tension aux bornes des supercondensateurs, des courants importants circulent dans ces deux convertisseurs pour une puissance donnée.



(A) version supercondensateurs / batterie.



(B) version batterie / supercondensateurs.

Figure. I. 16: Architecture en cascade avec deux convertisseurs en cascade

Toutes ces contraintes engendrent un coût global plus important et un rendement a priori plus faible. Enfin, la fiabilité de ces configurations à deux convertisseurs en cascade face à une défaillance de l'un des éléments du système de stockage est très limitée.

Pour une solution à deux convertisseurs, on préfère en général la version parallèle.

I.4.3.4 Architecture avec deux convertisseurs en parallèle

En mode parallèle, les deux éléments du système hybride de stockage (batterie/supercondensateurs) sont connectés indépendamment au bus continu par leur propre convertisseur DC/DC (cf. Figure. I. 17).

Cette topologie présente certains avantages :

- contrôle indépendant des courants des deux stockeurs
- limitation de leurs puissances de dimensionnement
- tolérance aux défauts

Les convertisseurs étant en parallèle, l'architecture peut encore fonctionner même si des pannes surviennent au niveau d'un des convertisseurs, ce qui augmente la fiabilité du système global. Dans le cas d'une défaillance d'un des convertisseurs, il suffit de *by-passer* celui-ci et de passer en mode dégradé. On se retrouve alors dans le cas d'une des configurations décrite précédemment, à savoir l'architecture en cascade avec un convertisseur DC / DC coté Supercondensateur ou batterie.

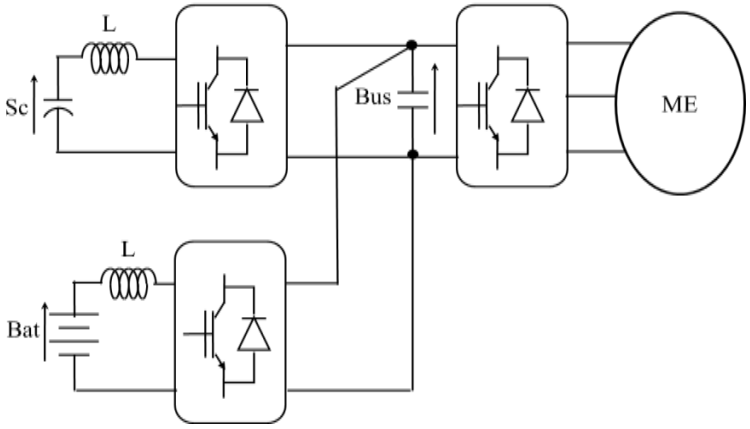


Figure. I. 17: Architecture parallèle avec deux convertisseurs

I.4.3.5 Couplage stockeurs sur la Plate-forme d'essais ESTACA-Laval

Dans le cadre de nos travaux expérimentaux de caractérisation et cyclage, nous avons choisi d'utiliser l'architecture dite en cascade avec un seul convertisseur coté supercondensateurs, comme illustré sur Figure. I. 18.

Cette topologie offre une bonne stabilité de la tension du bus continu, un bon rendement énergétique et permet le branchement direct de la batterie au bus continu. Ceci d'évite les pertes supplémentaires liées à l'utilisation d'un deuxième convertisseur et simplifie tout le contrôle commande avec un seul convertisseur à gérer.

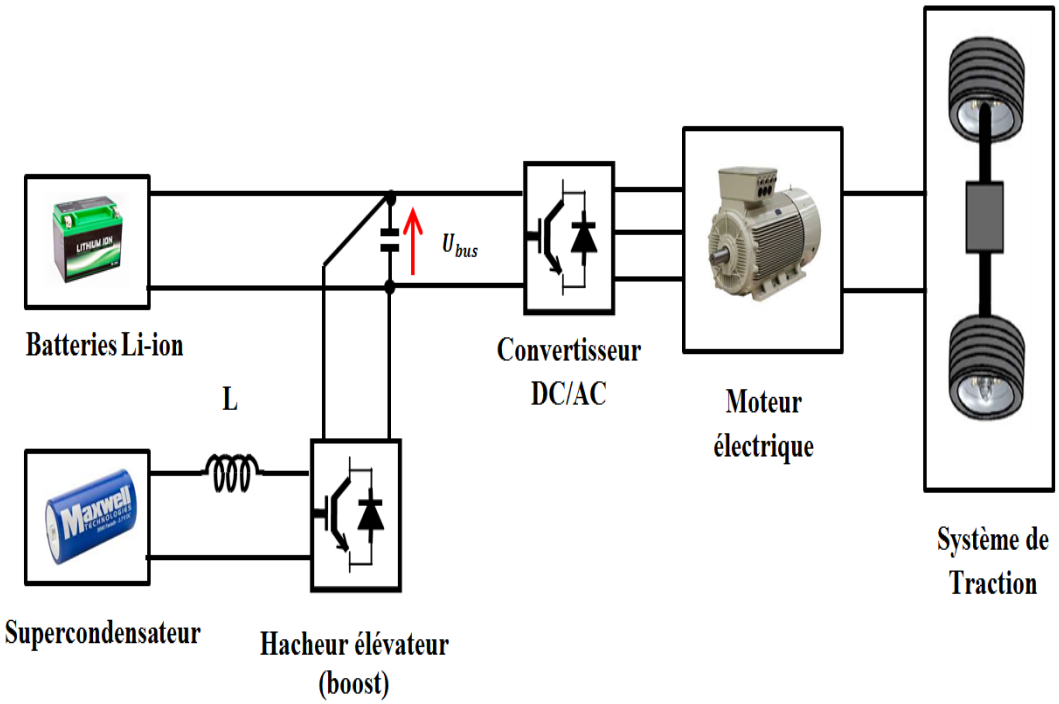


Figure. I. 18 : Architecture utilisée sur le banc expérimental ESTACA-Laval

I.5 Hybridation Batterie Li-ion HE/ Supercondensateurs

Les travaux de la thèse *R. SADOUN* [7] nous ont permis d'acquérir une expertise dans le domaine des sources d'énergie hybride et ainsi de pouvoir développer des méthodes de dimensionnement de ces systèmes.

Ces travaux ont permis d'identifier deux principaux avantages à cette hybridation :

- *Un gain en masse possible*
- *Une augmentation de la durée de vie de la batterie HE*

I.5.1 Influence sur la masse de la source

La Figure. I. 19 montre la comparaison du dimensionnement d'une source hybride (Batterie Li-ion HE & supercondensateurs) avec des batteries Li-ion HP seules. Cette figure représente l'évolution de la masse en fonction de l'autonomie. On peut constater que l'hybridation avec des supercondensateurs présente un intérêt à partir d'une autonomie d'environ 150km. Sur la plage d'autonomie de 150 à 250 km (autonomie de la plupart des

véhicules électriques actuels), l'hybridation des batteries Li-ion HE permet d'atteindre des performances, en masse et en volume, meilleures que celles des batteries HP avec des coûts comparables [7]. On peut observer ainsi que pour une autonomie de 250km, la masse de la source hybride est en moyenne de 50kg plus faible qu'avec des batteries HP seules.

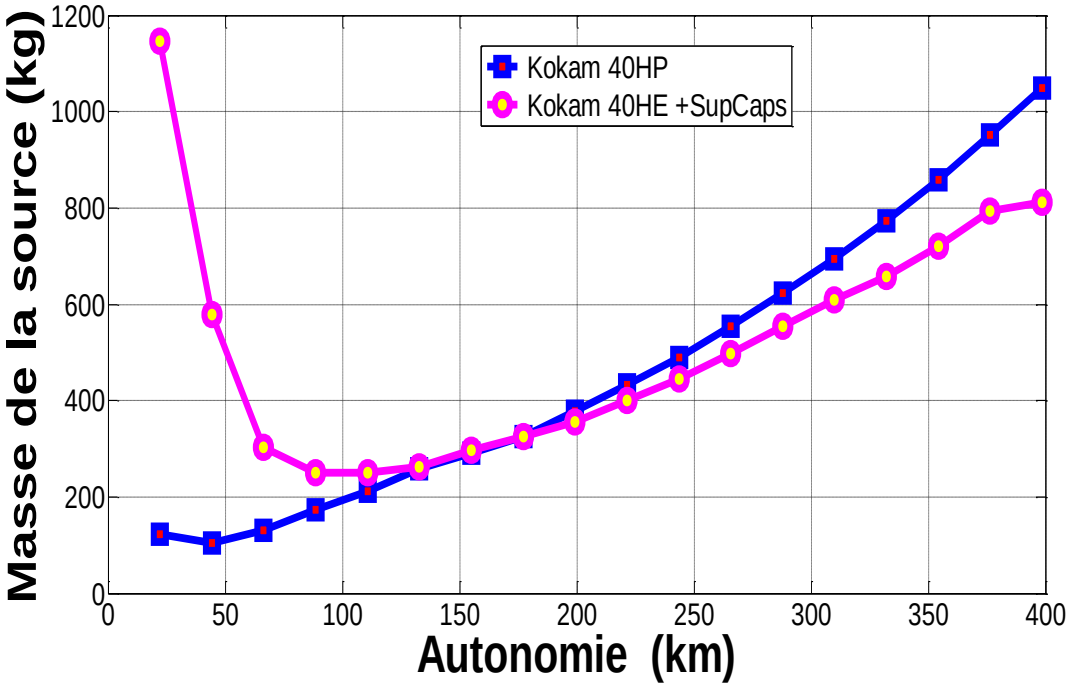


Figure. I. 19: Masse d'une source hybride (batterie HE+SupCaps) et d'une batterie HP selon l'autonomie [7]

I.5.2 Influence sur la durée de vie de la source

Le second point concerne l'augmentation de la durée de vie des batteries Li-ion par hybridation. Les résultats des essais expérimentaux effectués dans le cadre de thèse R. SADOUN [7], comparent ainsi le vieillissement d'une batterie Li-ion HP mono-source avec celui d'une batterie HE hybridée, subissant donc des contraintes électriques moins fortes (cf. Figure. I. 20) puisqu'une partie de la puissance est fournie par les supercondensateurs. Ce partage dépend bien sûr de la stratégie de gestion appliquée, mais dans tous les cas, les contraintes sont moindres pour la batterie.

Les résultats de cyclage de la Figure. I. 20-A mettent en évidence l'effet positif de l'hybridation des batteries Li-ion HE sur la dégradation de leurs capacités. On peut observer que le vieillissement est plus rapide pour la solution mono-source (batteries Li-ion HP seules). Si on considère la fin de vie des batteries fixée à 20% de perte de capacité par rapport à leur valeur initiale, on trouve une différence de 350 cycles entre les deux solutions, soit environ 10% de durée de vie supplémentaire.

De même, l'évolution de la résistance interne (en %) pour les deux batteries Li-ion est présentée sur la Figure. I. 20-B. Ce paramètre évolue au cours de l'utilisation de la batterie. On observe une augmentation bien plus rapide de la résistance interne de la batterie Li-ion HP par rapport à celle de la batterie HE hybridée avec des supercondensateurs. Ceci illustre encore tout l'intérêt de l'hybridation des batteries embarquées.

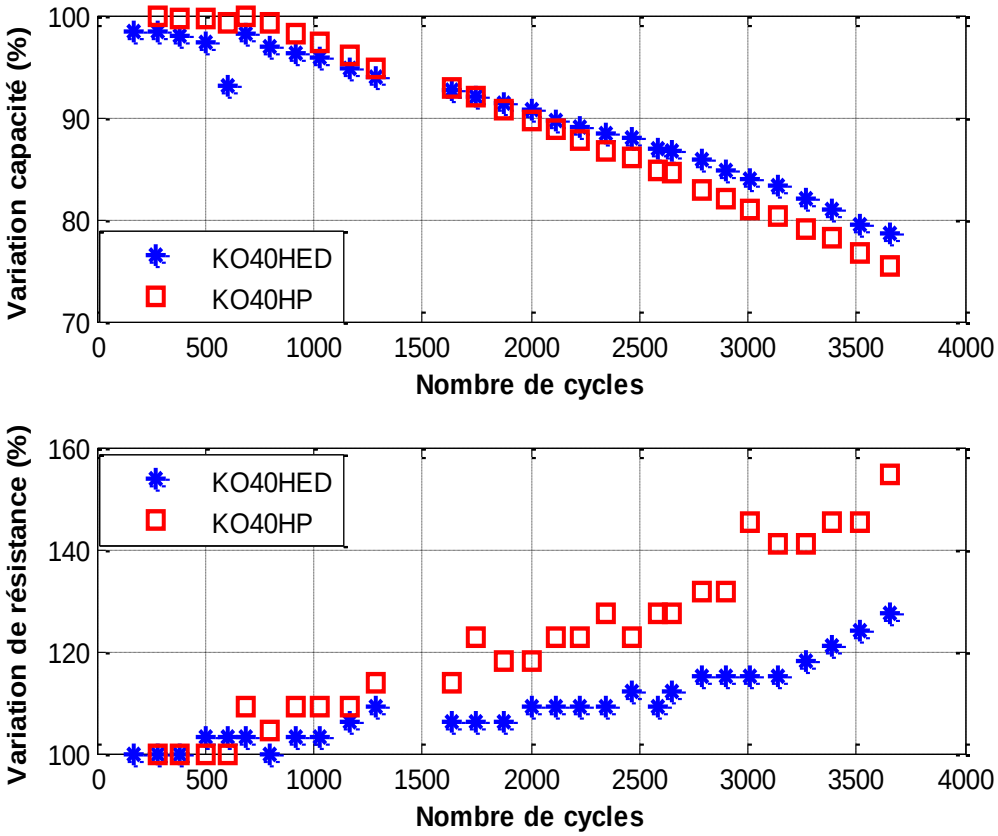


Figure. I. 20: Evolution de la capacité (A) et de la résistance interne (B) durant le cyclage

Ces essais confirment ainsi l'intérêt de l'hybridation des batteries pour ce type d'application de traction électrique avec une augmentation de sa durée de vie et une réduction marquée de l'augmentation de sa résistance interne.

I.5.3 Bilan

Nous avons vu que les mono-sources d'énergie utilisées dans les véhicules électriques actuels, telles que les batteries Li-ion HP, ne répondent pas complètement aux besoins des Véhicules Electrique. Des compromis sont à faire en termes de volume, masse, durée de vie, ainsi qu'en terme de besoins transitoires de puissance notamment lors des phases d'accélération et de freinage [89] [58].

En revanche, les résultats de dimensionnement et de vieillissement de source hybride présentés par *R. SADOUN* [7], illustrent l'intérêt de l'hybridation pour l'optimisation des performances.

On peut résumer les principaux avantages qui justifient le choix de l'hybridation des batteries Li-ion HE comme suit :

- L'hybridation permet de dissocier les dimensionnements en puissance moyenne et en puissance transitoire, l'intérêt principal résidant ici dans un gain en terme de volume, de masse et de coût [66] ;
- La diminution des pertes dans les batteries, le courant efficace étant plus faible [53]; les points de fonctionnement des batteries sont alors déplacés vers les zones de meilleurs rendements [31] ;

- Une meilleure durée de vie des batteries Li-ion due à l'absence de fortes amplitudes et variations de puissance accélérant le vieillissement des composants de stockage [89][53] ;
- L'augmentation significative de la puissance disponible en régime transitoire et donc un accroissement des performances dynamiques des dits systèmes [85] ;
- La source hybride d'énergie embarquée offre de bonnes performances en termes de continuité de service (fiabilité) et de temps de réponse [53].

I.6 Amélioration de la durée de vie de la source hybride par optimisation de la gestion d'énergie

Dans les paragraphes précédents, nous avons montré que l'utilisation de sources d'énergie hybride pouvait réduire les contraintes de volume, de coût et de durée de vie du stockeur. La source d'énergie hybride offre de plus des degrés de liberté qui permettent de mieux répondre aux exigences d'un cahier des charges. Il est ainsi possible de travailler sur le dimensionnement et le coût du système, et ceci pour différentes méthodes de gestion connues. Cette première phase de travail a été réalisée dans le cadre de la thèse de *R.SADOUN* [7].

La deuxième phase de ces travaux consiste désormais à exploiter le degré de liberté offert par l'hybridation des sources sur la gestion de la puissance et de l'énergie pour évaluer l'effet de ces méthodes de gestion de l'énergie sur les deux axes qui nous intéressent, c'est à dire volume/coût et durée de vie. Pour ce faire, différentes méthodes de gestion de l'énergie existantes ont été évaluées selon le critère de l'augmentation de la durée de vie de la batterie Li-Ion dans le cadre de mes travaux. L'ensemble de cette démarche est illustré par la Figure. I. 21.

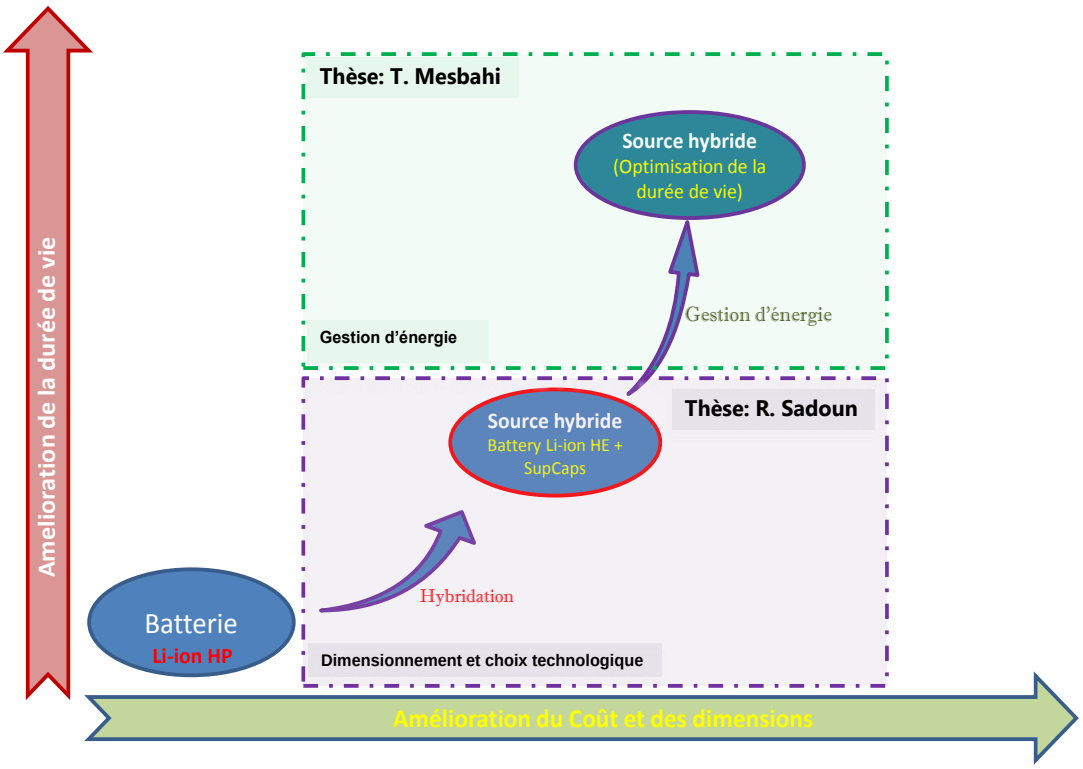


Figure. I. 21 : Démarches effectuées dans notre laboratoire pour développer des systèmes de stockage

Pour arriver à agir sur la durée de vie, il nous a été nécessaire de développer des outils d'analyse. Les méthodes de dimensionnement de la source hybride développées dans la thèse de R. SADOUN ont été enrichies par un modèle multi-physique plus complet développé dans le cadre de ce travail au chapitre 2. Il faut que ce modèle soit robuste puisque ces paramètres évoluent continuellement tout au long de la vie du système. Il a de plus été développé de telle sorte qu'il possède peu de paramètres, facilement identifiables à partir des données de cyclage.

Cette démarche a pour but d'aider à la maitrise du volume et du coût du système, et d'être capable d'évaluer la durée de vie des éléments de ce système. Nous verrons dans le chapitre 3 que cet outil permet également de développer de nouvelles méthodes de gestion d'énergie utilisables en temps réel. La Figure. I. 22 présente la démarche globale appliquée ici.

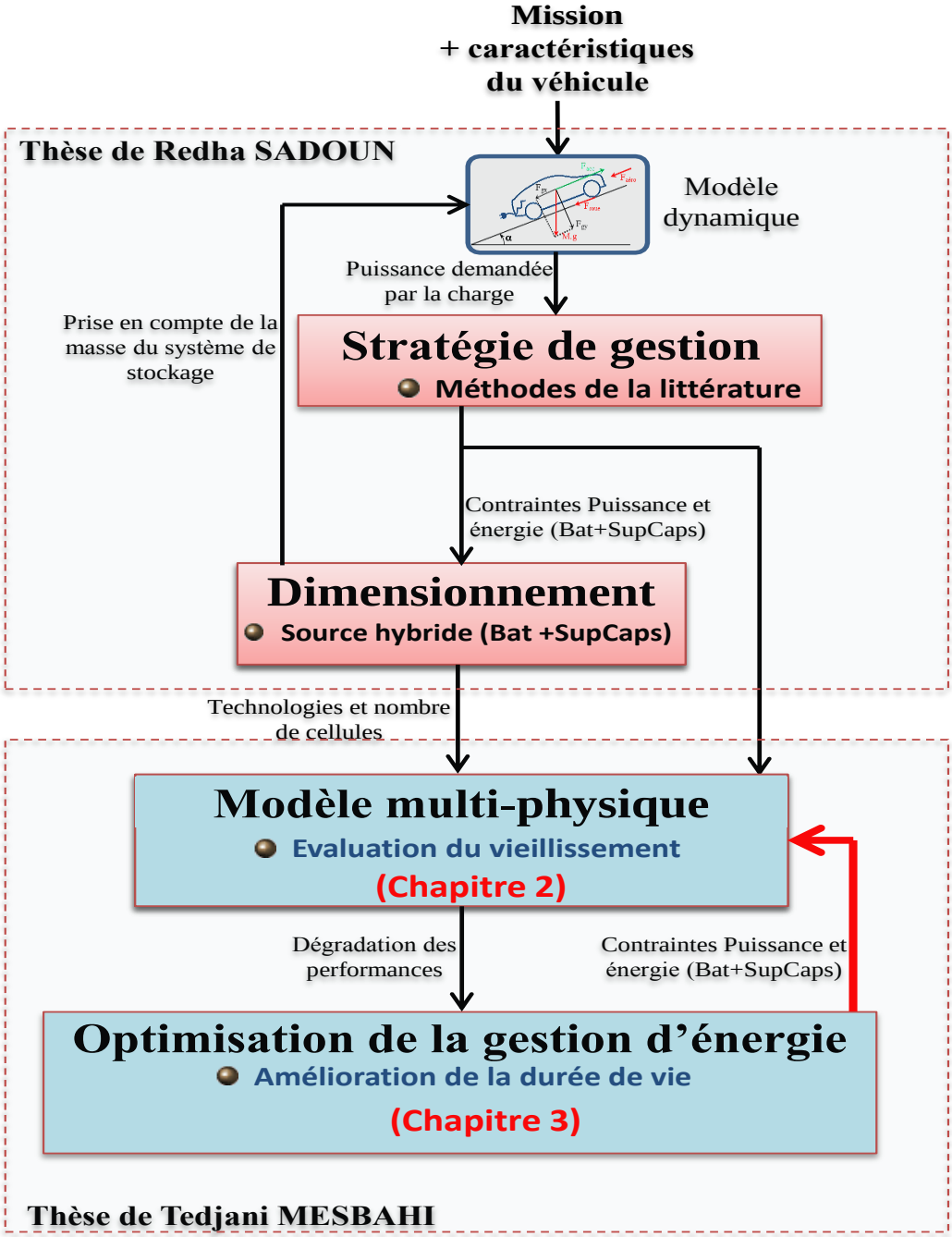


Figure. I. 22 : Développement d'une stratégie de gestion optimale – Méthodologie

On peut ainsi envisager d'utiliser ces outils de trois manières différentes :

- *Optimiser la durée de vie de la source embarquée* : dans ce cas, on impose les contraintes liées à la technologies des sources, structure du système, sa masse et son volume, etc… L'utilisation du modèle multiphysique de la source (chapitre 2), permet de développer des méthodes optimales pour la gestion d'énergie (chapitre 3). On essaie ainsi de prolonger la durée de vie du système de stockage embarqué en agissant sur le courant efficace consommé par la batterie par le biais de la stratégie de gestion. C'est cette approche qui a eté développée dans les travaux qui vont suivre . Dans notre cas, les dimensions de la source resultent d'une étude comparative des dimensions obtenues avec les différentes méthodes de gestion issues de la littérature, mais aussi développée dans ce mémoire.

- *Optimiser le coût du cycle de vie de la source embarquée* : dans ce cas, l'outil optimise le coût total de la source. Ce dernier est calculé en fonction du coût d'investissement et de la durée de vie du pack de stockage. Cette partie est développée dans le cadre des travaux d'*Anthony BABIN* (thèse CIFRE en cours avec l'industriel Gruau 2014-2017).

- *Optimiser les dimensions de la source embarquée*: En imposant comme contrainte sa durée de vie, l'outil peut alors dimensionner la source hybride avec une méthode optimale de gestion d'énergie. Ce type d'utilisation sera développé dans de futurs travaux.

1.5. Conclusion

L'objectif de ce premier chapitre a été tout d'abord de présenter les aspects environnementaux et technologiques caractérisant les véhicules électriques et hybrides, afin de poser le cadre général dans lequel s'insèrent les travaux de ce mémoire, à savoir « la gestion d'énergie et le vieillissement d'une source hybride de stockage dans un véhicule électrique ».

Nous avons défini le concept d'électrification dans les véhicules et montré son importance pour la réduction de la consommation de carburant permettant la diminution des polluants et des émissions de CO2. Le passage au véhicule tout électrique nécessite un stockeur performant en énergie massique et en puissance massique. L'absence d'un tel stockeur justifie actuellement le concept d'hybridation des sources développées dans nos travaux. Différentes hybridations des sources d'énergie ont été présentées et nous nous sommes focalisés sur l'étude de la source de stockage hybride composée de batteries Li-ion et de supercondensateurs. Les principaux avantages apportés par cette source hybride dans l'application véhicule électrique ont été rappelés au travers de résultats antérieurs [5].

Dans ce contexte, nous avons présenté notre démarche contribuant au développement et à l'amélioration des systèmes de stockage de l'énergie embarquée sur véhicule. Ce mémoire est axé sur l'estimation de la durée de vie des stockeurs et sa prise en compte dans la stratégie de gestion de la source hybridée.

L'évaluation et la comparaison de ces stratégies nécessite alors un modèle multi-physique complet de la source hybride afin de donner une description fiable et précise du comportement électrique, thermique et de vieillissement en utilisation. La modélisation multi-physique des deux éléments de la source hybride ainsi que leurs caractéristiques font l'objet du deuxième chapitre. Cette modélisation sera alors utilisée dans le chapitre 3 pour le développement de stratégies de gestion permettant l'amélioration de la durée de vie de la source hybride et un meilleur dimensionnement global des composants du stockeur hybride.

CHAPITRE II : Modélisation multi-physique de la source hybride

II.1 Introduction

Dans le cadre de cette étude, dédiée à l'optimisation de la source de stockage hybride associant batterie Li-ion et supercondensateurs (chapitre 3), il est indispensable de disposer d'un modèle multi-physique de l'ensemble de la source embarquée.

En effet, en simulant fidèlement le comportement des composants de stockage, on pourra alors étudier l'impact des stratégies de gestion d'énergie sur leurs performances et leur durée de vie.

La modélisation développée dans ce chapitre tient compte des comportements électriques, thermiques et de vieillissement des cellules de batteries et de supercondensateurs choisis dans le premier chapitre. L'objectif est ici de proposer une modélisation à la fois simple et suffisamment représentative des phénomènes physiques se produisant dans les cellules afin de pouvoir utiliser ces modèles en tant qu'outils d'évaluation des méthodes de gestion d'énergie et intégrable dans un modèle global multi-physique associé à une application de véhicule électrique dont le cahier des charges est détaillé en annexe A.

Dans ce chapitre, nous rappelons dans un premier temps le principe de fonctionnement des batteries Li-ion et des supercondensateurs, les différentes technologies et leurs grandeurs caractéristiques. Dans un second temps, nous développons le modèle multi-physique de la source hybride incluant les aspects électriques, thermique et vieillissement de chacun des composants à partir de modèles issus de la littérature, à l'exception du modèle électrique batterie qui sera élaboré dans ce chapitre. Une fois ces modèles choisis, l'identification des paramètres des modèles est faite. Coté supercondensateurs, nous utiliserons des données et travaux antérieurs à la thèse, alors que l'identification des paramètres des batteries Li–ion a été faite dans le cadre de mes travaux, au cours d'essais de caractérisation et de vieillissement réalisés au sein du pôle **S2ET** du laboratoire **ESTACA'LAB-Laval** et présentés dans ce chapitre.

II.2 Source hybride Batterie Li-ion / Supercondensateurs

II.2.1 Batteries Li-ion

Jusqu'à la fin des années 1980, les deux technologies les plus répandues étaient les accumulateurs au plomb et les accumulateurs nickel-cadmium NiCd [90]. A partir du début des années 90, on a vu apparaître progressivement les batteries nickel-métal hydrure (NiMH) et Lithium-ion (Li-ion) avec l'expansion des appareils portables comme les téléphones et les ordinateurs. En 1998, on note la première utilisation d'une batterie de type Li-ion dans le domaine de l'automobile avec le véhicule électrique de marque Nissan Altra [54]. Actuellement, de nombreux véhicules électriques et hybrides sont disponibles avec ce type de technologie (*Toyota Vitz CVT 4, Mercedes-Benz s400 blue hybrid modèle 2009…..*).

II.2.1.1 Principe de fonctionnement

L'accumulateur Li-ion est un système de stockage électrochimique. Les réactions internes assurent la conversion de l'énergie électrique en un processus chimique qui repose sur l'échange réversible des ions Li+ entre les électrodes positive et négative tout au long des cycles de charge ou de décharge (cf. Figure. II. 1)[30][91]. Le couplage de ces deux électrodes est réalisé par le biais de l'électrolyte qui assure le transport des ions d'une électrode à l'autre. L'électrolyte doit être choisi de manière à assurer la compatibilité entre celui-ci et les matériaux des électrodes [92].

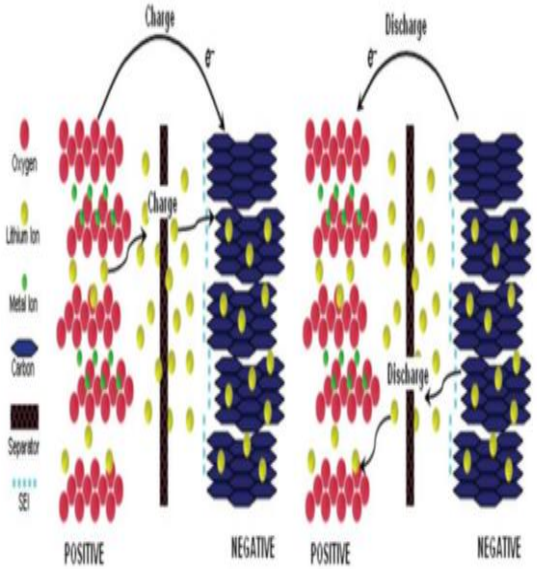


Figure. II. 1: Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion[92]

II.2.1.2 Technologies des batteries Li-ion

Les technologies Li-ion se différencient principalement par la composition de leur électrode positive, bien que la composition de l'électrode négative puisse aussi être un facteur de distinction [93]. L'électrode négative est composée de matériaux carbonés : graphite, carbones hydrogénés, carbones durs ou d'oxydes mixtes à base de vanadium amorphe, d'étain ou de titane [94]. Il existe ainsi plusieurs matériaux utilisés pour l'électrode positive, à base d'oxydes lamellaires, phosphates et spinelles.

On trouve sur le marché trois principales familles de batteries lithium-ion [30]. La première correspond aux oxydes lamellaires, comme le dioxyde de cobalt ($LiCoO_2$), dont la densité d'énergie est la plus élevée, ou le dioxyde de métaux composés comme le nickel-manganèse $LiMnNiO_4$, nickel-cobalt-aluminium $LiNiCoAlO_2$ (NCA), ou encore le nickel-manganèse-cobalt $LiNiMnCoO_2$ (NMC). La deuxième famille correspond aux matériaux dits « spinelle » comme le lithium manganèse $LiMn_2O_4$ (LMS) où l'utilisation du Manganèse permet d'avoir des électrodes stables et à faible coût. Par contre sa densité d'énergie est plus faible et la dissolution du manganèse dans l'électrolyte diminue fortement la durée de vie de cette batterie. Enfin, la troisième famille est représentée par les métaux de transition de phosphate comme le phosphate de fer LiFePO4 (LFP). Cette dernière offre un niveau de sécurité plus élevé et une meilleure tenue au vieillissement [7][95], mais la tension nominale étant plus faible, son énergie spécifique l'est également.

La comparaison (cf. Figure. II. 2) entre les principales technologies de batteries Li-ion est faite sur la base des caractéristiques suivantes : énergie spécifique, puissance spécifique, sécurité, performance, durée de vie et coût. Si différentes technologies cohabitent encore aujourd'hui, c'est parce qu'aucune d'entre elles ne sort véritablement du lot [30][95].

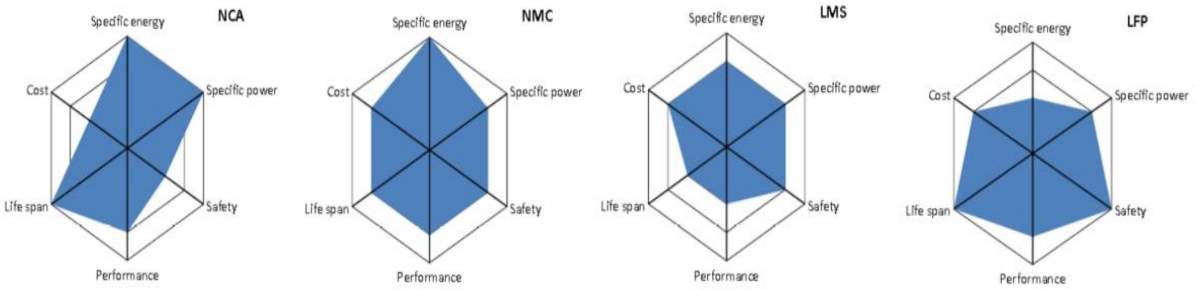


Figure. II. 2: Comparatif des différentes technologies de batterie li-ion [30]

II.2.1.3 Grandeurs caractéristiques des batteries Li-ion

Les principales grandeurs utilisées pour caractériser une batterie sont présentées dans cette partie et seront reprises dans les modèles proposés.

A. Capacité (C_{bat})

De façon générale, la capacité d'une batterie est la quantité de charge électrique qu'elle est capable de restituer, après avoir reçu une charge complète, pour un courant de décharge constant, une température et un état de santé bien définis. La capacité est exprimée en ampères-heures (Ah) :

$$C_{bat} = \int_{t_i}^{t_f} i\, dt \qquad \text{(II. 1)}$$

Avec : i l'intensité du courant de décharge de la batterie (A)
t_i et t_f l'état initial et final correspondant à des critères donnés, (de tension en général).

Par la suite on désignera par C_{bat_nom}, la capacité nominale d'une batterie à l'état neuf donnée par les constructeurs et mesurée dans les conditions nominales[11]. Ces conditions correspondent à un protocole précis, en particulier de température et de régime de charge / décharge [30].

B. Régime de charge /décharge et limitations en courant

Le cycle charge/décharge d'une batterie est évalué en fonction du régime de décharge. Par exemple, un régime de 3C pour une capacité de 40Ah signifie que la batterie sera théoriquement complètement déchargée en 20 minutes à un courant de 120 A. D'autre part, pour la même capacité de 40Ah, un régime de 1/10C est obtenu avec un courant de décharge de 4A pendant dix heures [95]. Il est considéré comme une normalisation vis-à-vis de la capacité de la batterie. En général, les limites d'utilisation en courant d'une batterie sont spécifiées par les régimes de charge et de décharge. Il faut cependant noter que la capacité réelle accessible est variable selon les régimes de charge et de décharge.

C. Etat de charge (SOC)

L'état de charge ou *SOC* (State Of Charge) d'une batterie est le pourcentage de quantité résiduelle de charge estimée pouvant être restituée par rapport à la capacité totale de la batterie, dépendant de son état de vieillissement. C'est donc le pourcentage de la quantité de charge en Ampère-heure qui serait délivrée si une décharge était effectuée, depuis l'état de charge actuel jusqu'aux critères de fin de décharge prédéfinis[96]. Le *SOC* est exprimé en pourcentage et il est référencé à 100% quand le courant de recharge ne varie plus depuis deux heures (t_0), pour une recharge à tension constante et température constante [97]. De façon normalisée, il correspond le plus souvent au ratio entre la capacité résiduelle et la capacité nominale actuelle (différente de C_{bat_nom} du fait du vieillissement) :

[11] C'est la capacité obtenue à un courant de décharge nominal, respectant les limites de tensions spécifiées et dans des conditions de température précises.

$$SOC(t_1) = 100 * \frac{C_{bat_{res}}}{C_{bat_{act}}} = 100 * \frac{C_{bat_act} - C_{bat_uti}}{C_{bat_act}} = SOC(t_0) - \frac{100}{C_{bat_act}} \int_{t_0}^{t_1} i(t)\, dt \quad \text{(II. 2)}$$

Avec : *SOC* (t_0) est l'état chargé à 100% (SOC_{int}), i(t) le courant traversant la batterie.

C_{bat_res} : Capacité résiduelle estimée en Ah à t = t_1.

C_{bat_act} : Capacité nominale actuelle en Ah (avec prise en compte du vieillissement)

C_{bat_uti} : Capacité utilisée en Ah, soit les Ah déchargés au cours du cycle.

D. Résistance interne (R_Ω)

La résistance interne correspond à la somme de la résistance électrique des matériaux constituant la batterie (électrodes, connexions, électrolyte) et de celle liée aux réactions électrochimiques. Cette résistance dépend de nombreux paramètres comme la composition chimique de l'électrolyte, la température, l'état de charge, la qualité de connexion aux bornes de l'élément. D'une manière générale la résistance interne d'une batterie a tendance à augmenter avec la dégradation de son état de santé du fait de son vieillissement. Il est par contre beaucoup plus difficile de donner une tendance de son évolution en fonction de son état de charge (*SOC*).

E. Tension en circuit ouvert (V_{OCV})

La tension à vide ou en circuit ouvert (*Open Circuit Voltage* : OCV) représente la tension continue d'une batterie en l'absence de charge ou de décharge et correspond à son potentiel d'équilibre. Elle dépend de son état de charge et de la température. La Figure. II. 3 montre un exemple d'évolution de celle-ci en fonction de son état de charge (SOC) à deux températures différentes.

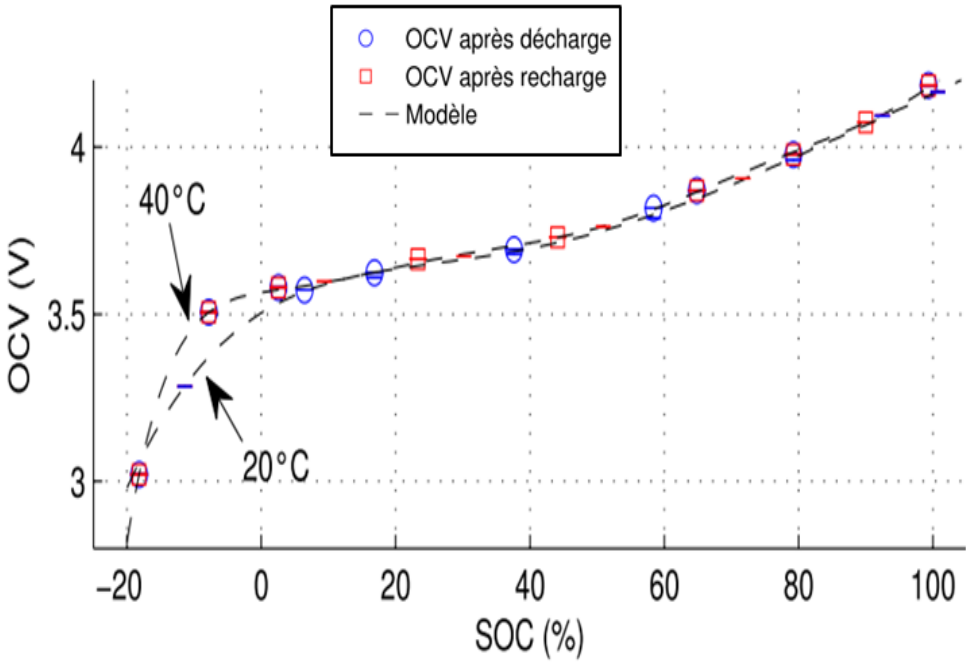


Figure. II. 3: Tension à vide (V_{OCV}) en fonction du SOC des batteries (Li-ion /NMC 100Ah) à différentes températures [93]

F. État de santé (SOH)

L'état de santé *SOH* (*State of Health*) de la batterie est un indicateur qui quantifie la réduction de performance due à la dégradation de sa capacité ou à l'augmentation de sa résistance interne [95] et permet de définir son vieillissement. La gamme de variation du SOH peut être définie de 0% à 100% [12] (état neuf) [98]. La capacité et la résistance interne peuvent être utilisées comme paramètres pour fournir une indication du *SOH* de la batterie. En général, cette grandeur est liée au rapport entre la capacité nominale actuelle et la capacité nominale de la batterie avant sa première utilisation, en maintenant la température stable [93]. De façon normalisée, elle correspond le plus souvent au rapport entre la capacité actuelle et la capacité nominale :

$$SOH = 100 * \frac{C_{bat_act}}{C_{bat_nom}} \quad \text{(II. 3)}$$

Avec :

C_{bat_nom} : Capacité nominale à l'état neuf en Ah.

C_{bat_act} : Capacité nominale actuelle (au cycle considéré) en Ah.

II.2.1.4 Coût des batteries Li-ion

Le coût d'une batterie Li-ion dépend de plusieurs facteurs : les matériaux, la main d'œuvre, le développement, la distribution et la durée de vie dans l'application visée. Dans ce contexte, les choix sur l'électrochimie retenue lors de la fabrication industrielle de batteries Li-ion jouent un rôle important pour le coût final des batteries. En ce qui concerne les batteries Li-ion à destination de l'électronique grand public, les matériaux contribuent à hauteur de 70% ou plus du prix total. Par contre pour les batteries de traction électrique, la contribution des matières premières reste encore minoritaire devant la contribution du processus de fabrication et des coûts de développement [91]. Les coûts des matières premières des différents matériaux de cathode sont présentés dans le Tableau. II. 1.

Matières premières	Coût ($/kg)
$LiMn_2O_4$	10
LiFePO4	20
$LiNi_{.80}Co_{.15}Al_{.05}O_2$	37
$LiNi_{.33}Co_{.33}Mn_{.33}O_2$	39
$LiCoO_2$	60
Graphite	19
$Li_4T_5O_{12}$	12

Tableau. II. 1: Coût des matières premières des batteries Li-ion [91]

En ce qui concerne les véhicules hybrides et électriques, la batterie représente actuellement jusqu'à 50% de leur prix. Selon les experts de *Bloomberg Energy Finance (BNEF) et Mc Kinsey*, le coût moyen des batteries Li-ion au **premier semestre 2014** se situe à environ **540 $ du kWh**, soit 20% de moins par rapport à 2012 et 50 % de moins par rapport à 2010 où les prix se situaient autour de 1000 $ le kWh. Les estimations de plusieurs fabricants de batteries annoncent pour 2015 des prévisions de prix à hauteur de 300 $ le kWh

[12] Les batteries dans le domaine de véhicules électriques sont considérées comme en fin de vie lorsque leurs capacités sont en dessous de 80%.

et même 150 $ en 2020 [99]. La Figure. II. 4 présente l'évolution du coût moyen prévu des batteries Li-ion entre 2010 et 2020.

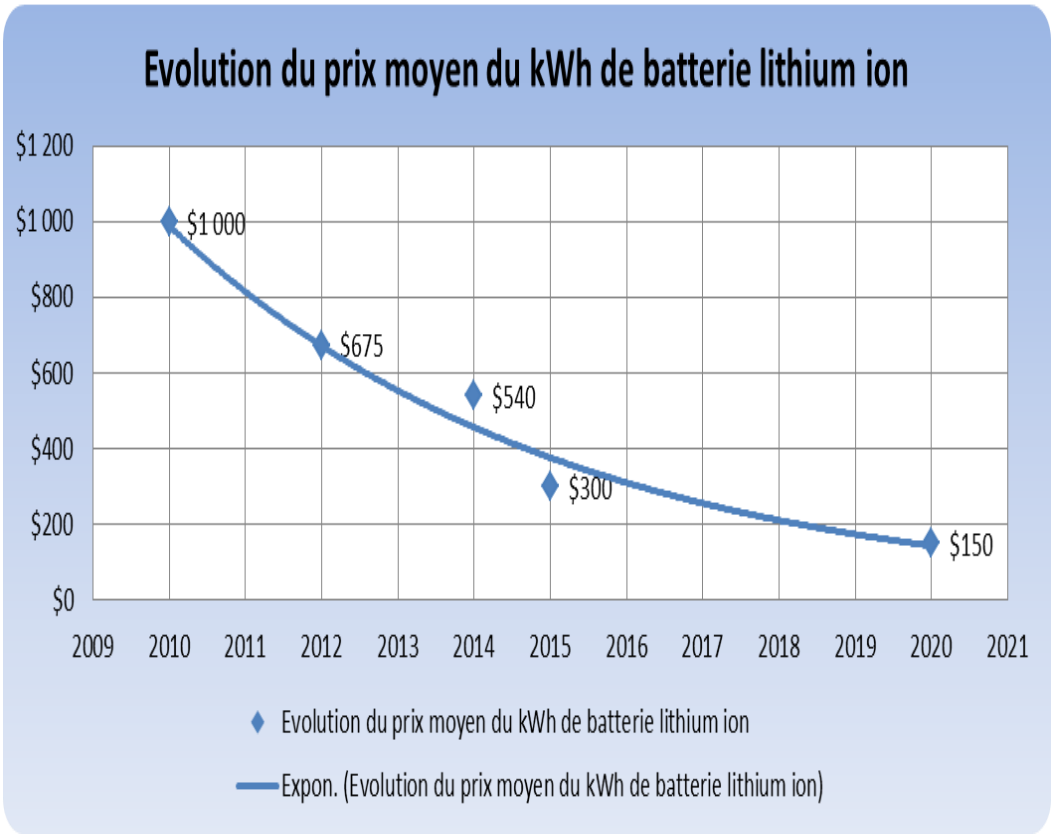


Figure. II. 4: Tendance coût moyen des batteries Li-ion 2010-2020 [99]

II.2.1.5 Batteries Li-ion et cellules choisies pour l'étude

Ces dernières années, la technologie Li-ion est devenue dominante sur l'ensemble des marchés des appareils portables autonomes en énergie pour lesquels le rapport masse/énergie est essentiel (téléphonie mobile, informatique…). Son introduction dans le domaine des transports a permis de relancer l'intérêt des véhicules électriques en apportant une solution réaliste au verrou technologique lié à la faible autonomie des autres stockeurs électriques.

Néanmoins, fabriquer un pack batterie Li-ion performant pour un véhicule électrique est une toute autre affaire. Un pack batterie dans le domaine de traction est constitué de plusieurs cellules individuelles, ou éléments, de tension nominale 3,2 à 3,7 V suivant la technologie utilisée, ainsi que de dispositifs d'assemblage et de protection électronique représentant une masse et un volume supplémentaire [30], compte tenu des critères de sécurité et la quantité d'énergie embarquée. Actuellement, plusieurs fabricants mondiaux de batteries ont lancé leur produit de technologie Li-ion pour les véhicules électriques et hybrides. La liste des fabricants n'est pas exhaustive mais on cite, A123 Systems avec les constructeurs automobiles Chrysler et *SAIC* aux Etats-Unis, *AESC* (JV Nissan-Nec) avec Renault-Nissan en Japon, *BYD* en Chine, *Dow Kokam* en Corée du sud et en France, *Toshiba* avec Volkswagen en Allemagne, *GS Yuasa/ Lithium Energy* Japan avec Honda, Mitsubishi et PSA au Japon. En France, la société *SAFT*, l'une des plus performantes au monde dans ce secteur, a mis au point des batteries de haute puissance (2 850 W /kg), de moyenne puissance (1170 W/kg) et de haute énergie (420 W/kg et 150 Wh/kg)[100]. La société *Blue Solutions*, filiale de *Bolloré* a développé une nouvelle technologie de batteries Lithium Métal-Polymère à hautes performances pour le véhicule électrique « *Bluecar* ». Il existe d'autres fabricants de taille plus modeste dans le monde : *E4V*

en France, qui a annoncé son partenariat avec *Mia*, *Amberjac Project* au Royaume Uni et *Ener1* aux Etats-Unis....

Le Tableau. II.2 résume les principales caractéristiques des deux éléments de batteries Li-ion **sélectionnés pour notre étude** :

- L'un à Haute densité de Puissance (**HP**)
- L'autre à Haute densité d'Energie (**HE**)

Commercialisées par le fabricant *DowKokam*, ce sont ces deux types de batteries qui ont fait l'objet d'essais de vieillissement à l'ESTACA-Laval durant mes travaux.

Batteries	**Ko40HP**	**Ko40HE**
Fabricant	DowKokam	DowKokam
Nom commercial	SLPB100216216H	SLPB90216216
Composition chimique (Electrode négative/ Electrode positive)	Graphite/NMC	Graphite/NMC
Tension nominale (**V**)	3.7	3.7
Capacité nominale (Ah)	40	40
Résistance interne (mΩ) (Conditions de mesures)	0.80 (AC_1kHz,23°C)	0.90 (AC_1kHz,23°C)
Courants Max charge/décharge	80/200	40/40
Energie spécifique (**Wh /Kg**)	143.68	167.25
Masse (kg)	1.030	0.885
Volume (l)	0.508	0.441
Coût (€)	82.22	76.33

Tableau. II. 2: Données fabricants des batteries Li-ion testées [7][80]

II.2.2 Caractéristiques des Supercondensateurs

Les supercondensateurs sont des systèmes de stockage électrostatique à très haut rendement et à haute dynamique. Les premiers développements technologiques des supercondensateurs, appelé également condensateur à double-couche électrique (*Electric Double Layer Capacitor - EDLC*), datent de 1957[101][102]. De nos jours, le marché offre des supercondensateurs dont les capacités vont de quelques Farads à 9000 Farads avec différents types de caractéristiques. Un grand nombre de fabricants de systèmes électriques et de laboratoires de recherche dans le domaine de l'électronique de puissance s'intéressent à l'utilisation de ces composants pour les applications présentant des pics de puissance importants tels que les véhicules électriques et hybrides, le stockage résidentiel d'énergie, la récupération d'énergie pour les grues et ascenseurs [84]….

II.2.2.1 Principe de fonctionnement

À la différence des condensateurs classiques avec diélectrique, qui emploient un isolant et accumulent des charges sur deux armatures, les supercondensateurs emploient un électrolyte peu visqueux qui remplit les pores des électrodes et assure la mobilité des ions, l'isolement entre les deux électrodes se faisant par l'intermédiaire du séparateur [101]. Ces supercondensateurs exploitent la double couche électrique qui apparaît à l'interface électrode-

électrolyte [94][103]. Grace à ce phénomène, le stockage d'énergie électrique se fait principalement sans réaction chimique. La Figure. II. 5 illustre la formation d'une double couche à l'interface électrode-électrolyte selon l'état déchargé ou chargé du supercondensateur.

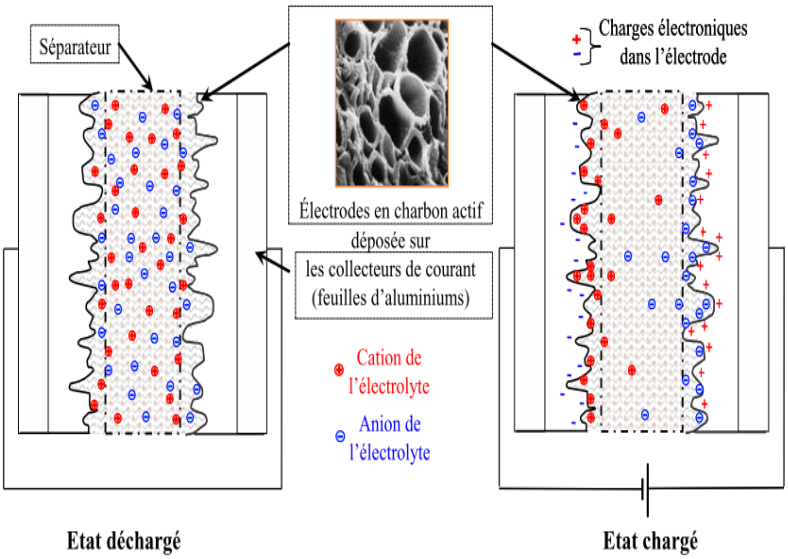


Figure. II. 5: Schéma de principe du supercondensateur déchargé et chargé [103]

Les principaux avantages des supercondensateurs par rapport aux autres solutions de stockage d'énergie sont :

- Une puissance massique élevée qui autorise des cycles de charge et décharge à très fort courant (plusieurs centaines d'ampères)
- Un très bon rendement en charge et en décharge.
- La quasi-absence de réaction chimique durant le fonctionnement permettant d'obtenir des durées de vie très élevées. Un supercondensateur peut être chargé et déchargé des millions de fois pour des conditions normales d'utilisation.
- Une relative simplicité de comportement électrique et une relative stabilité de ses caractéristiques en température par rapport aux batteries [84][104]. Il est donc très simple de pouvoir prédire l'énergie disponible et le comportement électrique.

Le Tableau. II. 3 résume les caractéristiques générales des batteries Li-ion et des supercondensateurs.

Caractéristiques	Batterie Lithium Ion	Supercondensateur
Temps de charge	2 heures	qq secondes
Temps de décharge	2 heures	qq secondes
Cyclabilité	Inférieure à 5000	Supérieure à 500 000
Energie Spécifique (Wh/kg)	100 à 200	5 à 10
Puissance spécifique (kW/kg)	0,5 à 1	1 à 10
Rendement	De 50 % à 90 %	De 75% à 95%
Cout / Wh	0,5 à 2,5 $ /Wh	5 à 10$ / Wh
Cout / kW	75 à 150 $ / kW	15 à 30 $ / kW

Tableau. II. 3 : Caractéristiques générales des batteries Li et supercondensateurs [101][105]

II.2.2.2 Technologies des Supercondensateurs

La classification des supercondensateurs peut être faite selon plusieurs critères tels que la nature du matériau de l'électrode, le type d'électrolyte, la technologie de fabrication ou encore le principe de fonctionnement [40]. Selon ce dernier, on distingue principalement trois types de supercondensateurs:

- Les supercondensateurs électrostatiques, où les ions restent dans l'électrolyte et où le concept fondamental de la double couche est bien exploité.
- Les supercondensateurs électrochimiques mettant en jeu aux électrodes des réactions de type redox, en plus des processus électrostatiques.
- Les supercondensateurs hybrides composés de deux électrodes dissymétriques : une électrode est de type capacitif et l'autre de type pseudo capacitif ou batterie [40][52].

Les supercondensateurs considérés dans cette étude sont *de type électrostatique*. Il existe principalement deux familles de supercondensateurs électrostatiques que l'on peut distinguer en fonction de la nature de leur électrolyte [81] :

A. Electrolytes organiques

Les électrolytes organiques sont obtenus par dissolution d'un sel dans un solvant organique tel que le carbonate de propylène ou l'acétonitrile. Ils possèdent une plage de stabilité qui peut s'étendre à 2,85 V. Le choix du solvant dépend de plusieurs facteurs: réactivité avec les espèces électro-actives et les matériaux d'électrode, fenêtre de stabilité, capacité de dissociation, toxicité ou encore inflammabilité [40][101]. Actuellement, les supercondensateurs les plus performants utilisent un électrolyte à base d'acétonitrile qui présente l'avantage d'une résistance ionique très faible conduisant à des densités de puissance importantes[106]. Cependant l'acétonitrile présente une certaine nocivité et une plage de stabilité en température, comprise en moyenne entre - 40 °C et 70 °C (limites d'état liquide), qui peut rendre son utilisation dans les applications du transport problématique [40]. De plus, le prix des électrolytes organiques est élevé et, dans certains cas, l'utilisation de solvants organiques dont la tension de vapeur est élevée pose un problème environnemental (solvants organiques difficilement recyclables et fuite par évaporation lors de la fabrication) [52].

B. Electrolytes aqueux

Les électrolytes aqueux furent historiquement (1957) les premiers employés pour la réalisation industrielle de supercondensateurs, en raison de leur excellente conductivité ionique [85]. Ces électrolytes sont typiquement de l'hydroxyde de potassium et de l'acide sulfurique dont la température de fusion est inférieure à 100°C [52][106]. L'avantage principal de ces électrolytes est leur grande conductivité (jusqu'à 700 $mS.cm^{-1}$ pour l'acide sulfurique), bien supérieure à celle des autres électrolytes utilisés, du fait de la forte conductivité des espèces ioniques qui le composent et de leur forte concentration (plusieurs moles par litre) [101]. Cette conductivité élevée permet d'obtenir des capacités élevées, de l'ordre de 200 $F.g^{-1}$ et des résistances faibles. De plus, leur prix et leur impact environnemental restent faibles. Contrairement aux électrolytes organiques, il n'y a pas de risque d'explosion en cas de surchauffe [52]. Leur principal défaut est leur faible tenue en tension (tension de décomposition

de ce type d'électrolyte de l'ordre de 1.3V à 1.4V)[107]. Cela réduit leur densité énergétique puisqu'elle dépend du carré de cette tension.

II.2.2.3 Grandeurs caractéristiques des Supercondensateurs

Un supercondensateur est principalement caractérisé par les grandeurs définies ci-dessous.

A. Energie et capacité

Pour un supercondensateur de capacité C_{sc}, sous une tension V_{sc} , l'énergie stockée E_{sc} est donnée par l'équation suivante :

$$E_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc}\, {V_{sc}}^2 \qquad \text{(II. 4)}$$

La valeur de la capacité C_{sc} est proportionnelle à la surface S d'interaction (électrode / électrolyte) et inversement proportionnelle à l'épaisseur d du diélectrique (la capacité de la double couche dépend de l'absorption des ions à la surface du matériau d'électrode) :

$$C_{sc} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \qquad \text{(II. 5)}$$

Avec : ε_r est la permittivité relative ou constante diélectrique électrolyte ;
ε_0 est la permittivité absolue du vide ($8{,}854.10^{-12}$F/m).

Compte tenu des équations (II.4) et (II.5), l'énergie stockée E_{sc} dans les supercondensateurs est donc en fonction de trois paramètres V_{sc}, S, d. Pour accroître l'énergie stockée, il faudra donc augmenter la tension V_{sc}, la permittivité relative ε_r, la surface S et diminuer l'épaisseur d [108]. La valeur de C_{sc} est un facteur clé, optimisé au travers du savoir-faire des fabricants en terme de construction et de fabrication des électrodes poreuses.

B. Résistance interne ($\mathbf{R_{SC}}$)

La résistance interne ou résistance série équivalente R_{SC} des supercondensateurs est un paramètre important qui influe directement sur la puissance délivrée par le supercondensateur. Cette résistance est la somme de différentes résistances « ioniques » et « électriques » (électrodes, connexions, électrolyte). Cependant, les contributions principales à cette résistance interne sont les résistances de la matière active, de l'électrolyte dans le séparateur et de l'interface matière active/collecteur de courant [52].

C. Etat de charge (SOC)

La notion d'état de charge (*SOC*) est dans ce cas définie relativement à l'énergie stockable. Dans certaines applications de traction électrique, le *SOC* est considéré comme une variable de décision. Cette grandeur est exprimée en pourcentage d'énergie et définie par la relation suivante [54]:

$$SOC = \frac{E_{sc_res}}{E_{sc_act}} . 100 \qquad \text{(II. 6)}$$

Avec :

E_{sc_res} : Energie restante des supercondensateurs.
E_{sc_act} : Energie nominale actuelle des supercondensateurs (au cycle considéré).
E_{sc_nom} : Energie nominale des supercondensateurs à l'état neuf.

En ce qui concerne la variation de *SOC* pendant l'utilisation des supercondensateurs, les fabricants conseillent d'utiliser leurs composants de 25% à 100% de leur *SOC*. Ceci permet d'exploiter 75% de la capacité énergétique [54][84][109].

D. État de santé (SOH)

Le SOC se réfère à la capacité nominale actuelle [7]. Le « SOH » (*State of Health*) permet de prendre en compte les pertes de capacité dues à la dégradation des supercondensateurs et de quantifier ainsi leur vieillissement afin d'évaluer l'impact sur le comportement et le fonctionnement du système alimenté [110]. De façon normalisée, le SOH se définit en pourcentage (%), comme l'énergie totale restante par rapport à l'énergie initiale délivrée avant sa première utilisation :

$$SOH = \frac{E_{sc_act}}{E_{sc_nom}} . 100 \qquad \text{(II. 7)}$$

Avec :
E_{sc_act} : Energie actuelle des supercondensateurs en J
E_{sc_nom} : Energie nominale des supercondensateurs en J.

Le SOH est donc lié à l'énergie totale pouvant être délivrée si une décharge complète était effectuée à partir d'un état de pleine charge. Cette grandeur est généralement comprise entre 100% et 80%, puisque l'on considère généralement qu'un supercondensateur a atteint sa fin de vie lorsqu'il restitue moins de 80% de sa capacité nominale initiale [103][81].

II.2.2.4 Coût des supercondensateurs

Le prix des supercondensateurs a réellement diminué ces dernières années, mais reste cependant toujours trop élevé pour permettre son développement massif. L'utilisation d'électrodes en charbon actif pour fixer les ions demande plusieurs processus de fabrication coûteux et complexes pour obtenir de bonnes performances de stockage. En effet, le prix des matières premières (charbon actif) est actuellement relativement important (de l'ordre de 30 à 50$ par kg) et est sujet à de fortes fluctuations (il est déjà monté à 100$ par kg). Le prix des solvants pour l'électrolyte tels le propylène de carbonate et l'acétonitrile est de 5 à 10$ le litre, et celui des sels ioniques qui se dissocient dans le solvant en cations et anions de l'ordre de 50 à 100$ par kg. Pour ces raisons, les applications commerciales (surtout pour les modules de taille moyenne ou grande) sont encore limitées, alors que les ventes potentielles seraient de l'ordre de plusieurs millions d'unités par an avec des prix plus attractifs [111].

La technologie des supercondensateurs est en évolution constante. Les efforts se portent sur la diminution des coûts de production, comme dans le cas de la première ligne de production de supercondensateurs de graphène lancée par la Chine en janvier 2014. La baisse des prix devrait se poursuivre et les supercondensateurs devraient petit à petit trouver leur place dans les applications de stockage d'énergie électrique. Le marché des supercondensateurs était attendu en hausse de 48% par an de 2012 à 2015 [112]. La Figure. II. 6 représente l'évolution du marché des supercondensateurs MAXWELL et leur utilisation dans différentes applications (transport, énergie renouvelable, électronique) [113].

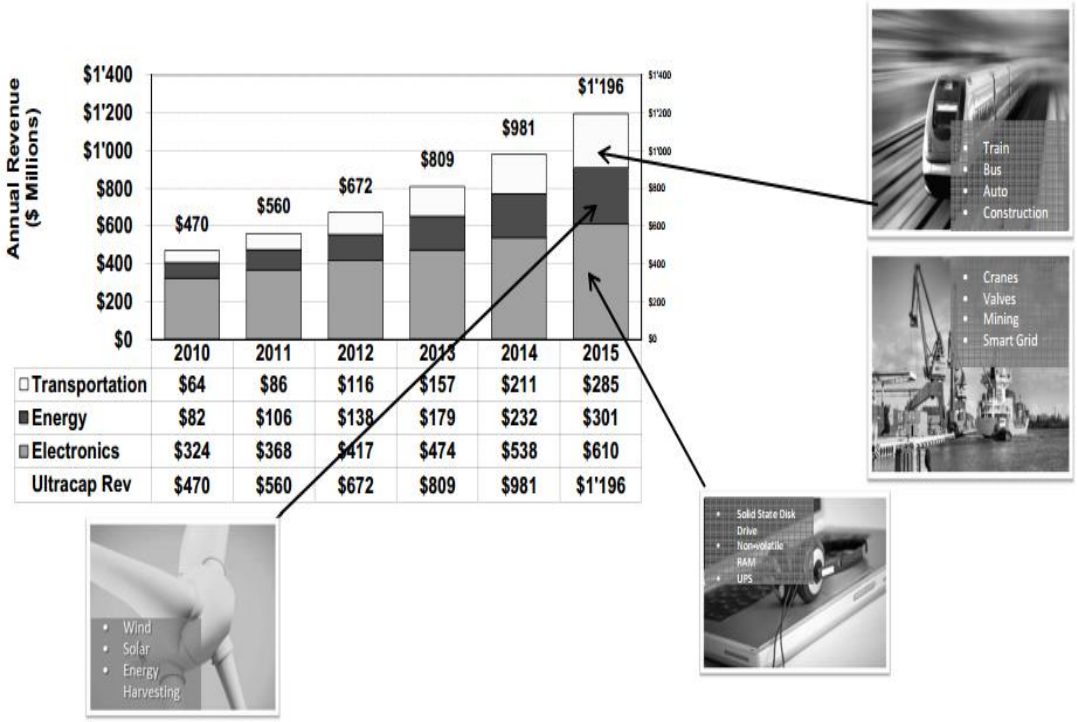


Figure. II. 6 : Évolution du marché de supercondensateurs MAXWELL et secteurs d'applications [113]

II.2.2.5 Supercondensateur choisi pour l'hybridation

Compte-tenu de leur puissance spécifique, les supercondensateurs sont de bons candidats dans le domaine de la traction électrique, pour l'hybridation des sources d'énergie embarquées. Ils permettent des cycles de charge et décharge à courant fort (plusieurs centaines d'ampères), ont une durée de vie très élevée (jusqu'à 1 million de cycles), un rendement énergétique très important (supérieur à 90%), et des caractéristiques relativement stables en température par rapport aux autres systèmes de stockage [89]. Actuellement, les supercondensateurs sur le marché sont commercialisés sous forme d'éléments simples avec plusieurs niveaux de tension de 2,3 à 2,85 Volts suivant la technologie choisie, ou sous forme de modules composés d'une mise en série de plusieurs éléments.

Dans ce contexte, on trouve de nombreux fabricants de supercondensateurs à l'échelle mondiale ; à titre d'exemple, *BlueSolutions* en *France*, *NESSCAP* en *Corée du sud*, *PANASONIC au Japon* et *MAXWELL* aux *Etats-Unis*. Par ailleurs, d'autres fabricants de taille modeste comme *AVX*, *EVANS et ELTON (ESMA)* proposent des supercondensateurs électrochimiques et hybrides [40].

Les éléments sont choisis dans les catalogues fabricant. Il faut déterminer la capacité totale nécessaire ainsi que la tension maximale. La tension maximale permet de déterminer le nombre d'éléments à connecter en série et la capacité à définir le nombre de branches en parallèle du pack de supercondensateurs. La tension peut décroitre en général jusqu'à 50% de la tension maximale permettant d'exploiter ainsi 75% de la capacité énergétique du module.

Le Tableau. II. 4 présente les caractéristiques du supercondensateur *MAXWELL* BCAP0350 E270T11 dont les données ont été utilisées pour notre étude. De type électrostatique, il utilise un électrolyte à base d'acétonitrile. Cette technologie présente de bonnes performances pour notre application, notamment en termes de résistance interne, de rendement énergétique ainsi que de coût de fabrication.

Supercondensateur	**Valeur**
Fabricant	*MAXWELL*
Tension nominale (**V**)	2.7
Capacité nominale (**F**)	350
Courants Max charge/décharge (A)	840/840
Résistance interne (mΩ)	3.20
Densité de puissance (**W/Kg**)	4300
Energie spécifique (**Wh /kg**)	5.62
Masse (**Kg**)	0.063
Volume (l)	0.053
Coût (€)	13.50

Tableau. II. 4: Données fabricants supercondensateur MAXWELL BCAP0350 E270T11 (350F/2.7V) [7][114]

Le composant étant choisi, il faudra déterminer la capacité totale nécessaire à l'application. La tension maximale permet de déterminer le nombre d'éléments à connecter en série et la capacité à définir le nombre de branches en parallèle.

II.3 Modélisation du vieillissement des stockeurs

Le processus de vieillissement d'un système de stockage est décrit par la dégradation de ses propriétés physiques au fil du temps et/ou au cours de son utilisation. En d'autres termes, il se traduit par la baisse de la capacité et/ou l'augmentation de l'impédance interne [30]. Les batteries Li-ion ou les supercondensateurs sont des systèmes électrochimiques complexes constitués de nombreux composants (électrodes, électrolyte, séparateur, collecteurs de courant…). Des mécanismes physico-chimiques complexes et interdépendants sont responsables du vieillissement et de la dégradation des performances de chacun de ces composants [95].

II.3.1 Mécanismes de vieillissement des batteries Li-ion

Les deux principaux effets du vieillissement sur les performances de la batterie sont la diminution de ses performances de stockage en Wh (ou de capacité en Ah) qui se traduit par une réduction de sa capacité à stocker l'énergie, et une augmentation de son impédance interne qui entraine une limitation de la puissance disponible en charge ou en décharge [93][115][116].

Les mécanismes de vieillissement des batteries Li-ion sont nombreux et interdépendants. Leur influence sur la durée de vie peut varier d'une technologie à une autre, mais ils peuvent être regroupés en trois principales catégories présentées dans les parties suivantes.

II.3.1.1 Mécanismes de vieillissement de l'électrode négative

Au niveau de l'électrode négative, la formation et la croissance de l'interface solide-électrolyte SEI (*Solid Electrolyte Interface ou Interphase*) est considérée comme la source principale du vieillissement de l'anode en graphite (Le carbone, sous forme graphite, est le matériau le plus utilisé dans les batteries Li-ion) [95]. Ce phénomène est dû au fait que l'électrode carbonée s'oxyde dès la première charge, consommant ainsi une partie du lithium et créant une couche solide à la surface de l'électrode avec les produits de décomposition de

l'électrolyte [6]. En effet, la présence des produits de ces réactions sur la surface de l'anode retarde le processus de l'intercalation et favorise la migration des ions lithium lors des phases d'insertion et de désinsertion dans le carbone. De plus, cette interface solide-électrolyte SEI qui évolue en période de cyclage et de repos tout au long de la durée de vie de la batterie devient instable. Cela conduit également à l'augmentation de la résistance de transfert de charge et de l'impédance et à l'obturation des pores de l'anode en graphite[93] [95].

Une autre source du vieillissement de l'anode est liée au changement du matériau actif et de la structure de l'électrode qui influence fortement la durée de vie de la batterie. En effet, le cyclage des batteries Li-ion à des courants et états de charge élevés induit une contrainte mécanique sur le réseau de graphite en raison du fort gradient de concentration en ions lithium [6].

II.3.1.2 Mécanismes de vieillissement de l'électrode positive

Les phénomènes de vieillissement de l'électrode positive peuvent être très différents selon les matériaux actifs utilisés [30]. Néanmoins, les causes principales du vieillissement de l'électrode positive, comme montrés sur la Figure. II. 7, sont liées :

- à la perte de la matière active,
- aux changements de structure du matériau actif,
- à l'oxydation de l'électrolyte et la formation d'une couche en surface libérant du gaz
- à la dégradation et la modification des composants de l'électrode tels que les conducteurs de courant et notamment la corrosion du collecteur de courant [93].

Par ailleurs, le comportement de l'électrode positive peut aussi être modifié avec ces phénomènes de vieillissement, notamment la dissolution du matériau actif de l'électrode positive.

D'un point de vue physico-chimique, la sensibilité du vieillissement aux conditions extrêmes comme les états de charge élevés, les hautes températures et ou les forts régimes de charge/décharge dépend du matériau de la cathode [95].

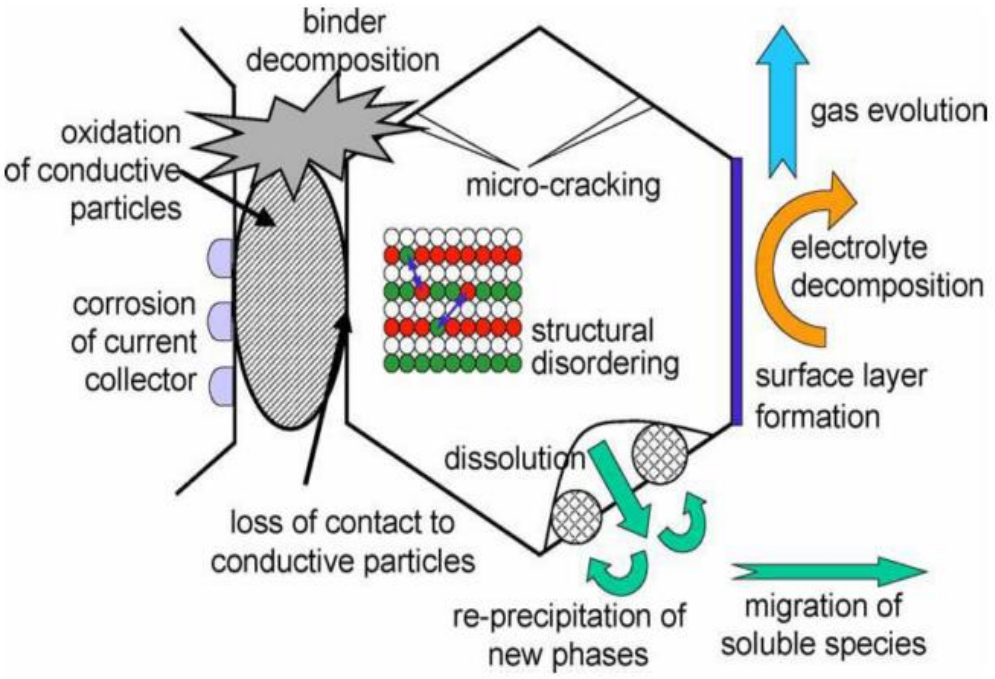


Figure. II. 7: Sources principales du vieillissement de la cathode [95]

II.3.1.3 Mécanismes de vieillissement de l'électrolyte et des collecteurs de courant

Le vieillissement de l'ensemble des composants électro-chimiquement non actifs (l'électrolyte, les collecteurs de courants et le séparateur) est généralement plus lent que celui des électrodes [6]. D'une manière générale, l'électrolyte peut s'oxyder au contact de l'électrode positive à haut potentiel et, à l'inverse, se réduire au contact de l'électrode négative si celle-ci est à faible potentiel. Ces interactions avec les électrodes provoquent souvent la présence d'impuretés dans l'électrolyte, ce qui ralentit le transport des ions lithium. En effet, cette diminution de la conduction ionique se manifeste plus concrètement par une augmentation de la résistance interne [30][95].

Par ailleurs, le cuivre et l'aluminium sont les matériaux les plus couramment utilisés pour les collecteurs de courant [93]. Les dégradations de ces parties métalliques causées par la corrosion se déroulent à l'interface entre l'électrolyte et le collecteur de courant et provoquent la dissolution de celui-ci (augmentation locale de la résistance).

Ces deux problèmes sont considérés comme les principales sources de vieillissement de ces éléments [30].

II.3.2 Modélisation du vieillissement des batteries Li-ion

II.3.2.1 Vieillissement calendaire et en cyclage

Le vieillissement des batteries Li-ion est directement lié aux dégradations des propriétés physico-chimiques de leurs constituants (électrode positive et négative, électrolyte, séparateur, collecteurs de courant). Deux principaux modes de vieillissement dus au fonctionnement et conditions d'utilisation doivent être distingués et sont présentés ci-après.

A. Vieillissement calendaire

Le mode de vieillissement calendaire est défini par la dégradation des performances en fonction du temps, quand les batteries sont maintenues dans un état stationnaire d'un point de vue thermodynamique (pas de sollicitation en courant) [6]. La température et le SOC sont les deux facteurs principaux influant les phénomènes de corrosion ainsi que toutes les réactions secondaires dans ce mode de vieillissement. Ces évènements se traduisent par une augmentation de la résistance interne et une perte de capacité de la batterie. La Figure. II. 8 représente l'évolution de la capacité dans le mode de vieillissement calendaire, pour plusieurs valeurs de température et de SOC [25].

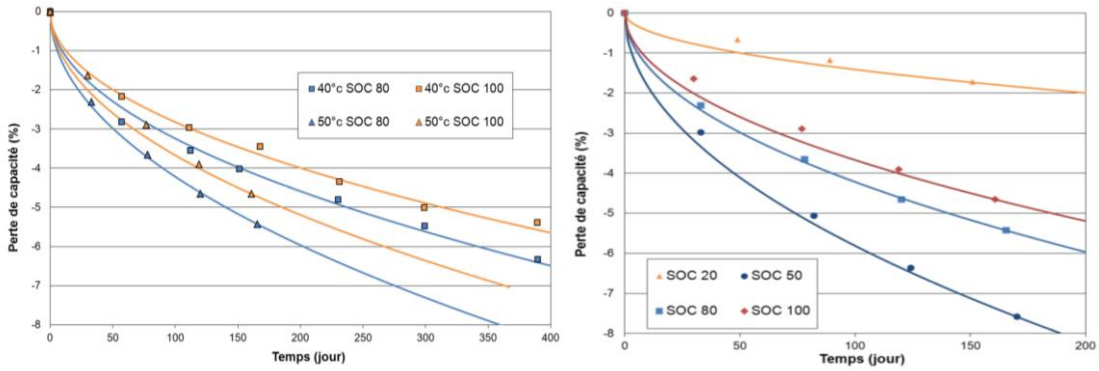


Figure. II. 8: Évolution de la perte de capacité en vieillissement calendaire (à 50°C pour les SOC de 20%, 50%, 80% et 100%) [30]

B. Vieillissement en cyclage

La durée de vie en cyclage d'une batterie est exprimée en nombre de cycles de charge-décharge ou par la quantité de charge échangée. Elle dépend des principaux facteurs tels que le profil de cyclage, l'état de charge (SOC) et la température de conditionnement de la batterie. Le profil de cyclage peut être donné en courant ou en puissance et représente plus justement les conditions d'utilisation de la batterie dans un véhicule électrique. La Figure. II. 9 présente l'évolution de la résistance interne et de la capacité en fonction du nombre de cycles charge-décharge d'une batterie Li-ion [38].

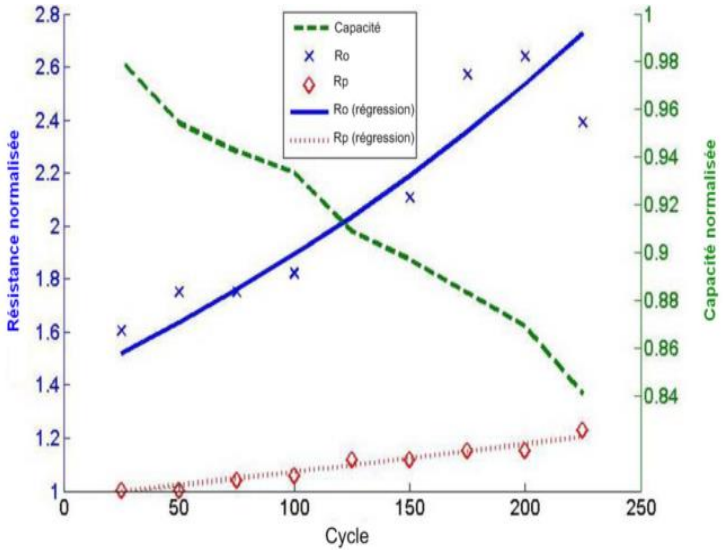


Figure. II. 9: Évolution de la résistance interne (R_0) et de la capacité en fonction du nombre de cycles [117]

II.3.2.2 Modèles de vieillissement des batteries Li-ion

La littérature offre plusieurs modèles permettant d'estimer le vieillissement de la batterie. Ces modèles permettent de prédire l'évolution de la capacité et de l'impédance interne en fonction des conditions d'utilisation. Selon *Q.BADEY* [30] et *J.NADEAU* [6], on peut regrouper les différents modèles de vieillissement des batterie Li-ion recensés dans la littérature en trois classes principales: les modèles basés sur les propriétés physiques, les modèles mathématiques et les modèles basés sur le comptage d'évènements.

Le Tableau. II. 5 présente la classification de ces modèles basée sur l'étude bibliographique réalisée par *Q.BADEY* [30].

Modèles de vieillissement		
Modèles basés sur les propriétés physiques	Modèles mathématiques	Modèles basés sur le comptage d'évènements
Modèles électrochimiques [118][119][120][121]	Modèles RNA [122][123][124]	Modèles basés sur la courbe de Wöhler [125][126]
Modèles empiriques [127][128][129][130]	Modèles logique floue [131][132][133]	Modèles Ah-throughput
Modèles empirique + circuits électriques(MCE) [134][135][136][137]		Modèles basés sur de facteurs de pondération [30][138][139]

Tableau. II. 5: Classification des modèles de vieillissement [30]

A. Modèles basés sur les propriétés physiques

Avec ces modèles, le vieillissement est estimé directement par la dégradation des performances de la batterie issue des différents processus physiques. En effet, le modèle nécessite une entrée d'informations physique, que ce soit sous la forme d'une conductivité électrique, d'une courbe de mesures empiriques ou bien d'une loi électrochimique [30].

Dans ce contexte, les modèles électrochimiques sont considérés comme la première grande catégorie de ces modèles. Ils décrivent les processus physico-chimiques de la batterie tels que le transfert de charge et la diffusion d'espèces à partir d'équations analytiques qui expriment une relation entre les différents paramètres électriques ou physiques (états de charge, température et la densité de courant) [6]. L'inconvénient majeur de ces modèles est que les systèmes d'équations deviennent rapidement lourds et complexes, faisant intervenir de nombreuses dérivées partielles avec un temps de calcul considérable.

La deuxième catégorie de modèles est constituée de ceux à base de circuits électriques équivalents. Ces derniers peuvent avoir différents composants tels que capacités, résistances, sources de tension et/ou de courant, inductances avec plusieurs topologies afin de modéliser au mieux les performances de la batterie. En effet, Le vieillissement de la batterie est représenté par l'évolution des paramètres du circuit électrique équivalent suivant les conditions d'usage [93]. Dans cette catégorie, plus on ajoute de paramètres, plus le modèle devient difficile à identifier et à utiliser. De plus, le transfert d'un comportement électrochimique à un comportement électrique a ses limites.

Enfin, la dernière catégorie concerne les modèles empiriques. Ils décrivent la variation des propriétés physiques de la batterie à partir d'interpolations, de régressions et d'extrapolations de données obtenues de manière expérimentale sans utiliser d'équations analytiques (liées aux lois électrochimiques). La prévision de la durée de vie de la batterie avec les modèles empiriques est fiable à court terme, mais se révèle peu efficace pour les essais à long terme [6].

B. Modèles mathématiques

Ces modèles exploitent directement les données expérimentales afin d'extraire en sortie le comportement à observer. Les deux méthodes les plus utilisées dans cette famille sont les réseaux de neurones artificiels et la logique floue. En effet, ces algorithmes permettent de relier les paramètres d'entrées (causes) aux sorties (conséquences) sous forme de boîte noire [6]. Par ailleurs, ce type de modèle est souvent difficile à mettre en œuvre et n'offre que peu de garanties sur les performances du système (sensibilité à la quantité et à la qualité des données expérimentales), surtout si ce dernier est complexe.

C. Modèles basés sur le comptage d'évènements

Les modèles basés sur le comptage d'évènements reposent sur une approche de modélisation dérivée du domaine de la fatigue mécanique (courbe de Wöhler). Cette méthode permet d'exprimer la durée de vie de batteries en nombre de cycles, en fonction d'un paramètre précis (la profondeur de décharge, la tension de charge, le courant). En effet, les modèles existants se différencient par la grandeur utilisée pour comptabiliser ce nombre d'évènements [93].

Les modèles pondérés de type Ah-throughput (*Weighted Ah-thoughput model*) font partie des modèles basés sur le comptage d'évènements. La durée de vie de la batterie est estimée en comptant la charge totale échangée par une cellule. La prise en compte de l'influence de différents paramètres, tels que la température, le courant, la profondeur de décharge, sur la perte de capacité, est modélisée à l'aide du principe de facteur de pondération. Ensuite, le

modèle évalue la quantité de charges échangées durant chaque événement selon les conditions d'usage et en fait la somme. Celle-ci est ensuite comparée à la quantité de charge pouvant être échangée signalant la fin de vie théorique de la batterie [6].

Selon *M.MONTERU* [93], la validité des résultats des modèles de vieillissement par comptage d'évènements ou par cumul pondéré de quantité de charges échangées est limitée par les conditions des essais. Cela ne garantit pas la fiabilité et la précision de ces modèles pour d'autres conditions d'usage.

II.3.2.3 Modèle de vieillissement retenu

Notre objectif est d'obtenir un moyen de prévision du vieillissement des batteries Li-ion, dans le cadre d'un usage automobile et une alimentation électrique hybride. Le modèle de vieillissement doit permettre d'estimer l'évolution au fil du temps des deux paramètres électriques (capacité/résistance) utilisés pour caractériser le vieillissement de la batterie. Le vieillissement dit calendaire doit être également pris en compte car pour un véhicule particulier le temps de repos (à l'arrêt) est estimé à 90%.

Un modèle semi-empirique de vieillissement de batterie Li-ion, de type entrée-sortie, a été choisi ici pour son caractère simple et utilisable en temps réel. Ce modèle proposé par M. *ECKER et al. en 2012* [135] permet d'obtenir une prévision de la durée de vie en cyclage à l'aide d'essais de vieillissements calendaires. Sa loi comportementale générique est décrite sur la Figure. II. 10 avec ses entrées et sorties. Ce modèle est facilement implantable sur le calculateur de bord d'un véhicule électrique.

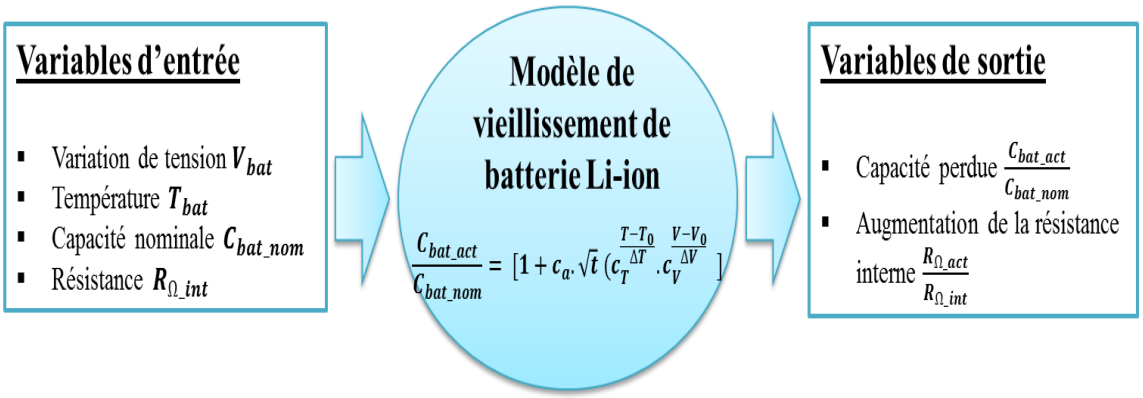


Figure. II. 10: Modèle de vieillissement de batterie retenu

L'estimation de la durée de vie est réalisée à partir de ce modèle semi-empirique associé au modèle électrique à circuit équivalent en considérant les simplifications et les hypothèses suivantes :

- Le modèle est paramétré sur la base d'essais de vieillissements en cyclage.
- Les résistances du modèle électrique évoluent de façon similaire au cours du vieillissement.
- Le vieillissement calendaire des batteries évolue en fonction de la racine carrée du temps et avec un ralentissement de la forme (A^{-X}) en fonction de la température et de la tension.
- L'évolution de la courbe V_{OCV} est définie par rapport à la capacité nominale actuelle et non par rapport à la capacité nominale initiale.

Sur la base de ces hypothèses et simplifications, la dégradation de la capacité ou l'augmentation de résistance interne peuvent être exprimés sous la forme suivante :

$$a_{bat}(t, V_{bat}, T_{bat}) = a_{init}.[1 + c_a.\sqrt{t}\,(c_T^{\frac{T-T_0}{\Delta T}}.c_V^{\frac{V-V_0}{\Delta V}}\ ] \qquad \text{(II. 8)}$$

Où a_{bat} est la capacité C_{bat} ou la résistance interne R_Ω d'une cellule après un certain temps t sous une température T_{bat} et une tension V_{bat}. Les constantes T_0, V_0, ΔT et ΔV peuvent être choisies arbitrairement comme points de référence pour le modèle de vieillissement. c_a , c_T et c_V sont les paramètres du modèle qui doivent être déterminés à partir d'essais.

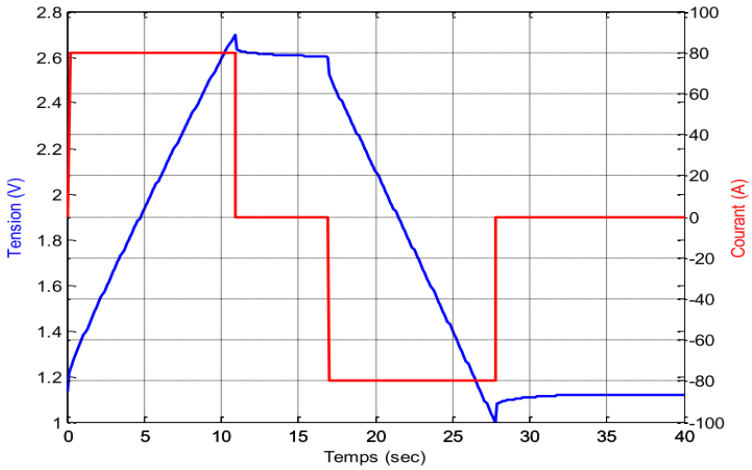
Avec ce modèle, on peut évaluer la dynamique des paramètres de vieillissement de la cellule en calendaire et en cyclage en tenant compte de la diminution de la capacité, de l'effet de la température et de l'évolution de la tension. La fin de vie d'une batterie est en général définie par la perte de 20% de sa capacité nominale, ou bien l'augmentation de sa résistance interne pouvant atteindre le double de sa valeur initiale [6].

II.3.3 Modélisation du vieillissement des supercondensateurs

Le vieillissement des supercondensateurs est un processus complexe dû à la combinaison de plusieurs phénomènes physiques et chimiques mettant en jeu différentes causes de dégradation des composants. Les principaux phénomènes de dégradation sont la décomposition de l'électrolyte et le décollement du charbon actif de l'électrode [81]. L'interprétation actuelle du vieillissement des supercondensateurs est principalement axée sur la présence de réactions chimiques à l'interface électrode/électrolyte ou des transformations électrochimiques de l'électrolyte modifiant son comportement [103][140].

Comme pour les batteries Li-ion, ce vieillissement est, soit dépendant du temps (calendaire), soit dépendant du nombre de cycle de charge/décharge effectué (cyclage). Le vieillissement calendaire intervient lorsque les supercondensateurs sont au repos ou en stockage [116]. Les paramètres influant pour ce mode de vieillissement sont la température et l'état de charge. En revanche, le vieillissement en cyclage dépend très fortement de l'utilisation des supercondensateurs (profil de cyclage et SOC [141]).

Les performances des supercondensateurs en conditions normales d'utilisation se détériorent lentement avec les phénomènes de vieillissement. Leur dégradation est liée à la diminution de la capacité nominale, à l'augmentation de la température durant l'utilisation liée à l'augmentation de résistance interne [75][141]. La Figure. II. 11-B représente l'évolution relative de capacité et de résistance interne d'un élément supercondensateur (Batscap 650F-2.7V testé à 50°C) en fonction du nombre de cycles. Ces résultats mettent en évidence que le vieillissement des supercondensateurs est bien plus lent que celui des batteries Li-ion. Pour ce qui concerne le cyclage, les essais ont été réalisés à une température ambiante de 50°C et sont basés sur un micro-cycle dont l'allure de la tension et du courant est illustrée sur la Figure. II. 11-A[141].



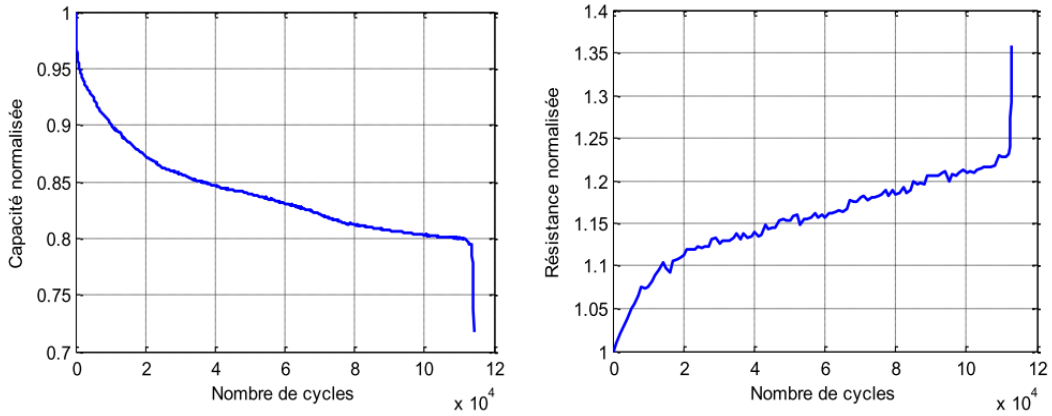


Figure. II. 11: Profil de courant et réponse en tension (A). Évolution de capacité et de résistance interne de supercondensateurs (*Batscap* 650F) en fonction du nombre de cycles à 50°C (B)[141]

Les travaux sur la prévision de la durée de vie des supercondensateurs étaient jusqu'à il y a peu de temps, relativement peu nombreux dans la littérature [40]. La plupart de ces travaux sont basés sur des essais calendaires consistant à maintenir à une valeur constante la tension et la température tout en enregistrant l'évolution des paramètres électriques (la baisse de capacité et l'augmentation de résistance interne) [103] [142]. Les modèles proposés reposent sur les lois d'Arrhenius et d'Eyring dont les deux principaux paramètres influant sur les mécanismes de vieillissement sont la tension et la température.
O. BOHLEN et al [143][144] ont proposé un modèle simple pour évaluer la durée de vie des supercondensateurs sous contraintes variables au cours du temps. Nous avons choisi d'utiliser ce modèle car il est basé sur une approche semi-empirique similaire à celle choisie pour la batterie et nous parait adapté à nos contraintes d'études. Sa loi de comportement est présentée sur la Figure. II. 12 avec ses entrées/sorties.

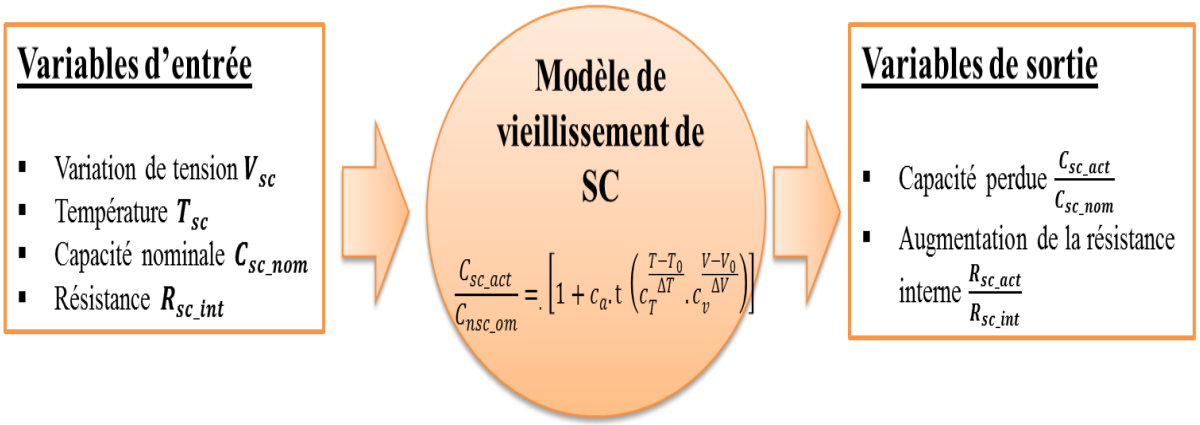


Figure. II. 12: Modèle de vieillissement de supercondensateur retenu

L'évolution de la capacité et de la résistance interne peuvent être estimée à partir de la relation suivante :

$$a_{scp}(t, V_{sc}, T_{sc}) = a_{init}.\left[1 + c_a.t\left(c_T^{\frac{T-T_0}{\Delta T}}.c_v^{\frac{V-V_0}{\Delta V}}\right)\right] \quad \text{(II. 9)}$$

Avec :

V_{sc}, T_{sc} : La tension et la température de chaque cellule de supercondensateurs, c_a , c_T et c_V, les paramètres d'ajustement,

a_{scp} : Capacité C_{sc} ou résistance interne R_{sc} d'une cellule de supercondensateur.

Les constantes T_0, V_0, ΔT et ΔV peuvent être choisies arbitrairement comme points de référence pour le modèle de vieillissement.

La Figure. II. 13 montre la réponse du modèle de vieillissement pour l'évolution des capacités et des résistances internes de cellules supercondensateurs dans un même module. Un profil de courant issu d'un fonctionnement réel du véhicule hybride (±100 A) a été utilisé pour valider ce modèle par les auteurs [143] [144]. En effet, on estime que la tension d'une cellule varie entre 2.7V et 1.35V et la température entre 40° et 55° durant les deux phases de charge et décharge.

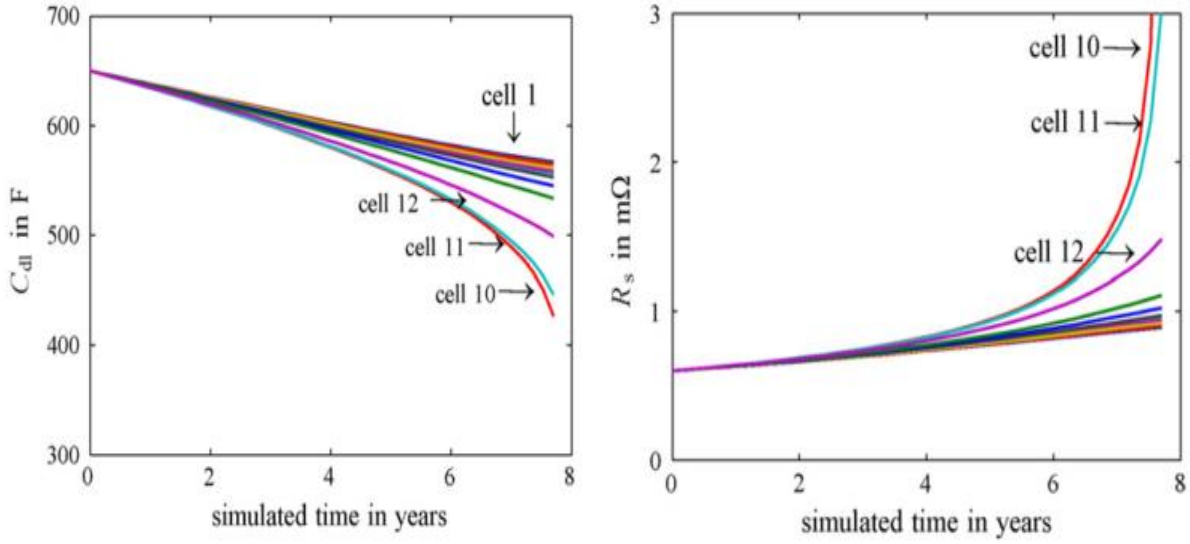


Figure. II. 13: Evolution des paramètres électriques de cellules supercondensateurs : Capacité (A), Résistance interne (B) [144]

On peut constater sur la Figure. II. 13 que ce modèle de vieillissement (relation II.9) ne prend en compte que la phase lente de vieillissement avec une chute en fin de vie, qui se traduit par une décroissance constante de la capacité suivie d'une baisse rapide liée à l'augmentation de la résistance interne (effet de la température). Cette phase complète dure environ 90 % de la durée de vie des supercondensateurs. Par contre, la chute rapide de la capacité en début d'utilisation, estimée à 10 % de la durée de vie, est négligée ici. En effet, les phénomènes de vieillissement apparaissant au début d'utilisation des supercondensateurs restent encore difficiles à modéliser [81].

II.3.4 Synthèse

Comme tous les systèmes électriques, la batterie et le supercondensateur vieillissent inexorablement au fur et à mesure de leur usage. La diminution de la capacité par rapport à la capacité initiale et l'augmentation de la résistance interne sont les principales signatures de fin de vie d'un stockeur [96]. Pour évaluer ces deux indicateurs de vieillissement de batterie et de supercondensateur (SOH), nous avons préféré l'approche semi-empirique basée sur l'impact de trois facteurs dominants : le temps, la température et la tension (ou le SOC).

Dans ce contexte, un modèle multi-physique de la source hybride batteries Li-ion/supercondensateurs est nécessaire pour estimer la durée de vie du stockeur au cours de laquelle les phénomènes physiques de tous ces systèmes interagissent les uns avec les autres

avec des couplages faibles ou forts [141][145]. Il sera utilisé pour une description fine et précise du comportement électrique et prend en compte trois variables dominantes : la température, la tension et le vieillissement. La Figure. II. 14 présente le synoptique du modèle de vieillissement développé dans la suite du chapitre.

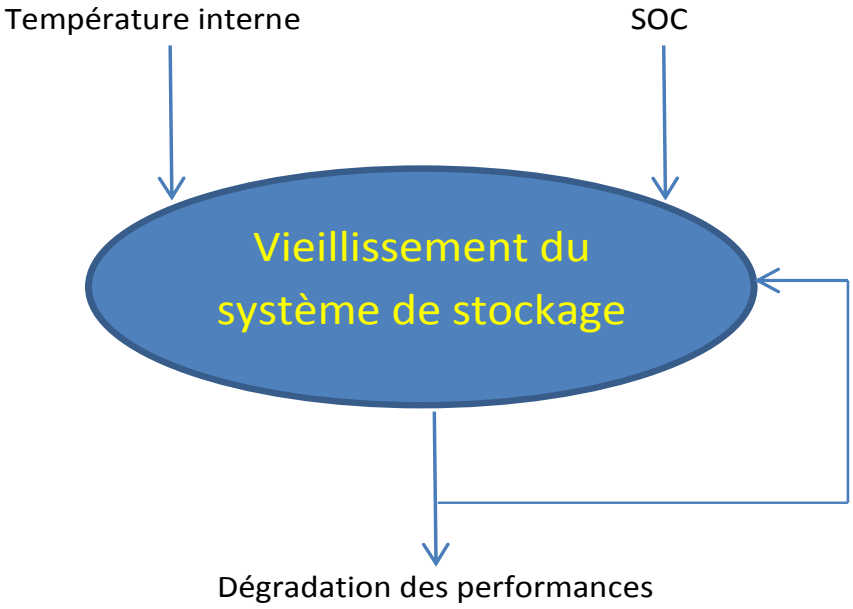


Figure. II. 14: Entrées/sorties du modèle de vieillissement des stockeurs utilisé

Il est nécessaire de connaître la température interne des composants, leur état de charge, leurs caractéristiques actuelles pour connaitre l'évolution de leurs caractéristiques au cours d'une mission (cf. Figure. II. 14).

Ce modèle sera implémenté dans le modèle énergétique global du système et contribuera à l'amélioration des stratégies de gestion énergétique [146][145] ***et au développement de nouvelles stratégies, ce qui est l'un des objectifs visé de notre travail.***

II.4 Modélisation multi-physique de la source hybride Batterie Li-ion / Supercondensateurs

La dégradation des caractéristiques internes des composants de stockage est due à l'évolution de leur état interne et peut être prédit à partir des modèles de vieillissement. Dans ce cadre, le dispositif de stockage est émulé au travers d'un modèle multi-physique qui va suivre l'évolution du stockeur subissant les missions du véhicule (profil charge/décharge) dans lequel il est embarqué. L'état interne du composant dépend de contraintes externes d'utilisation, à savoir principalement la température ambiante et le courant de charge/décharge (cf. Figure. II. 15).

Pour évaluer sa température interne et son état de charge, deux modèles sont nécessaires :

- Le modèle électrique permet de représenter le lien entre les contraintes électriques d'utilisation (profil charge/décharge) et l'évolution de l'état énergétique du composant (SOC)

- Le modèle thermique du composant permet d'avoir accès à la température interne du composant. Il varie en fonction de la température ambiante et des pertes internes, calculable en fonction du courant et des paramètres électriques.

La dégradation du composant est alors donnée par le modèle de vieillissement et est utilisée pour corriger la valeur de ses paramètres électriques, avec un retour des nouvelles valeurs de ces paramètres à la fin de chaque mission dans le modèle électrique. La Figure. II. 15 montre les interactions multi-physiques du modèle construit.

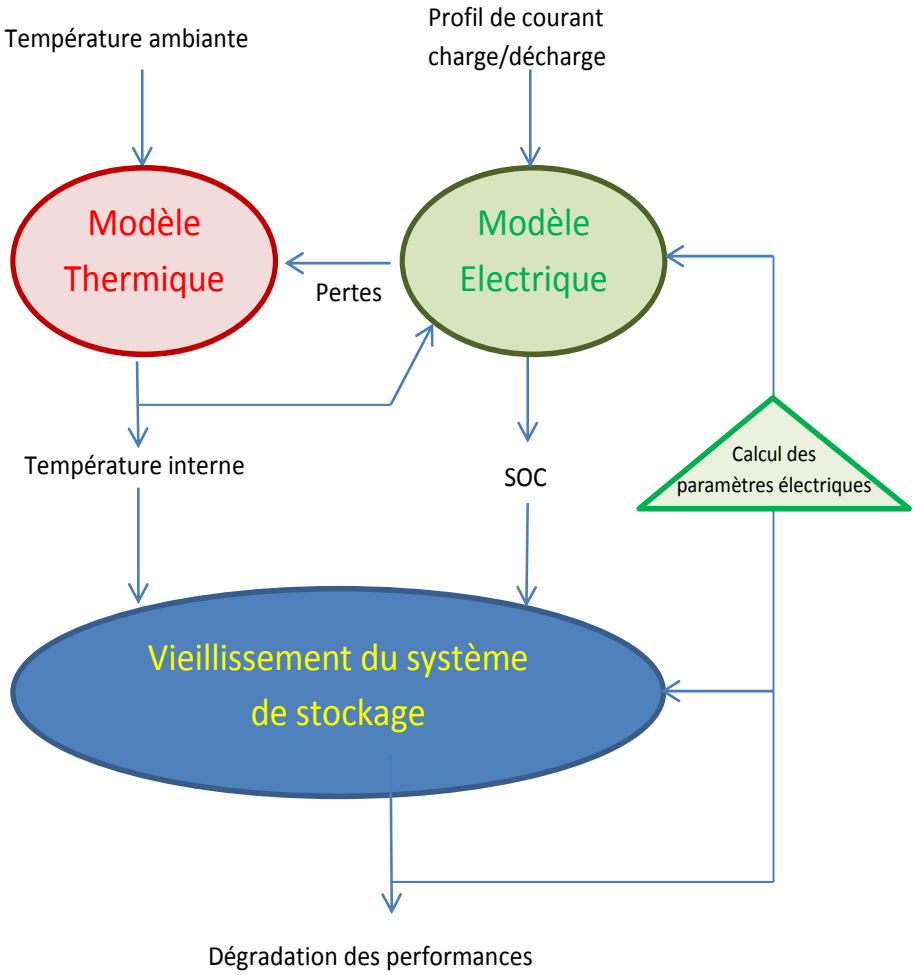


Figure. II. 15: Synoptique du modèle multi-physique (électrique, thermique et vieillissement) du stockeur hybride

Les briques de ce modèle appliquées au stockeur hybride (batterie Li-ion et supercondensateurs) vont être définies dans la suite de ce chapitre. Ce type de modèle demande une représentation appropriée des interactions entre différents domaines tels que la physique, l'électrochimie et la thermique. Il doit permettre d'évaluer la dégradation progressive des performances des composants de stockage alimentant le véhicule électrique, ainsi que mesurer ***l'impact des stratégies de gestion d'énergie sur la durée de vie de la source hybride***, objectif principal de ce travail.

Compte tenu de la linéarité des modèles électrique et thermique du supercondensateur (variation linéaire de la capacité en fonction de l'état énergétique, résistance interne constante,

résistance thermique constante…), la modélisation proposée sera basée sur l'utilisation de travaux issus de la littérature.

Concernant la batterie Li-ion dont le comportement est moins linéaire, les paramètres du modèle électrique proposé seront plus complexes, car dépendant notamment de la phase de fonctionnement (charge ou décharge) et de l'état énergétique du composant (SOC).

II.4.1 Contraintes des modèles et de l'identification des paramètres

La modélisation multi-physique doit être bien ciblée afin de développer un modèle utilisable dans notre contexte de gestion d'énergie. En effet, implanter un modèle avec trois niveaux de représentation (électrique, thermique et vieillissement) peut demander un nombre important de tests de caractérisation et mobiliser trop de données à traiter. Il convient d'identifier les principales contraintes qui vont conditionner nos choix de modèles et de méthodes d'identification, avant de commencer la phase de modélisation du vieillissement pour les deux composants de stockage (batterie Li-ion HE et Supercondensateur).

Ces modèles doivent :

- Représenter les phénomènes physiques dominants agissant sur le vieillissement
- Utiliser un nombre réduit de paramètres, tout en traduisant correctement le comportement du composant
- Utiliser un nombre d'essais limité et simples pour l'identification des paramètres
- Etre compatibles entre eux (modèles électrique, thermique et de vieillissement),

Concernant les deux modèles électriques (batterie et supercondensateur), il faut noter qu'ils vont être intégrés dans le modèle multi-physique pour obtenir les résultats de vieillissement du stockeur pour chaque stratégie de gestion testée. Le modèle de vieillissement est fortement dépendant de la tension du stockeur. Il a été choisi dans un premier temps d'opter pour des modèles électriques avec des constantes de temps suffisamment rapide, de façon à ce que l'évolution temporelle des formes d'ondes de tension suive de façon assez proche les formes d'ondes expérimentales. Ces modèles électriques pourront certainement être ultérieurement simplifiés, s'il s'avère que, par comparaison avec ces premiers résultats (qui serviront de référence), des modèles simplifiés aboutissent à des résultats de vieillissement comparables mais avec des temps de calculs largement réduits.

Dans la suite de ce chapitre, la modélisation multi-physique des deux composants de stockage (batterie Li-ion HE *SLPB902116216* et supercondensateur *BCAP0350 E270T11*) est présentée en prenant en compte ces contraintes.

II.4.1.1 Banc de tests pour le vieillissement des batteries Li-ion

Un banc de test (cf. Figure. II. 16) a été développé au pôle **S2ET** du laboratoire **ESTACA'LAB -Laval** afin de réaliser les essais de vieillissement en cyclage accéléré, tout en essayant d'être le plus proche possible de l'application véhicule électrique. Il est constitué de deux principaux composants qui sont :

- Une enceinte climatique
- Un banc de charge/décharge.

Ce dernier peut être utilisé pour effectuer des essais en cyclage permettant la charge et la décharge avec un module tampon de capacité 7 fois supérieure à celle des cellules testées, une alimentation de 10kW assurant un fonctionnement 24h/24h et 7jours/7 du banc [7]. De plus, un module Compact RIO, NIcRio-9024, de National Instruments a été utilisé pour assurer à la fois le contrôle des cycles et l'acquisition des données avec une grande précision (fréquence d'échantillonnage de 10kHz). Ce module possède un FPGA programmable avec un environnement LabVIEW. Les spécifications et les caractéristiques techniques du convertisseur, des cartes d'interface, de l'enceinte climatique et du programme LabVIEW sont présentés dans **l'annexe B**.

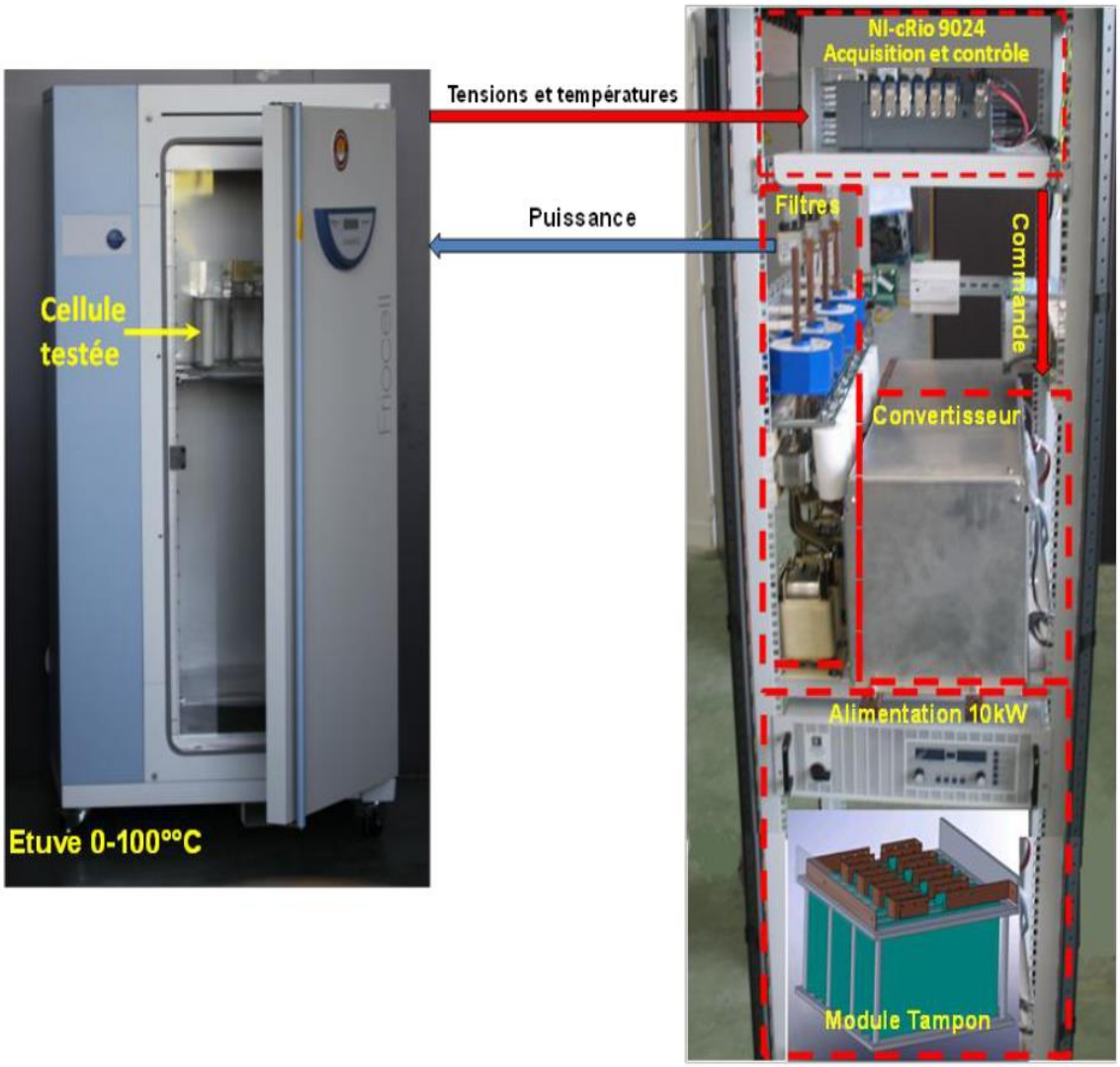


Figure. II. 16: Banc de test ESTACA-Laval

II.4.1.2 Protocole de test de vieillissement en cyclage des batteries Li-ion

La procédure de test suivie pour l'estimation de durée de vie des batteries est composée de deux phases principales :

- Une phase de cyclage basée sur un profil de courant représentatif d'un véhicule électrique alimenté par une source hybride
- Une phase de caractérisation temporelle pendant laquelle on mesure l'impact du cyclage sur la variation de la résistance interne et la capacité [7].

La Figure. II. 17 représente le séquencement du test de vieillissement en cyclage d'une cellule de batterie Li-ion.

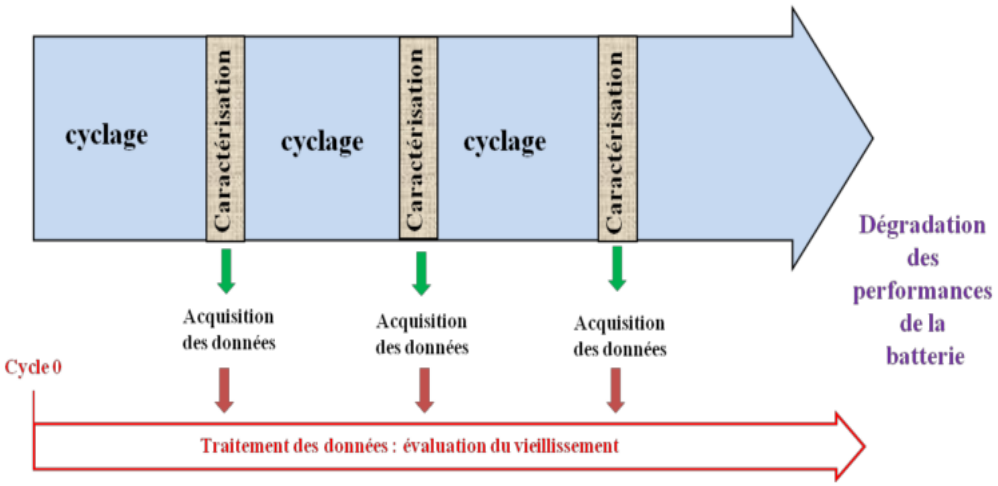


Figure. II. 17: Schéma de déroulement des tests de vieillissement en cyclage [7]

La batterie est considérée en fin de vie lorsque ses performances ne sont plus assurées. Ceci est défini dans notre cas à 20% de perte de la capacité par rapport à la valeur initiale. Les séquences d'essais sont illustrées par l'organigramme de la Figure. II. 18.

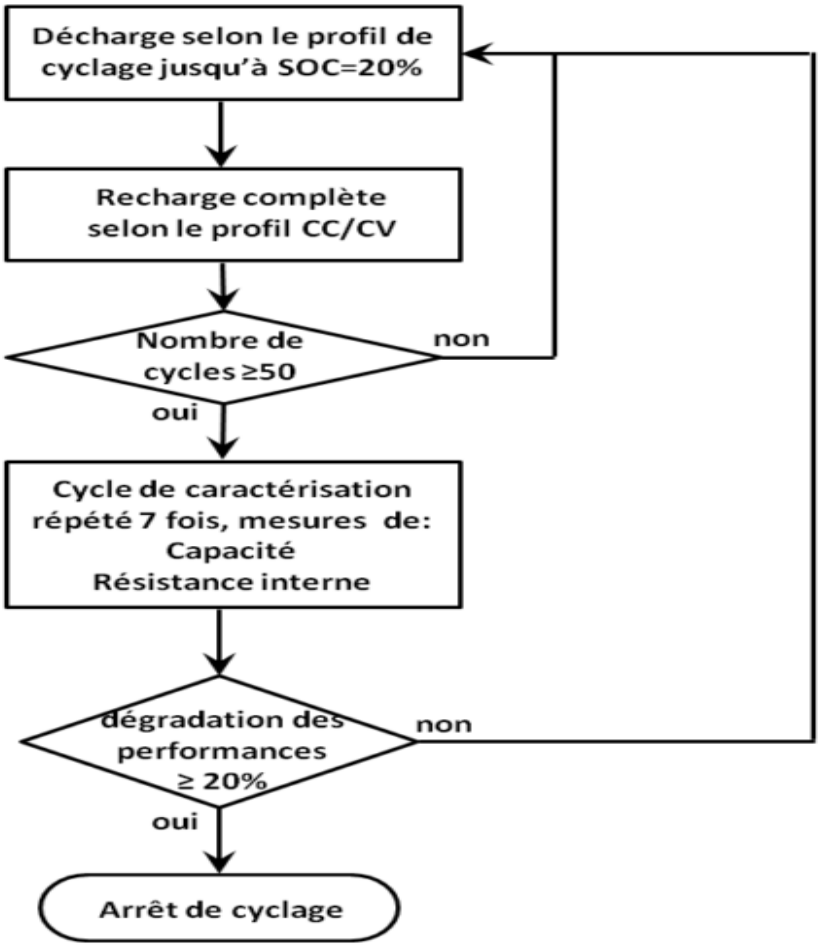


Figure. II. 18: Organigramme des séquences d'essais de vieillissement en cyclage [7]

Les profils de puissance ou de courant directement issus de mesures ou estimés par rapport aux cycles de conduite normalisés sont relativement complexes. Il existe dans la

littérature plusieurs approches de simplification de ces profils, qui s'appuient sur des méthodes de comptage et de classification employées en statistiques [30][93].

Dans notre cas, nous avons utilisé une méthode de classification des contraintes en niveaux d'intensités développée par *R.SADOUN* [7] et inspirée de *Q.BADYE* [30] . Elle a pour objectif de réduire les temps de cyclage tout en conservant les grandeurs caractéristiques les plus importantes pour les profils de test, telles que l'intensité maximale de courant et la quantité de charge échangée. La simplification adoptée dans cette approche nous permet de passer d'un profil de courant à impulsions complexes à un signal sous forme de pallier de courant avec des valeurs de courant bien définies. La Figure. II. 19 illustre le profil de courant de cyclage (courant ref) superposé avec le profil de courant réel pour les deux technologies testées, *Kokam* Ko40HE et Ko40HP. Avec cette approche, la durée des cycles, et par la même occasion celle des essais de vieillissement, est réduite de 35% par rapport aux profils réels [7]

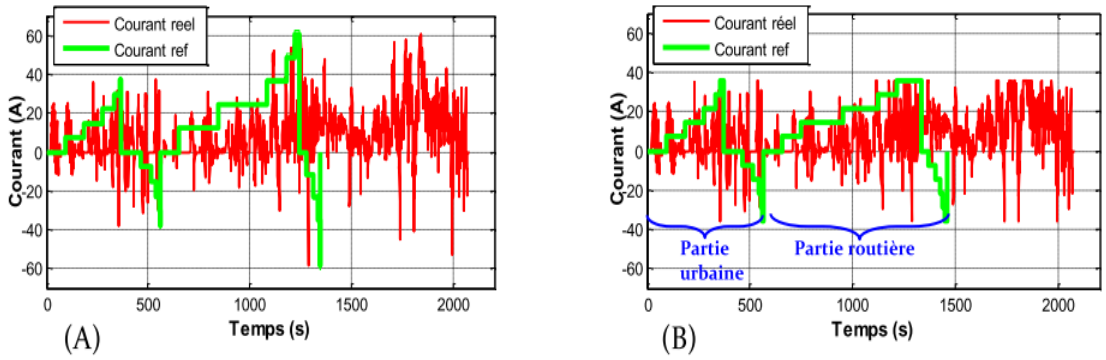


Figure. II. 19: Profil de courant de cyclage superposé avec le profil de courant réel pour les deux technologies *Kokam* Ko40HP (A mono-source) et Ko40HE (B source hybride) [7]

En ce qui concerne la phase de recharge, elle intervient lorsque la profondeur de décharge souhaitée est obtenue. Cette recharge permet de ramener à 100% l'état de charge des batteries. Le cyclage peut ensuite recommencer jusqu'à l'étape de caractérisation. La recharge suit le protocole défini par le fabricant *Kokam*. Ce profil est constitué d'une recharge à CC/CV (*Constant current/Constant Voltage*), précédée d'une phase de repos (cf. Figure. II. 20).

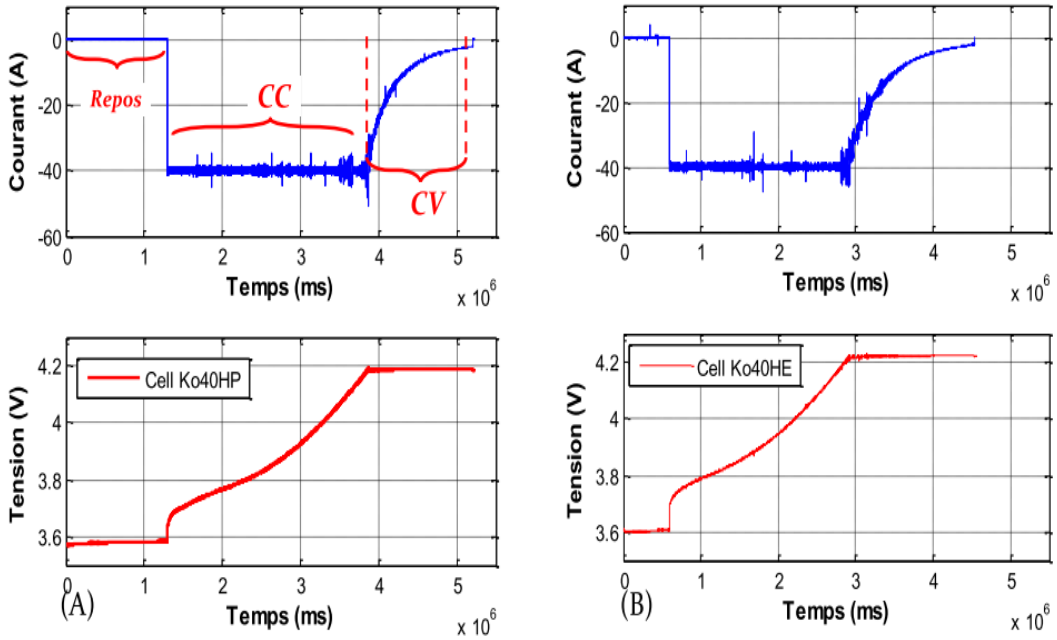


Figure. II. 20: Courant et tension des cellules de batteries HP (A) et HE (B) pendant la recharge à CC/CV [7]

II.4.1.3 Protocole de caractérisation temporelle

Le vieillissement des éléments de batterie est évalué par des mesures de la résistance interne et de la capacité. Ces caractéristiques sont basées sur les données de mesure de courants et tensions de chaque élément. Des cycles réglementaires de mesure ont été définis en se basant sur des normes internationales, telle que la norme CEI-62660-1/2 qui s'applique à toutes les batteries[7]. Cette norme exige une recharge complète de l'élément de batterie suivie d'une décharge à courant constant jusqu'à la tension finale donnée par le fabricant (cf. Figure. II. 21).

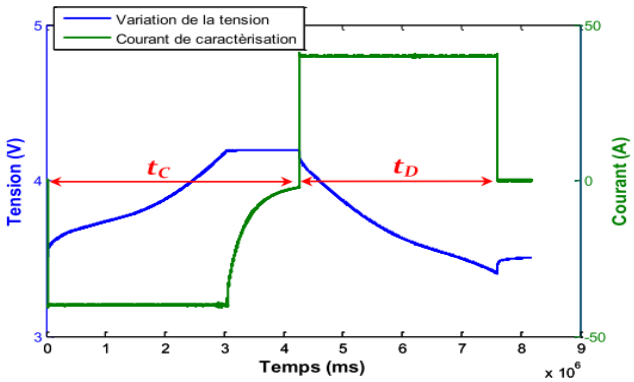


Figure. II. 21: Profil de courant et de tension d'une cellule de batterie durant le cycle charge/décharge de caractérisation [7]

Dans notre cas, le cycle charge/décharge de caractérisation choisi (cf. Figure. II. 21) est décomposé en :

- Une phase de charge à courant constant (CC) avec un régime 1C (40A) jusqu'à la tension maximale d'un élément de batterie de 4.2V.
- Une phase de charge à tension constante (CV) avec un arrêt lorsque le courant passe sous les 2A (0.05C).
- Une phase de décharge à 1C (40A) jusqu'à la tension de 3.4V. Cette tension est choisie de manière à éviter un dysfonctionnement dans la partie contrôle du banc de test. Ce dysfonctionnement peut être provoqué par les bruits de mesure qui entrainent une chute brusque de la tension au-delà de la tension minimale de sécurité de 2.7V.
- Une phase de repos de 10 minutes (imposée par le constructeur).

II.4.2 Modèles électriques des stockeurs

II.4.2.1 Modélisation électrique des batteries Li-ion

La batterie est un système électrochimique complexe qui est à la fois non linéaire et non stationnaire. Cette non-linéarité de la batterie est due au fait que la relation entre le courant appliqué en entrée et la tension récupérée en sortie ne peut être exprimée par une relation linéaire. La batterie est non stationnaire parce que les caractéristiques des paramètres électriques internes de la batterie sont variables pendant un cycle de charge/décharge et durant le cycle de vie d'une batterie [96]. Dans ce contexte, des phénomènes électrochimiques statiques et dynamiques agissent de concert au niveau de chacune des électrodes [92]. Afin de modéliser ces phénomènes dans une cellule de batterie, on distingue plusieurs types de modèles qui peuvent être classés selon leur approche de modélisation.

La première méthode de modélisation consiste à utiliser les lois de l'électrochimie (**modèles électrochimiques**) qui permettent, après caractérisation des espèces, d'obtenir une

bonne précision. La seconde méthode est basée sur l'utilisation des propriétés physiques associées à des tests expérimentaux (**modèles empiriques**) permettant d'utiliser des mesures, ensuite interpolées et éventuellement extrapolées. Une méthode de modélisation de type **mathématique** est aussi utilisée pour le développement de modèles de batterie. Ces modèles utilisent la résolution numérique et sont basés sur une approche phénoménologique, au lieu d'équations ou de courbes de paramètres physicochimiques [30]. La dernière méthode repose sur la modélisation circuit (**modèles circuits électriques équivalents**) à constantes localisées, qui permet d'affecter à chaque réaction chimique une impédance [147]. Elle s'appuie sur l'analogie entre les domaines électrochimique et électrique. Ainsi, les éléments électriques du circuit équivalent permettent de décrire les phénomènes qui interviennent au sein du système [75][148].

En résumé, c'est l'exigence de l'application visée qui fixe le degré de complexité du modèle et la méthode de modélisation. Celui-ci peut favoriser la simplicité en tenant compte de plusieurs hypothèses simplificatrices, ou exiger plus de performance en intégrant la quasi-totalité des caractéristiques physico-chimique de la batterie [95].

A. Modèles électrochimiques

Les modèles électrochimiques sont basés sur les processus physico-chimiques qui ont lieu au sein de la batterie. Ceux-ci tiennent compte des réactions régissant le fonctionnement des batteries associés à des équations liées aux paramètres physicochimiques tels que la conductivité des ions, la géométrie et les dimensions réelles des électrodes [30][147]. Ces modèles mettent en effet en jeu plusieurs de ces équations aux dérivées partielles, et la complexité du modèle augmente alors exponentiellement avec la précision désirée. Il n'est pas rare, ainsi, de se retrouver avec plusieurs dizaines de paramètres évoluant au cours de l'utilisation [30]. On trouve dans littérature plusieurs modèles électrochimiques [149][150][151] tels que les modèles de *MARC DOYLE* [152] et *THOMAS FULLER* [153]. Ces modèles sont sans doute les plus cités dans le domaine de la modélisation électrochimique des batteries Li-ion [154]. Doyle explique que le principal avantage de la modélisation d'un système électrochimique est la possibilité de mieux appréhender les distributions de courant, de potentiel et de concentration, ce qui est souvent impossible à déterminer expérimentalement. Dans ce contexte, des modélisations encore plus complexes ont été effectuées par *SMITH et al.* [155][156], ainsi que par *NEWMAN et al.*[157], portant sur les transferts électrolytiques et la perte de lithium.

Tous ces modèles sont basés sur des représentations de phénomènes qui ne sont pas mesurables en tant que tels (transport de matière et de charges). De plus, les informations concernant les paramètres à utiliser dans les modèles ne sont pas encore toutes disponibles et varient considérablement d'un auteur à l'autre pour un même couple électrochimique [154]. En conséquence, le développement et l'utilisation de ces modèles nécessitent un grand niveau d'expertise dans le domaine de l'électrochimie. Un second inconvénient, lié à la complexité des équations utilisées dans ce type de modèle, empêche toute résolution manuelle ou analytique. Il faut donc utiliser une méthode de résolution numérique avec un temps de calcul conséquent.

B. Modèles empiriques

Les modèles empiriques de batteries sont basés sur ses propriétés physiques et des tests expérimentaux. Son principe de base consiste à exprimer la variation des propriétés physiques de la batterie à partir d'interpolations, de régressions et d'extrapolations de données obtenues de manière expérimentale [6][47]. La différence majeure entre ces modèles et les autres se situe dans le fait que les équations des modèles analytiques sont remplacés par des courbes (look-up

table) [158][6]. Par ailleurs, des variantes ont été effectuées par *R.DARLING* et al [159] couplant des modèles empirique et électrochimique. L'idée est de substituer une équation où les lois électrochimiques sont trop complexes ou limitées par une courbe de tendance issue d'essais [30].

L'inconvénient majeur des modèles empiriques est que la construction de ce type de modèle ne tient pas compte des paramètres et des processus physiques ou chimiques. En l'absence totale d'équations et de compréhension des phénomènes, il faut donc faire des tests pour chaque type de batteries. Enfin, les erreurs de mesure commises impactent directement sur la fiabilité des modèles (impliquent la linéarité sur l'extrapolation). Dans ce contexte, l'utilisation de ce genre de modèle est délicate, car l'influence de multiples paramètres (courant, température, SOC…) rend leur influence délicate à isoler [30].

C. Modèles mathématiques

La modélisation mathématique (type « boîte noire ») est mise en œuvre dans le cas où l'on dispose de peu de connaissances sur le système étudié, ou si le modèle de connaissance établi est trop complexe pour être exploité, ce qui est le cas des batteries. Ces modèles mathématiques traitent la batterie comme un processus accessible uniquement via ses entrées-sorties et ne tiennent compte que des mesures externes comme le courant, la tension et la température en terme d'excitation et de réponse respectives [95]. Actuellement, un grand nombre d'approches existent, tels que les modèles à base de réseaux de neurones artificiels ou de logique floue. Ces techniques résolvent les limitations des approches conventionnelles par l'extraction des informations désirées directement depuis les données des batteries [30]. On trouve ce genre de modèles, en particulier dans les travaux qui traitent des estimations de l'état de charge (SOC) ou de la capacité des batteries [160][161][162][163][164]. Ce type de modèle est souvent difficile à mettre en œuvre et n'offre que peu de garanties sur les performances des systèmes, surtout si ces derniers sont complexes. En effet, il faut fournir énormément de données d'entrée et de sorties mesurées, et cela sur une certaine durée, ce qui n'est pas toujours disponible pour les batteries [30]. Ainsi, les modèles existants de ce type n'ont pas encore prouvé leur efficacité pour simuler fidèlement les comportements des batteries.

D. Modèles basés sur des circuits électriques équivalents

Différents modèles basés sur les circuits électriques équivalents ont été proposés dans la littérature pour représenter le comportement d'une batterie, simuler ses performances et estimer son état charge (SOC). En effet, selon la spécificité de l'application et en particulier selon la précision souhaitée, ces modèles peuvent s'appuyer sur des simplifications comme la prise en compte ou pas d'une non-linéarité liée à un phénomène particulier [95][47][148]. Dans ce contexte, on distingue deux types de modèles basés sur les circuits électriques équivalents :

- **Modèle simple de type « R-E »**

La batterie est représentée par une force électromotrice E, représentant la tension à vide V_{OCV}, et d'une résistance R représentant les surtensions ohmiques (cf. Figure. II. 22)[75]. Ces deux paramètres varient parfois également avec l'état de charge de la batterie pour mieux se rapprocher du comportement réel de la batterie [165].

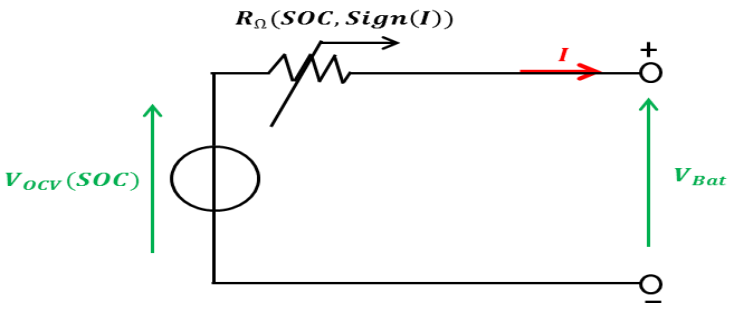


Figure. II. 22: Modèle type R-E

En général, ce modèle est très simple, et donc facile à mettre en œuvre pour un premier modèle de simulation, par contre il n'est pas adapté aux régimes transitoires et très éloigné du comportement physique d'une batterie réelle [75].

- **Modèle multi-branches**

Les modèles multi-branches utilisant les circuits électriques équivalents sont basés sur l'analogie électrique des phénomènes physiques et chimiques (transfert de charge, capacité de double couche et diffusion) qui apparaissent au sein des batteries, à travers l'association d'éléments d'impédance bien déterminée [95]. Ces circuits électriques sont largement utilisés en électricité et reposent sur un assemblage de composants du type résistance et condensateur ou CPE, en association parallèle ou série. On peut ainsi associer les paramètres physiques de la cellule (porosité, épaisseur du collecteur de courant, couche de passivation, résistance de contact) à des grandeurs du domaine électrique : tension, résistance, capacité, inductance [6].

On note que les choix effectués sur ces paramètres fixent le degré de complexité du modèle développé. Enfin, ces modèles deviennent complexes si ils intègrent les non linéarités et les dépendances des facteurs qui agissent directement sur le comportement d'une batterie tels que le SOC, la température, le courant et le vieillissement [95]. Le Tableau.II.6 montre les principaux dipôles électriques utilisés dans la modélisation multi-branches des batteries par des circuits équivalents.

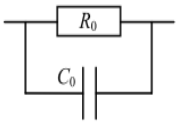
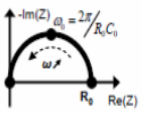
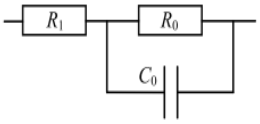
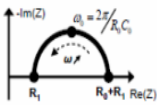
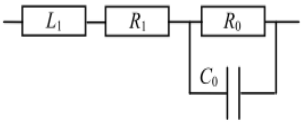
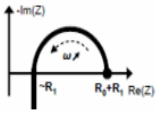
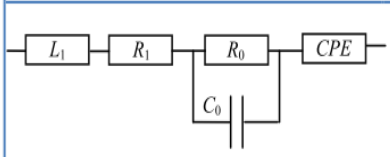
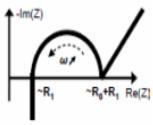
Dipôle	Impédance	Spectre d'impédance	Remarque
	$\frac{R_0}{1+jR_0C_0\omega}$		Modélisation de la capacité double couche en parallèle avec la résistance de transfert de charge.
	$R_1+\frac{R_0}{1+jR_0C_0\omega}$		L'ajout d'une résistance purement ohmique R_1 décale le spectre vers la droite.
	$jL_1\omega+R_1+\frac{R_0}{1+jR_0C_0\omega}$		L'inductance modélise le comportement à hautes fréquences.
	$jL_1\omega+R_1+\frac{R_0}{1+jR_0C_0\omega}+\frac{1}{Qp^\alpha}$		Le CPE est utilisé pour fitter correctement le spectre en basses fréquences et pour tenir compte de la diffusion.

Tableau. II. 6: Exemples de modèles « circuits électriques équivalents » [95]

Dans la littérature, il existe de nombreux modèles de batteries de ce type [147]. Ces modèles sont alors soit statiques (décharge à courant constant) [166] [138], soit dynamiques (prise en compte de la dynamique chimique de la batterie) [167][168].

LIAW et al. [134] présentent un modèle simple pour simuler la charge et la décharge des batteries Li-ion. Le modèle est composé d'une résistance représentant les pertes ohmiques en série avec une branche RC parallèle modélisant la partie non linéaire faradique. Ce modèle, bien que simple, atteint toutefois très rapidement ses limites [95]. Plus récemment, un modèle a été développé par *S. BHIDE et al.* [169] pour une application véhicules hybride. Ce modèle utilise les analogies électriques, électrochimiques et thermiques, afin de décrire le comportement des batteries Li-ion.

A. HENTUNEN et al.[170] utilisent les circuits équivalents afin de développer un modèle dynamique de batteries Li-ion valable pour l'application véhicule électrique. L'avantage majeur de ce modèle est la possibilité de pouvoir l'appliquer à d'autres technologies de batteries en identifiant les paramètres avec des tests relativement simples. Récemment, *D.S SHIN et al.*[171] a développé des modèles à base de circuits électriques équivalents pour une batterie Li-ion de type Kokam 20Ah. Ce modèle est composé d'une résistance représentant les pertes ohmiques en série avec un CPE (*Constant Phase Element*) qui modélise le phénomène de transfert de charge, la capacité de double couche et la diffusion à l'intérieur de la cellule. Il représente mieux le comportement de la batterie que les modèles à branches RC parallèle. D'autres travaux ont modélisé le fonctionnement des batteries Li-ion à l'aide de circuits électriques plus précis [172][173][174][175][176].

Les modèles par circuits électriques équivalents sont en général utilisés pour la simulation dans le domaine temporel en faisant en sorte que les paramètres utilisés dans ces modèles soient représentatifs des phénomènes que l'on souhaite prendre en compte.

E. Synthèse des modèles batterie

Dans notre étude, le modèle de batterie choisi doit prendre en compte les particularités de la technologie Li-ion et de l'application véhicule électrique. De plus, il doit être suffisamment simple, et en même temps être capable de simuler fidèlement le comportement de la batterie afin de l'intégrer facilement dans le modèle global du véhicule développé pour tester les stratégies de gestion d'énergie entre les deux stockeurs. Le Tableau. II. 7 synthétise les avantages/inconvénients des différentes familles de modèles cités dans cette partie.

Famille de modèle	**Contraintes modélisation de notre étude**				
	Représentation des phénomènes physiques	**Nombre de paramètres (Simplicité)**	**Compatibilité entre les sous-modèles**	**Identification des paramètres**	**Temps de calcul**
Electrochimiques	☺	☹	☺	☹	☹
Empiriques	☹	☺	☹	☺	☺
Mathématiques	☹	☹	☹	☹	☹
Circuits électriques équivalents	☺	☺	☺	☺	☺

Tableau. II. 7 : Avantages et inconvénients des familles de modèles de batterie

Compte-tenu des contraintes de notre étude, nous nous sommes orientés vers des modèles de type circuits électriques équivalents. Ils ont l'avantage de demander relativement peu de moyens expérimentaux pour l'identification, sont simples à mettre en œuvre et faciles à utiliser. Enfin, ils offrent un bon compromis entre le temps de calcul et la précision de la simulation. Bien entendu, cette approche de modélisation est une simplification. Elle suppose que les différents phénomènes physiques et chimiques (le transfert de charge, la capacité de double couche et la diffusion) soient indépendants les uns des autres, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Toutefois, l'erreur introduite par l'utilisation de cette forme de modèle est suffisamment faible pour que cette simplification puisse être considérée comme acceptable [177].

F. Modèle circuit de batterie proposé

Le modèle développé dans notre étude, basé sur les circuits électriques équivalents, est le modèle dynamique présenté en Figure. II. 23.

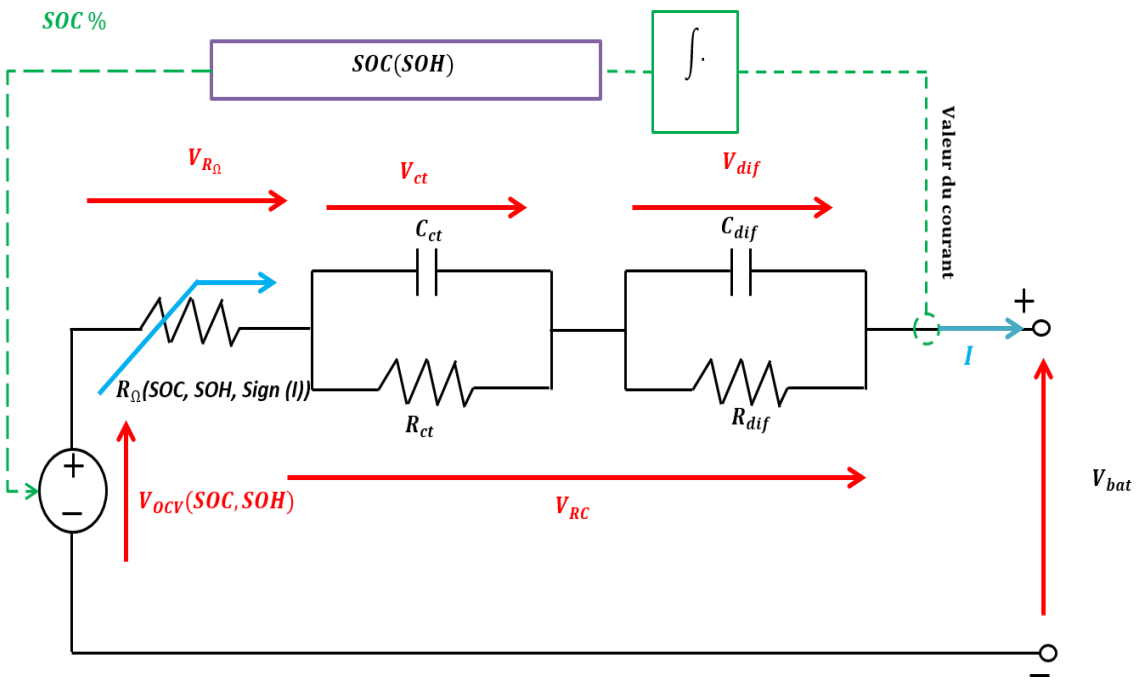


Figure. II. 23: Modèle dynamique de cellule de batterie

Ce modèle « classique » en termes de « circuit électrique équivalent » est formé de 4 éléments principaux qui permettent de représenter les principaux phénomènes physiques identifiables au travers des essais de cyclage appliqués sur nos éléments :

- Une source de tension continue V_{OCV} qui représente la tension à vide de la batterie en fonction du SOC.
- Une résistance ohmique R_Ω représentant la résistance des collecteurs de courant, des interconnections et de l'électrolyte ; elle dépend du SOC et signe du courant I.
- Deux circuits R_{ct} C_{ct} et R_{dif} C_{dif} représentant les surtensions en charge ou en décharge engendrées par le transfert des charges et la capacité de double couche, assurant ainsi un bon comportement dynamique du modèle.

L'estimation du SOC de la batterie est nécessaire pour le bon fonctionnement de ce modèle car ses paramètres en dépendent. Il est estimé en utilisant l'équation (II.2) avec la prise en compte du vieillissement (dégradation de la capacité énergétique). La connaissance du signe de courant batterie I est également indispensable, *un courant négatif correspondant ici à la recharge*.

L'intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité (circuit équivalent), sachant que l'on précisera par la suite comment sont paramétrés et identifiés R_Ω et V_{OCV}, grandeurs qui dépendront du SOC et du courant. Ceci permettra de prendre en compte certaines non-linéarités du comportement de la batterie. Le modèle pourra atteindre des performances dynamiques adaptées à l'application véhicule électrique.

II.4.2.2 Identification des paramètres du modèle électrique batterie

La détermination des paramètres du modèle basé sur les circuits électriques équivalents peut s'effectuer soit par des essais spécifiques, soit par spectroscopie d'impédance électrochimique, soit par identification temporelle en utilisant la chronopotentiométrie.

A. Identification fréquentielle

La spectroscopie d'impédance électrochimique est une technique très utilisée dans de nombreux domaines scientifiques depuis quelques décennies [95]. L'intérêt et la quantité d'informations qu'elle apporte dans l'étude des mécanismes réactionnels de batterie se déroulant à l'interface électrode/électrolyte ne sont plus à démontrer. Cette méthode d'identification, reposant sur l'analyse fréquentielle et la mesure d'impédance comme montré sur la Figure. II. 24, se fait généralement en mode galvanométrique : un courant sinusoïdal de fréquence variable éventuellement superposé à un courant continu est appliqué à la batterie ; la réponse en tension alternative est relevée pour toute la gamme de fréquence définie et permet de déterminer l'impédance complexe de la batterie [75].

Pour l'analyse des réponses, il existe deux modes de représentation des diagrammes d'impédance électrochimique. Ils peuvent être soit tracés en coordonnées cartésiennes dans le plan complexe de **Nyquist**, en plaçant les valeurs Zr(ω) en abscisse et −Zj(ω) en ordonnée (cf. Figure. II. 24) ou visualisés sur les diagrammes de **Bode**. Dans ce cas, le module de l'impédance |Z| et le déphasage φ sont tracés en fonction de la fréquence, représentée en général en échelle logarithmique. Ces deux visions différentes sont complémentaires et chacune d'entre-elles montre un aspect particulier du diagramme d'impédance [177].

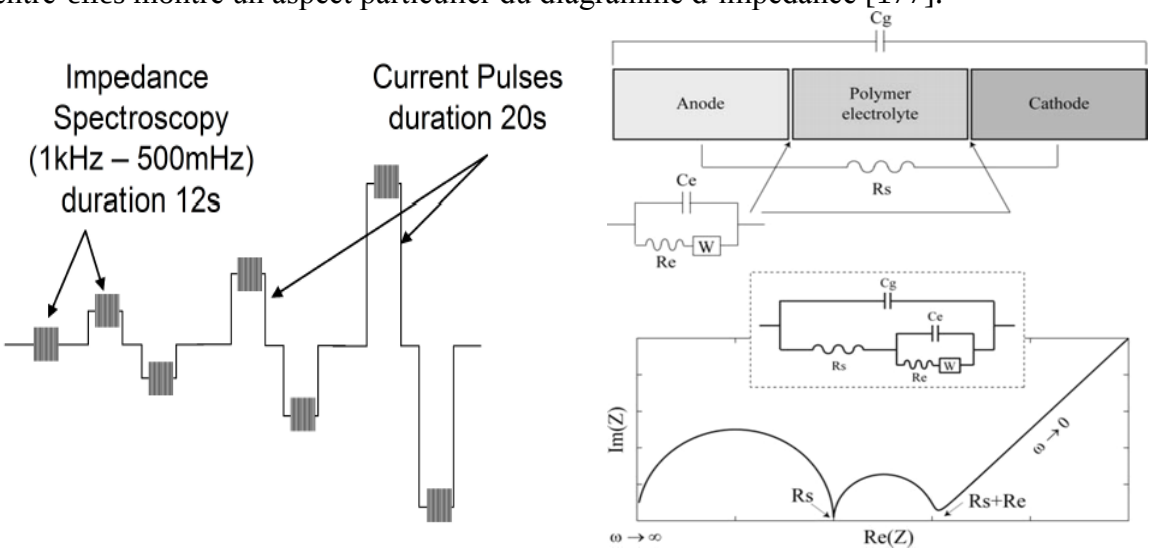


Figure. II. 24: Identification fréquentielle [178]

Par conséquent, dans le plan de Nyquist ou de Bode, le spectre d'impédance obtenu permet de visualiser les zones d'influence des différents phénomènes électrochimiques intervenant au sein de la batterie. La séparation en trois zones distinctes de la caractéristique d'impédance, permet d'exprimer l'impédance comme la somme de trois termes [92] :

$$Z(s) = R_{\Omega} + \frac{R_{dll}}{1 + sR_{dll}C_{dl}} + Z_w(s) \qquad \text{(II. 10)}$$

- R_{Ω} représente la somme des résistances de connectiques et d'électrolyte, identifié dans les zones des hautes fréquences.
- Le circuit $R_{ct}\ C_{ct}$ parallèle représente le demi-cercle dans le plan de Nyquist, caractéristique du phénomène de transfert de charge et la capacité de double couche basse fréquence.
- L'impédance de Warburg Z_w représente le phénomène de diffusion, théoriquement caractérisé par une pente à 45° sur le diagramme de Nyquist.

Une inductance est parfois ajoutée pour prendre en compte les phénomènes hauts fréquence. Celle-ci est généralement négligée en comparaison aux autres phénomènes plus significatifs dans le cadre d'une application de traction électrique [92]. Les valeurs des éléments constituants le modèle à base de circuits électriques équivalents peuvent être déterminé pour différentes températures, courants, vieillissements et SOC.

L'avantage de cette technique d'identification est la possibilité de séparer les différentes cinétiques associées aux phénomènes physiques et réactions électrochimiques. De plus, c'est une méthode qui sollicite très peu la batterie comparée à des tests d'excitation temporels avec des impulsions à fort niveau de courant. Néanmoins, l'identification fréquentielle nécessite un équilibre thermodynamique afin d'éviter une dérive en tension de la batterie qui se superposerait au signal de sortie. Cet équilibre thermodynamique n'est pas toujours assuré, notamment dans le cas où les mesures d'impédance sont effectuées avec un fort courant continu qui va perturber la mesure en rajoutant une dérive de la tension et une variation du SOC au cours de l'essai. Toutefois, une solution basée sur la compensation de ces dérives en tension et en SOC est envisagée durant l'essai d'identification, mais cette méthode se montre plus délicate au fur et à mesure que l'on descend en fréquence car les durées mises en jeu, sont de plus en plus grandes et la dérive en tension de plus en plus importante [75]. La Figure. II. 25 extraite de [6], illustre cette méthode d'identification pour la batterie Li-ion utilisée dans notre étude (*DowKokam 40 Ah*). La mesure de spectroscopie d'impédance est réalisée à courant de polarisation nul, à température constante de 20C° et à différents états de charge.

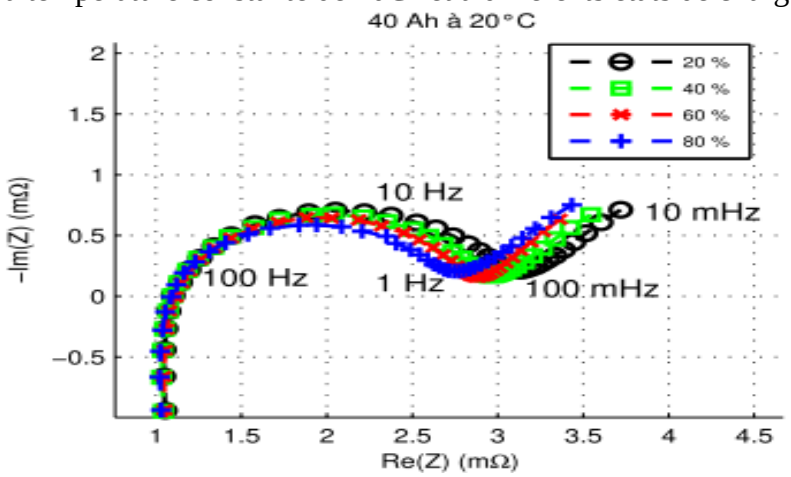


Figure. II. 25: Diagramme de Nyquist d'une batterie Li-ion (*40 Ah*) en fonction du SOC [93]

B. Identification temporelle

L'identification temporelle est bien plus utilisée dans les applications de puissance car les profils de courant utilisés sont plus proches de l'usage réel. Cette méthode repose sur une mesure de chronopotentiométrie obtenue à partir du rapport de tension/courant de la batterie [93]. Les profils de courant utilisés sont simples et ils sont composés d'un ou plusieurs créneaux réalisés en charge et en décharge. Des échelons de courant de longues durées, faibles amplitudes ou de plus courtes durées fortes amplitudes sont appliqués à la batterie. Les premiers types d'échelons permettent de caractériser les phénomènes à dynamique lente (la diffusion). Par contre, les seconds types d'échelon permettent de caractériser les phénomènes à dynamiques plus rapides (la somme des résistances de connectiques et d'électrolyte, de transfert de charge et de polarisation) et de mettre en évidence la non linéarité de certains éléments du modèle notamment avec le courant [75]. Dans ce contexte, on trouve le test spécifique *Hybrid Pulse Power Characterization* (HPPC) utilisé pour l'application *Power-Assist*. Il consiste à appliquer, tous les 10 % d'état de charge, un échelon de courant, en charge et en décharge, de 10s d'intensité égale à 25 % ou 75 % du courant maximal autorisé par le fabricant [93].

Enfin, l'identification temporelle sur cycles réels ou utilisant les profils de courant similaires à ceux appliqués à la batterie en traction électrique permet de plus d'évaluer l'impédance de la batterie en temps réel, sans réaliser d'essais supplémentaires.

C. Synthèse et choix de la méthode d'identification

Le Tableau. II. 8 présente un résumé des avantages et inconvénients de chaque méthode d'identification :

Méthode d'identification	Avantages	Inconvénients
Méthode fréquentielle	• Permet de séparer les différentes cinétiques associées aux phénomènes et réactions électrochimiques. • Sollicite très peu la batterie en comparaison à des tests d'excitation temporels	• Sensible aux bruits de mesure et à la distorsion des signaux induite par les non linéarités de batterie. • Nécessite un grand nombre de mesures expérimentales. • Basée sur l'hypothèse de linéarité et d'invariance dans le temps.
Méthode temporelle	• Les mesures d'impédance sont effectuées pour des valeurs de courant importantes. • Nécessite moins de moyens expérimentaux	• Peu fiable pour les mesures d'impédance en haute fréquence. • Sollicite davantage la batterie durant l'identification.

Tableau. II. 8 : Avantages et inconvénients des méthodes d'identification

L'identification fréquentielle est une méthode de caractérisation de systèmes linéaires invariants dans le temps. Or les éléments de stockage comme les batteries, sont des systèmes non linéaires [107]. Pour introduire la non-linéarité avec l'identification fréquentielle, il faut multiplier le nombre de tests. De plus, la mesure directe du courant et de la tension peut engendrer des erreurs importantes du fait de la présence de bruits de mesure et de la distorsion des signaux induite par les non linéarités des éléments testés. Il est donc nécessaire d'utiliser des appareils de mesure performants permettant de filtrer numériquement les faibles variations de tension et courant, principalement lors de caractérisation en basse fréquence [93].

Compte tenu des limites propres à la méthode fréquentielle, nous avons choisi de réaliser l'identification de modèles de batteries Li-ion avec la méthode temporelle.

II.4.2.3 Identification des paramètres du modèle choisie

L'identification des paramètres et les équations du modèle utilisé (cf. Figure. II. 23) est basée sur l'exploitation des courbes de tension de la batterie en fonction d'un profil de courant défini en cyclage, comme ceux présentés précédemment (cf. Figure. II. 19) et sur la mesure de la capacité énergétique au travers d'essais de caractérisation classiques (cf. Figure. II. 21).

Un algorithme d'optimisation se charge d'identifier correctement les paramètres ainsi que la tension à vide et la résistance interne équivalente de la batterie. L'algorithme d'optimisation hybride PSO/NM (*Particle Swarm Optimization / Nelder-Mead*) a été retenu pour ce travail et est présenté en **annexe C** avec les valeurs des coefficients trouvés pour les différents modèles de batteries [179].

Dans cette partie, le profil de cyclage simplifié utilisé pour l'étude de vieillissement est issu de la thèse de *R.SADOUN* [7] (cf. Figure. II. 26-B). Il a été utilisé pour l'identification temporelle des paramètres électriques de la batterie Li-ion Ko40HE. La comparaison de la tension mesurée avec celles issue de simulations permet d'identifier les paramètres du modèle de la batterie en prenant en considération les phénomènes de non-linéarité de l'impédance en fonction du courant et du SOC. Le critère d'optimisation utilisé est basé sur la minimisation d'erreur entre ces deux réponses de tension [93][75]. La précision des paramètres identifiés dépend de la qualité des mesures caractérisée par les niveaux de bruit, l'offset de tension et le rapport entre la fréquence d'acquisition minimum et la constante de temps des circuits RC du modèle. Cela rend l'approche temporelle peu fiable pour les mesures d'impédance aux zones haute fréquence qui représentent les impédances ohmiques, et de polarisation de connectiques et d'électrolyte.

L'expression non-linéaire de la tension à vide V_{OCV} de la batterie à identifier est fonction du SOC et est définie par l'équation II.11. Les x_n *et* c_n sont les coefficients à identifier par l'algorithme d'optimisation[179].

$$V_{OCV\ (soc)} = x_1 + x_2 . e^{(c_1.(1-soc))} + x_3 . e^{(c_2.soc)} + x_4 . e^{(c_3.(1-soc)^2)} + x_5 . e^{(c_4.(soc)^2)} + x_6 . e^{(c_5.(1-soc)^3)} + x_7 . e^{(c_6.(soc)^3)} \quad \text{(II. 11)}$$

L'évolution de la résistance interne équivalente R_Ω est fonction du SOC, de *I* courant traversant la batterie, de (x_8, c_7) , coefficients à identifier et est donnée par [179] :

$$R_{\Omega\ (soc,I)} = \frac{x_8}{\sqrt{soc + c_7 . soc . sign\ (I)}} \quad \text{(II. 12)}$$

Les deux circuits $R_{tc}\ C_{tc}$ et $R_{dif}\ C_{dif}$ placés en série permettent de représenter le comportement dynamique de la batterie. L'identification des paramètres $R_{tc}, C_{tc},\ R_{dif}, C_{dif}$ de

ces circuits est également assurée par l'algorithme d'optimisation. Les chutes de tension aux bornes de ces circuits sont définies dans le domaine de Laplace par [179]:

$$\begin{cases} V_{tc} = I.\dfrac{R_{tc}}{1 + sR_{tc}C_{tc}} \\ V_{dif} = I.\dfrac{R_{dif}}{1 + sR_{dif}C_{dif}} \end{cases} \quad \text{(II. 13)}$$

A. Identification des paramètres du modèle sur batterie neuve

La Figure. II. 26–B montre les simulations du cycle après identification des paramètres d'une cellule de batterie Kokam Ko40HE. La comparaison de la tension obtenue à l'aide du modèle pour un profil de courant de cyclage (cf. Figure. II. 26.A) avec la tension réelle du composant pour ce même profil de courant montre le très faible écart entre les deux réponses. L'erreur relative, comme montré sur la Figure. II. 26–C, est compris entre -2 et 2 %, ce qui valide la topologie et les paramètres du modèle retenus pour les batteries Li-ion Ko40HE.

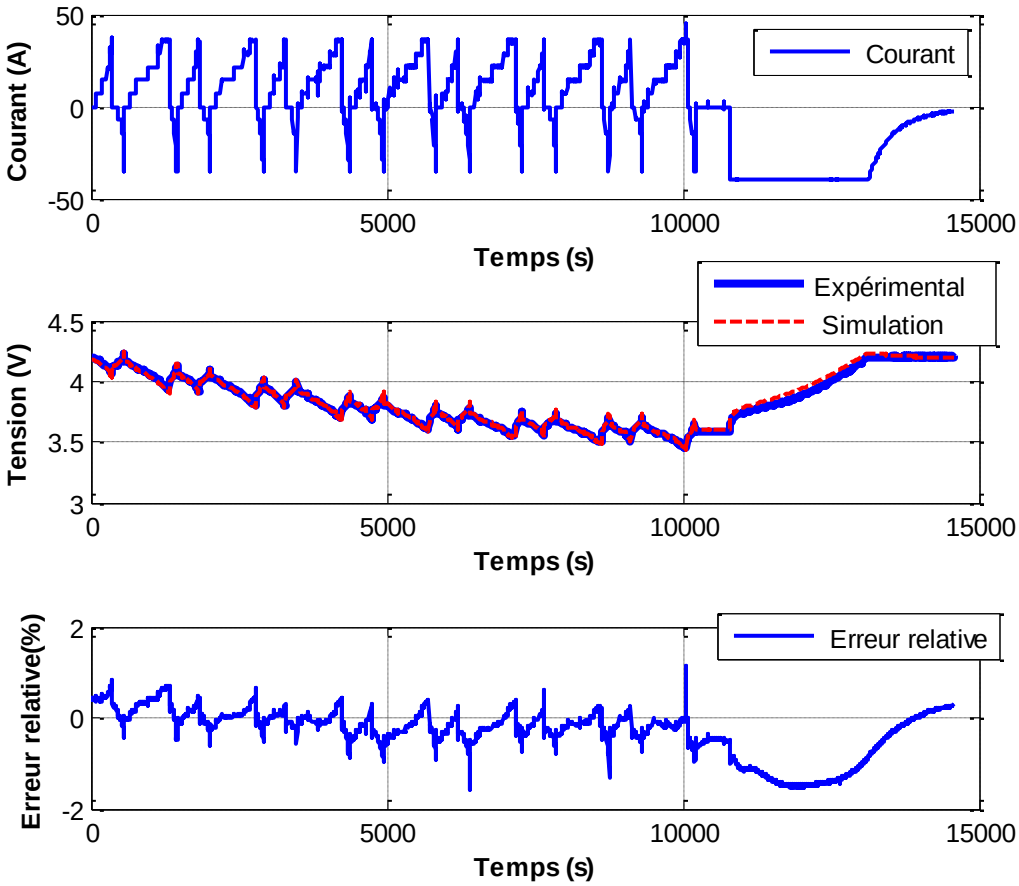


Figure. II. 26 : Test de batterie neuve : Profil du courant (A).Tension batterie (expérimental/modèle) (B). Erreur relative tension (C)

Par ailleurs, l'évolution des tensions aux bornes des différents éléments du modèle est montrée sur la Figure. II. 27 . Ceci permet d'appréhender la prédominance des éléments V_{OCV} et R_{Ω} sur le comportement global de ce modèle. Ainsi la tension à vide V_{OCV} durant la

sollicitation de la batterie est présentée sur la Figure. II. 27-A, la tension $V_{R\Omega}$ sur la Figure. II. 27-B et enfin, la tension V_{RC} aux bornes du circuit composé des éléments R_{tc} C_{tc} et R_{dif} C_{dif} (cf. Figure. II. 27-C).

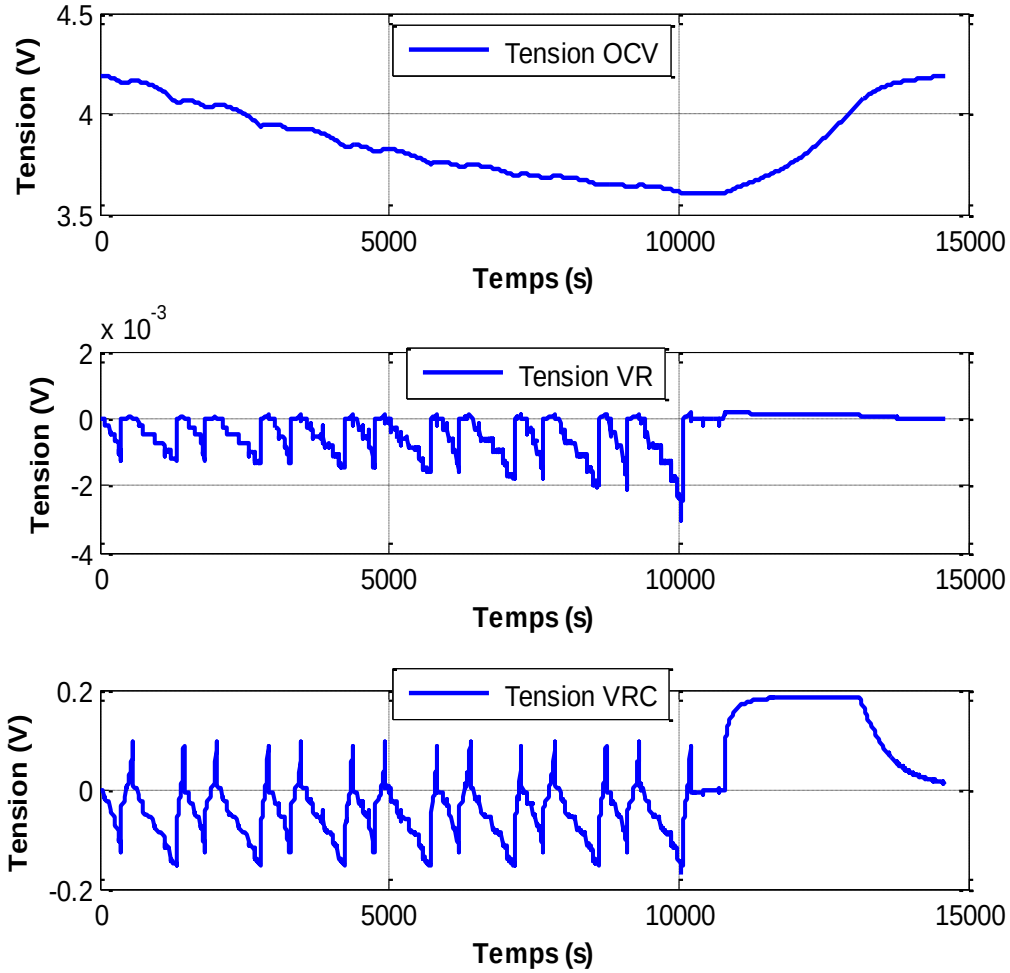


Figure. II. 27: Tension à vide de batterie V_{OCV} (A).Tension aux bornes de la résistance interne équivalente R_{Ω} (B). Tension aux bornes des circuits R_n C_n (C)

La Figure. II. 28-A illustre l'évolution de l'état de charge de la batterie pour le même profil de courant. Le SOC varie entre 20 % et 100 %. Cette plage de variation du SOC a été définie pour respecter les conditions de fonctionnement d'un pack batterie dimensionné pour un véhicule électrique. L'évolution de la tension à vide V_{OCV} en fonction de l'état de charge durant le profil du courant appliqué à la batterie est montrée sur la Figure. II. 28-B. Il apparait bien dans cette figure que : à SOC = 100% (batterie totalement chargée), la tension de la batterie est égale à la tension à vide V_{OCV}. Une fois que la batterie commence à se décharger, la tension à vide V_{OCV} diminue. La Figure. II. 28-C représente l'évolution de la résistance interne équivalente en fonction de l'état de charge, et ce pour des courants positifs ou négatifs. On observe que la valeur de résistance interne équivalente est plus importante pour les faibles valeurs du SOC, ce qui augmente la chute de tension de la batterie dans cette zone. On observe de plus la non-linéarité de la résistance interne équivalente durant les phases de charge et de décharge de la batterie.

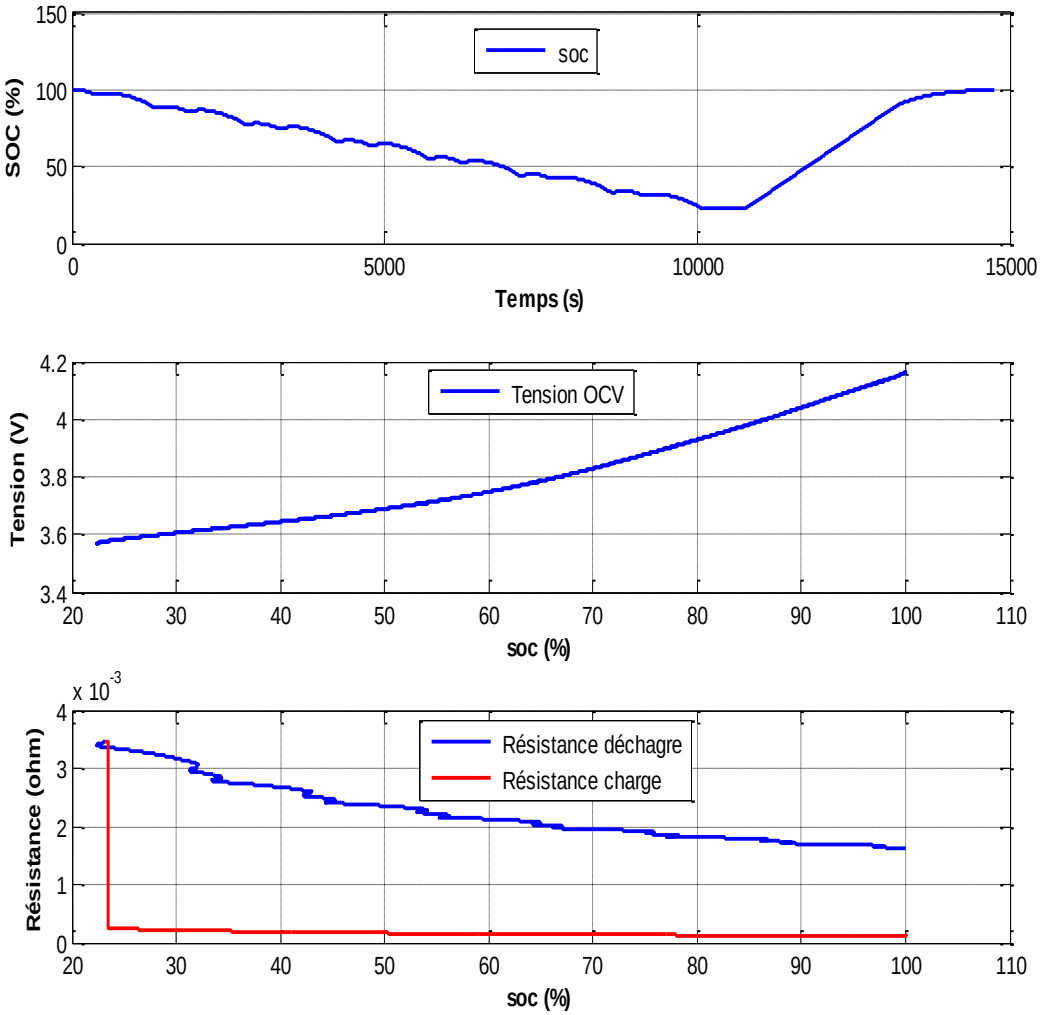


Figure. II. 28: SOC en fonction du temps (A) -Tension à vide V_{OCV} (B) et Résistance interne équivalente R_{Ω} (C) en fonction du SOC.

B. Validation de l'identification sur batterie à - 20% C_{nom} (en fin de vie)

Afin de valider les paramètres du modèle développé et cela dans des conditions d'utilisation différentes, nous avons réalisé un cyclage en fin de vie de la batterie, après 20% de perte de capacité par rapport sa valeur initiale. La Figure. II. 29 représente la tension expérimentale de la batterie testée en état neuve et a $-20\%\ C_{nom}$ avec le même profil de courant représentatif de l'usage dans un véhicule électrique. Il est bien évident que la tension de la batterie a $-20\%\ C_{nom}$ diminue rapidement contrairement à la réponse de la batterie neuve. L'écart entre les deux réponses de tension devient important pour les faibles valeurs de l'état de charge (SOC).

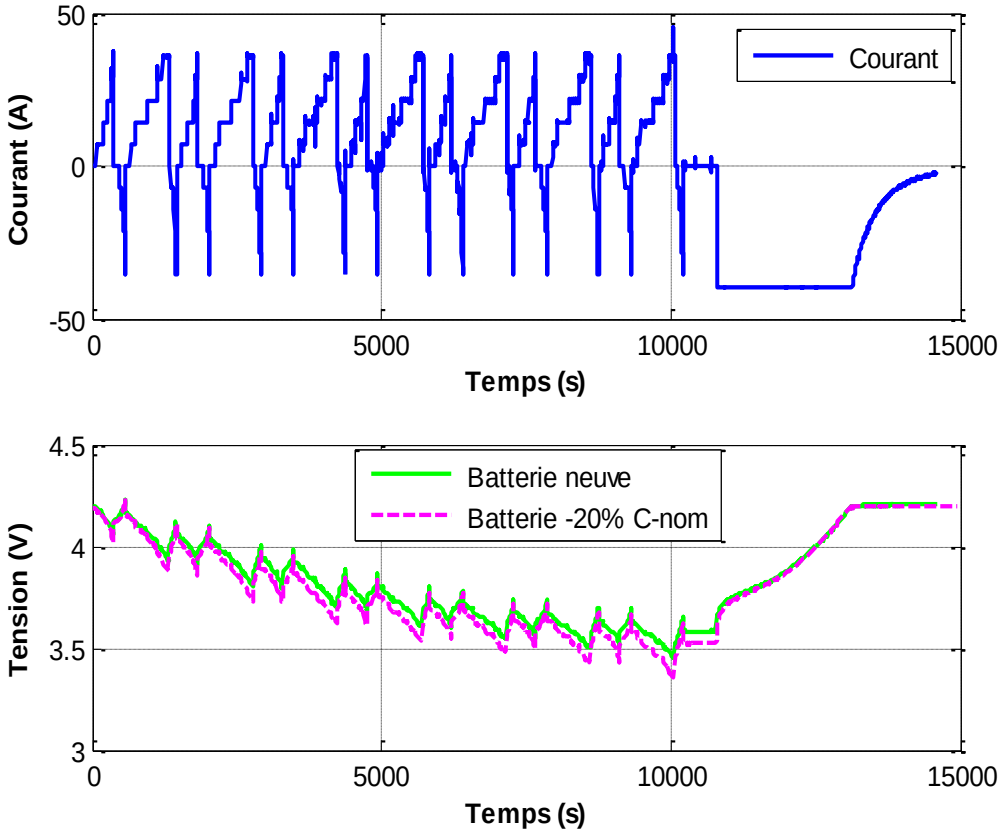


Figure. II. 29 : Profil du courant (A) et Tension batterie (neuve / a - 20%C_{nom}) (B)

Pour tester notre modèle a - 20% C_{nom} , nous conservons les valeurs de paramètres du modèle identifié sur batterie neuve, en prenant en compte seulement les paramètres énergétiques de vieillissement pour cet essai (SOH: C_{act}=80%, R_{Ω}=130%). Ceci permet de vérifier que ce modèle reste valide tout au long des la vie de cette batterie.

La Figure. II. 30-A montre une décharge complète de la batterie testée sur un profil de courant de cyclage, suivie d'une phase de recharge à courant constant CC/CV (*Constant Current / Constant Voltage*).

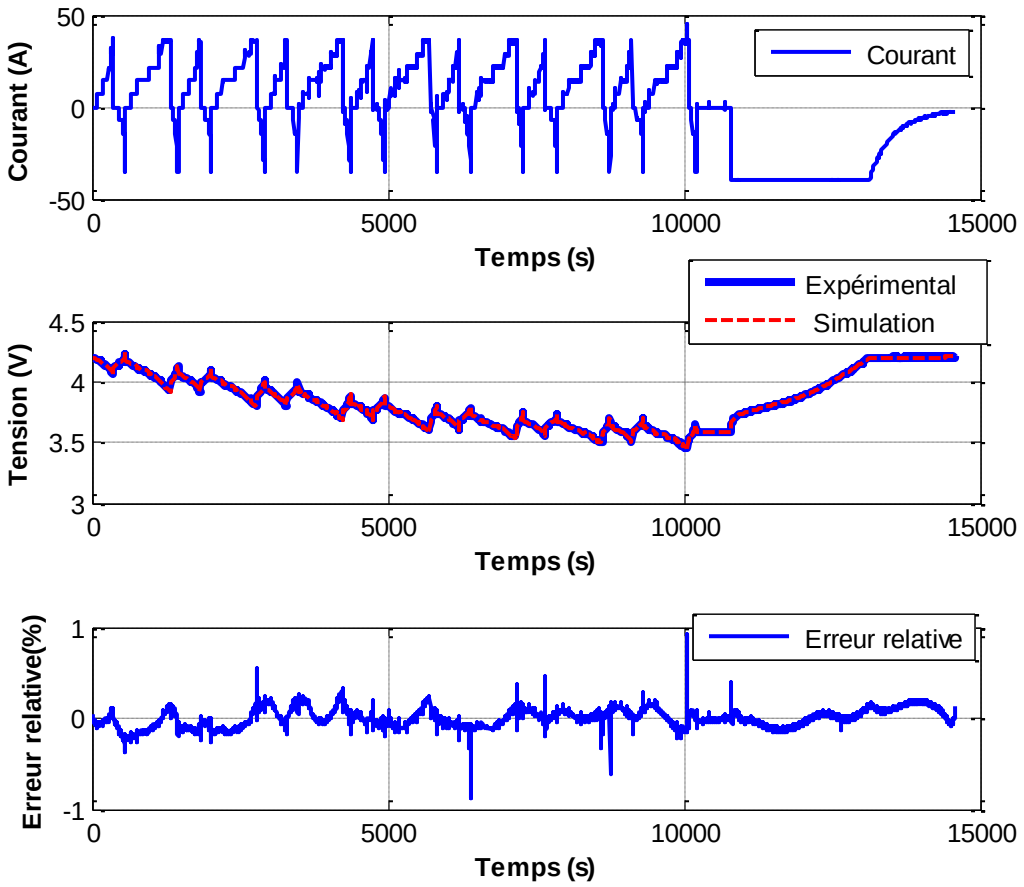


Figure. II. 30: comparatif expérimental/modèle sur Batterie à - 20% C_{nom} : Courant (A) et Tension batterie (B). Erreur relative tension (C)

La Figure. II. 30-B présente une comparaison entre la tension de la batterie avec celle obtenue par simulation du modèle identifié précédemment. Cette simulation valide les bonnes performances du modèle en fin de vie de la batterie compte-tenu de sa correspondance avec la réponse expérimentale. La Figure. II. 30-C montre la faible erreur en tension obtenue entre simulation et essais.

La tension à vide V_{OCV} du modèle développé durant la sollicitation de la batterie est présentée sur la Figure. II. 31-A. On peut constater que la valeur de V_{OCV} notamment dans la zone où le SOC de la batterie est faible (fin de cycle) n'est pas la même que celle de batterie neuve. Cela peut s'expliquer par le fait que la capacité énergétique dans le modèle de la batterie est diminuée en fonction de vieillissement. La Figure. II. 31-B montre la chute de tension aux bornes de la résistance interne équivalente R_{Ω}. On peut observer aussi que la valeur de tension $V_{R\Omega}$ est plus importante que dans le test de batterie neuve. Cela veut dire que l'augmentation de la résistance équivalente en fonction du vieillissement influence la tension globale de la batterie. Par contre, la chute de tension aux bornes deux circuits RC est restée la même que celle de batterie neuve, car on considère que les paramètres des deux circuits RC dans le modèle sont constants (cf. Figure. II. 31-C).

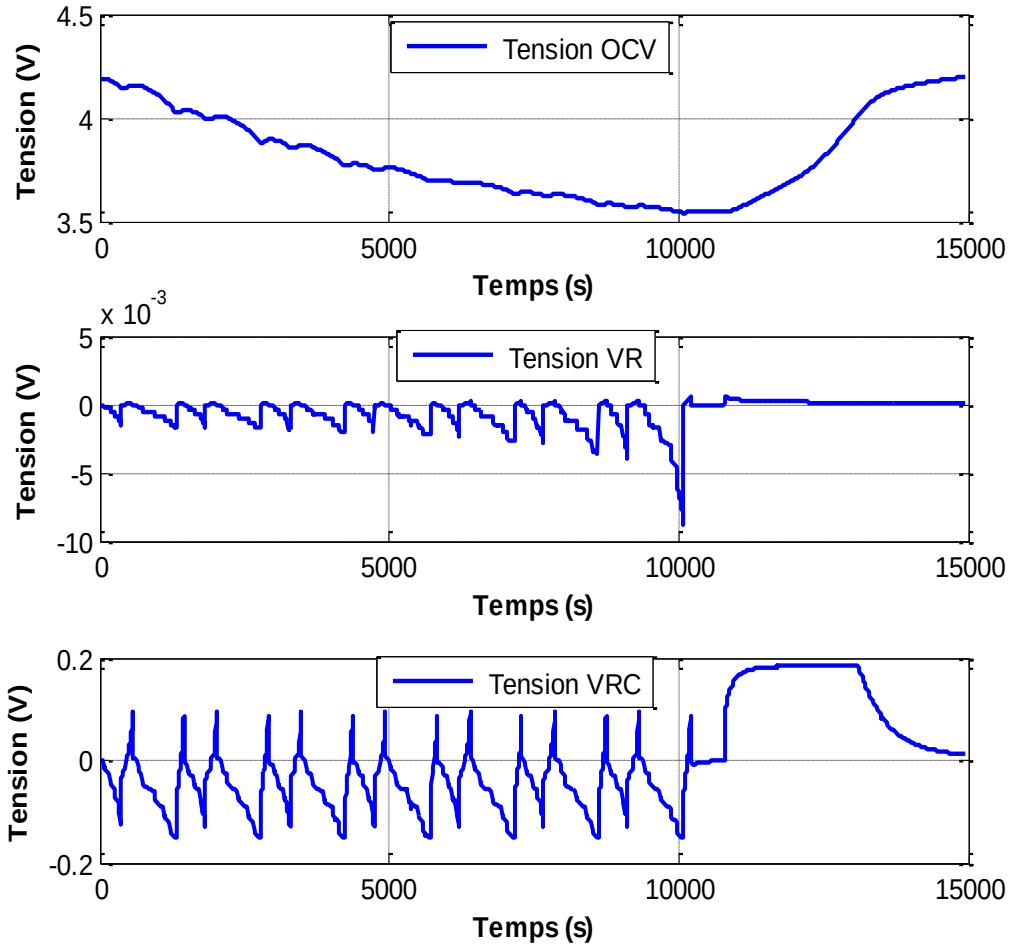


Figure. II. 31: Batterie a - 20% C_{nom} : Tension à vide de batterie V_{OCV} (A).Tension aux bornes de la résistance interne équivalente R_{Ω} (B). Tension aux bornes des circuits R_n C_n (C)

C. Limitation du modèle R-E

Pour montrer l'intérêt des branches RC utilisées dans le modèle développé en plus de la partie R-E, nous avons testé ce modèle sans ses branches RC en début et fin de vie de la batterie [7]. La Figure. II. 32 montre les simulations issues du modèle R-E, sans adjonction des branches RC, du cycle de mission simplifiée avec des batteries neuves.

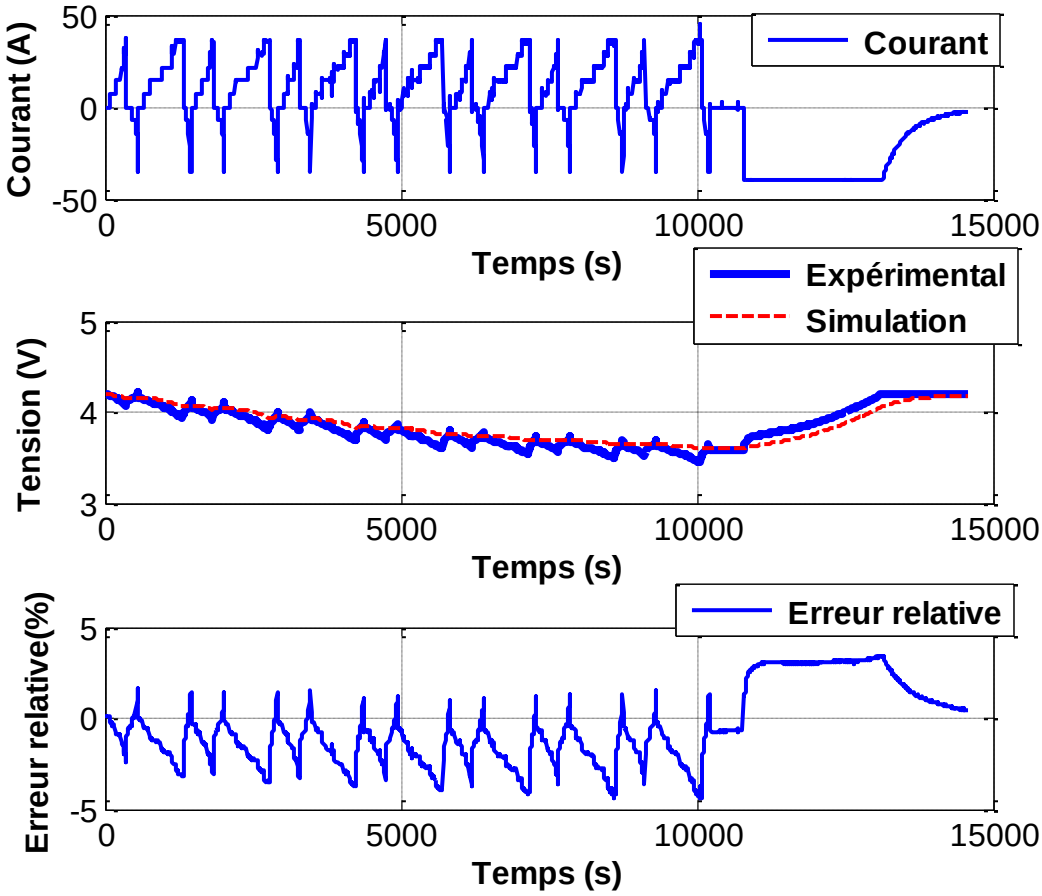


Figure. II. 32: Batterie neuve modèle R-E: Courant batterie (A). Tension batterie (expérimental/modèle) (B). Erreur relative tension (C)

La Figure. II. 32-B montre une comparaison entre l'évolution simulée et mesurée de la tension pour une batterie neuve. Nous pouvons constater que la tension calculée par le modèle développé sans les branches RC est proche en valeur moyenne de la tension réelle de la batterie, mais ne suit pas les régimes transitoires.

Sur la Figure. II. 32-C, on peut constater que l'erreur relative entre la réponse en tension du modèle simplifié et la réponse en tension de la batterie, est inférieure à 5%. Les pics observés sur l'erreur relative correspondent aux premiers instants de micro charges et de décharges de la batterie. Le modèle est caractérisé par une bande passante volontairement limitée aux basses fréquences (absence des branches RC). En conséquence, les variations rapides du profil de courant de cyclage ne peuvent être prises en compte.

Une seconde simulation a été réalisée en fin de vie de la batterie (après 3700 cycles) pour montrer la limitation du modèle simplifié avec le courant de cyclage. Les valeurs des paramètres du modèle développé ont été adapté en prenant en compte les paramètres énergétiques de vieillissement **(C_{act}=80%, R_{Ω}=130%).**

La Figure. II. 33-B représente l'évolution de la tension mesurée et simulée avec le modèle R-E. Nous constatons que la réponse donnée par le modèle est acceptable en valeur moyenne, néanmoins la différence entre les deux réponses dans les phases dites transitoires est importante. Ce décalage entre les deux tensions est dû à la limitation du modèle simplifié aux régimes transitoires.

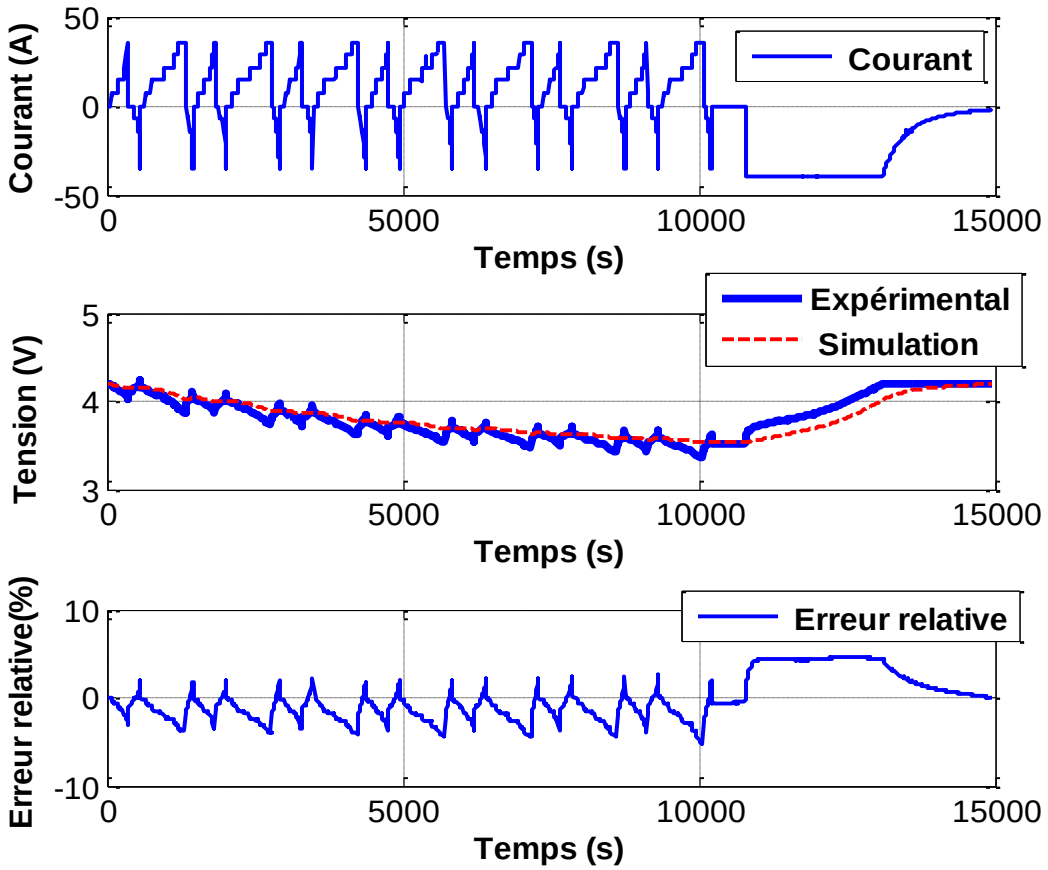


Figure. II. 33 :Test batterie vieillie a - 20% $\mathbf{C_{nom}}$: Courant (A). Tension batterie (expérimental/modèle) (B). Erreur relative tension (C)

La Figure. II. 33-C représente l'erreur relative entre la réponse en tension du modèle simplifié et la réponse en tension de la batterie testée. Nous pouvons constater une erreur plus importante en tension, notamment dans la dernière partie de recharge à courant constant CC/CV. Il est évident que l'utilisation du modèle proposé sans les branches RC engendre des erreurs sur l'estimation de la tension de batterie et ne permet pas de reproduire fidèlement le comportement dynamique.

Ces branches RC ont été conservées pour la comparaison des performances des stratégies de gestion vis-à-vis du vieillissement dans le modèle multi-physique. L'objectif est pour nous d'extraire dans un premier temps des résultats de vieillissement les plus justes possible. Ultérieurement, il sera intéressant de quantifier l'écart en termes de vieillissement apporté par la présence ou non de ces branches RC « rapides ».

II.4.2.4 Modélisation électrique des supercondensateurs

Le principe de fonctionnement des supercondensateurs à double couche repose sur la théorie de la double couche d'Helmhotz, qui décrit l'accumulation de charges électriques à l'interface entre un conducteur ionique (électrolyte) et un conducteur électronique de haute surface spécifique (électrode) [180].

Dans ce contexte, des phénomènes statiques et dynamiques interviennent lors de la décharge et la recharge telle que les surtensions de polarisation dues aux phénomènes de doubles couches électrochimiques aux interfaces électrodes/électrolyte, les surtensions ohmiques qui se produisent dans l'électrolyte, dans les électrodes et dans les collecteurs de courant. D'autres phénomènes interviennent durant le fonctionnement et au repos, comme les surtensions de relaxation et l'autodécharge [75].

Dans la littérature de nombreux modèles sont proposés pour simuler fidèlement le comportement des supercondensateurs. Chaque modèle permet de décrire le comportement des supercondensateurs dans des conditions particulières [40][181]. Ces modèles peuvent être classés selon leur approche [84]:

- Les modèles **électrochimiques** sont capables de représenter de manière très précise les phénomènes physiques à l'intérieur des cellules.
- Les modèles de type **circuits électriques équivalents**, moins proches de la réalité physique, présentent l'avantage d'offrir une conception et une mise en œuvre beaucoup plus simples.

Notre objectif est de construire un modèle multi-physique de la source hybride batteries Li-ion/supercondensateurs afin d'étudier l'impact des stratégies de gestion d'énergie sur la durée de vie des éléments de stockage d'énergie dans un véhicule électrique. Cela nécessite donc de développer de modèles offrant un bon compromis simplicité-précision afin de pouvoir simuler l'ensemble du système sur des cycles très longs. Il nous a donc paru souhaitable de sélectionner un modèle de supercondensateur de type circuits électriques équivalents. Ce type de modèle est plus adapté à l'usage de l'électricien et très intéressant pour sa simplicité d'identification des paramètres et a l'avantage de ne pas nécessiter un grand niveau d'expertise dans le domaine de l'électrochimie.

Dans ce contexte, l'approche retenue consiste à trouver un modèle de circuit électrique simple adapté à l'application du véhicule. Pour cela, une synthèse des modèles basés sur les circuits électriques équivalents est présentée dans la section qui suit. En effet, nous allons voir que le point important distinguant souvent ces modèles concerne les méthodes de caractérisation, basées sur les réponses fréquentielles ou sur les réponses temporelles. Cependant, la rigueur et la simplicité de la méthode utilisée peuvent apporter au modèle utilisé une précision et une fiabilité qu'il convient de prendre en compte [84].

A. Modèles des supercondensateurs basés sur des circuits électriques équivalents

Plusieurs auteurs proposent des modèles de type « circuit électrique équivalent » qui décrivent le fonctionnement électrique d'un supercondensateur avec une bonne approximation [182]. Cette partie présente les principaux modèles électriques développés.

➢ Modèle constructeur RC

Le modèle le plus simple est un modèle basé sur la constante de charge répartie avec un simple circuit RC. Ce dernier est appelé aussi «modèle constructeur» car il est souvent utilisé par les industriels. Comme montré sur la Figure. II. 34, il est composé d'une résistance série R_{sc}, caractérisant les surtensions ohmiques, mise en série avec un condensateur C_{sc} représentant le phénomène de double couche électrochimique [75].

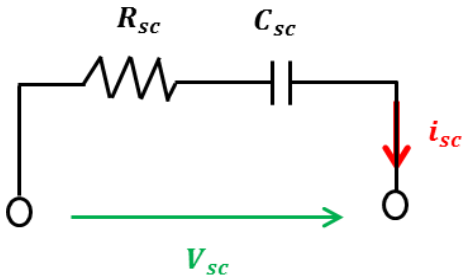


Figure. II. 34: Modèle « constructeur RC »

La simplicité de mise en œuvre du modèle RC limite de façon importante son utilisation pour les applications dynamiques. Selon *N.RIZOUG* [84] la résistance équivalente d'un supercondensateur doit varier en fonction des contraintes électriques afin de simuler les comportements dynamiques du composant. L'absence de cette spécificité dans le modèle RC limite sa précision et sa fiabilité dans les applications de forte puissance. Un autre inconvénient du modèle RC réside dans le fait que sa capacité ne varie pas en fonction de la tension instantanée, la précision du modèle diminue durant la phase de recharge.

- **Modèles type multi-branches « ligne de transmission »**

L.ZUBIETA et R.BONERT [183] a présenté l'un des premiers véritable modèle de supercondensateur (cf. Figure. II. 35). La réponse du composant est décomposée en deux branches RC. La première branche, appelée branche principale, représente le comportement énergétique rapide durant les phases de charge et de décharge avec une capacité variable [56]. La partie lente de réponse des supercondensateurs (phénomène redistribution interne) est mobilisée par la deuxième branche. L'identification des paramètres de ce modèle a été réalisée de façon temporelle.

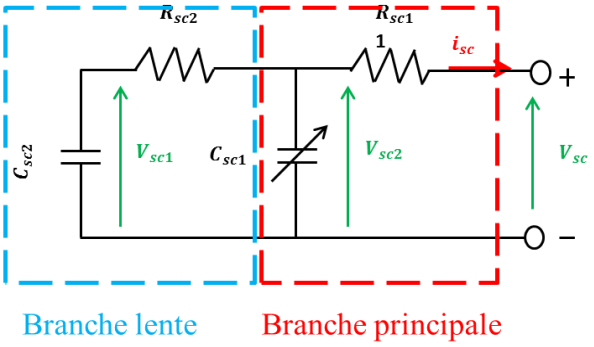


Figure. II. 35 :Modèle proposé par Zubieta et al

Le problème principal de ce modèle est l'identification des paramètres, notamment les paramètres de seconde branche (phénomène redistribution interne) [84].

Une modélisation plus fine des dynamiques chimiques des supercondensateurs est proposée par *ZUBIETA et al* [184]. Ce modèle, basé encore sur des réponses temporelles, est composé de trois branches RC, comme le montre sur la Figure. II. 36. Il tient compte des trois principaux phénomènes physiques qui caractérisent les supercondensateurs : la porosité des électrodes, la théorie de la tension à l'interface entre deux matériaux de phases différentes et le phénomène d'autodécharge [40].

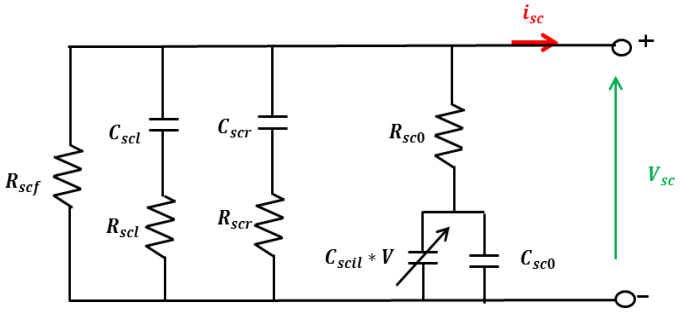


Figure. II. 36: Modèle à 3 branches [178]

Afin d'identifier les paramètres de ce modèle, plusieurs essais temporels sont réalisés en se basant sur la séparation des constantes de temps des trois branches [40]. D'après [40] [185], l'inconvénient majeur de ce modèle est le fait que les constantes de temps des trois

branches sont très éloignées l'une de l'autre et que le calcul de ces dernières est effectué avec une analyse temporelle sans connaissance du comportement dynamique du système.

L'utilisation des réponses fréquentielles des supercondensateurs pour modéliser les comportements dynamiques de ces composants est détaillée dans plusieurs travaux [40][84]. D'autres travaux [186][187][188] utilisent les résultats de spectroscopie d'un balayage en fréquence qui sont souvent représentés sur le diagramme de Nyquist avec la partie réelle en abscisse, et la partie imaginaire en ordonnée [103]. Le modèle exprimé dans le domaine fréquentiel peut être présenté de différentes manières.

L'approche la plus simple est l'utilisation d'un circuit électrique équivalent avec plusieurs constantes de temps à tendance croissante. Dans ce genre de modèle, le choix du nombre de branches RC peut être fait en fonction de la précision voulue et en fonction de l'intervalle de fréquence dans lequel l'impédance est mesurée [40]. La Figure. II. 37 montre le type de circuit utilisé pour modéliser les comportements dynamiques des supercondensateurs dans le domaine fréquentiel.

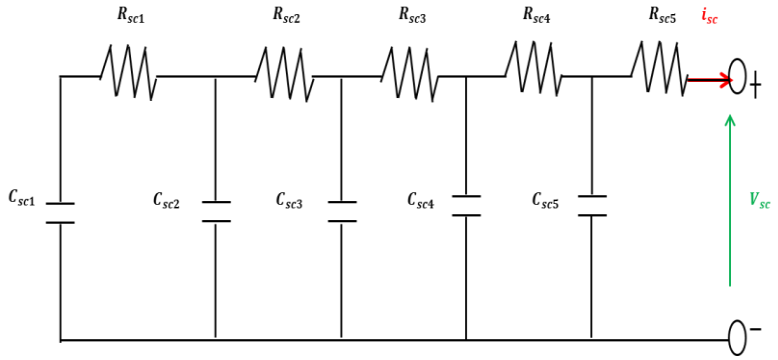


Figure. II. 37: Modèle par approximation de la réponse fréquentielle

L'inconvénient majeur de ce modèle est le nombre important de paramètres et de circuits électriques équivalents à identifier, cela rend la mise en œuvre du modèle difficile et compliqué dans certaines applications [107].

Afin d'améliorer la précision du modèle de *L. ZUBIETA et R. BONERT* [184],et de prendre en compte les non-linéarités et le phénomène de relaxation, *F. BELHACHEMI* [185][189] a proposé une modification. Celle-ci est basée sur le remplacement de la cellule RC de la branche principale par une ligne de transmission de type RC non linéaire de résistance totale R et de capacité totale C dépendant de la tension par une fonction linéaire par morceaux (discrétisée en un nombre fini de cellules identiques, de façon à permettre l'implantation du modèle dans les logiciels usuels de simulation électrique) [85]. Pour représenter les phénomènes lents, des réseaux RC avec des constantes de temps plus élevées que celles prises pour la phase de charge sont ajoutés. Les valeurs des capacités sont définies par une fonction linéaire par morceaux dépendant de la tension aux bornes de l'élément (cf. Figure. II. 38) [23] [84].

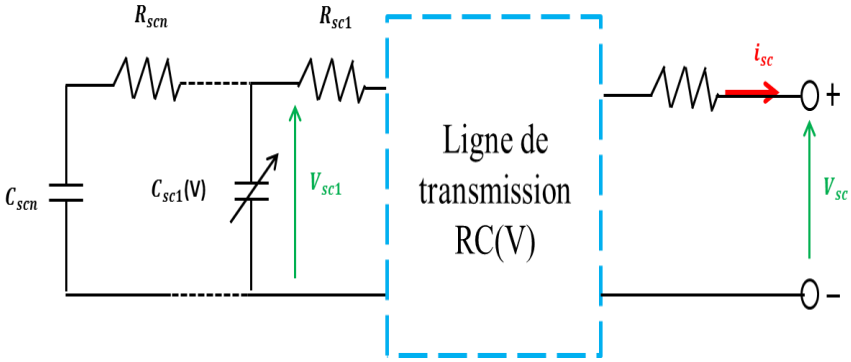


Figure. II. 38: Modèle de Belhachemi

Tout comme le modèle présenté précédemment, l'inconvénient majeur de ce modèle est le nombre élevé de paramètres. En plus, l'identification des différents paramètres a été faite suite à un seul essai de charge à courant constant qui risque d'être insuffisant pour déterminer au mieux les différents paramètres du modèle [40].

- **Modèle multi-pores**

Un autre modèle, dit « multi-pores », proposé par *A. HAMMAR et al* [190], basé sur les réponses fréquentielles des supercondensateurs prend en compte la distribution de la taille des pores et permet de représenter au mieux la forme analytique de l'impédance du supercondensateur. La Figure. II. 39 présente le circuit électrique équivalent utilisé pour représenter le composant.

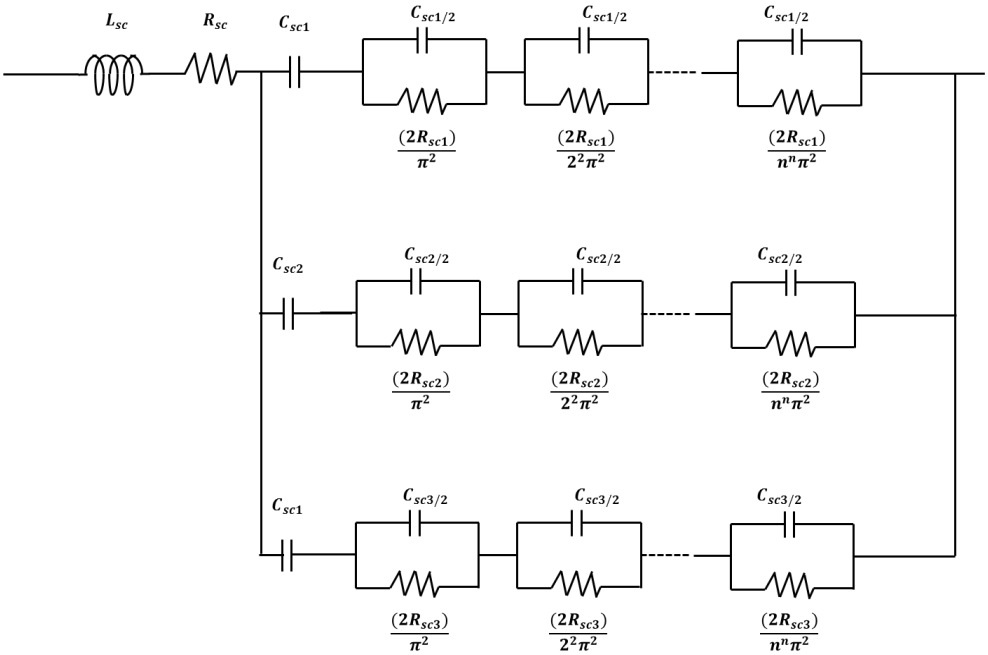


Figure. II. 39: Modèle multi-pores [184]

Avec ce genre de modèle, la prise en compte d'une distribution de taille des pores dans la modélisation permet d'améliorer la précision de celui-ci lors des phases de relaxation. Néanmoins, l'identification des paramètres de ce dernier nécessite plusieurs mesures d'impédance sur une plage de fréquence étendue [107].

- **Modèle de supercondensateur retenu**

L'analyse de différents profils de missions et les besoins de puissances transitoires dans les applications automobiles a montré que l'utilisation des supercondensateurs est caractérisée par de forts régimes de charges / décharges discontinus et répétitifs. Le modèle du supercondensateur doit donc être valide pour une plage de fréquence liée aux conditions d'utilisation, car le comportement du modèle s'éloigne de la réalité lorsque les conditions d'utilisation réelle sont différentes des conditions d'identification du modèle.

Le modèle de ligne de transmission RC validé par *N.RIZOUG et al* [191] est retenu pour notre étude (cf. Figure. II. 40), celui-ci étant un bon compromis en terme de simplicité/précision. Ce modèle tient compte de la dynamique des supercondensateurs en permettant de décrire et simuler au mieux leur comportement. Il est composé d'une résistance série qui représente la partie haute fréquence, d'une ligne de transmission RC dont la capacité est une fonction linéaire de la tension. L'ordre de la ligne de transmission est choisi en fonction

de la qualité de l'approximation (écart entre points de mesure la partie réelle de l'impédance et le modèle électrique).

Les résultats obtenus [191] mettent en évidence le fait que le modèle de ligne de transmission RC permet de décrire avec précision le comportement des supercondensateurs malgré les hypothèses émises pour l'élaborer. L'avantage de ce modèle réside dans sa relative simplicité et le nombre réduit de paramètres qui le rendent bien adapté aux simulations numériques et à l'implémentation dans un système embarqué. Ce modèle néglige le phénomène d'autodécharge ainsi que les phénomènes très lents liés à la redistribution des charges.

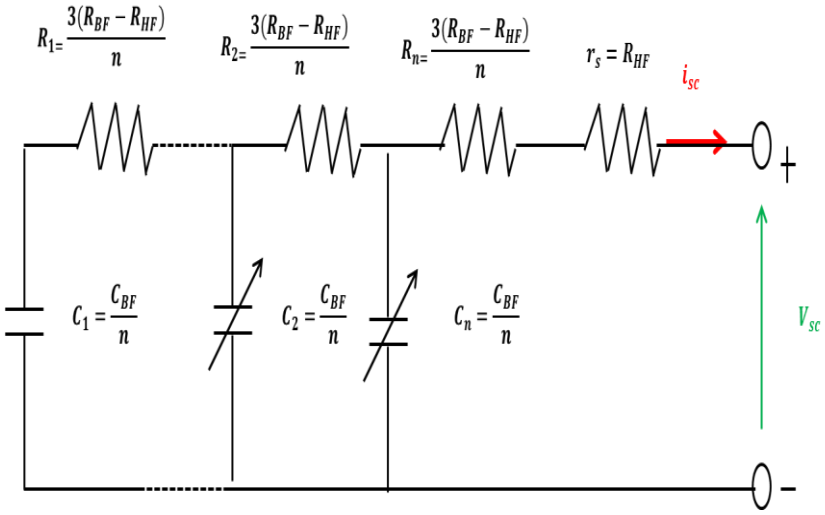


Figure. II. 40 : Modèle de supercondensateur retenu [84]

Une méthode mixte a été proposée pour l'identification des paramètres consistant à utiliser d'une part la réponse fréquentielle du supercondensateur pour identifier la résistance de transmission et la résistance série, et d'autre part à utiliser la réponse temporelle du supercondensateur pour identifier la capacité. Selon *N.RIZOUG* [84] cette méthode permet d'éviter le cumul des erreurs liées à l'identification des paramètres. On peut ainsi profiter à la fois des avantages du modèle temporel de la ligne de transmission et de l'utilisation de la réponse fréquentielle pour obtenir une valeur plus précise de la résistance série et de celle de la ligne de transmission :

$$\begin{cases} R_n = \dfrac{3(R_{BF} - R_{HF})}{n} \\ r_s = R_{HF} \end{cases} \qquad \text{(II. 14)}$$

La variation de la capacité C en fonction de la tension peut être représentée par un polynôme de deuxième degré :

$$C = -12\, V_{sc}^2 + 76 V_{sc} + 2{,}54e2 \qquad \text{(II. 15)}$$

La Figure. II. 42 montre une comparaison entre les deux capacités (capacité instantanée mesurée et la capacité donnée par le polynôme de deuxième degré) en fonction de la tension pour un essai de charge complète à 10A. On constate une non-linéarité de la capacité instantanée pour le supercondensateur testé. On remarque aussi que la réponse du modèle (polynôme) suit bien la réponse expérimentale de la capacité instantanée pour un essai de charge complète.

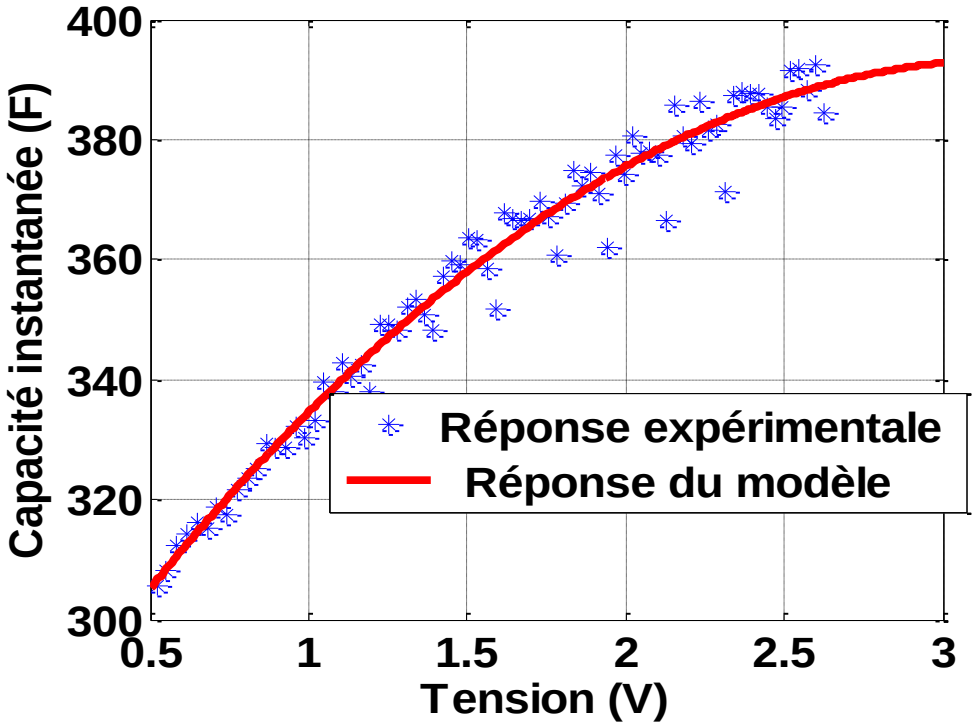


Figure. II. 41 : Variation de la capacité d'un supercondensateur en fonction de la tension

La Figure. II. 42-A présente une comparaison entre la réponse en tension réelle et celle du modèle pour une charge complète à courant constant. On peut constater que la réponse du modèle suit bien la réponse expérimentale.

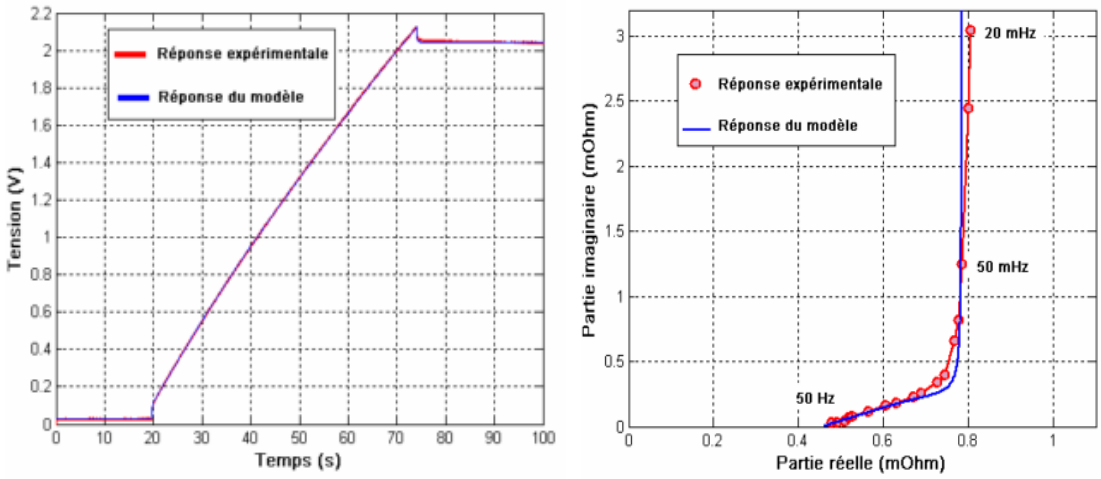


Figure. II. 42: Comparaison expérimental/modèle : en Temporel (A), en Fréquentiel (B) [84]

La Figure. II. 42-B montre la comparaison de la réponse fréquentielle du modèle pour 20 branches avec une réponse fréquentielle mesurée. Cette figure confirme que la réponse fréquentielle d'un modèle de ligne de transmission est proche de la réponse expérimentale du supercondensateur sur une plage assez large de fréquence.

La Figure. II. 43-A présente le cycle de caractérisation. Ce dernier, dont la période est d'environ 175s, est composé de créneaux de charge et de décharge à courant constant (10A), séparés par des phases de repos en circuit ouvert d'environ 10s pour permettre une caractérisation temporelle. La Figure. II. 43-B présente la réponse en tension du modèle électrique identifié et la réponse d'un composant supercondensateur mesurée sur le banc de test.

L'erreur relative, comme montré sur la Figure. II. 43-C, est compris entre -2 et 2 %, ce qui valide l'identification réalisée.

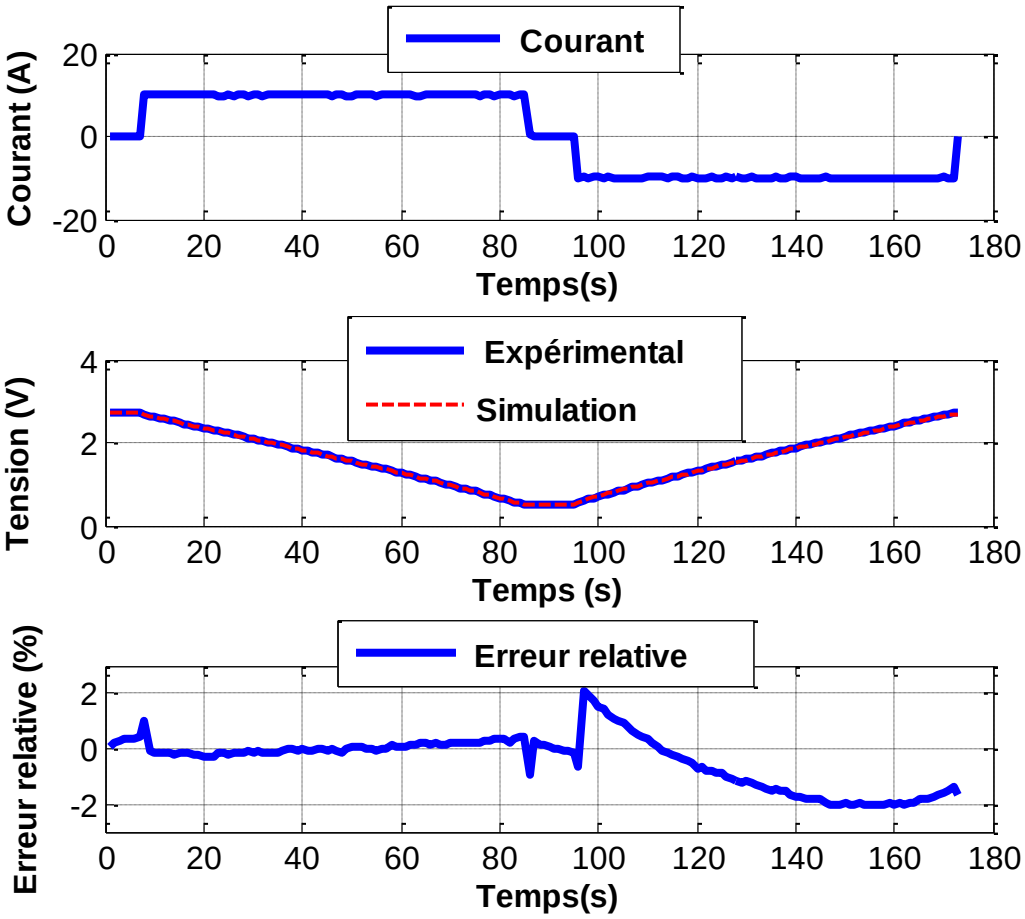


Figure. II. 43: Caractérisation des supercondensateurs : Courant supercondensateur (A). Tension supercondensateur (expérimental/modèle) (B). Erreur relative tension (C)

L'utilisation de modèle de supercondensateurs à circuit RC dans notre application doit permettre d'évaluer précisément les grandeurs électriques temporelles. Pour être adapté à la modélisation multi-physique, ce modèle doit également être précis d'un point de vue énergétique. Cette approche est basée sur l'utilisation du bilan énergétique du supercondensateur sur un cycle charge/décharge et est définie par la relation simplifiée suivante [84] :

$$E_{stockée} = E_{consommée} - E_{pertes} \qquad \text{(II. 16)}$$

La séparation de l'énergie stockée et perdue est facilitée par la modélisation du supercondensateur sous forme d'un circuit électrique RC. En effet, la résistance R_E représente les pertes de l'énergie et la capacité C_E l'énergie stockée. En utilisant l'égalité précédente, on peut déduire la valeur de la résistance énergétique R_E :

$$R_E = \frac{\int_0^{cycle} v.i\,dt}{\int_0^{cycle} i^2\,dt} \qquad \text{(II. 17)}$$

La capacité énergétique C_E est définie par l'équation suivante :

$$C_E(v) = \frac{2E_{stockée(v)}}{v^2} \quad \text{(II. 18)}$$

Avec :

$$v = (V_{sc} - R_E i^2) \quad \text{(II. 19)}$$

Le calcul de résistance équivalente dans le cas d'une identification temporelle est fait en considérant que la résistance représentant les pertes est constante et en utilisant la formule :

$$P_j = R_{eq} I^2 \quad \text{(II. 20)}$$

Le même principe a été utilisé pour calculer la résistance énergétique avec une formule énergétique :

$$Pertes = \int_0^{cycle} R_E i^2 \, dt \quad \text{(II. 21)}$$

On constate que les deux formules aboutissent à la même valeur de la résistance, $R_E = R_{eq}$. Par ailleurs, le calcul de capacité instantanée du modèle de supercondensateur est basé sur l'expression suivante :

$$i(t) = C_{eq} \frac{dv}{dt} \quad \text{(II. 22)}$$

De l'autre côté, la capacité énergétique C_E est définie par l'équation suivante :

$$E(t) = C_E \frac{v^2}{2} \quad \text{(II. 23)}$$

En se basant sur ces deux équations, la capacité énergétique peut être calculée par l'équation suivante :

$$C_E = \frac{2 \int C_{eq}.v \, dv}{v^2} \quad \text{(II. 24)}$$

II.4.3 Modélisation thermique des stockeurs

La chaleur générée dans une cellule électrochimique lors de la charge et de la décharge a pour effet d'élever sa température et de modifier l'ensemble des caractéristiques de la cellule, notamment la capacité électrique et la conductivité de l'électrolyte dans les pores [101]. Cette chaleur peut être décomposée en deux termes. Le premier est associé à la chaleur générée par effet Joule[13], considérée irréversible, car elle est toujours positive. Le second correspond à la génération de chaleur produite à l'interface entre l'électrolyte et les électrodes c'est-à-dire

[13] L'effet Joule est un processus irréversible lié à la présence des atomes ou des molécules constituant la matière traversée et qui constituent un frein au déplacement des porteurs de charge. Les interactions entre les porteurs de charge et ces atomes donnent lieu à des dissipations de l'énergie électrique sous forme d'énergie thermique [101].

d'origine thermodynamique et réversible, car son signe dépend du sens des réactions électrochimiques [154].

L'étude de la durée de vie d'un système de stockage d'énergie est complexe et nécessite la considération de tous les phénomènes mis en œuvre au cours de l'utilisation [141]. Ainsi le modèle multi-physique proposé doit prendre en compte l'effet de la température sur les modèles électrique et de vieillissement afin d'ajuster les paramètres au cours de l'usage. La variation des résistances internes et des capacités de batteries et supercondensateurs en fonction de la température est prise en compte dans la simulation.

Dans notre étude, l'estimation de la température interne via un modèle thermique peut notablement améliorer les prédictions du modèle électrique de la source hybride, aider ce dernier à ne pas dépasser les limites en température (emballement thermique de la batterie[14]) des deux sources et lui permettre une gestion énergétique plus efficace afin de prolonger sa durée de vie [154]. Le modèle thermique ciblé pour la source hybride dans cette application est basé sur un couplage entre le comportement électrique (v,i) d'un composant batterie ou supercondensateur et un bilan thermique réalisé à l'échelle de la cellule. Il faut noter qu'ici, la détermination des températures des deux sources batteries et supercondensateurs est basée sur l'hypothèse de non prise en compte des phénomènes thermiques liés à la résistance thermique de contact entre les cellules.

II.4.3.1 Modélisation thermique des batteries Li-ion

D'une manière générale, les effets thermiques sont liés au transport des électrons et des ions dans les conducteurs électroniques et ioniques mais aussi à l'interface électrode-électrolyte. Ils diffèrent selon les processus de stockage mis en jeu : faradiques et non faradiques et sont induits par différents processus, irréversibles ou réversibles [101]. Dans le cas des batteries Li-ion, les deux termes sources de la chaleur, provoquant l'échauffement généré dans la cellule, ne sont obtenus qu'après de nombreuses hypothèses effectuées sur le bilan d'énergie [154]. Celui-ci est défini par l'équation simplifiée suivante :

$$Cp_{saurf\ sep}.\frac{dT}{dt} = \left(U_{ocv} - U - T\frac{dU_{ocv}}{dT}\right).I + h_{surf\ sep}.(T_{amb} - T) \qquad \text{(II. 25)}$$

$Cp_{saurf\ sep}$ est la capacité thermique de la cellule par unité de surface de séparateur $(j.m^{-2}.K^{-1})$, $h_{surf\ sep}$ le coefficient de transfert thermique dépendant notamment de la surface de membrane ($W.m^{-2}.K^{-1}$), T_{amb} la température de l'air ambiant.

Cette formule simplifiée du bilan énergétique de la batterie est la plus utilisée dans la littérature. Cependant, la chaleur générée par effet Joule dans cette équation est désignée par le produit de la densité de courant *I* par la différence entre le potentiel mesuré en circuit ouvert et le potentiel d'utilisation. La variation d'entropie due à la réaction électrochimique est calculée par le produit de la densité de courant, de la température et de la dérivée du potentiel en circuit ouvert en fonction de la température [154]. Ces deux sources de chaleur suffisent à décrire le comportement thermique de cellule de la batterie sous sollicitation. En prenant en compte des hypothèses de pression constante et volume constant pour la cellule de batterie en utilisant le premier principe de la thermodynamique, on obtient pour la chaleur produite :

[14] L'emballement thermique de l'accumulateur est un phénomène intervenant lorsque celui-ci est soumis à des conditions de température élevées, généralement hors des limites préconisées par le constructeur (60°C). Son origine peut aussi être liée à un court-circuit interne de la batterie, ou une surcharge.

$$Q = I\left[V_{ocv} - V - T\frac{dV_{ocv}}{dT}\right] \quad \text{(II. 26)}$$

La littérature présente de nombreux modèles thermiques de batteries utilisant différentes approches [154] : la résolution d'équations aux dérivées partielles (PDE : partial differential equations)[192], les modèles linéaires à paramètres variables (LPV : linear parameter-varying) [193], les modèles éléments finis [194][195] ou encore les modèles à constantes localisées [196][197][198].

A. Modèle thermique utilisé pour la batterie Li-ion

Pour cette étude un modèle à constantes localisées, aussi appelé circuit électrique équivalent, basé sur une seule constante de temps thermique est utilisé. Ce dernier est couplé au modèle électrique développé auparavant en considérant que la cellule de batterie est située dans un volume infini à température ambiante constante. De plus, la chaleur de réaction est négligée ainsi que les pertes vers l'extérieur, car pour les fortes sollicitations, leur effet est globalement faible par rapport à l'effet Joule [154].

La puissance thermique injectée P_{th} est calculée à partir du modèle électrique dont les paramètres peuvent être ajustés suivant la température estimée par le modèle thermique. Cette puissance produite par effet Joule provient principalement de la résistance interne des batteries Li-ion. Elle est traduite par la relation suivante :

$$P_{th} = I.(V_{ocv} - V) = R_{int}.I^2 \quad \text{(II. 27)}$$

La résistance interne globale R_{int} de la batterie Li-ion a pour origine trois phénomènes résistifs. Le premier est la résistivité électrique intrinsèque de ses composants : cette résistance ohmique correspond donc à la résistance électronique des électrodes et à la résistance ionique de l'électrolyte. La seconde résistance est liée au phénomène de diffusion du cation Li^+ dans les différents composants de la cellule électrochimique. Le transfert de charge à l'interface entre la solution et le matériau solide d'insertion représente la troisième partie de la résistance interne globale. Néanmoins, la mesure expérimentale, quel qu'en soit le procédé, ne permet pas de déterminer ces résistances indépendamment [154]. C'est pour cette raison que la résistance interne est considérée dans la plupart des travaux comme une résistance globale générant les différentes chutes ohmiques.

La Figure. II. 44 présente le circuit électrique équivalent utilisé pour représenter le comportement thermique de la batterie Li-ion avec une seule constante de temps, produit d'une résistance et d'une capacité thermique R_{th}, C_{th}. L'impédance thermique est représentée par ces deux éléments et la puissance thermique P_{th} correspond à la source de chaleur. De ce fait, la résistance thermique $\mathrm{R_{th}}$ permet de modéliser le transfert de chaleur par convection entre le composant et le milieu environnant (enceinte adiabatique) caractérisé par la température ambiante T_{amb} [141].

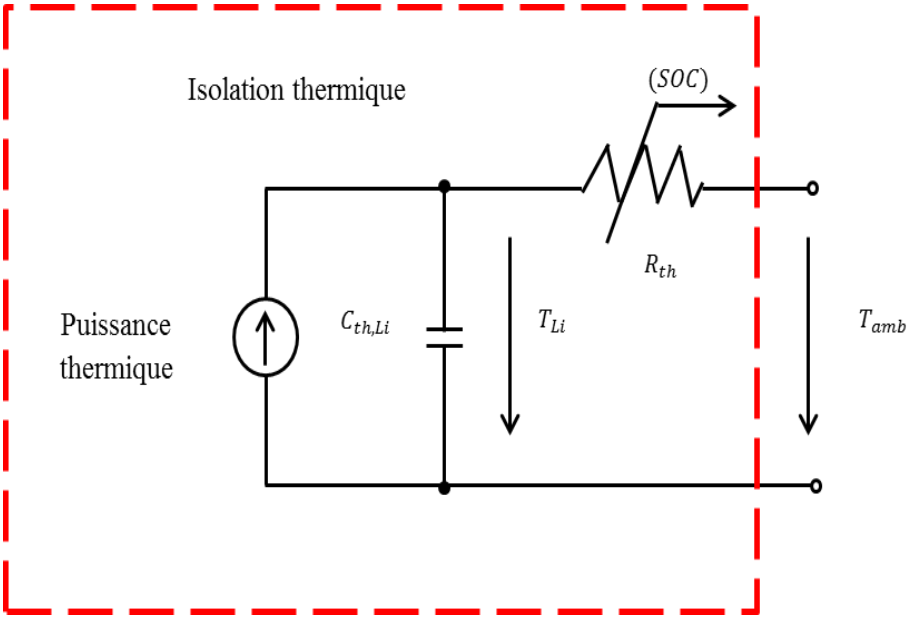


Figure. II. 44: Modèle thermique utilisé [187]

Dans ce modèle, la résistance thermique R_{th} est représentée par une fonction non linéaire dépendant de l'état de charge de la batterie. Le choix de cette fonction est effectué afin de bien représenter les faibles variations de réponse thermique durant le régime permanent de batterie Li-ion. Cependant, l'expression non-linéaire de la résistance thermique R_{th} en fonction du SOC est définie par l'équation suivante :

$$R_{th} = a_1 + a_2 . soc^4 \qquad \text{(II. 28)}$$

Où, les a_1 et a_2 représentent les coefficients d'optimisation à identifier.

Pour calculer les coefficients a_1 et a_2 de la résistance thermique R_{th} ainsi que la capacité thermique C_{th}, l'algorithme d'optimisation hybride PSO / NM utilisé auparavant dans l'identification des paramètres électriques du modèle de batteries Li-ion se charge d'identifier correctement les valeurs de ces paramètres via un seul essai thermique, comportant la phase transitoire et le régime permanent. Cet algorithme d'optimisation consiste à minimiser les écarts entre la réponse du modèle thermique et les mesures de température de cellule réelle soumis au même profil de courant.

B. Identification du modèle thermique des batteries Li-ion

La mise en œuvre d'un essai supplémentaire a permis d'identifier les paramètres du modèle thermique. La cellule de batterie Li-ion est placée dans une enceinte climatique à une température initiale de 40°C. On lui applique un profil du courant charge /décharge de 60 A (cf. Figure. II. 45-A) et la température de cellule est mesurée. L'algorithme d'optimisation hybride PSO / NM est alors utilisé pour identifier les coefficients de R_{th}.

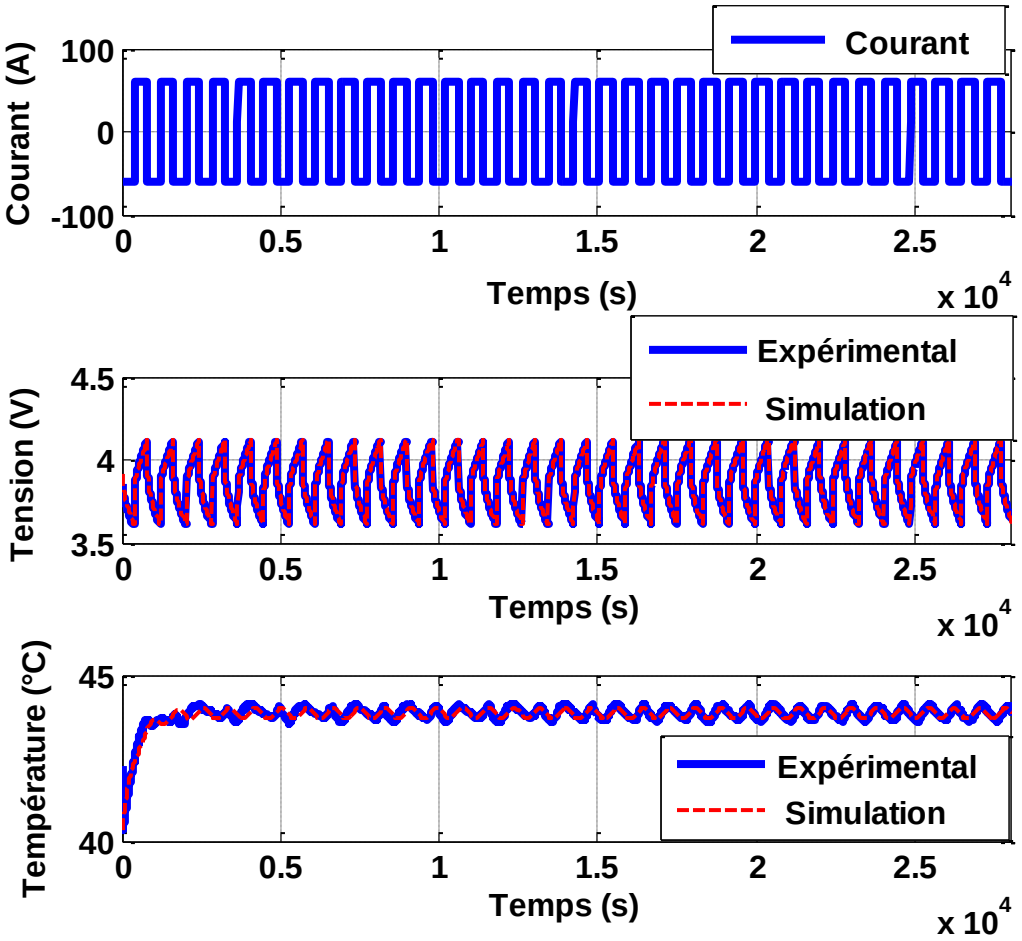


Figure. II. 45: Profil du courant (A). Comparaison expérimental /simulation modèle électrique identifié (B) .Comparaison expérimental/simulation du modèle thermique identifié (C).

La Figure. II. 45-B présente une comparaison de la tension de la batterie obtenue par simulation et par l'expérience. On peut remarquer une bonne concordance entre l'expérimentation et la simulation. La Figure. II. 45-C montre une comparaison entre la température mesurée et la simulation du modèle thermique de cellule batterie Li-ion pour le profil du courant charge /décharge de 60 A. On peut constater que le comportement réversible à l'échelle d'un cycle est respecté par le modèle thermique. De plus, ces résultats confirment le comportement dynamique du modèle thermique développé et la prise en compte des différents phénomènes au niveau de la source de chaleur.

II.4.3.2 Modélisation thermique des supercondensateurs

Dans la littérature, l'estimation de la chaleur générée par les supercondensateurs comme par les batteries est basée sur l'équation (II.25). La génération de chaleur se fait selon deux modes [199]. Le premier mode correspond à la chaleur dissipée par l'effet Joule et le second représente la chaleur entropique réversible. Néanmoins, dans une cellule de supercondensateur qui subit généralement un fort courant, le mode de génération de chaleur lié aux réactions électrochimiques est très faible. C'est pourquoi, la plupart des modèles proposés dans la

littérature négligent ce terme et considèrent la chaleur générée par les supercondensateurs comme étant seulement celle des pertes Joule issues de la résistance interne globale.

La modélisation thermique de supercondensateurs est la même que pour les batteries Li-ion, et conduit au même type de modèle à base de circuit électrique équivalent RC (cf. Figure. II. 44) utilisé pour les batteries Li-ion, mais avec une résistance thermique constante.

Le modèle thermique de circuit électrique équivalent RC retenu a été développé par *W.LAJNEF* [40] pour des supercondensateurs de type *MAXWELL*. Les paramètres de ce modèle simplifié R_{th} et C_{th} sont calculés à partir des deux phases (transitoire et permanent) de la réponse thermique du supercondensateur [40].

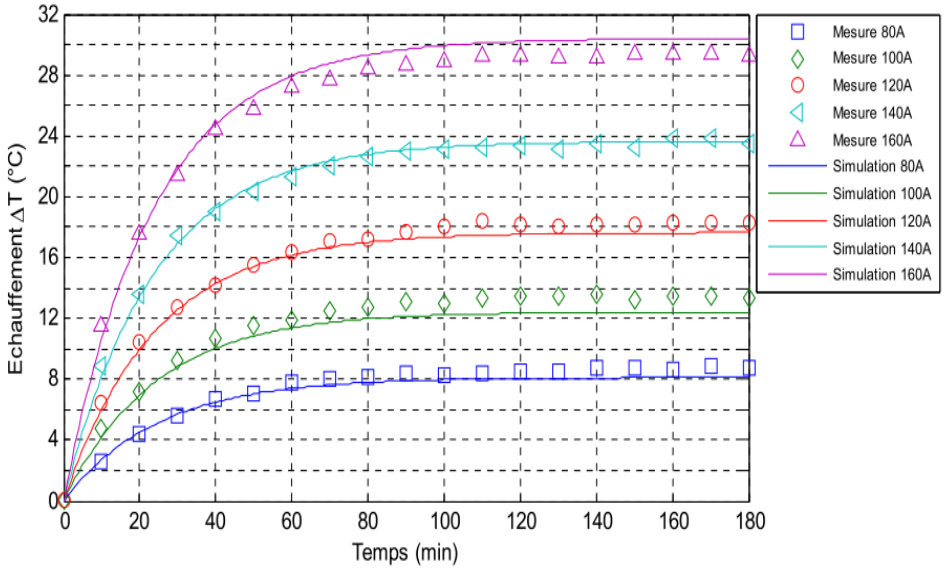


Figure. II. 46: Validation du modèle thermique de supercondensateurs [40]

La Figure. II. 46 illustre la comparaison entre la réponse expérimentale et celle du modèle. L'écart est toujours inférieur à 2°C, quel que soit le niveau de courant [40]. La validation du modèle thermique de supercondensateurs avec des profils du courant dynamique permet de confirmer la validité du modèle pour l'application du véhicule électrique. Dans ce contexte, un profil de courant caractérisé par une période de 60s et une valeur efficace de 150A (cf. Figure. II. 47-A) a été élaboré par *W.LAJNEF* [40] afin de tester le modèle dans les régimes de charge et décharge rapides.

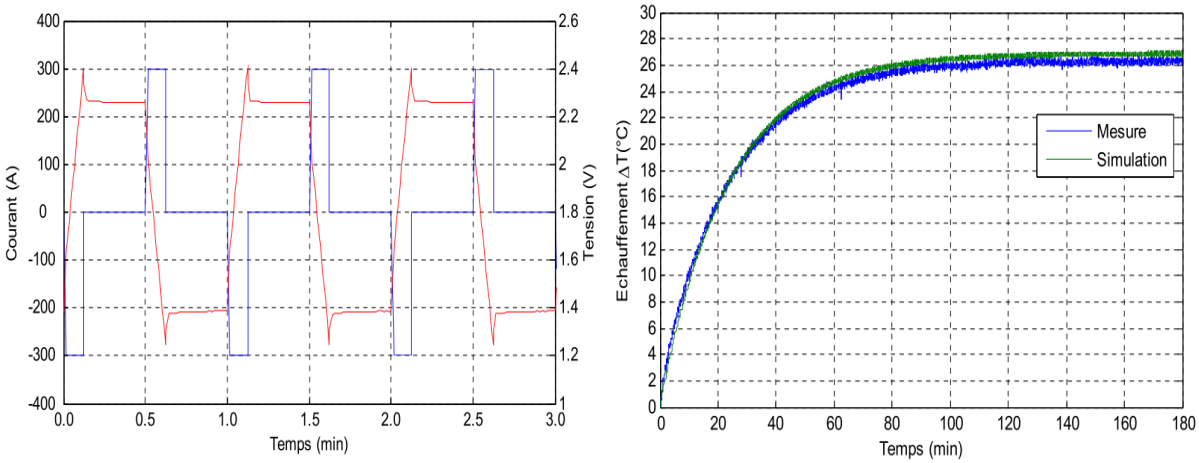


Figure. II. 47: Courant et réponse en tension du supercondensateur (A). Réponses thermique expérimentale et du modèle (B)[40]

Sur la Figure. II. 47-B, on peut remarquer que la réponse du modèle thermique suit globalement la réponse expérimentale. De plus, on constate que ce modèle de circuit électrique équivalent est capable de représenter les phénomènes thermiques typiques et de fournir l'évolution de température de supercondensateurs durant leur utilisation. Ce modèle a aussi l'avantage d'être implémentable dans un calculateur temps réel (BMS), ou d'être utilisable dans des applications hors-ligne en tant qu'outil de conception thermique.

La Figure. II. 48-A présente le cycle de caractérisation de charge et de décharge à courant constant (40A). La Figure. II. 48-B montre une comparaison entre la réponse en tension du modèle électrique identifié et la réponse d'un composant supercondensateur mesurée sur le banc de test. On peut constater que la réponse du modèle suit bien la réponse expérimentale. La Figure. II. 48-C présente une comparaison entre la température mesurée et la simulation du modèle thermique d'un composant supercondensateur. Cette comparaison confirme bien la validité du modèle thermique proposé et la prise en compte des différents phénomènes au niveau de la source de chaleur.

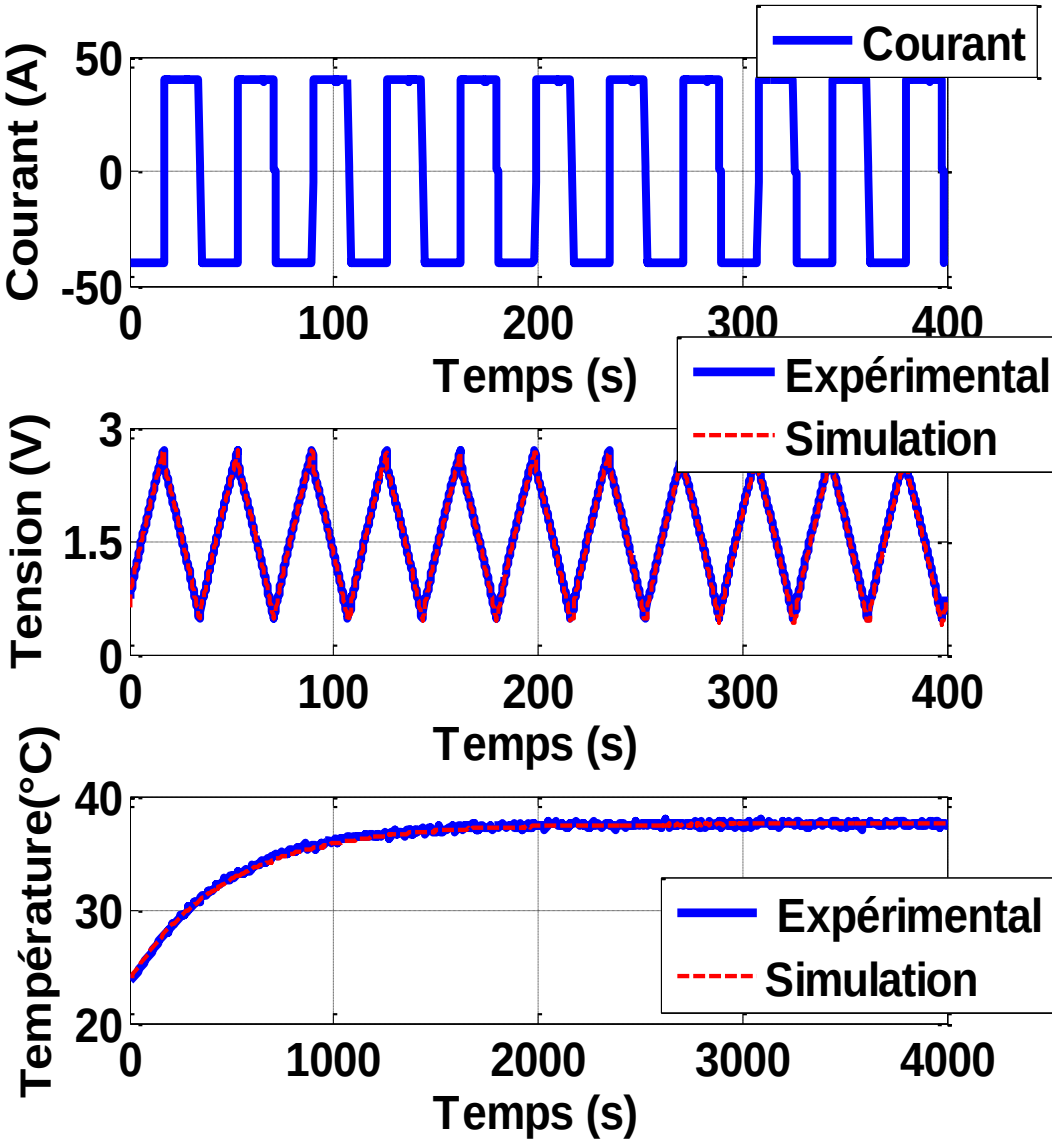


Figure. II. 48: Profil du courant (A). Comparaison expérimental /simulation modèle électrique identifié (B) .Comparaison expérimental/simulation du modèle thermique identifié (C).

II.5 Identification du modèle de vieillissement des batteries Li-ion

Afin de paramétrer le modèle retenu pour une alimentation hybride du véhicule électrique, nous avons besoin de données en vieillissement de cellules Li-ion. Pour cela, des essais de vieillissement en cyclage accélérés[15] pour les deux technologies *Kokam* Ko40HE et Ko40HP ont été réalisés avec différentes conditions d'usage en se basant sur les profils simplifiés de la Figure. II. 19.

L'évaluation des performances des batteries au cours du fonctionnement, à savoir la diminution de capacité et l'augmentation de résistance nécessite une phase de caractérisation effectuée de manière périodique (chaque 50 cycle) tout au long de la durée de vie des batteries. Selon la norme CEI-62660-1/2 [200], ces mesures exigent une recharge complète des cellules de batterie, suivie d'une décharge à courant constant jusqu'à la tension finale donnée par le fabricant. En effet, l'évaluation de la capacité et de la résistance interne est basée sur la mesure de courants et tensions de chaque élément durant cette phase [7]. La Figure. II. 49 montre le profil de cyclage des batteries Ko40HE. Obtenu par la classification des contraintes, il est répété sept fois pour correspondre à la distance de 150km (et pour obtenir une profondeur de décharge de 80%) et il est suivi d'un cycle de caractérisation.

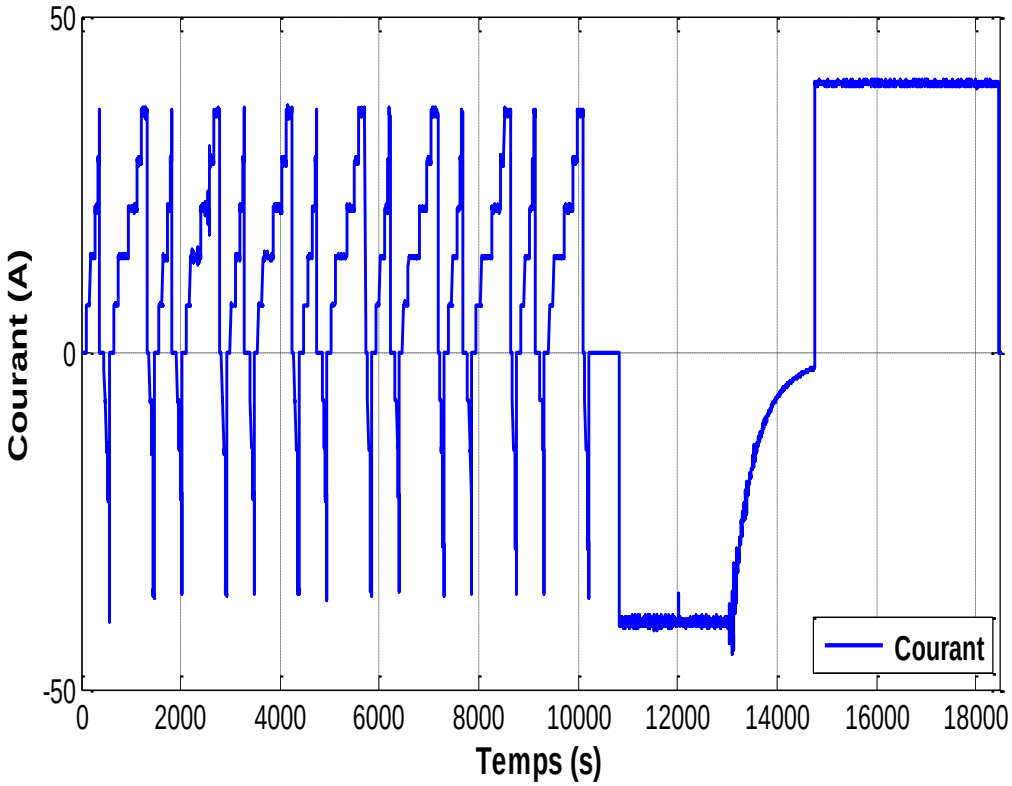


Figure. II. 49: Profil de courant de cyclage des batteries Ko40HE suivi d'un cycle de caractérisation

Par ailleurs, la mesure de la capacité est liée directement à l'énergie des cellules à l'instant (i) de cyclage donné par l'équation suivante :

[15] Les tests de vieillissement de cyclage accélérés consistent à appliquer un profil de cyclage à la batterie de maniéré répétitive.

$$E_{dech}^{i} = \int_{0}^{t_d} V.I.dt \qquad \text{(II. 29)}$$

Où I et V représentent, respectivement, le courant de décharge et la tension instantanée de l'élément de batterie. t_d est la durée de la phase de décharge.

La variation de la capacité ΔC^i à l'instant (i) par rapport leur valeur initiale est définie par :

$$\Delta C^i(\%) = \left(1 - \frac{E_{dech}^{i}}{E_{dech}^{0}}\right).100 \qquad \text{(II. 30)}$$

Où E_{dech}^{0} la valeur initiale de l'énergie au démarrage des essais de cyclage.

Pour la mesure de la résistance interne, l'énergie de la batterie en charge et décharge est donnée par :

$$\begin{cases} E_{bat}^{i} = E_{dech}^{i} + R^i \int_{0}^{t_d} I^2.dt \\ E_{bat}^{i} = E_{cha}^{i} + R^i \int_{0}^{t_c} I^2.dt \end{cases} \qquad \text{(II. 31)}$$

L'énergie de la batterie en charge E_{cha}^{i} est calculée par :

$$E_{cha}^{i} = \int_{0}^{t_c} V.I.dt \qquad \text{(II. 32)}$$

Pour déterminer la résistance interne R^i de la batterie à l'instant (i) de cyclage, on utilise l'équation suivante :

$$R^i = \frac{E_{cha}^{i} - E_{dec}^{i}}{\int_0^{t_d} I^2.dt + \int_0^{t_c} I^2.dt} \qquad \text{(II. 33)}$$

Par la suite, la variation de la résistance interne ΔR^i est estimée par :

$$\Delta R^i(\%) = \left(1 - \frac{R^i}{R^0}\right).100 \qquad \text{(II. 34)}$$

Où R^0 est la valeur initiale de la résistance interne au démarrage de ces essais de cyclage.

La Figure. II. 50-A montre le rapport (en %) entre la capacité disponible à l'instant de la mesure et la capacité initiale des deux cellules Ko40HP et Ko40HE. On peut remarquer la présence de deux pentes différentes au cours du cyclage pour chaque technologie. En début de cyclage (première phase), la pente est faible jusqu'à environ 1000 cycles. Ensuite, la pente devient plus importante jusqu'à la fin de vie des composants. Cette fin de vie est fixée, par définition, à 20% de perte de capacité par rapport sa valeur initiale. Au-delà de 1500 cycles, la perte de capacité de la cellule Ko40HP devient plus importante que celle de la cellule Ko40HE. Cela confirme l'avantage de l'hybridation de batteries Ko40HE avec des supercondensateurs en termes de durée de vie. Sur la Figure. II. 50-B, on peut constater l'évolution de la résistance interne (en %) pour les deux cellules Ko40HP et Ko40HE. Bien que la valeur de la résistance initiale de la batterie Ko40HE soit plus importante, l'augmentation de la résistance interne de la cellule Ko40HP en fonction du nombre de cycles est plus rapide. Nous remarquons aussi la chute rapide de la capacité des batteries Ko40HP au-delà de 1500 cycles. Par ailleurs, on

constate que le critère définissant la fin de vie des batteries par la dégradation des résistances n'est pas encore atteint pour ces essais de cyclage. Le critère de fin de vie, pour la résistance, est défini à 200% de la valeur initiale.

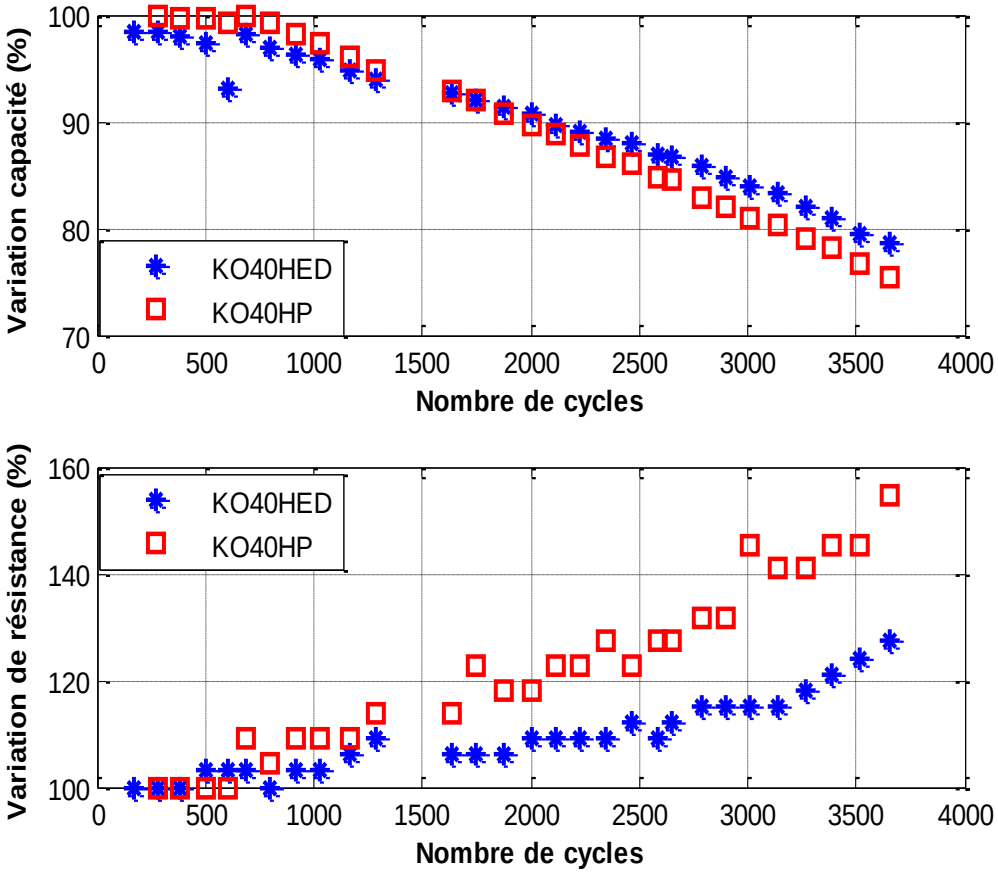


Figure. II. 50: Evolution de la capacité durant le cyclage (A). La résistance interne (B)

L'algorithme d'optimisation hybride PSO / NM utilisé auparavant pour l'identification des paramètres électriques et thermiques du modèle de batteries Li-ion se charge de trouver les paramètres du modèle de vieillissement des batteries Li-ion basé sur l'équation (II.8). Cet algorithme est utilisé à la fois pour l'identification des paramètres du modèle qui représentent la perte de capacité, et aussi pour l'identification de l'augmentation de la résistance interne des cellules de batteries étudiées (Ko40HE).

Pour simplifier l'identification des paramètres c_a , c_T et c_V du modèle de vieillissement, nous considérons que la durée de vie diminue de manière constante pour chaque augmentation de $\Delta V = 0.1V$ de la tension et pour chaque augmentation de $\Delta T = 10°C$ de la température. De plus, nous avons fixé la tension de référence V_0 à la tension nominale de batterie étudiée $V_0 = 3.7$ V , et la température de référence T_0 à 25 °C [135]. La Figure. II. 51 illustre la simplification des entrées du modèle de vieillissement des batteries (tension & température) durant l'identification de leurs paramètres. Sur un profil de courant de cyclage, suivie d'une phase de recharge, la tension et la température injecté dans le modèle de vieillissement est rafraichi quatre fois. Cette simplification résout les problèmes liés à la simulation en topologie à différentes constantes de temps (disparité des constantes de temps, temps de simulation long,...).

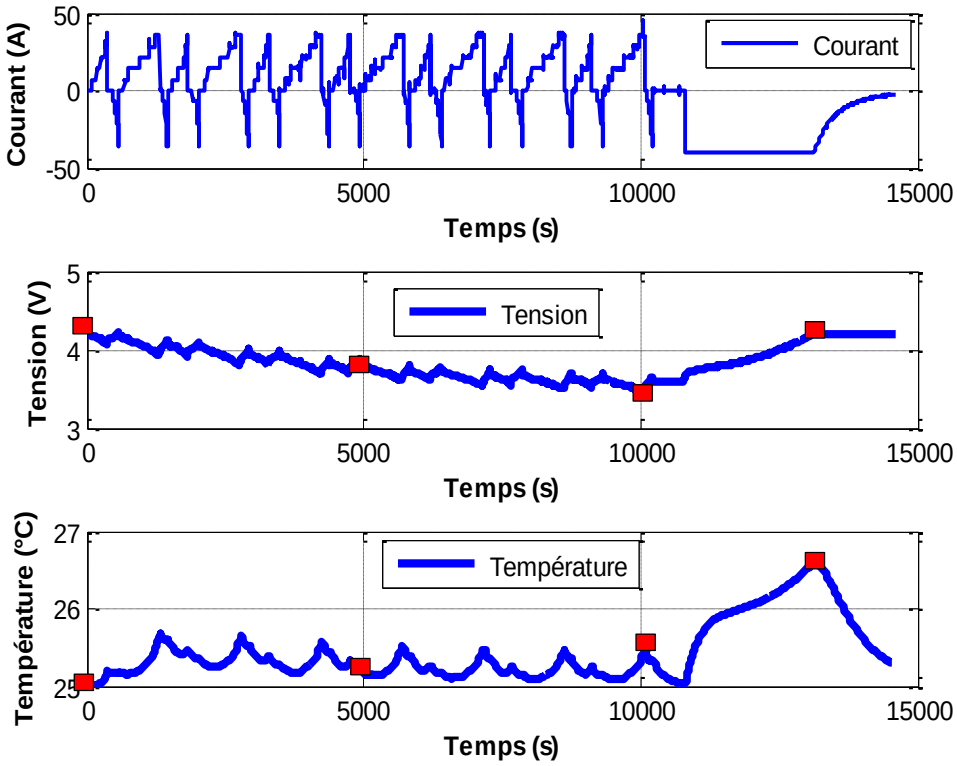


Figure. II. 51: Echantillonnage pour identification du modèle de vieillissement : Profil du courant (A). Tension batterie (B). Réponses thermique (C)

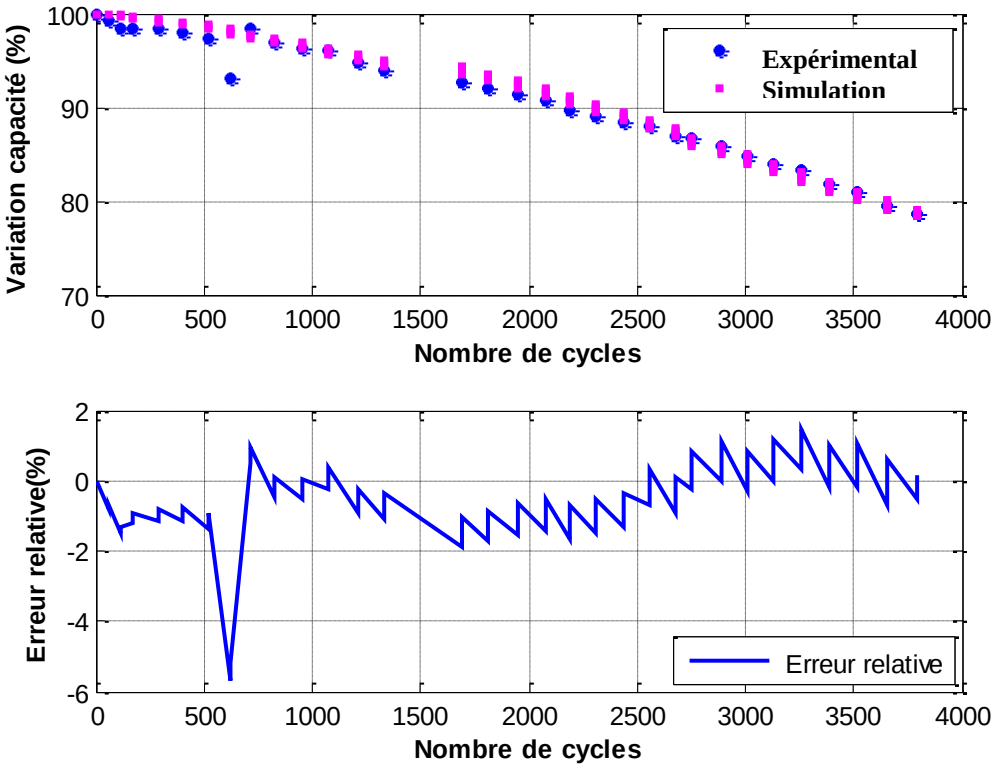


Figure. II. 52: Comparaison expérimental/modèle du vieillissement. Dégradation de capacité (A). Erreur relative (B)

La Figure. II. 52-A illustre une comparaison des résultats du modèle de vieillissement retenu avec un essai expérimental d'une cellule de batteries Ko40HE. Cette figure montre un bon accord entre la simulation et la mesure. L'écart entre les points de mesure et la réponse du modèle de vieillissement retenu est globalement acceptable sur le plan de prévision de la durée de vie de batteries. Comme le montre la Figure. II. 52-B, l'erreur relative est comprise entre ± 2 % (sauf pour le point correspondant à 600 cycles). Ceci prouve que le modèle développé pour le vieillissement des batteries Li-ion Ko40HE est satisfaisant.

Les deux courbes représentant l'evolution de la résistance interne des cellules de batteries Ko40HE obtenue expérimentalement, en cyclage accéléré, et par simulation du modèle, sont montrées sur la Figure. II. 53-A. On peut constater que la réponse du modèle suit globalement la réponse expérimentale avec une erreur relative ne dépassant pas 5% entre la résistance mesurée de la cellule et la valeur estimée par le modèle (cf. Figure. II. 53-B).

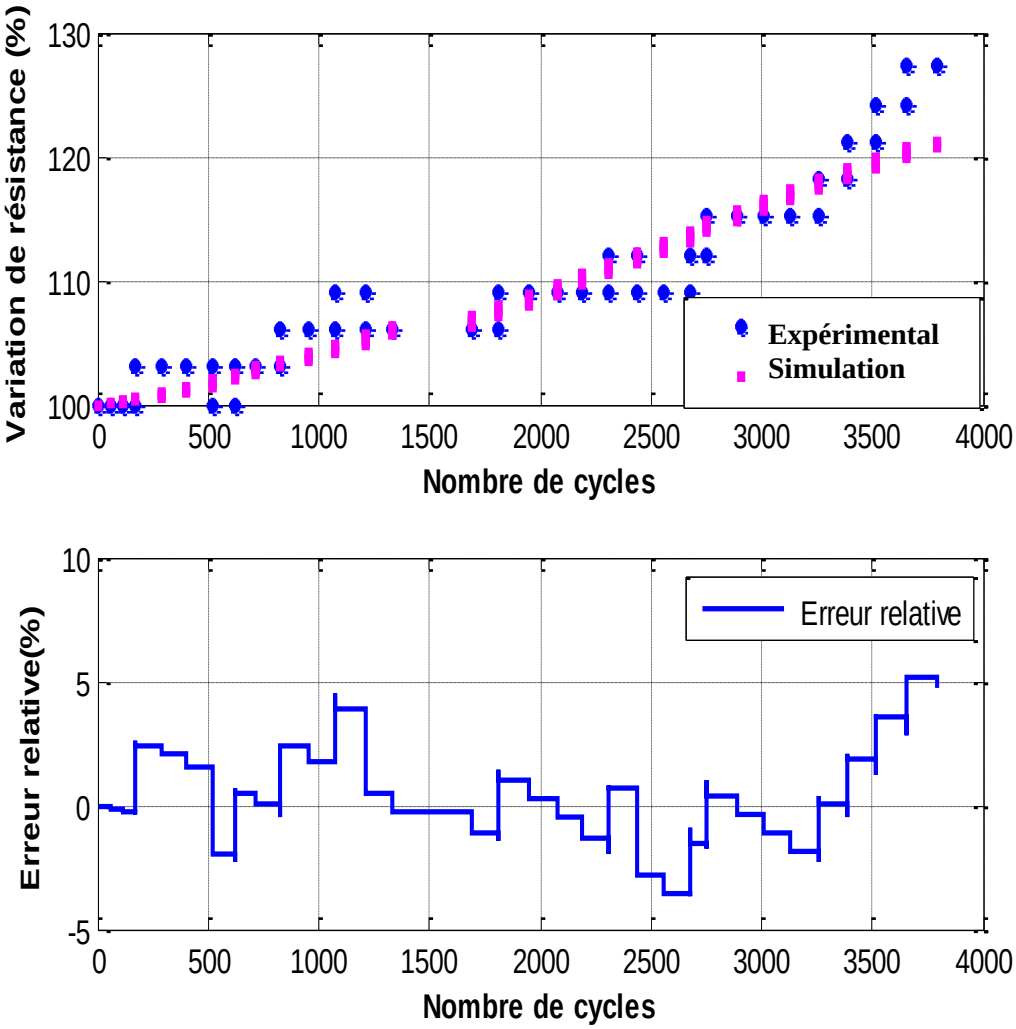


Figure. II. 53: Comparaison expérimental /modèle du vieillissement. Augmentation relative de résistance interne (A). Erreur relative (B)

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une modélisation multi-physique d'une source hybride composée de batteries Li-ion et de supercondensateurs afin de bâtir un modèle comportemental pour l'étude du vieillissement. On a choisi de réaliser la prédiction du vieillissement des batteries et des supercondensateurs à partir de modèles semi-empirique couplés à leurs modèles électriques et thermiques.

Après avoir présenté l'approche générale utilisée pour la modélisation multi-physique de la source hybride étudiée, nous avons présenté une brève synthèse sur les différents modèles électriques des batteries existants pour des applications de véhicules électriques. Nous nous sommes intéressés à un modèle électrique dynamique qui permette de simuler fidèlement le comportement temporel des batteries Li-ion. Le développement d'une méthode originale d'identification nous a permis de valider le modèle avec un profil de cyclage à forts niveaux de courant. Pour les supercondensateurs, un modèle électrique issu de travaux antérieurs a été sélectionné. Il est basé sur l'utilisation d'une « ligne de transmission » et ses paramètres ont été estimés relativement à des essais antérieurs.

Des modèles thermiques issus de la bibliographie et basés sur circuit électrique équivalent ont été appliqués pour les deux composants de la source hybride. Les distributions de température sont déterminées au sein du système en fonction des paramètres de fonctionnement, de la température extérieure et des conditions d'échange thermique avec l'extérieur. Le modèle batterie Li-ion a été validé expérimentalement avec un profil spécifique de courant. Le modèle thermique des supercondensateurs et ses paramètres ont été repris de la bibliographie et implanté dans notre modèle. Le modèle de vieillissement des batteries Li-ion a été identifié à partir de nos résultats expérimentaux. La comparaison de réponse du modèle avec nos résultats expérimentaux issus du vieillissement accéléré d'une cellule de batteries Ko40 HE montre un bon accord entre les deux réponses.

Cet outil va nous permettre d'étudier l'impact des stratégies de gestion d'énergie sur la durée de vie des systèmes de stockage hybride et sera le levier de comparaison des nouvelles méthodes de gestion proposées dans le dernier chapitre.

CHAPITRE III :
Nouvelles stratégies de gestion de la source hybride

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la gestion d'énergie d'une source de stockage hybride. Après avoir présenté les grandes familles de méthodes de gestion connues, nous ciblerons les méthodes les mieux adaptées au véhicule électriques et permettant d'agir sur les performances globales, à savoir la masse, le coût et la durée de vie. Notre objectif est donc de tester ces méthodes connues et de chercher à les améliorer. Il est alors nécessaire de quantifier les performances de la source hybride. Ceci sera identifié au travers de deux critères prédominants : sa masse et sa durée de vie.

Dans cette optique nous serons amenés à comparer différentes stratégies de gestion en termes de dimensionnement de la source hybride et de puissance efficace affectée à chaque stockage. Ces informations nous permettrons de quantifier les améliorations liées à ces stratégies pour finalement comparer leur vieillissement estimé à l'aide du modèle multi-physique développé dans le chapitre précédent.

Au final, on quantifiera le gain en masse et en durée de vie obtenu grâce à l'hybridation et aux méthodes développées, en comparaison de la solution classique dite « mono-source ». Cette étude sera faite pour un véhicule électrique de référence dont les caractéristiques sont données en annexe A et pour une plage d'autonomie variable.

III.2 Etat de l'art des méthodes de gestion d'énergie

La gestion des flux d'énergie dans une source de stockage hybride alimentant un véhicule électrique est toujours un sujet délicat, car il existe une infinité de façons de procéder. Les questions principales que l'on doit se poser sont :

- Comment gérer ces flux de manière « optimale » ?
- Quels est alors le bon compromis avantages/inconvénients ?

Dans notre cas, l'ajout d'une source auxiliaire disposant d'une forte puissance spécifique comme les supercondensateurs, permet de diminuer fortement les sollicitations en courant sur les batteries et ainsi augmenter les performances globales de la source de stockage (durée de vie, rendement, dynamique, autonomie, etc...). De plus, la présence de cette source d'énergie secondaire permet d'envisager des fonctionnalités supplémentaires, notamment en raison de sa réversibilité. Il devient alors possible de récupérer la totalité de l'énergie de freinage [201]. Cette répartition doit satisfaire la demande de puissance du moteur électrique et respecter les contraintes électriques et énergétiques du système de stockage [202]. Ce système hybride nécessite une stratégie de gestion d'énergie adaptée afin d'exploiter au mieux le potentiel des différentes sources et afin d'utiliser efficacement l'énergie embarquée. Elle peut être basée sur des règles déterministes ou non, mais également sur des fonctions objectifs (durée de vie de la batterie, confort de conduite, consommation énergétique du véhicule, etc...). De nombreux travaux ont été effectués sur le sujet. Comme montré sur la
Tableau III. 1, on peut classer ces stratégies en deux principales catégories :

- Les stratégies basées sur des règles prédéfinies
- Les stratégies basées sur l'optimisation

Stratégies de gestion d'énergie			
Stratégies à base de règles		**Stratégies à base d'optimisation**	
Règles déterministes [203][204][205][206][207][75][208][209][210][211]	Règles floues et réseaux de neurones artificiels (RNA) [212][213][64][214][215][216][217][218][219][62]	Optimisation Globale [220][221][222][223][221][224][225][46][226]	Optimisation Temps Réel [225][227][228][229][230][231][232][233]
• Machine d'état • Thermostat • Contrôle modifié • Suivi de puissance	• Prédictives • Adaptatives • Conventionnelles • Commande	• Programmation linéaire • Programmation dynamique • Contrôle optimal • Algorithme génétique	• Contrôle robuste • Contrôle prédictif • Minimisation de consommation équivalente

Tableau III. 1 : Classification des différentes stratégies de gestion d'énergie[82][234][235]

Dans la suite du chapitre, nous allons passer en revue les méthodes décrites dans la littérature afin de sélectionner les stratégies les mieux adaptées à notre application (simplicité, ressources matérielles, temps de calcul, robustesse lorsque le parcours n'est pas défini à l'avance).

Afin de limiter le volume et la masse de la source hybride, la réserve d'énergie disponible dans la source de puissance est en général limitée. Il est donc primordial de veiller à ce que sa mission ne puisse pas être compromise par une mauvaise gestion énergétique de cette dernière.

Comme le montre la Figure III. 1, le principal objectif consiste à gérer la répartition des puissances de manière à exploiter au mieux les performances des deux sources. Ceci doit se faire en respectant leurs contraintes, à savoir :

- Respecter la plage de tension d'utilisation des supercondensateurs
- Respecter les limitations en puissance de la batterie (en charge et en décharge)

Notons également que la gestion énergétique des supercondensateurs peut avoir un impact non négligeable sur la consommation en puissance de la batterie et ses contraintes. La Figure III. 1 résume le lien entre le dimensionnement et la gestion d'une source hybride. La variable d'entrée de ce processus est le profil de puissance du véhicule électrique et les

caractéristiques des batteries et des supercondensateurs. Les variables de sorties sont les consignes de puissance réparties sur les deux sources (P_{bat} et P_{SC}).

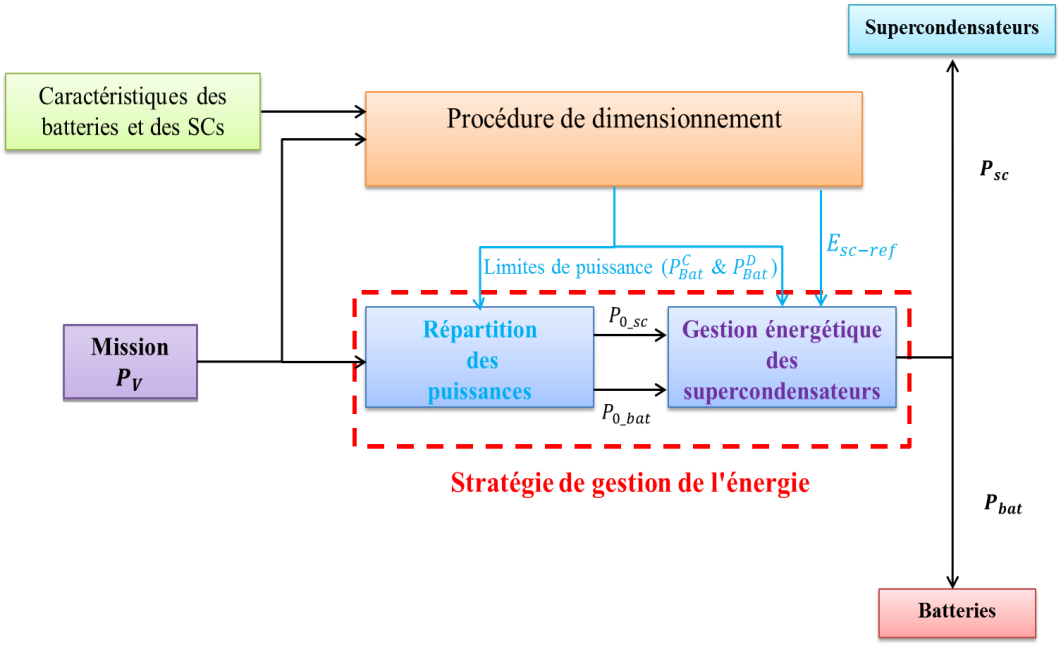


Figure III. 1: Principe de gestion d'énergie d'une source hybride

Toutes les méthodes présentées par la suite devront satisfaire à ces conditions pour pouvoir accomplir la mission imposée.

III.2.1 Méthodes de répartition des puissances à base d'optimisation

Le problème de la gestion énergétique revient dans ce cas à trouver la meilleure répartition de la puissance demandée entre les différentes sources de stockage d'énergie, de manière à minimiser le coût du système. Ce dernier peut être basé sur la consommation de carburant, les émissions de polluants, la durée de vie des composants, le confort de conduite, etc [202][32]. Dans ce contexte, une série de techniques d'optimisation ont été appliquées ces dernières années pour résoudre le problème de gestion d'énergie dans les véhicules électriques hybrides, comme la programmation linéaire ou la programmation non linéaire (LP et NLP), la programmation dynamique (DP), la commande optimale linéaire-quadratique (LQ), et l'algorithme génétique (GA) [236]. L'objectif principal de ces techniques d'optimisation est d'assurer en permanence la puissance demandée le long d'un profil de mission, en minimisant autant que possible la fonction « coût » du système [237].

En ce que concerne la régulation énergétique des sources secondaires, un critère d'optimisation qui tient compte de plusieurs paramètres à la fois (surtout le maintien de l'état de charge de la source de puissance) est généralement utilisé dans ces stratégies de gestion de l'énergie basée sur l'optimisation.

Dans les deux parties suivantes, nous présentons une analyse de deux groupes de méthodes couramment utilisées pour la gestion optimale de l'énergie.

III.2.1.1 Stratégies de gestion hors ligne

Ces techniques d'optimisation sont destinées à la résolution de problèmes d'optimisation dits difficiles (avec contraintes, de taille importante, hybride, etc.) et sont généralement

stochastiques et itératives [32]. Les stratégies de gestion d'énergie basées sur l'optimisation hors ligne nécessitent la connaissance du profil de conduite pour trouver la meilleure répartition de puissance entre les sources d'énergie à chaque point de la mission. Cela rend l'implémentation en temps réel de ces stratégies d'optimisation globale irréalisable, par contre elles sont très utiles pour l'ajustement d'autres stratégies de gestion à base de règles.

Dans la littérature, la recherche d'une technique exacte qui donne une solution optimale a été l'objectif de nombreuses recherches ces dernières années. Cependant, la programmation dynamique est une technique qui permet de résoudre un problème d'optimisation globale à travers une séquence de calculs successifs. Cette technique a été largement utilisée pour résoudre le problème de gestion d'énergie au sein de véhicules hybrides. Elle a été appliquée par *E.VINOT et al* [220] pour répartir la puissance dans un système hybride de stockage composé d'une batterie et de supercondensateurs avec une fonction objectif basée sur la minimisation du courant efficace de la source principale.

La théorie de la commande optimale a été utilisée aussi pour la résolution de problèmes de gestion d'énergie dans plusieurs travaux [222][223][221]. Avec cette théorie, les stratégies de gestion d'énergie permettent de calculer l'optimum global qui minimise (ou maximise) un critère de performance sur un cycle de vitesse donné et sous les hypothèses posées.

L'application d'une méthode d'optimisation multi-objectif pour la gestion d'énergie en utilisant un algorithme génétique pour le dimensionnement et le contrôle optimal de flux de puissance d'un système multi-source est présenté par *M.G. MONTAZERI et al* [224]. D'autres méthodes d'optimisation aléatoires (encore appelées stochastiques ou métaheuristiques) sont utilisées pour trouver la solution optimale de répartition de puissance dans un système hybride. A titre d'exemple, on peut citer l'algorithme par essaim de particules PSO (*Particle Swarm Optimization*), l'algorithme d'optimisation (*Bacterial Foraging*), le recuit simulé, l'algorithme de Monte-Carlo et de Tabou [236][238]...

III.2.1.2 Stratégies de gestion en ligne

Les techniques d'optimisation globale ne sont généralement pas applicables en temps réel et pour la plupart nécessitent d'importants temps et puissances de calcul. Pour cela, certains chercheurs proposent des stratégies permettant d'obtenir une commande instantanée (en temps réel) des flux énergétiques et ne nécessitent pas la connaissance du profil de conduite par avance. Dans ce contexte, la stratégie de commande optimale basée sur le principe du maximum de Pontriaguine a été utilisée pour obtenir une répartition de puissance optimale instantanée dans un véhicule hybride [238][233][225]. En général, dans cette approche, une cartographie donnant la puissance optimale du moteur thermique en fonction de la puissance demandée à la roue est établie ainsi qu'un paramètre scalaire K définissant la propension à plus ou moins décharger la source secondaire (batterie, PAC, supercondensateurs) sur le cycle. De ce fait, ce paramètre correspond à un profil d'état de charge optimal durant l'utilisation.

Une autre stratégie de gestion d'énergie en ligne dite « ECMS » pour *Equivalent Consumption Minimization Strategy*, proposée par *MUSTARDO et al* [228], est basée sur un algorithme adaptatif. Cet algorithme utilise une fonction qui calcule l'équivalent de l'énergie de recharge de la batterie en consommation de carburant. La consommation globale est égale à la somme de la consommation du véhicule hybride délivrée par le moteur thermique et l'équivalent délivré par le moteur électrique.

La programmation non-linéaire (NLP) permet aussi de résoudre le problème de répartition de puissance dans un système hybride en temps réel. *F. TIEFENSEE et al* [229], proposent une approche non-linéaire (*Passivity Based Control-PBC methodology*) basée sur la passivité du système pour trouver le point optimal de fonctionnement d'une source hybride (PAC, supercondensateurs). Cette approche, qui dans cette étude est échantillonnée, permet

entre autres de garantir la stabilité asymptotique de l'association commande/système ainsi qu'un meilleur rendement énergétique.

D.V.NGO et al [230] proposent une stratégie de gestion d'énergie pour un véhicule hybride basée sur l'anticipation en utilisation d'informations délivrées par des systèmes de navigation (état du trafic, et la pente de la route). Ces informations sont ensuite identifiées et classées selon les types de conditions de roulage (urbaine, périurbaine, autoroutière, etc.). La programmation dynamique couplée avec la méthode du gradient d'optimisation a été utilisée pour trouver la solution optimale selon l'état du trafic. Dans cette stratégie de gestion d'énergie, la connaissance du parcours peut améliorer sensiblement les performances énergétiques du véhicule ; néanmoins, concernant les conditions de roulage, comme pour les méthodes d'optimisation stochastiques, les performances de cette stratégie dépendent de la pertinence d'estimation de ces dernières [32].

III.2.2 Méthodes de répartition des puissances à base de règles

Les méthodes de gestion d'énergie à base de règles ont l'avantage d'être plus simplement implémentables en temps réel et ne nécessitent pas, a priori, de connaître le cycle de conduite par avance [67][68][239] contrairement aux stratégies basées sur l'optimisation. Les règles de gestion d'énergie utilisées dans cette catégorie sont définies au préalable, sur la base d'une expertise ou sur l'analyse du comportement des composants du système. Nous présentons dans cette partie les principales méthodes de gestion d'énergie à base de règles pour une source de stockage hybride dans le domaine de l'automobile.

III.2.2.1 Stratégies basées sur les règles floues ou les réseaux de neurones

A. Les règles floues

La logique floue ou de l'anglais ″Fuzzy Logic″ est une théorie qui a connu un grand engouement depuis que *L. A. ZADEH* [240] a introduit le concept de sous-ensembles flous en 1965. C'est une technique adéquate pour la résolution de problèmes où des incertitudes entachent la connaissance dont on dispose sur le système. Il convient d'utiliser cette technique lorsque la modélisation rigoureuse du système est difficile ou lorsqu'il est très complexe à appréhender et à commander [202]. Dans ce sens, les variables d'entrée du système sont décomposées en plusieurs ensembles que sont les fonctions d'appartenance représentées par des triangles ou des parallélogrammes ou toutes autres formes. Ces fonctions prennent des valeurs comprises entre 0 et 1 de manière graduelle, comme montré sur la Figure III. 2. Le caractère graduel des sous-ensembles flous correspond à l'idée que plus on se rapproche de la caractérisation typique d'une classe, plus l'appartenance à cette classe est forte. Dans ce contexte, cette technique ne fait pas intervenir de relations mathématiques directes, mais utilise plutôt des inférences avec plusieurs règles définies via l'expertise acquise dans le champ d'application. La logique floue, par sa capacité à reproduire le raisonnement humain semble particulièrement adaptée à la répartition de puissance dans une source de stockage hybride. Elle possède en effet la robustesse nécessaire pour prendre naturellement en compte les variations du système [241].

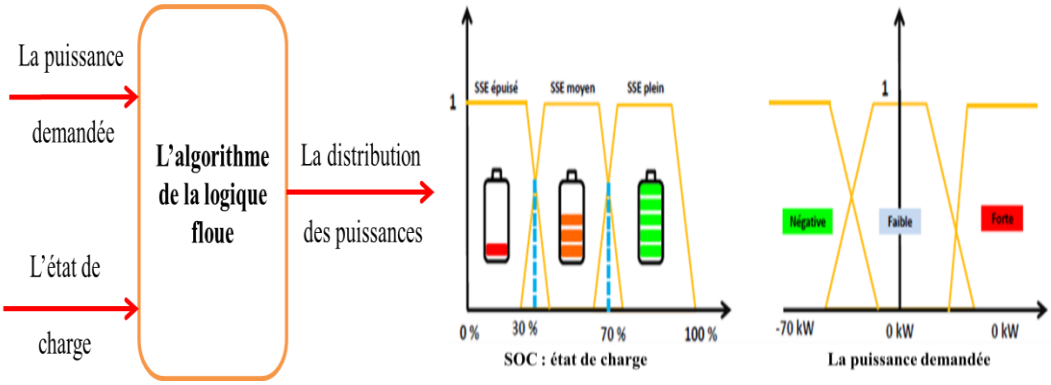


Figure III. 2 :Principe de la logique floue [54]

L'application des stratégies de gestion d'énergie à base de logique floue dans les véhicules électriques ou hybrides est un sujet de grand intérêt dans les recherches académiques ou industrielles actuelles. Dans ce contexte, une stratégie de gestion d'énergie pour un système hybride de stockage basée sur des règles floues a été proposée par *M. C. KISACIKOGLU et al* [212]. Cependant, le but principal de cet algorithme est la satisfaction de la puissance demandée par le moteur électrique ainsi que l'amélioration de la répartition de puissance entre les trois sources (Pile à combustible (PAC), batterie, supercondensateurs). Les règles floues sont établies pour que la PAC fournisse la puissance moyenne sans répondre aux pics. La batterie avec les supercondensateurs assistent la source principale afin de garder le meilleur rendement global du système.

Dans l'étude de *Q.ZENG et al* [216], un contrôleur flou a été utilisé pour caractériser l'angle d'ouverture des papillons du moteur à combustion interne en fonction de l'état de charge des batteries et du couple de traction demandé. *M.H.HAJIMIR et al* [242] proposent une nouvelle approche dite « *Predictive and Protective Algorithm* » *(PPA)* basée sur des règles floues pour la gestion d'énergie d'un véhicule hybride série. La stratégie de gestion développée prend en considération l'état de santé (*State Of the Health SOH*) de la batterie. Par conséquent, si le *SOH* de la batterie est critique, la stratégie de gestion doit réagir en limitant les deux principaux facteurs qui influencent la durée de vie : le courant maximal et le nombre de cycles de charge/décharge de la batterie. Dans l'étude du *A.WANG et al* [243], l'unité de contrôle flou sert de même à trouver la puissance de la batterie en fonction de la puissance demandée et l'état de charge de l'élément de stockage.

M. ZANDI [244] a développé une stratégie de gestion d'énergie pour un système multi-source basée sur la combinaison de la commande issue de la modélisation par platitude et la commande par logique floue. Le système intègre deux sources d'énergie secondaires : des supercondensateurs et des batteries. Cependant, le partage de puissance est réalisé en fonction de l'état de charge (SOC) des organes de stockage en utilisant la commande par logique floue. Plus précisément, en cas de variations de charge, la puissance issue du système de stockage est fournie par la commande de la modélisation par platitude et la répartition de puissance entre les batteries et les supercondensateurs est gérée grâce au contrôle flou.

Q.LI et al [245], présentent une nouvelle stratégie de gestion d'énergie basée sur des règles floues. La demande de puissance de moteur électrique et l'état de charge (SOC) de la batterie sont considérés comme des variables d'entrée par le système de décision flou, et la variable de sortie est la puissance de la PAC. Quatre modes de fonctionnement sont définis selon l'état de la source et celui du véhicule : démarrage, recharge de la batterie, PAC et batterie sollicitées, récupération d'énergie de freinage. Cette stratégie de gestion a été testée avec quatre cycles de conduite afin de montrer sa performance pour différentes conditions.

Dans ses travaux de thèse sur les stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source, *A.NEFFATI* [202] a proposé une approche de gestion temporelle floue

en utilisant la méthode de segmentation et de basculement. L'objectif final visé de cette stratégie est la gestion de l'énergie électrique du véhicule hybride en ligne, en minimisant autant que possible la consommation totale d'hydrogène avec une répartition optimale de la puissance entre les diverses sources et en respectant les contraintes énergétiques des éléments de stockage. L'avantage principal de cette stratégie de gestion est l'amélioration du rendement énergétique global de la source hybride. Ceci est possible sur n'importe quel type de cycle de conduite, avec des résultats très proches de la consommation optimale.

Dans l'article de *H.HONGWEN et al* [217], la gestion d'énergie d'un système hybride constitué de supercondensateurs et d'une batterie est effectuée avec une stratégie active basée sur la logique floue. Les facteurs utilisés dans le système de décision flou pour repartir la puissance entre les deux sources sont : la demande de puissance du moteur électrique, l'état de charge (SOC) de la batterie et de supercondensateurs et la vitesse du véhicule. Une unité additionnelle de contrôle de l'énergie de supercondensateurs a été ajoutée au système de contrôle flou standard pour garder le rendement énergétique élevé. La vitesse du véhicule en ligne est considérée comme la variable clé pour la décision dans cette unité de contrôle.

B. Les réseaux de neurones artificiels

Une autre approche intéressante pour la gestion énergétique dans le véhicule électrique hybride est celle basée sur les outils de l'intelligence artificielle tels que les essaims particulaires ou les réseaux de neurones artificiels (RNA). Ces derniers sont, à l'origine, une imitation du fonctionnement du cerveau d'humain, et constituent une approche permettant d'aborder et de formuler mathématiquement des problèmes de perception, de mémorisation, d'apprentissage et de raisonnement [246]. Généralement, les neurones artificiels sont regroupés en couches, chaque neurone d'une couche étant connecté à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante (excepté pour la couche d'entrée et celle de sortie du réseau). Cependant, le passage de l'information dans ces réseaux artificiels est effectué de la couche d'entrée à la couche de sortie en passant soit par aucune, soit par une ou plusieurs couches intermédiaires (cachées) [247]. L'apprentissage d'un réseau de neurones signifie qu'il change son comportement de façon à lui permettre de se rapprocher d'un but défini. Celui-ci est normalement l'approximation d'un ensemble d'exemples ou l'optimisation de l'état du réseau en fonction de ses poids pour atteindre l'optimum d'une fonction économique fixée a priori [248]. Cette spécificité rend l'utilisation de réseaux de neurone intéressante dans les applications où la sauvegarde des meilleurs essais permet l'amélioration du fonctionnement du système dans les futures opérations.

Différentes stratégies de gestion d'énergie basées sur les réseaux de neurones artificiels pour une application automobile ont été proposées dans la littérature. A titre d'exemple, *J.MORENO et al*,[218] proposent une approche de gestion d'énergie pour un véhicule électrice hybride en utilisant les réseaux de neurones artificiels. Cette stratégie est développée en profitant des avantages de supercondensateurs comme source de puissance pour limiter la décharge de la batterie durant le fonctionnement du véhicule. L'apprentissage des réseaux de neurones artificiels a été utilisé dans ce cas pour optimiser le fonctionnement du système hybride de stockage d'énergie dans différentes conditions.

M.ORTUZAR et al [102], développent une stratégie intelligente de gestion d'énergie pour un système multi-source. Ils utilisent les réseaux de neurones artificiels pour trouver la meilleure répartition de puissance entre les batteries et les supercondensateurs. Cependant, la construction de ces réseaux de neurones est faite après plusieurs tests d'apprentissage.

Dans l'article de *Y.ATES et al* [62], la gestion du flux de puissance dans un système hybride de stockage d'énergie est assurée par une stratégie originale basée sur la transformée en ondelettes multi-niveaux couplée avec les réseaux de neurones artificiels. Cette technique

mathématique permettant d'extraire les caractéristiques temporelles et fréquentielles, et ainsi de séparer un signal donné (la demande de puissance) en différentes bandes de fréquences. L'utilisation des réseaux de neurones adaptatifs *Adaptive Linear Neural Network (ADALINE)* avec les avantages de l'apprentissage en ligne, l'auto-adaptation et la structure simple pour perfectionner la stratégie fréquentielle multi-niveaux, rend cette approche plus efficace dans les systèmes de stockage hybrides.

III.2.2.2 Stratégie thermostat On/Off

La stratégie thermostat *On/Off* est connue pour son efficacité, sa robustesse et son fonctionnement en temps réel. Le principe est très simple et similaire au principe du thermostat électromécanique [54][249]. La répartition de puissance dépend principalement de l'état de charge de la source de stockage secondaire. Il faut garder le SOC entre les deux bornes supérieure et inférieure prédéfinies, comme illustré sur la Figure III. 3 [250]. Le choix de cette fourchette est généralement fait de façon à faire fonctionner la source de stockage autour de sa meilleure performance globale. Dans ces travaux [60][250][251][252], cette stratégie a été utilisée avec différentes configurations du système multi-source pour une application automobile.

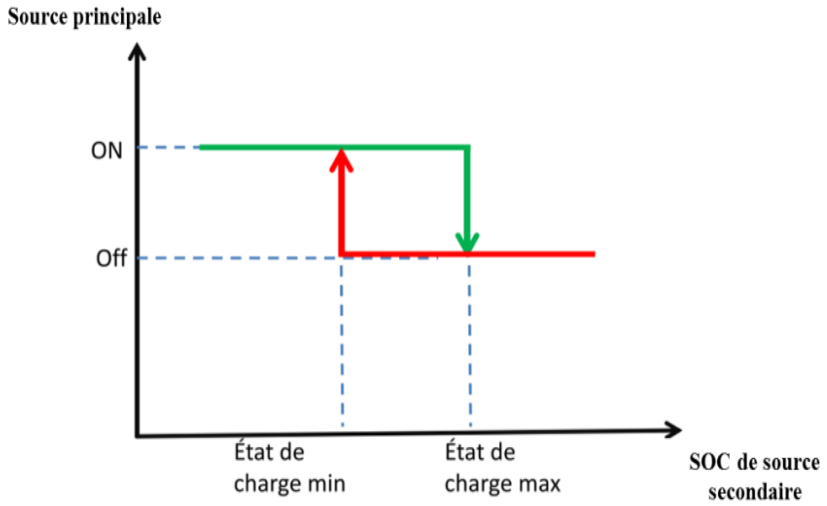


Figure III. 3 : Principe de la stratégie thermostat

En général, cette stratégie ne peut pas toujours satisfaire la demande en puissance du véhicule électrique. De plus, elle présente un risque de phénomène dit de « chattering » (permutations intempestives d'algorithmes) lorsque le système fonctionne au voisinage de deux modes de fonctionnement. Ceci engendre de fortes sollicitations de courant avant d'obtenir une convergence vers la valeur finale (état stable) [57]. Aussi l'intérêt de cette stratégie est limité aux architectures et dimensionnements fortement hybridés « full hybrid », notamment pour les véhicules hybrides série pour lesquels elles sont bien adaptées [70].

III.2.2.3 Stratégie basée sur la dynamique du véhicule

Cette méthode est basée sur la décomposition de la puissance de traction nécessaire à l'avancement du véhicule en deux parties : une puissance résistive globale P_{res} et une puissance pour l'accélération du véhicule P_{acc}. Dans l'objectif de diminuer les contraintes de puissance appliquées sur la batterie pour prolonger sa durée de vie, le pack supercondensateur assure la demande de puissance pendant les phases d'accélération et décélération P_{acc} et la batterie répond

aux besoins de puissance résistive globale P_{res}. Un exemple de répartition de puissance par cette stratégie est illustré sur la Figure III. 4.

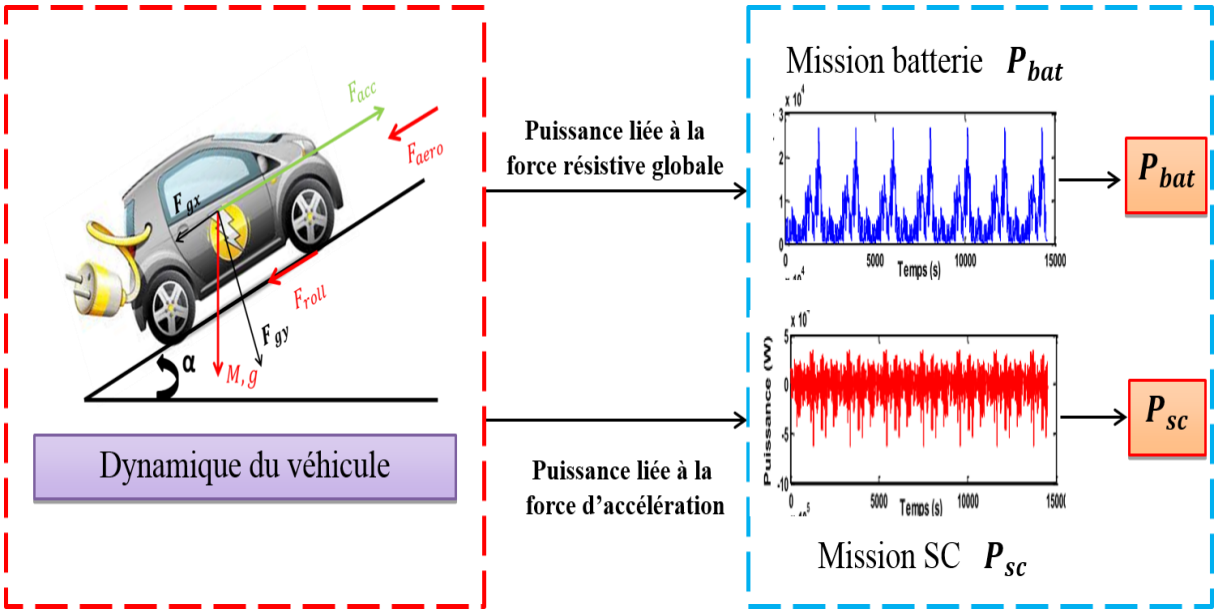


Figure III. 4: Principe de décomposition des puissances de la stratégie basée sur la dynamique du véhicule

Généralement, l'accélération est estimée par la dérivée de la vitesse du véhicule, mais cette méthode présente l'inconvénient d'introduire l'opérateur non causal de dérivation. Aussi une autre approche proposée consiste à asservir la vitesse et utiliser exclusivement la causalité intégrale pour estimer l'accélération du véhicule [75][208]. Notons ici qu'il n'existe pas de paramètre réglable de la répartition de puissance comme pour les méthodes précédentes. La seule possibilité, pour pouvoir maitriser les contraintes batteries, est d'agir sur le style de conduite, ce qui peut paraître frustrant pour le conducteur.

Dans cette stratégie, les supercondensateurs fournissent sensiblement autant d'énergie qu'ils en absorbent et il est nécessaire d'ajuster leur niveau de tension pendant les temps d'arrêt du véhicule pour équilibrer l'échange en effectuant des échanges de puissance avec la batterie.

III.2.2.4 Stratégie basée sur le choix du chemin le moins résistif

Dans l'objectif de diminuer les pertes au niveau de la source de stockage hybride**,** *A.L. ALLEGRE* [75] a proposé une stratégie dans laquelle un coefficient de distribution de puissance entre les sources de stockage (batterie / supercondensateurs), nommé K_d, est calculé de façon à minimiser les pertes globales de la source. Celles-ci étant considérées directement proportionnelle à Ri^2, cette stratégie va avoir tendance à solliciter la source de stockage ayant la plus petite résistance interne. La résistance interne équivalente du pack de batteries étant généralement plus grande que celle du pack de supercondensateurs, l'utilisation de ce dernier est favorisée par cette stratégie en respectant les contraintes énergétiques des deux sources [253]. Par ailleurs, le coefficient de distribution K_d est obtenu par le rapport entre le courant de référence de la mission globale et celui de la batterie. Ce dernier est calculé de façon à minimiser les pertes dans la source de stockage hybride à partir d'une méthode de calcul effectuée hors ligne et basée sur les caractéristiques et le modèle de la source qui est fortement simplifiée. Cela diminue la fiabilité de cette stratégie dans les applications automobiles et limite son utilisation.

Pour cette méthode il est également nécessaire d'ajuster le niveau de charge des supercondensateurs pendant les temps d'arrêt du véhicule pour équilibrer les échanges.

III.2.2.5 Stratégie fréquentielle

La gestion fréquentielle d'énergie consiste à rendre complémentaire les sources d'énergie et de puissance (batterie / supercondensateurs) en tenant compte des caractéristiques intrinsèques de chaque source pour assurer la mission globale du véhicule. L'idée directrice de cette stratégie consiste à répartir les composantes basse fréquence de la puissance de traction à la source d'énergie (P_{Bat}) et les haute fréquence à la source de puissance (P_{sc}) [210][203].

Ceci peut être obtenu à l'aide d'un filtre passe-bas caractérisé par une fréquence de partition (Fc : autrement nommée fréquence de coupure) qui a évidemment un effet direct sur les contraintes appliquées au pack batterie. L'effet de cette fréquence impacte également le dimensionnement des supercondensateurs puisque la constante de temps du courant qui les traverse en est modifiée. Il n'existe actuellement aucune méthode directe permettant de calculer de manière directe cette fréquence de coupure [210]. Dans notre cas, et pour déterminer cette fréquence de partition, nous nous sommes basé sur les travaux de recherche réalisés par *A. HAMMANI* [203] . Ils portaient sur les méthodes de dimensionnement des sources hybrides pour l'alimentation d'un véhicule électrique. De ce fait, nous avons choisi la valeur optimale de la fréquence de coupure (Fc = 0,00694Hz) permettant d'obtenir la meilleure masse de notre source hybride avec la stratégie fréquentielle.

La Figure III. 5 illustre le principe de la gestion énergétique fréquentielle. La puissance (P_V) requise pour la propulsion du véhicule électrique est décomposée en deux parties par le filtre passe-bas.

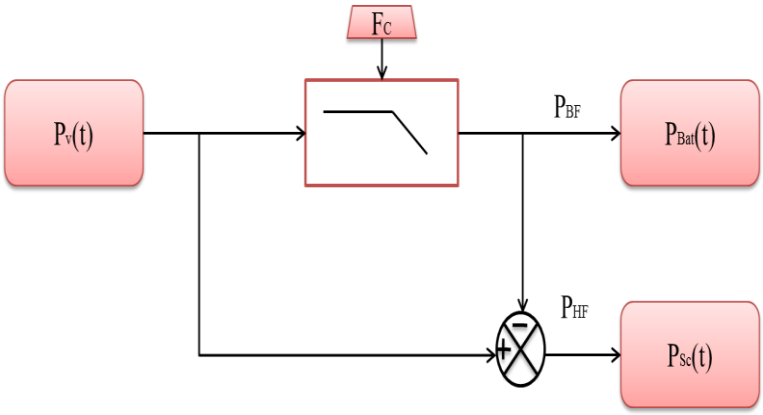


Figure III. 5: Principe de la stratégie énergétique fréquentielle

Une autre stratégie fréquentielle adaptative développée par *A.FlORESCU* [209] consiste à faire fonctionner le supercondensateur dans une gamme de tension correspondant à un intervalle bien défini et sécurisé. L'idée de la résolution du problème de gestion de l'énergie par séparation en fréquences adaptatives est de maintenir la tension de supercondensateurs dans un intervalle de protection donné en remplaçant le filtre fixe présenté dans la stratégie de base par un répartiteur de fréquence adaptatif. Avec cette méthode de gestion d'énergie le pack supercondensateurs doit être capable d'assurer la puissance requise comme par exemple d'éventuelles accélérations (décélérations) importantes. Cette approche d'auto-adaptation de fréquence de coupure selon la nature de la mission a été utilisée aussi par *C.AKLI* [210] pour une application de locomotive hybride autonome.

A.NEFFATI [202] propose aussi dans ses travaux de thèse sur la gestion d'énergie d'un système de stockage multi-sources de nombreux dispositifs intégrant des outils qui permettent la gestion fréquentielle optimale de l'énergie selon les différents profils de mission du véhicule. L'une de ses principales contributions consiste à filtrer a priori avec un filtre de lissage

numérique la puissance demandée, de façon à affecter les puissances de traction basse fréquence à la source principale (pile à combustible), l'élément de stockage prenant en charge les puissances positives haute fréquence d'une part et pour des puissances négatives, assure la possibilité de déstocker l'énergie de freinage.

III.2.2.6 Stratégie basée sur la limitation de puissance de la batterie

Cette stratégie utilise une approche classique de saturation de puissance. Elle consiste à limiter préalablement la puissance de charge et de décharge de la batterie sur l'ensemble du trajet considéré. L'utilisation des limites de puissance permet alors de maintenir l'état de charge de la batterie dans une fourchette acceptable et offre un degré de liberté supplémentaire aidant à optimiser le fonctionnement du système hybride de stockage. En effet, le choix des limites de puissance de la batterie est généralement lié à la puissance moyenne de la mission et aux caractéristiques internes des deux composants. La Figure III. 6 présente la gestion d'énergie dans une source hybride où la puissance instantanée est décomposée en deux missions. Cet exemple de profils de puissance montre bien que l'algorithme de gestion d'énergie limite la puissance de la batterie dans les deux phases (charge/décharge). Le pack de supercondensateurs assure alors la différence de puissance entre la mission du véhicule (P_v) et celle de la batterie (P_{bat}).

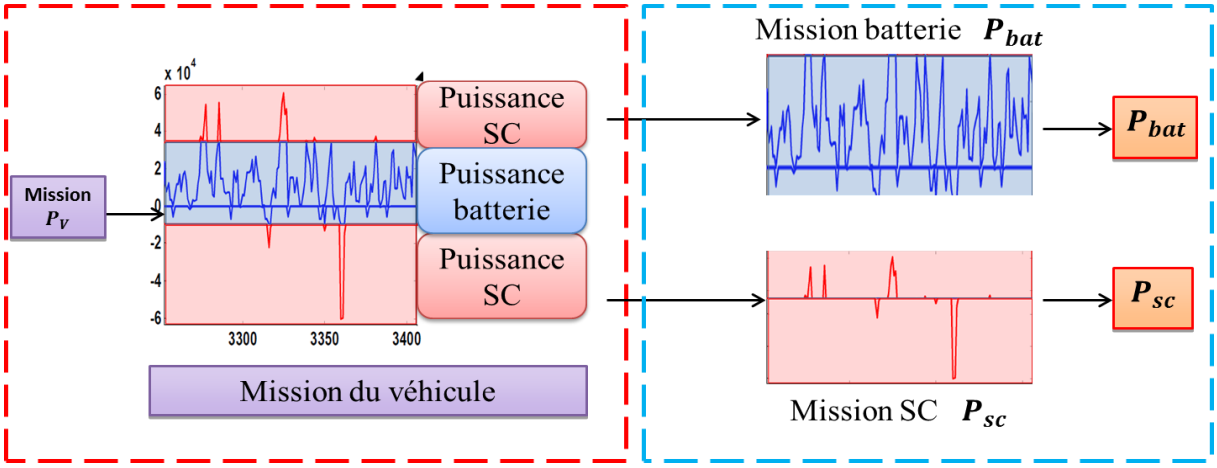


Figure III. 6 : Stratégie basée sur la limitation de la puissance batterie

Cette stratégie a été testée dans un véhicule léger appelé ***Cobra***, dont la source hybride d'énergie embarquée est composée de batteries au plomb et de supercondensateurs. L'algorithme [147] a été réglé dans le but d'augmenter soit l'autonomie du véhicule, soit la durée de vie des batteries au plomb en diminuant le courant de la batterie.

III.2.3 Synthèse des méthodes de gestion d'énergie

La qualité de la stratégie de gestion choisie pour une source hybride embarquée influe directement sur l'efficacité du véhicule électrique ou hybride. La recherche de la meilleure stratégie de gestion de l'énergie en termes de ressources nécessaires, d'optimisation et de facilité d'implantation a conduit au développement de nombreuses méthodes [37]. Au vu des méthodes de gestion d'énergie exposées précédemment, il apparaît qu'aucune approche ou stratégie n'a encore fait l'unanimité. Nous proposons donc de sélectionner celles qui nous paraissent les plus pertinentes afin de procéder à une étude comparative plus approfondie.

Comme nous l'avons déjà dit, les stratégies de gestion d'énergie pour une source hybride peuvent être classées en deux principales catégories :

- Les stratégies basées sur l'optimisation.
- Les stratégies basées sur des règles prédéfinies

Le Tableau III. 2 présente une synthèse des différentes familles de méthodes en fonction de différents critères.

Critère de comparaison		**Simplicité**	**Embarquée à bord**	**Parcours inconnu**	**Temps de calcul**	**Solution optimale**	**Robustesse**
Stratégies à base d'optimisation	**Optimisation Temps Réel**	😐	😐	☺	☹	☺	☺
	Optimisation Globale	☹	☹	☹	☹	☺	☺
Stratégies à base de règles	**Règles déterministes**	☺	☺	☺	☺	😐	😐
	Règles floues et réseaux de neurones	☹	☺	😐	☺	☹	😐

Tableau III. 2 : Synthèse des méthodes de gestion d'énergie

L'avantage des stratégies basées sur l'optimisation telles que la programmation dynamique et la théorie de la commande optimale, est qu'elles permettent d'obtenir des solutions exactes au problème de gestion d'énergie dans une source hybride [202], en utilisant la minimisation d'un critère, d'une fonction coût, tenant compte soit de l'autonomie, les pertes d'énergie, la durée de vie des stockeurs, la récupération d'énergie au freinage [202]. Néanmoins, les nombreux paramètres qui entrent en jeu, ainsi que la nécessité permanente d'adaptation à l'environnement et la connaissance a priori du cycle de puissance demandée (trajet effectué par le véhicule) empêche ces méthodes d'être directement embarquées à bord [32][37][202] [147]. De plus, ces méthodes étant globales, il est très difficile d'en extraire des informations sur des méthodes d'optimisation généralisables à différentes situations ou configurations.

Quant aux stratégies de gestion à base de règles déterministes, leur principal avantage est leur simplicité et une relative rapidité de mise en œuvre sur un calculateur temps réel. De plus, ces stratégies ne nécessitent pas, a priori, de connaître le trajet du véhicule par avance

[75]. Par contre, leur principal défaut est que ces méthodes reposent sur la connaissance de l'expert qui a conçu les règles et que celles-ci ne sont valables que dans le domaine de cette expertise [147]. En effet, ce type d'algorithme ne peut être généralisable à toutes les architectures, à tous les dimensionnements et tous les véhicules, dans toutes les conditions de roulage [32]. Néanmoins, ce défaut peut être compensé par la description détaillée des procédures utilisées.

Au final, les méthodes à base de règles déterministes sont les plus simples à implanter, évaluer et comparer. C'est vers celles-ci que nous nous sommes orientés pour la suite de l'étude. Dans cette optique, nous avons choisi de travailler sur les stratégies de gestion suivantes :

- ***La séparation de puissance fréquentielle***
- ***La limitation de puissance batterie***

III.2.4 Méthodes de gestion de référence

Les deux méthodes de gestion choisies reposent sur un principe de séparation de la puissance de mission du véhicule ne prenant pas en compte les contraintes du module de supercondensateurs. Leur niveau d'énergie doit être géré pour pouvoir assurer la mission complète. Ainsi, les puissances issues des deux principes précédents ne peuvent être appliquées directement et une stratégie de gestion des supercondensateurs doit être implantée en supplément pour assurer la fonction « puissance » de la source hybride sur toute la mission. La maîtrise de l'E_{sc_ref} (énergie de référence des supercondensateurs), impose la consigne de recharge de ces derniers (*P_{SC}-régulation*) qui module le partage initial des puissances de la stratégie de gestion (cf. Figure III. 7).

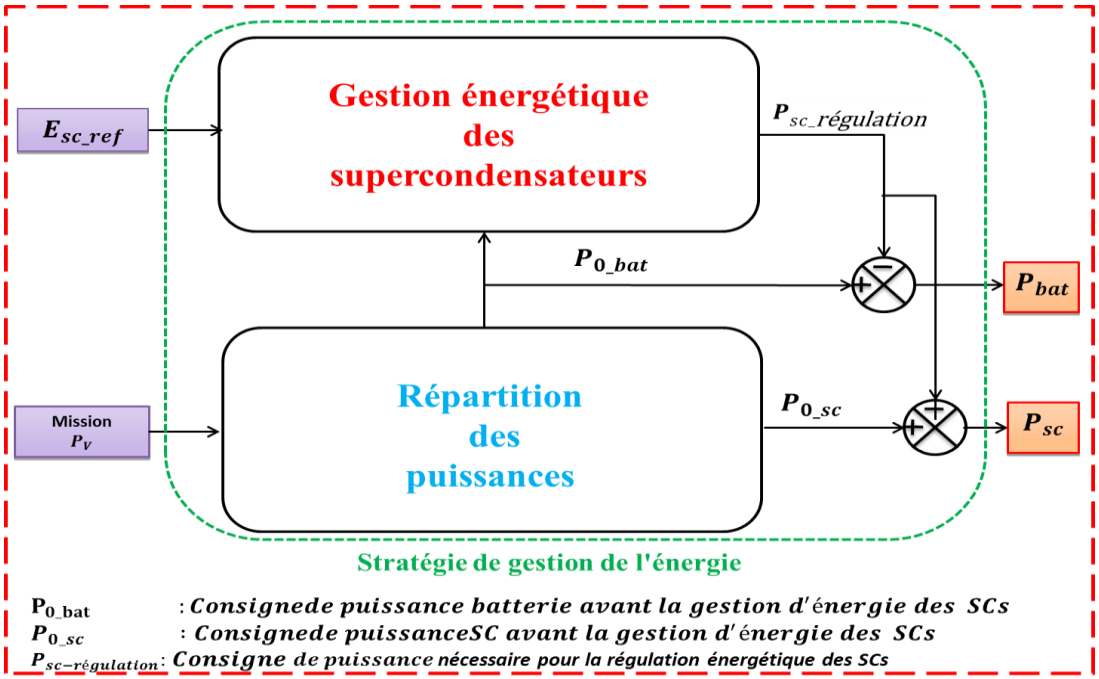


Figure III. 7 : Principe de gestion de l'énergie d'une source hybride avec régulation de la source de puissance

Dans cette partie nous présentons dans un premier temps les deux méthodes de recharge utilisées des supercondensateurs qui seront associées aux méthodes de séparation des

puissances choisies précédemment, puis nous définirons les méthodes de gestion de référence globales.

III.2.4.1 Stratégie de régulation énergétique des Supercondensateurs

Comme cela a déjà été mentionné, les supercondensateurs sont des stockeurs qui possèdent une très faible densité d'énergie par rapport aux batteries. Afin de limiter la masse et le volume embarqué, il convient donc de réduire au maximum les variations d'énergie qu'ils ont à gérer. Il faut donc faire en sorte de maintenir en permanence la tension dans une plage convenable. La régulation d'énergie des supercondensateurs doit être suffisamment efficace pour que le système puisse être opérationnel en permanence, mais doit aussi être suffisamment « souple » afin de laisser sa tension fluctuer suffisamment pour assurer sa mission principale qui est d'assister en puissance les batteries.

Deux méthodes ont été retenues pour la gestion de l'état de charge des supercondensateurs :

- La première méthode consiste à réajuster leur énergie à l'arrêt du véhicule, le système de stockage étant au repos (hors alimentation auxiliaires).
- La seconde méthode consiste à contrôler l'énergie des supercondensateurs en permanence, en ajoutant une puissance supplémentaire au système de répartition de la puissance calculée à l'aide d'une boucle de régulation adaptée.

Pour les deux méthodes retenues, le dimensionnement des supercondensateurs sera obtenu pour pouvoir revenir à l'équilibre lors de chaque cycle afin d'assurer tout le temps les demandes de puissance du système de traction, sans problème de saturation en tension (charge complète ou décharge complète) [75][7]. Cette référence d'énergie E_{sc_ref} est calculée pour que la tension des supercondensateurs varie entre la tension nominale V_{sc} et minimale ($\frac{1}{2} V_{sc}$) [79].

A. Régulation énergétique du pack de supercondensateurs à l'arrêt du véhicule

Dans cette solution, la recharge des supercondensateurs se fait à courant constant provenant des batteries durant l'arrêt du véhicule. Cette solution n'est intéressante que pour un trajet effectué en zone urbaine, où les arrêts sont fréquents et de durée suffisante (attente à un feu rouge,…). Si le véhicule reste à l'arrêt suffisamment longtemps, les supercondensateurs sont rechargés jusqu'à un niveau énergétique défini préalablement. Ce niveau cible est choisi pour que l'état énergétique des supercondensateurs revienne à son état initial à la fin du cycle [7][75]. Le diagramme de la Figure III. 8 illustre ce principe de fonctionnement. L'algorithme est appliqué à l'arrêt du véhicule en veillant à faire en sorte que le bilan d'énergie soit réajusté à la valeur initiale. La puissance de traction du véhicule étant nulle au moment du réajustement (on néglige la puissance des auxiliaires), le transfert se fait entre les deux sources.

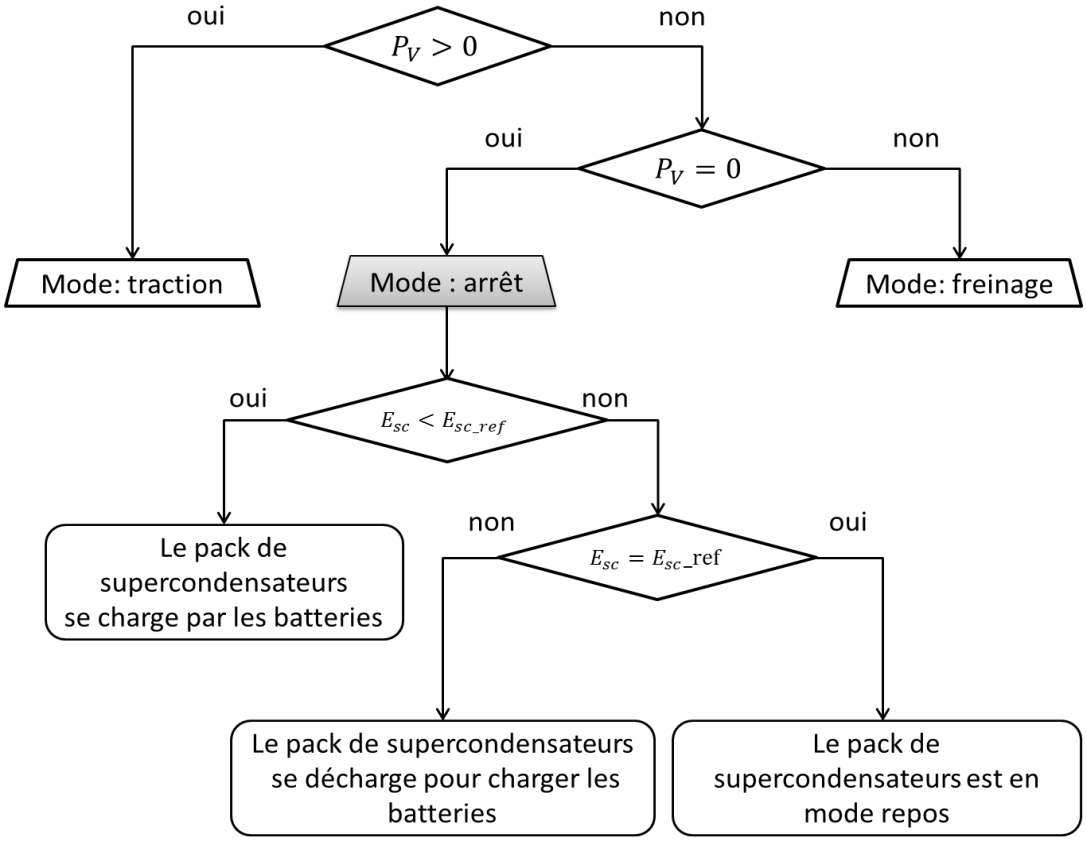


Figure III. 8: Recharge des supercondensateurs à l'arrêt du véhicule

La Figure III. 9 montre l'évolution de l'état de charge des supercondensateurs avec la solution de recharge à l'arrêt. Nous observons que le pack de supercondensateurs n'atteint ni sa limite maximale ni sa limite minimale sur la mission. De plus, la contrainte de maintien de niveau énergétique des supercondensateurs qui exige l'égalité de l'état de charge final par rapport à celui initial est bien respectée (comportement cyclique).

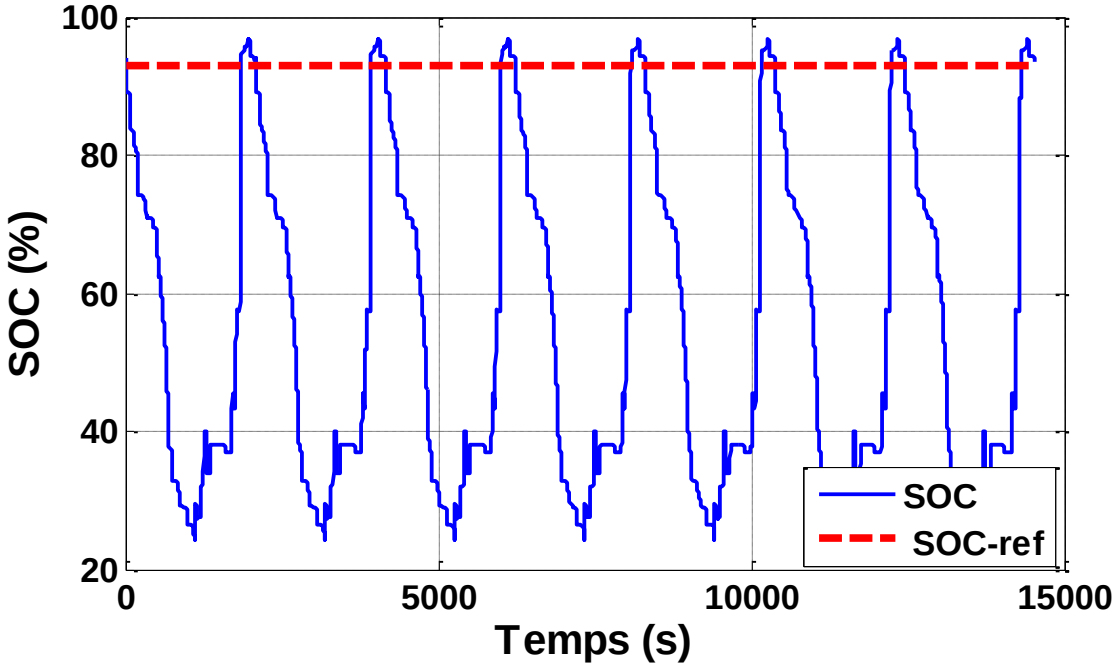


Figure III. 9 : Régulation de l'état énergétique des supercondensateurs par recharge à l'arrêt

B. Régulation énergétique du pack de supercondensateurs par boucle de régulation

Dans ce cas, une boucle d'asservissement gère en permanence l'état énergétique des supercondensateurs. L'objectif de ce contrôle est d'éviter la dérive énergétique du pack de supercondensateurs durant le fonctionnement du véhicule afin de lui permettre de toujours soutenir en puissance les batteries [7]. Comme le montre la Figure III. 10, l'énergie obtenue en sortie d'un intégrateur est comparée à une valeur de référence. Si on ne prend pas en compte les conditions initiales et que l'on a préalablement chargé le pack de supercondensateurs à une valeur définie, l'énergie aura tendance à rester autour de cette valeur.

Il faut cependant autoriser les variations d'énergie car, dans le cas contraire, les supercondensateurs ne pourraient plus assister le pack batterie dans sa mission. Le cas extrême serait la compensation du moindre écart d'énergie. Les supercondensateurs perdraient alors leur intérêt puisque la régulation énergétique compenserait en totalité l'effet du bloc de répartition de puissance. Il sera donc necessaire d'adapter les contraintes par l'intermédiaire du réglage du correcteur PI de la boucle. La deuxième exigence est de faire en sorte que la puissance imposée au pack batterie ne dépasse pas les valeurs préconisées par le constructeur. C'est le rôle du bloc de saturation placé en aval du correcteur PI (cf.Figure III. 10). Les grandeurs P^C_{bat} et P^D_{bat} représentent les limites de puissances en Charge et en Décharge des batteries préconisées par le fabricant.

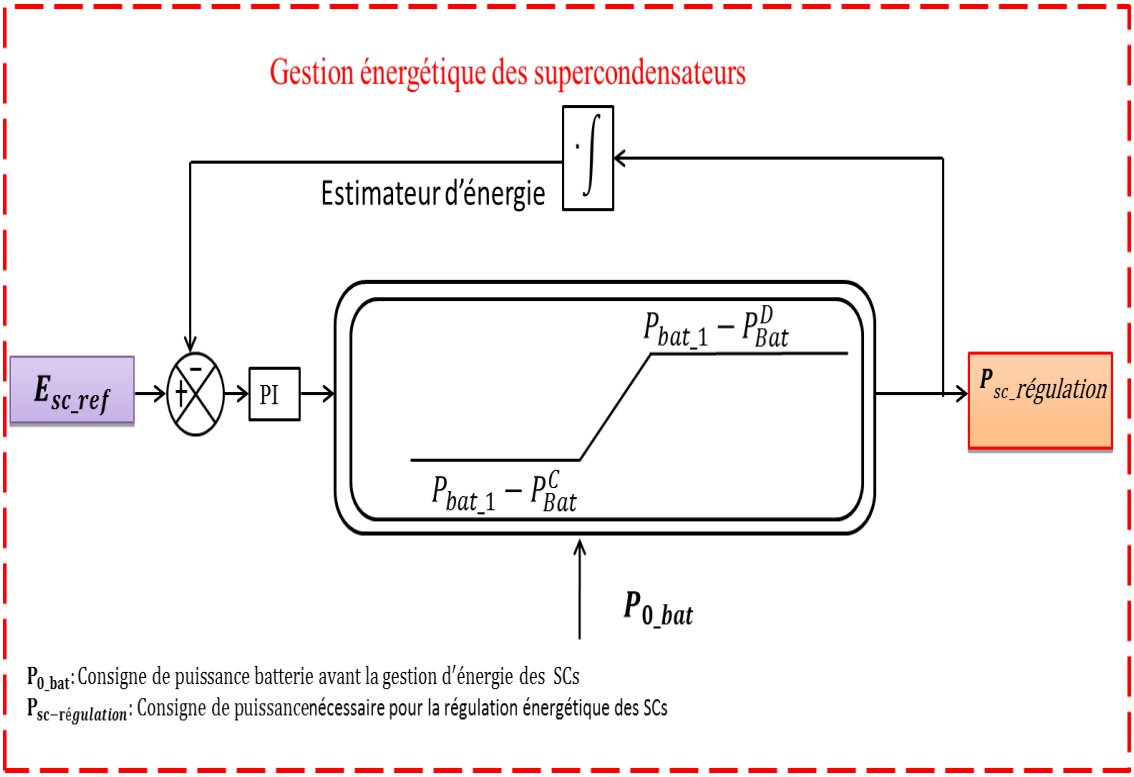


Figure III. 10: Régulation énergétique des supercondensateurs par boucle de régulation

La Figure III. 11 représente l'évolution de l'état de charge des supercondensateurs avec la régulation énergétique par un contrôleur PI. On peut constater que l'état de charge des supercondensateurs est régulé à sa valeur de consigne fixée à 94% de l'énergie stockée. Cette régulation énergétique permet de maintenir l'évolution de l'état de charge entre ses deux bornes : « SOC_{min} = 25% » et « SOC_{max} = 100% ».

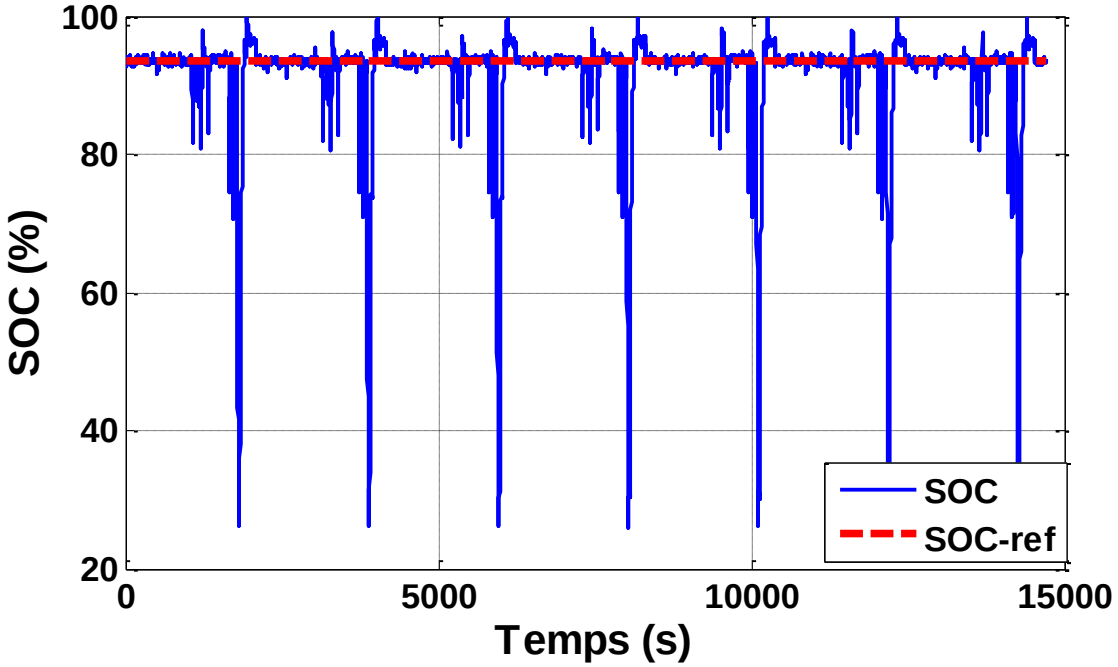


Figure III. 11 : Régulation de l'état énergétique des supercondensateurs à l'aide d'un contrôleur PI

Une autre solution, similaire à la régulation énergétique par correcteur PI, a été proposée par *B. MORIN* [89], et *M.G. ARREGUI* [254]. Cette stratégie est basée sur le maintien de l'état de charge des supercondensateurs à un niveau requis. Ceci est obtenu par une boucle de régulation de type proportionnel, couplée au filtrage de la tension à l'aide d'un filtre passe-bas (cf. Figure III. 12), la tension V_{sc_ref} étant définie en fonction de l'énergie maximale utilisable.

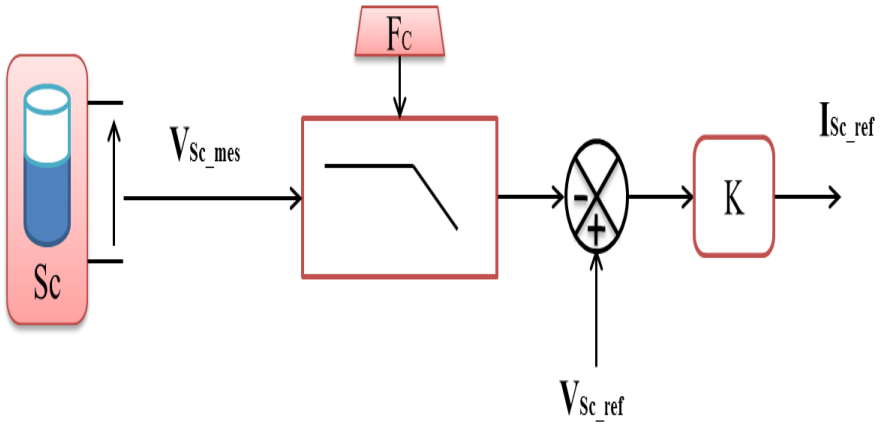


Figure III. 12: Boucle de régulation des supercondensateurs avec gain et filtre passe bas

La fréquence de coupure du filtre passe-bas est ajustée de manière à découpler l'effet des deux tâches à accomplir :

- La répartition de puissance, qui doit agir instantanément pour répondre à la demande du véhicule et au soutien à la batterie
- La gestion de la charge des supercondensateurs qui doit, comme indiqué précédemment, autoriser une certaine souplesse afin de donner la possibilité à ces derniers d'assister en puissance le pack batterie.

Notons que ces deux méthodes sont équivalentes puisque, si on fait les hypothèses suivantes sur la première régulation (cf. Figure III. 10):

- Fonctionnement en petits signaux : le bloc de saturation n'est pas actionné.
- Gain *Ki* de l'intégrateur du correcteur PI réglé à 1.

Le correcteur PI peut alors être assimilé à un filtre passe-bas dont la fréquence est réglable par le gain de la partie proportionnelle du correcteur (*Kp*). Avec la première méthode, les grandeurs gérées sont les énergies et puissance, et dans le second cas, ce sont les tensions et courants.

Dans la suite des travaux, c'est la régulation présentée sur la Figure III. 10 ***qui est utilisée.***

III.2.4.2 Stratégies de gestion MG1, MG2, MG3, MG4

Quatre méthodes ont été ciblées pour la suite de cette étude. Elles sont la combinaison de stratégies de répartition de puissance (fréquentielle et limitation de puissance batterie) et des deux méthodes de régulation énergétique des supercondensateurs définies précédemment. Ces quatre méthodes nommées MG1, MG2, MG3 et MG4 sont définies dans le tableau ci-dessous et détaillées dans cette partie.

	Régulation des SC à l'arrêt	**Régulation des SC par boucle de régulation**
Stratégie fréquentielle	**MG1**	**MG2**
Stratégie limitation de puissance batterie	**MG3**	**MG4**

Tableau III. 3 : Méthodes sélectionnées pour la suite de l'étude

A. Stratégie fréquentielle avec recharge des supercondensateurs à l'arrêt du véhicule («MG1»)

La stratégie fréquentielle classique (cf. Figure III. 5) est généralement couplée avec la méthode de recharge à l'arrêt [7][75]. Ce transfert de puissance entre les supercondensateurs et les batteries peut s'effectuer de différentes manières et notamment à courant constant, à puissance constante, à puissance maximale [75]. Cette stratégie est nommée **«MG1»**.

B. Stratégie fréquentielle avec régulation énergétique des supercondensateurs par boucle de régulation («MG2»)

La fréquence de répartition (*Fc*) dans une stratégie fréquentielle joue un rôle déterminant dans le dimensionnement du système hybride de stockage. En effet, à capacité de stockage donnée, plus cette fréquence est basse, plus la tension des supercondensateurs aura tendance à fluctuer [203]. Dans ce contexte, *O.LANGLOIS* [255] propose de coupler cette stratégie

fréquentielle avec la méthode de régulation énergétique des supercondensateurs par boucle de régulation (cf. Figure III. 10). Cette association a été utilisée et améliorée par *R. SADOUN* [7] principalement pour optimiser la masse et la durée de vie du système hybride de stockage en application automobile. Cette stratégie est nommée **«MG2».**

C. Stratégie de limitation de puissance de la batterie avec recharge des supercondensateurs à l'arrêt du véhicule («MG3»)

Dans ce cas, la détermination de la part de mission de puissance destinée à chacune des sources du système hybride est établie par la stratégie de gestion basée sur la limitation de puissance de la batterie qui assure la distribution de la puissance avec la prise en compte des caractéristiques et des conditions d'exploitation des sources [7]. Par ailleurs, la recharge des supercondensateurs à l'arrêt du véhicule lui est associée et cette stratégie est nommée **«MG3»** [75]**.**

D. Stratégie basée sur la limitation de puissance de la batterie avec régulation énergétique des supercondensateurs par boucle de régulation («MG4»)

R. SADOUN, [7] dans ses travaux de thèse sur le dimensionnement d'une source d'énergie électrique hybride pour un véhicule électrique urbain propose de coupler la stratégie de limitation de puissance de batterie avec la régulation énergétique des supercondensateurs par un contrôleur PI. L'emploi de cette méthode pour une source hybride rend le dimensionnement de la batterie dépendant uniquement de l'énergie consommée par le véhicule électrique. L'état énergétique du pack supercondensateur revient à son état initial grâce au correcteur PI. De ce fait, si on la compare aux stratégies classiques pour la même mission de puissance, la masse de la source hybride devient moins importante, la régulation énergétique des supercondensateurs réduisant leur plage de variation d'énergie durant un cycle d'utilisation [7]. Cette méthode est nommée **« MG4 ».**

Notre objectif est de comparer ces 4 méthodes selon deux critères :

- Le dimensionnement de la source hybride (masse et coût)
- L'impact des méthodes de gestion sur le vieillissement de la source hybride

Les méthodes fréquentielles et de limitation de puissance ont été initialement sélectionnées parce qu'elles répondaient bien au premier critère. Le critère vieillissement est par contre plus délicat à anticiper. Nous serons amenés par la suite à quantifier la puissance efficace et la quantité d'énergie échangée par chaque source selon la méthode choisie afin d'investiguer le critère vieillissement de façon objective et comparative.

III.3 Dimensionnement de la source d'énergie embarquée

Le premier élément de comparaison des méthodes sélectionnées pour cette étude concerne le dimensionnement des sources dont nous décrivons la démarche en premier lieu.

Dans un premier temps, nous nous intéressons à la configuration dite « **mono source** », composée uniquement d'une batterie de type Li-ion. Cette configuration est celle rencontrée

dans la quasi-totalité des véhicules électrique actuels. Cette source unique doit alors être capable de fournir seule l'énergie et la puissance à la chaine de traction, sachant que ses capacités de freinage sont limitées.

Dans un second temps nous décrivons la démarche appliquée pour dimensionner la source hybride de stockage d'énergie composée des batteries Li-ion et de supercondensateurs. Le rôle du pack de batteries est d'assurer l'autonomie (source d'énergie) et la présence des supercondensateurs permet de répondre aux exigences dynamiques du véhicule électrique (pics de puissance à l'accélération et au freinage) [76]. Les deux algorithmes de dimensionnement utilisés dans cette partie ont été développés dans le cadre de la thèse de *R. SADOUNE* [7]. Les outils de dimensionnement proposés ont pour vocation de guider le concepteur dans ses choix, en fonction du type de mission et de la stratégie de gestion de l'énergie. Pour illustrer cela nous nous basons sur le cahier des charges décrit en **annexe A**.

III.3.1 Prise en compte de la masse de source pour le dimensionnement

La consommation en énergie et en puissance d'un véhicule électrique est très fortement influencée par sa masse, incluant celle de sa source embarquée. Celle-ci peut dépasser le tiers de la masse totale. Il est donc primordial de prendre en compte son impact car, dans le cas contraire, cela pourrait compromettre les bénéfices obtenus grâce à l'hybridation en terme d'autonomie et de puissance crête [31][204].

Notre objectif est d'éviter d'avoir des processus itératifs interminables provoquer par l'interdépendance de tous ces paramètres. Nous proposons donc de considérer la variation de la puissance et de l'énergie consommée, issue de l'intégration de la source dans le véhicule, par les équations suivantes :

$$\Delta P_V = M_{SSE}.\left(\frac{dV_{veh}}{dt} + g.\left((C_0 + C_1.V_{veh}^2) + sin(\alpha)\right)\right).V_{veh} \qquad \text{(III. 1)}$$

$$\Delta E_{V_cons} = \int_0^{t_{cy}} \Delta P_V\,(t).dt \qquad \text{(III. 2)}$$

Où : M_{SSE} représente la masse de SSE. V_{veh} représente la vitesse de véhicule. C_0, C_1 expriment les coefficients de résistance au roulement curviligne et rectiligne.

Afin de prendre en compte la variation de puissance et d'énergie consommée dans le processus de dimensionnement, on s'intéresse à l'évolution des trois paramètres principaux intervenant dans le dimensionnement de source de l'énergie, à savoir $P_{V_cons}, P_{V_rec}, E_{V_cons}$ [7]. Les variations linéaires de ces trois paramètres peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{cases} \Delta P_{V_cons} = \partial_{P_W}^{cons}.M_{SSE} \\ \Delta P_{V_rec} = \partial_{P_W}^{rec}.M_{SSE} \\ \Delta E_{V_cons} = \partial_{E_W}.M_{SSE} \end{cases} \qquad \text{(III. 3)}$$

Où : M_{SSE} représente la masse de source de stockage embarquée. $\partial_{P_W}^{cons}$, $\partial_{P_W}^{rec}$ et ∂_{E_W} expriment les rapports des variations des puissances crêtes et d'énergie en fonction de la masse.

Nous définissons également deux paramètres ∂_{Sc}^{cons} et ∂_{Sc}^{rec} qui représentent les variations de la masse de source sur la puissance et l'énergie du pack supercondensateurs. L'impact de la masse sur l'énergie ΔE_{Sc}^{W} est calculé par :

$$\Delta E_{Sc}^{W} = N_{S_Sc}.N_{P_Sc}.(\partial_{Sc}^{cons} + \partial_{Sc}^{rec}).W_{el_Sc} \qquad \text{(III. 4)}$$

La Figure III. 13 illustre l'impact de la masse de la source embarquée sur la puissance et l'énergie d'une mission de 150 km.

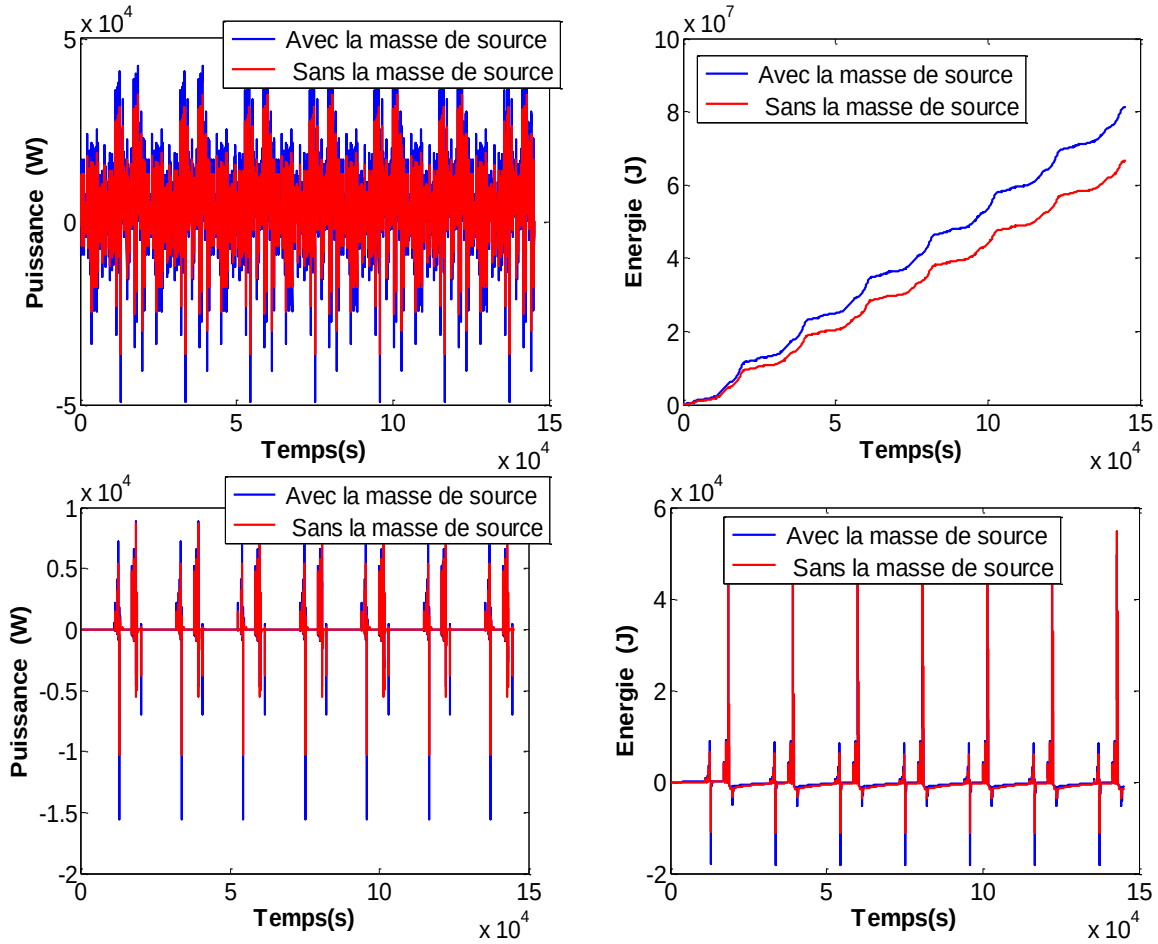


Figure III. 13: Impact de la masse de source sur la puissance et l'énergie du pack de batteries (en haut) et de supercondensateurs (en bas)

III.3.2 Démarche globale de dimensionnement

Lors de la conception d'un véhicule, ses performances dynamiques doivent être spécifiées par le cahier des charges. Ses caractéristiques dynamiques permettent de calculer les contraintes extrêmes appliquées à la source, à savoir les extremums de puissance et l'énergie nécessaire pour son autonomie [31][256].

L'objectif de cette démarche est de proposer un outil permettant de déterminer les dimensionnements admissibles vis-à-vis du cahier des charges. En plus cet outil permet d'évaluer *l'influence des méthodes de gestion d'énergie sur le dimensionnement de la source hybride*. Afin de répondre aux exigences du cahier des charges, nos algorithmes de dimensionnement respectent les trois critères imposés suivants :

- La source du véhicule doit être capable de récupérer la totalité de la puissance de freinage (cette condition n'est valable que dans le cas d'une source hybride).
- La source du véhicule doit être capable de fournir la totalité de la puissance nécessaire à la propulsion du véhicule
- Enfin, la source doit embarquer l'énergie nécessaire pour assurer l'autonomie du véhicule préconisée par le cahier des charges.

Ces trois critères déterminent le nombre d'éléments de stockage nécessaires pour assurer la mission du véhicule.

Le dimensionnement d'un pack « mono source » HP, puis celui d'une source hybride constituée d'un pack batteries Li-ion HE et de supercondensateurs associée à l'une des 4 stratégies de gestion est proposée dans les parties suivantes.

III.3.3 Dimensionnement du pack batteries HP mono-source

Dans le cas où l'alimentation du véhicule est assurée uniquement par la technologie Li-ion, la batterie doit donc fournir l'énergie nécessaire à l'autonomie du véhicule tout en étant capable de répondre aux contraintes en puissance de propulsion et de freinage. Or, les applications liées aux transports demandent des dynamiques de puissances qui sont encore difficilement atteignables par les technologies de batteries actuelles. Ainsi, il est courant que la puissance de recharge soit trop faible pour envisager un dimensionnement basé sur la puissance de freinage. Dans ce cas, la fonction « freinage régénératif » est sacrifiée partiellement ou totalement. Il faut alors recalculer l'énergie nécessaire pour l'autonomie, en tenant compte de cette énergie perdue au freinage. Lorsque le problème est lié à la limitation de la puissance de décharge, un surdimensionnement en énergie est en plus nécessaire. Si l'on ne veut pas se retrouver avec un pack trop volumineux et trop lourd, il faut alors choisir des technologies de batteries HP (Haute Puissance) ayant une densité d'énergie plus faible que les batteries HE (Haute Energie) que nous utiliserons ultérieurement dans les sources hybrides.
L'algorithme de dimensionnement est basé sur les trois équations suivantes reprenant les trois critères de dimensionnement définis préalablement [7].

- La batterie assure la récupération totale de la puissance de freinage :

$$N_{S_B}.N_{P_B} = \frac{P_{V_{rec}}\left(1 + \sqrt{1 + 4.\left(P^{C}_{el_B} - \partial^{rec}_{P_W}.1{,}4.W_{el_B}\right).\frac{R_{0_{el_B}}}{U^{2}_{el_B_min}}}\right)}{2.\left(P^{C}_{el_B} - \partial^{rec}_{P_W}.1{,}4.W_{el_B}\right)} \qquad \text{(III. 5)}$$

Où N_{S_B} et N_{P_B} représentent respectivement le nombre d'éléments en série et le nombre de branches en parallèle du pack batterie. $P_{V_{rec}}$ est la puissance récupérée par le véhicule, $P^{C}_{el_B}$ la puissance maximale de charge d'une cellule de batterie, W_{el_B} la masse d'un élément de batterie, $R_{0_{el_B}}$ la résistance interne d'un élément de batterie, $U_{el_B_min}$ la tension minimale d'un élément de batterie.

- La batterie assure le maximum de puissance de propulsion :

$$N_{S_B}.N_{P_B} = \frac{P_{V_{cons}}(1 + \sqrt{1 + 4.\left(P^{D}_{el_B} - \partial^{cons}_{P_W}.1{,}4.W_{el_B}\right).\frac{R_{0_{el_B}}}{U^{2}_{el_B_min}}})}{2.(P^{D}_{el_B} - \partial^{cons}_{P_W}.1{,}4.W_{el_B})} \quad \text{(III. 6)}$$

Où $P_{V_{cons}}$ est la puissance consommée par le véhicule et $P^{D}_{el_B}$ la puissance maximale de décharge d'une cellule de batterie.

- La batterie assure l'énergie nécessaire pour l'autonomie du véhicule :

$$N_{S_B}.N_{P_B} = \frac{E_{V_{cons}}(1 + \sqrt{1 + 4.\left(E_{el_B} - \partial_{E_W}.1{,}4.W_{el_B}\right).\frac{R_{0_{el_B}}}{U^{2}_{el_B_min}}})}{2.(E_{el_B} - \partial_{E_W}.1{,}4.W_{el_B})} \quad \text{(III. 7)}$$

Où $E_{V_{cons}}$ est l'énergie consommée par le véhicule, E_{el_B} l'énergie maximale d'une cellule de batterie.

On peut alors calculer le nombre d'éléments $N_{S_B}.N_{P_B}$ du pack de batteries en prenant en compte les variations de la consommation en fonction de la masse de source.

L'algorithme de dimensionnement du pack batteries en cas d'alimentation par batteries HP seules [7] est présenté en Figure III. 14. Il est constitué de deux parties principales. La première étape de cet algorithme, consiste à identifier les besoins en énergie et en puissance pour une mission donnée. Ceci définira ensuite le nombre d'éléments ($N_{S_B}.N_{P_B}$) du pack batterie. La limite de puissance de charge P^{C}_{Bat} peut ensuite être définie. Dans le cas où la puissance de freinage du véhicule dépasse les capacités d'absorption de la batterie, on limite alors la puissance de freinage régénératif. Cela implique une réduction de la quantité d'énergie récupérée. Une deuxième étape est alors nécessaire pour vérifier que l'énergie du pack dimensionné auparavant est suffisante afin d'assurer l'autonomie désirée. Cette étape de vérification est exécutée plusieurs fois jusqu'à ce que l'on trouve les caractéristiques de source répondant aux exigences énergétiques du véhicule [7].

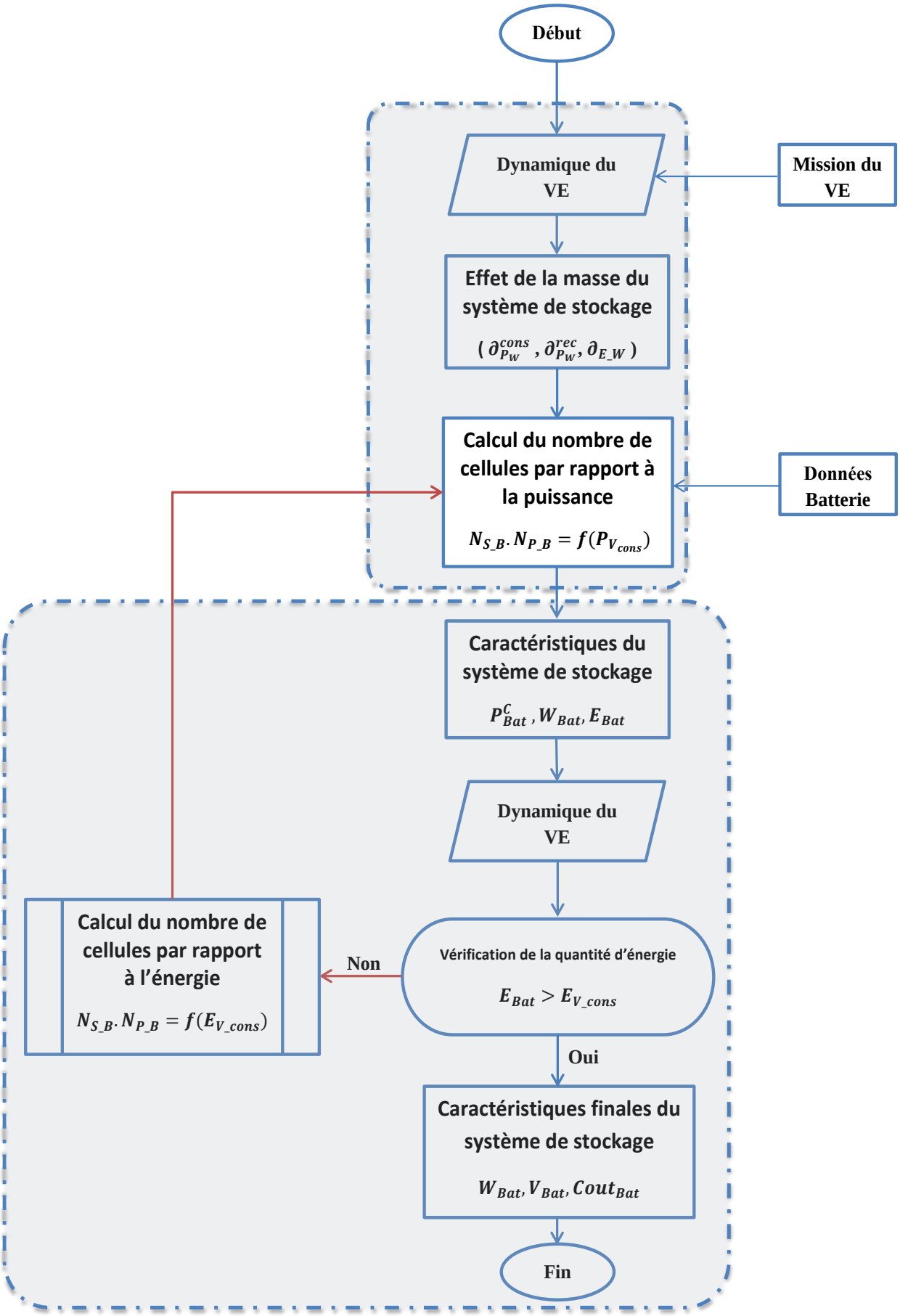


Figure III. 14: Algorithme de dimensionnement des batteries « mono source » [7]

III.3.4 Dimensionnement de la source hybride de stockage (Batterie HE + Supercondensateur)

L'hybridation des sources d'énergie augmente les degrés de liberté du système et permet notamment de découpler les trois critères de dimensionnement en faisant en sorte que la source d'énergie soit dimensionnée uniquement sur le critère lié à l'autonomie. La source de puissance se concentre sur les pics de puissance à l'accélération et au freinage. On peut alors faire en sorte que le cahier des charges soit respecté au plus juste et ainsi s'adapter aux besoins de l'utilisateur en assurant un freinage électrique intégral. Les packs « mono-source » doivent faire appel à des batteries HP, avec des densités d'énergie plus faibles et plus couteuses que leurs homologues HE utilisées dans les sources hybrides.

La démarche de dimensionnement de la source hybride est résumée en Figure III. 15. Celle-ci repose sur un ensemble de contraintes définies par le cahier des charges telles que l'autonomie du véhicule, les coûts, le cycle de conduite, le maximum de puissance consommée. Dans ce contexte, l'idée principale de l'hybridation des systèmes de stockage est de respecter la nature intrinsèque des sources d'énergie et de puissance. Par ailleurs, l'intégration d'une méthode de gestion d'énergie dans notre outil de dimensionnement permet de définir la mission de puissance de chaque source. Il est ensuite possible, grâce à ces profils de puissance, de calculer la masse et le coût des packs de batteries et de supercondensateurs nécessaires pour la mission demandée.

Comme on peut le voir sur la Figure III. 15., la procédure de dimensionnement s'effectue en deux étapes. On procède au dimensionnement du pack de batteries en considérant que celui-ci ne doit stocker que l'énergie nécessaire à l'autonomie du véhicule. En revanche, le pack de supercondensateurs doit être dimensionné pour répondre aux exigences de puissance crête. De ce fait nous calculons l'énergie nécessaire aux supercondensateurs pour fournir et absorber la puissance maximale en décharge et en charge, en tenant compte de sa profondeur de décharge maximale de 75% [79][75]. Cette énergie ΔE_{Sc} correspond à l'écart entre les maximums d'énergie fournie et récupérée [7]:

$$\Delta E_{Sc} = E_{Sc_max} - E_{Sc_min} \qquad \text{(III. 8)}$$

Où E_{Sc_max} est l'énergie maximale stockée par le pack de supercondensateurs et E_{Sc_min} son énergie minimale.

Le nombre d'éléments $N_{S_Sc}.N_{P_Sc}$ dépend de l'énergie du cycle de charge-décharge le plus contraignant sur le parcours complet. De ce fait, la vérification des contraintes imposées sur le pack de supercondensateurs est donnée par la relation suivante [7] :

$$N_{S_Sc}.N_{P_Sc} = \frac{\Delta E_{Sc}}{(\frac{3}{8} C_{el_Sc}.U_{Bus}^2 - (\partial_{Sc}^{cons} + \partial_{Sc}^{rec}).1{,}4.W_{el_Sc})} \qquad \text{(III. 9)}$$

Où N_{S_B} et N_{P_B} représentent respectivement le nombre d'éléments en série et le nombre de branches en parallèle du pack supercondensateur. C_{el_Sc} est la capacité nominale d'un élément de supercondensateur . U_{Bus} est la tension du bus continu, W_{el_Sc} la masse d'un élément de supercondensateur.

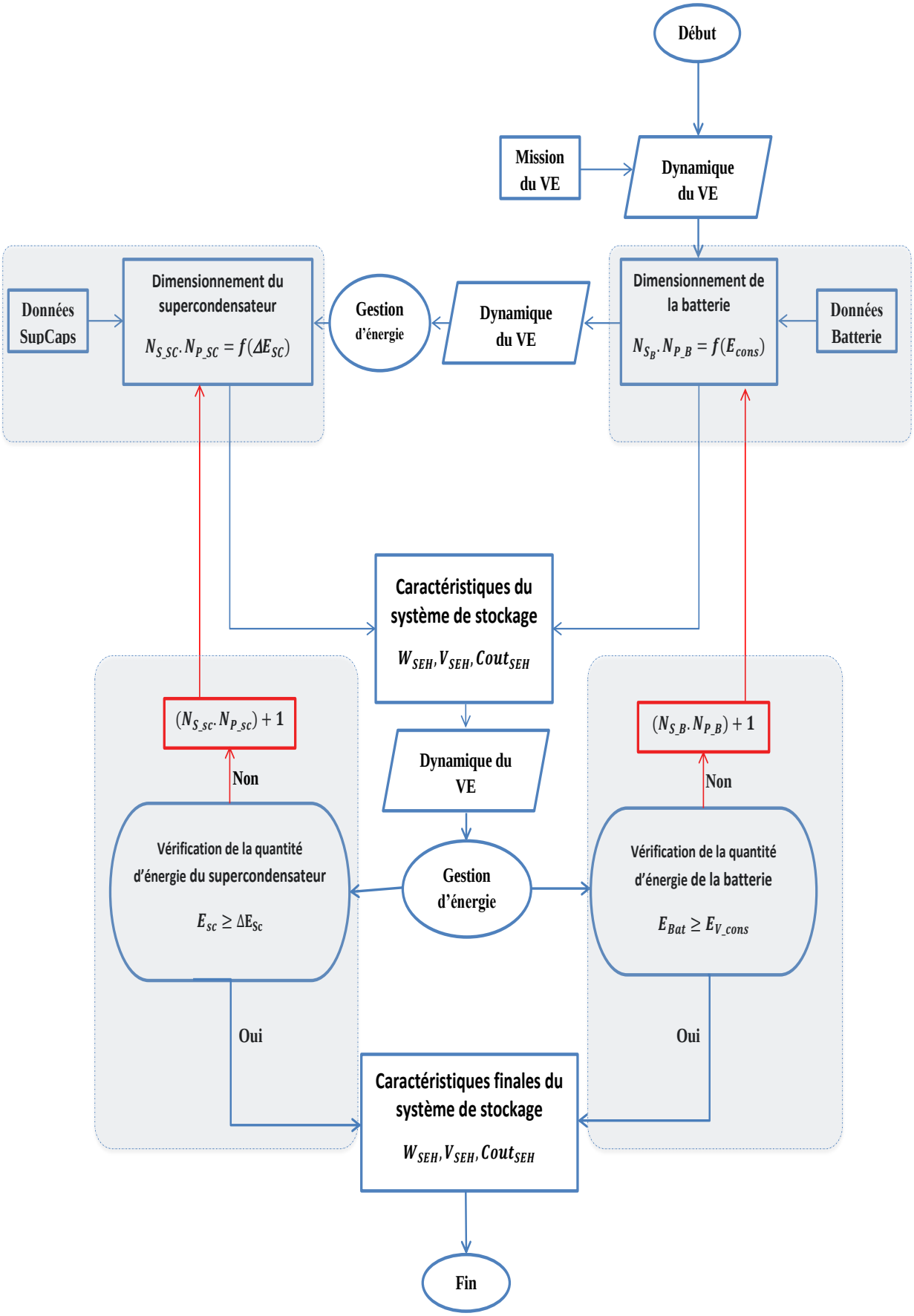


Figure III. 15: Algorithme de dimensionnement d'une source hybride [7]

III.4 Influence des méthodes de gestion d'énergie sur le dimensionnement des sources hybrides

Dans le cas d'un véhicule électrique à alimentation conventionnelle, la puissance nécessaire à son mouvement est fournie par la source unique embarquée. La stratégie de gestion se limite simplement au contrôle du flux de puissance entre le moteur électrique et la source de stockage. Dans le cas d'un véhicule électrique à source d'énergie hybride, le problème est plus complexe. La chaîne de traction est alimentée par au moins deux sources d'énergie ce qui démultiplie les façons de procéder [37]. Les stratégies de gestion sont nombreuses et peuvent avoir un effet direct sur l'autonomie du véhicule [201][203] et sur le vieillissement des batteries [36]. L'objet de cette section est d'améliorer ces stratégies de gestion de l'énergie en termes de la masse, de coût et de durée de vie du stockage.

La première étape est l'étude de l'influence de ces quatre méthodes de gestion de l'énergie **(MG1, MG2, MG3 MG4)** sur le dimensionnement et les contraintes électriques des sources hybrides.

Notre objectif est, à partir de ces résultats, de pouvoir proposer de nouvelles méthodes, au moins aussi performantes que les précédentes en dimensionnement, et qui auront en plus un gain sur les contraintes électriques, ce qui autorisera une augmentation de la durée de vie des éléments de stockage. Ceci pourra être testé grâce au modèle multi-physique de vieillissement développé au second chapitre.

III.4.1 Définition de critères de comparaison

L'étude comparative se base sur **quatre critères** liés aux caractéristiques de la source d'énergie : la masse de la source hybride, le coût, la puissance efficace et la quantité de charge échangée.

III.4.1.1 Masse de la source hybride

Le pack de batteries ou de supercondensateurs est composé de modules mis en série et/ou en parallèle selon la tension d'alimentation et la capacité de stockage désirée. Chaque module est à son tour composé d'un nombre de cellules à définir. La masse totale est calculée en prenant en compte l'intégration des dispositifs d'assemblage et de protection nécessaire pour le fonctionnement des packs. On considérera pour simplifier que la masse (et le volume) supplémentaire peuvent être évalués à **environ 40%** de la masse (et le volume) des cellules [7] :

$$\begin{cases} W_{Bat} = 1{,}4.\, N_{S_B}.\, N_{P_B}.\, W_{el_B} \\ W_{Sc} = 1{,}4.\, N_{S_Sc}.\, N_{P_Sc}.\, W_{el_Sc} \end{cases} \qquad \text{(III. 10)}$$

III.4.1.2 Coût de la source hybride

Le développement industriel du véhicule électrique est en relation directe avec le coût et les performances des sources de stockage d'énergie, ce qui dépend à la fois des caractéristiques de la source et des contraintes du véhicule. Le coût des batteries et des supercondensateurs est un indice de comparaison important dans le cadre de notre étude sur les méthodes de gestion de l'énergie [257][228]. L'estimation du coût du pack est basée sur le prix

d'achat « à l'unité » des cellules de batteries et de supercondensateurs fournis par les fabricants choisis dans notre dimensionnement :

$$\begin{cases} Coût_{Bat}(€) = N_{S_b}.N_{P_b}.Coût_{el_B} \\ Coût_{Sc}(€) = N_{S_Sc}.N_{P_Sc}.Coût_{el_Sc} \end{cases} \quad \text{(III. 11)}$$

Le coût du convertisseur DC/DC qui assure la liaison entre le pack de supercondensateurs et le bus continu tel qu'il a été fixé par le cahier des charges de **l'annexe A**, est négligé par rapport au coût des composants de stockage de la source hybride, sachant que pour une autonomie de 150km, dans le cas du cycle ARTEMIS, le coût du convertisseur représente en moyenne seulement 3 à 7% du coût total de la source.

III.4.1.3 Puissance efficace

La notion de puissance efficace donne l'image du courant efficace d'une cellule du pack de batteries si on suppose que sa tension est quasi-constante.

Pour les supercondensateurs dont la tension varie beaucoup, cette variable permet de donner une idée des contraintes subies par le composant de stockage[258]. Ainsi, plus la puissance efficace est importante, plus la température moyenne du composant augmente. Cela aura forcément un impact sur leur durée de vie [75][221][220]. La puissance efficace est définie par :

$$\begin{cases} P_{eff_Bat} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T P_{Bat}^2\, dt} \\ P_{eff_Sc} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T P_{Sc}^2\, dt} \end{cases} \quad \text{(III. 12)}$$

III.4.1.4 Quantité de charge échangée et nombre de cycles

La capacité de stockage représente la quantité de charge qu'il est possible d'obtenir lors d'une décharge complète de la batterie, initialement chargée, généralement avec un courant constant. En se basant sur cette définition, **la quantité de charge échangée** Ah_{Bat} est donnée comme étant la somme des ***Ah*** fournis et absorbés par l'accumulateur pendant un cycle d'utilisation [258] :

$$Ah_{Bat} = \left(\frac{1}{V_{Bat}.3600}\right)\int_0^T |P_{Bat}|\, dt \quad \text{(III. 13)}$$

De même, **le nombre de cycles de charge/décharge** ($N_{ch/déc}$) des supercondensateurs est un indicateur du taux d'utilisation des supercondensateurs au cours de la mission. Il représente le rapport entre l'intégrale de la valeur absolue de la puissance échangée et la capacité énergétique de dimensionnement :

$$N_{ch/déc} = \frac{\int_0^T |P_{sc}| dt}{\Delta E_{sc}} \quad \text{(III. 14)}$$

III.4.2 Analyse des résultats

La source d'énergie a été dimensionnée en utilisant le cycle de conduite ARTEMIS avec une pente moyenne de la route de 2.5 %, l'autonomie du véhicule variant entre 60km et 500km. La Figure III. 16-A montre l'évolution de la masse des sources d'énergie en fonction de l'autonomie désirée pour un système mono-source à base de batteries HP et pour les quatre solutions hybrides équipées de batteries haute énergie (HE) assistées en puissance par un pack de supercondensateurs.

On peut tout d'abord remarquer qu'il existe des disparités pour le dimensionnement des sources hybrides selon la stratégie de gestion d'énergie implantée. Ceci est dû au fait que le partage de puissance entre les deux systèmes de stockage varie d'un cas à l'autre.

L'hybridation ne commence à être payante que pour des autonomies suffisamment importantes (à partir de 150km). Ceci est lié à la forte proportion de supercondensateurs pour les faibles autonomies. Ils ont à gérer de fortes variations d'énergie car la source d'énergie est fortement limitée en puissance. En revanche, la mono-source, composée de batteries HP, est capable de fournir seule cette puissance pour de faibles autonomies. Cet avantage disparaît pour les autonomies supérieures à 150 km. Comme la densité d'énergie de la technologie HP est plus faible, il faut plus de masse de batteries HP pour la même énergie. On remarque également un infléchissement des résultats correspondants à MG3 et MG4, à partir de 370-400km. Dans ce cas, les batteries HE n'ont plus besoin d'assistance en puissance et les supercondensateurs ne sont plus nécessaires. On aboutit alors à une solution mono-source à base de batteries HE. Ceci montre que l'hybridation est une solution relative à des conditions particulières liées aux limitations des batteries Li-Ion.

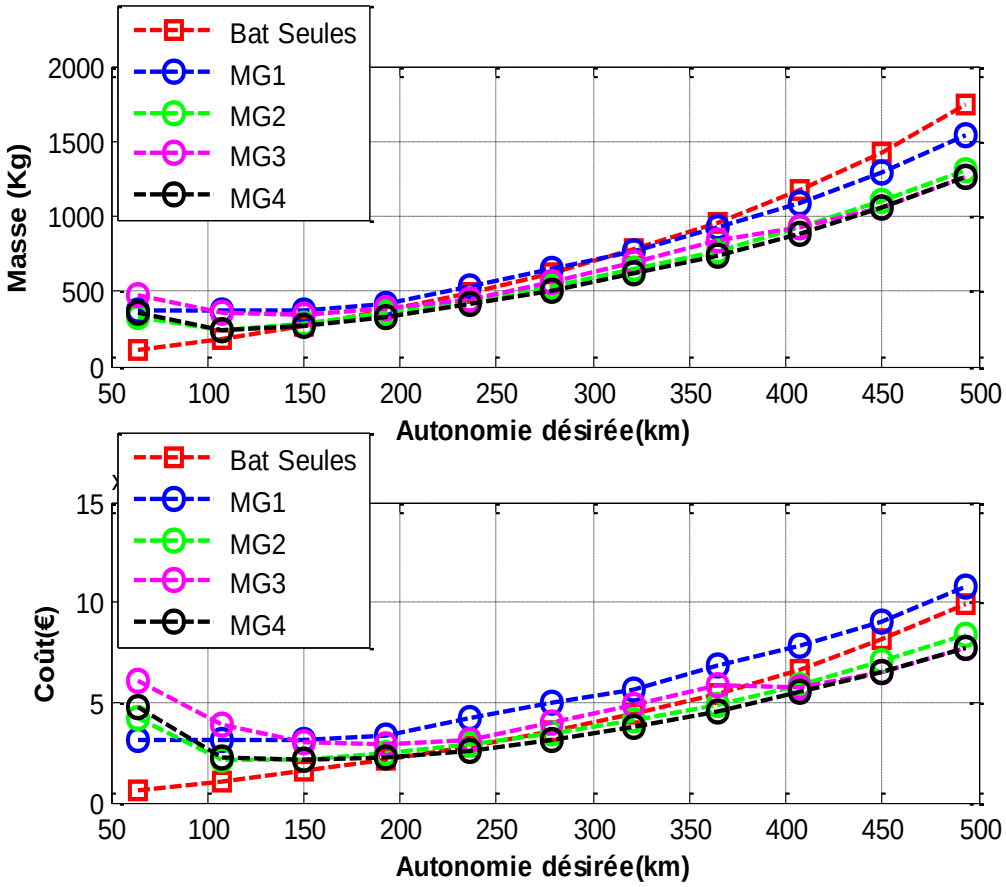
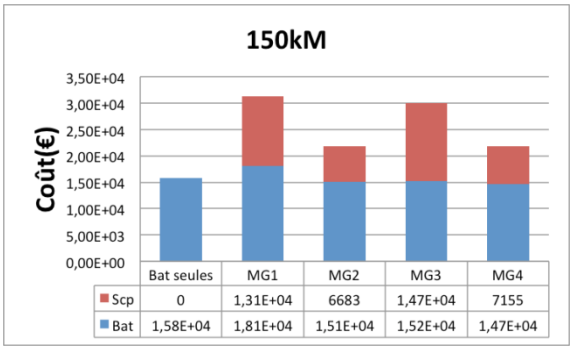


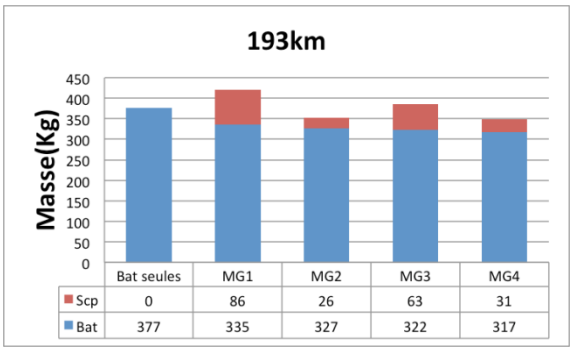
Figure III. 16: Evolution de la masse (A) et du coût (B) de la source en fonction de l'autonomie désirée

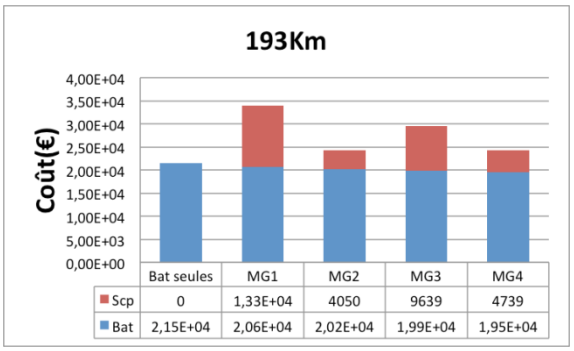
La figure Figure III. 16-A montre l'évolution de la masse de source dans le cas d'une mono-source à base de batterie HP et dans le cas de sources hybrides gérées avec les quatre méthodes (MG1, MG2, MG3 et MG4). Dans le cas mono-source, on observe une augmentation continue de la masse en fonction de l'autonomie. Dans le cas de la source hybride, on remarque une tendance inverse pour une autonomie inferieure à 110km (influence de la masse des supercondensateurs). Au-delà, la masse calculée avec les quatre méthodes augmente avec l'autonomie. On remarque aussi que les deux méthodes MG2 et MG4 sont les plus intéressantes et aboutissent à une masse similaire, avec un léger avantage pour la méthode MG4.

La Figure III. 16-B, représente l'évolution du coût des sources d'énergie en fonction de l'autonomie du véhicule. L'impact du coût du pack de supercondensateurs, tout comme celui de sa masse est plus important pour les faibles autonomies. A partir de 370-400 km d'autonomie, on observe aussi un infléchissement des courbes MG3 et MG4 pour les mêmes raisons que précédemment. Par ailleurs, on peut noter que, pour les faibles autonomies (inferieures à 70km), la méthode MG1 est la moins coûteuse des méthodes à base de source hybride car la présence de supercondensateurs est ici la moins importante. Ensuite, les méthodes MG2 et MG4 sont équivalentes. A partir de 370-400 km, les solutions MG3 et MG4 deviennent des solutions à batteries HE seules et n'ont donc pas de rivales dans cette gamme.

La Figure III. 17 présente les résultats plus détaillés pour trois valeurs d'autonomie comparables à celle envisagées dans les véhicules électriques actuels (150, 193 et 364km). On peut remarquer que les méthodes MG2 et MG4 commencent à rivaliser avec la solution mono-source puisque les masses sont à peu près équivalentes avec même un gain d'environ 7% pour une autonomie de 193km. Concernant le coût, les solutions avec hybridation sont moins intéressantes, mais le surcout a tendance à diminuer avec l'autonomie pour passer à moins de 12% pour 193km d'autonomie. Cette tendance s'inverse pour des autonomies plus importantes, car pour 364km on gagne 211kg par rapport à la solution mono-source. Si maintenant on compare les solutions MG2 et MG4, ces deux méthodes sont équivalentes avec un léger avantage pour MG4.







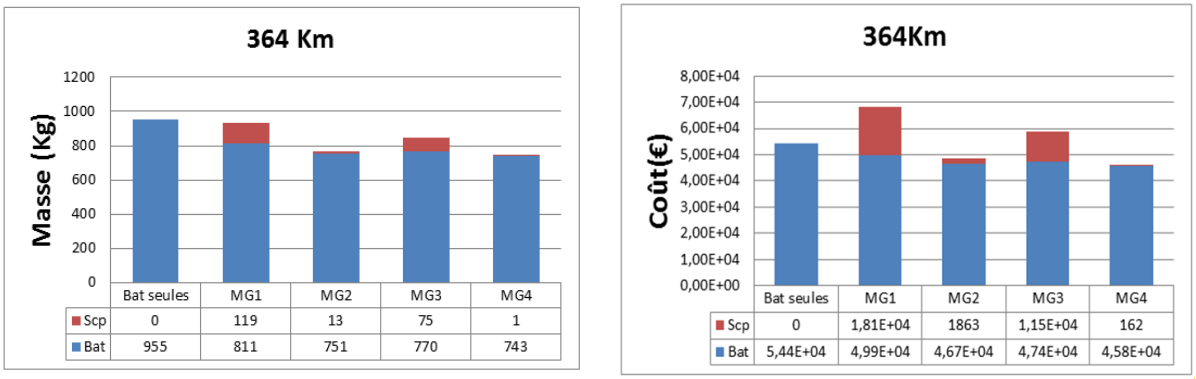


Figure III. 17: Masse et coût des sources pour trois valeurs d'autonomie (150, 193 et 364km)

La Figure III. 18 montre l'évolution de la masse de source en fonction de l'autonomie désirée pour les deux meilleures solutions hybridées (MG2, MG4) et pour la mono-source HP. Pour les autonomies de plus de 150 Km, l'hybridation avec les méthodes MG2 et MG4 réduit de façon significative la masse de la source d'énergie et on peut conclure que la méthode MG4 est globalement la plus intéressante suivie de la méthode MG2 selon le critère de masse.

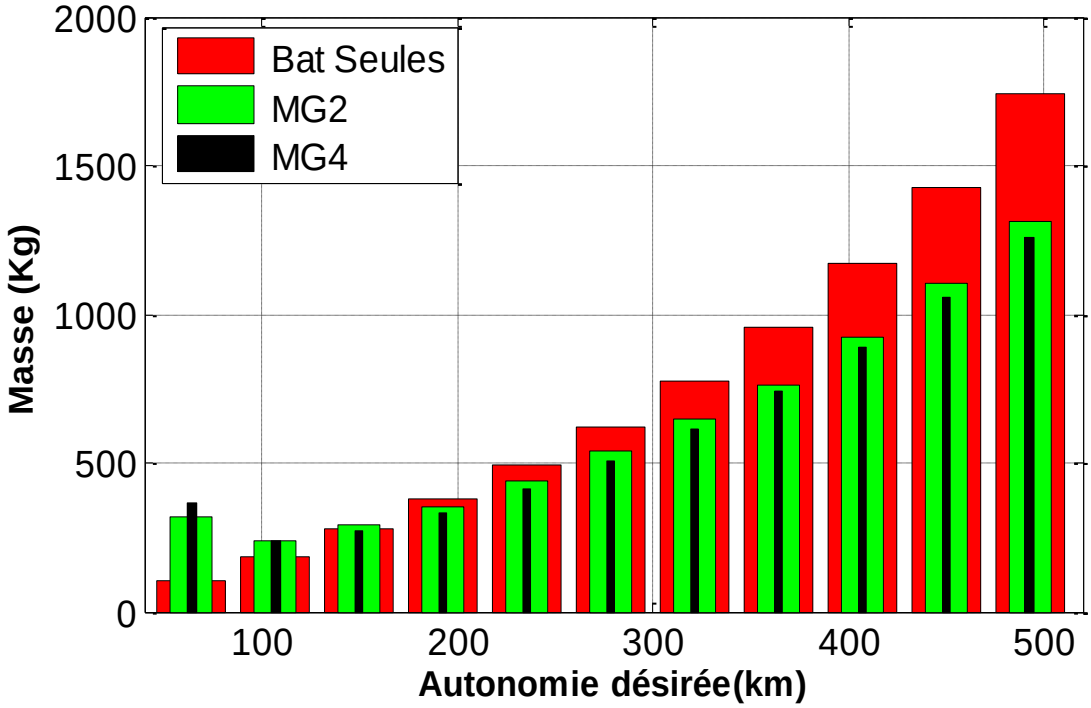


Figure III. 18 : Evolution de la masse avec batteries HP seules, hybride (MG2/MG4)

Les résultats précédents montrent l'intérêt de la solution hybride sur l'aspect financier, taille et cout. Il faut compléter cette étude avec une comparaison des contraintes imposées lors de l'utilisation de chaque méthode. La Figure III. 19 présente pour les batteries l'évolution de la puissance efficace et la quantité de charge échangée en fonction de l'autonomie désirée.

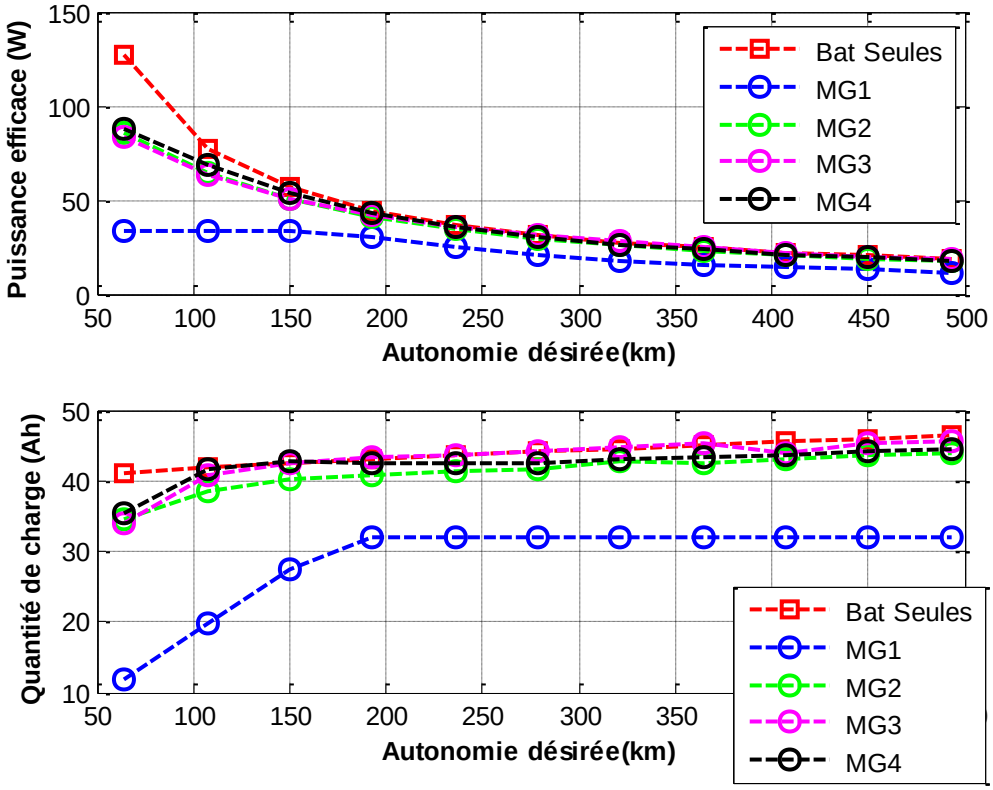


Figure III. 19: Evolution de la puissance efficace et de la quantité de charge échangée des batteries Li Ion en fonction de l'autonomie désirée

Sur la Figure III. 19-A, on peut remarquer globalement que la puissance efficace d'une cellule de batteries diminue avec l'augmentation de l'autonomie du véhicule puisque le nombre de cellules qui compose le pack augmente et que cette puissance est répartie sur l'ensemble de pack. La méthode MG1 est globalement la moins contraignante, suivie de la méthode MG2, selon ce critère.

La Figure III. 19-B montre l'évolution de la quantité de charge échangée par la batterie en fonction de l'autonomie du véhicule. On observe sur cette figure que la quantité de charge échangée pour les faibles autonomies est limitée car la capacité énergétique de batteries est alors surdimensionnée. Avec l'augmentation de l'autonomie, la quantité de charge échangée augmente jusqu'à atteindre une valeur stable autour de la capacité nominale de la batterie utilisée (40Ah), correspondant à l'énergie consommée par le véhicule. On peut constater que la mono-source (batteries HP) et les sources hybrides (avec MG3, MG4) présentent la quantité de charge échangée la plus importante quelle que soit l'autonomie. MG1 présente une faible quantité de charge échangée puisque les packs de batteries sont composés par un nombre de cellules moins important. MG2 est par contre plus intéressante que MG4 selon ce critère

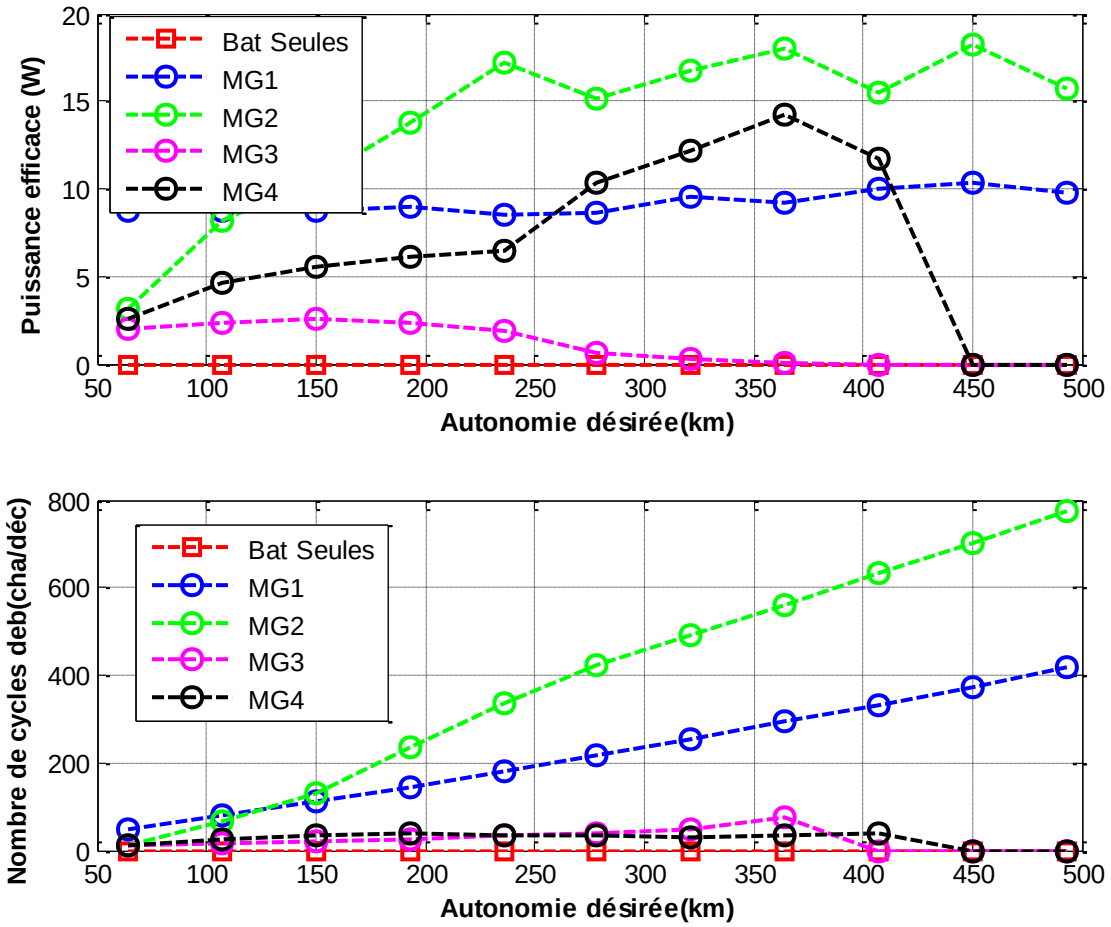


Figure III. 20: Evolution de la puissance efficace et du nombre de cycles de charge/décharge des supercondensateurs en fonction de l'autonomie désirée

La Figure III. 20-A illustre l'évolution de la puissance efficace des supercondensateurs en fonction de l'autonomie désirée. Pour MG1, la courbe est relativement constante. Pour MG2, il y a tout d'abord une croissance puis une relative stabilisation. Pour MG4, il y a croissance puis décroissance avec une annulation autour de 370-400 km puisque les supercondensateurs ont disparu pour ces configurations. MG3 présente quant à elle une valeur assez régulière et faible qui donne l'avantage à cette méthode pour ce critère.

Sur la Figure III. 20-B, on peut constater l'évolution du nombre de cycles de charge/décharge des supercondensateurs en fonction de l'autonomie désirée. Dans notre étude, ce paramètre est utilisé pour connaître le niveau de sollicitation de ces composants. Ceci nous permet d'avoir des informations sur le vieillissement en cyclage. Dans ce contexte, les solutions MG1 et MG2 présentent des nombres de cycles nettement plus élevés avec des évolutions quasi linéaires. En revanche, le nombre de cycles augmente très lentement avec l'autonomie pour les méthodes MG3 et MG4.

Les valeurs optimales des paramètres obtenus pour la simulation de chaque méthode de gestion (MG1, MG2, MG3 et MG4) sont regroupées dans le Tableau III. 4 :

	SOC_sc-ref (initial)	DOD_sc	Kp (PI-sc)	Ti (PI-sc)	Fc	SOC_bat (initial)	DOD_bat
MG1	94%	75%	/	/	0,0069Hz	100%	80%
MG2	94%	75%	1	0.001	0,0069Hz	100%	80%
MG3	94%	75%	/	/	/	100%	80%
MG4	94%	75%	1	0.001	/	100%	80%

Tableau III. 4 : Paramètres de simulation des méthodes de gestion

En conclusion de cette partie, sur la plage d'autonomie où l'hybridation est intéressante, les stratégies MG2 et MG4 conduisent aux dimensionnements les plus intéressants, avec un léger avantage pour la stratégie MG4. Par contre, en termes de puissance efficace et de nombre de cycles sur les supercondensateurs, la stratégie MG4 est bien moins contraignante que la MG2.

La stratégie MG4 est aussi plus facilement améliorable en ajoutant de la souplesse sur les limites de puissance imposées à la batterie. La partie suivante est consacrée à son amélioration dans l'optique d'aboutir à de meilleures contraintes électriques globales de la source hybride.

III.5 Nouvelles méthodes de gestion d'énergie à limitation de puissance batterie et vieillissement

L'objet de cette partie consiste à faire évoluer la stratégie de gestion MG4 **(limitation de la puissance batteries & régulation énergétique de supercondensateurs par boucle de régulation)** en travaillant sur l'amélioration de ses contraintes électriques en figeant le dimensionnement de la source hybride obtenu avec la stratégie MG4. Ces variantes sont proposées dans le but de permettre la maitrise des contraintes électriques et d'accroître la durée de vie des batteries.

III.5.1 Nouvelles stratégies de gestion d'énergie

L'objectif est maintenant de réduire les contraintes électriques appliquées aux batteries en faisant évoluer la méthode de gestion MG4 dans le but de limiter leur vieillissement, mais ***sans modifier le dimensionnement du stockeur obtenu précédemment avec MG4***. Ce vieillissement sera quantifié grâce au modèle multi-physique développé dans le chapitre précédent.

Le principe retenu et développé selon plusieurs variantes, est de faire varier la ou les limitations de puissance de la batterie en fonction de l'état de charge des supercondensateurs, tout en veillant à ce que l'énergie des supercondensateurs reste dans sa plage de fonctionnement. Cette surveillance est toujours réalisée par la méthode de régulation énergétique des supercondensateurs. Ces trois nouvelles méthodes sont dénommées MGD1, MGD2, MGD3. Elles sont inspirées de la méthode MG4, mais en agissant sur les seuils de limitation de puissance batterie.

Ces stratégies ont pour objectif de plus solliciter les supercondensateurs et ainsi soulager la batterie. En effet, la durée de vie des supercondensateurs dans des conditions normales de fonctionnement étant bien plus grande que la durée de vie des batteries. On a donc tout intérêt à « surcharger » les supercondensateurs dans l'optique de réduire les contraintes électriques sur la batterie.

Dans le prolongement de ces 3 stratégies, une variante, nommée MGD3+, est proposée. Son intérêt est d'augmenter la durée de vie de la batterie, au prix d'un vieillissement accéléré des supercondensateurs.

III.5.2 Limitation de la puissance de décharge de la batterie sur deux niveaux en fonction de l'énergie des supercondensateurs («MGD1»)

Le schéma de principe de cette stratégie de gestion d'énergie est montré sur la Figure III. 21, avec une limitation variable du partage de puissance en fonction de l'état de charge des supercondensateurs dans la phase de traction, et une limitation constante dans la phase de récupération de l'énergie de freinage.

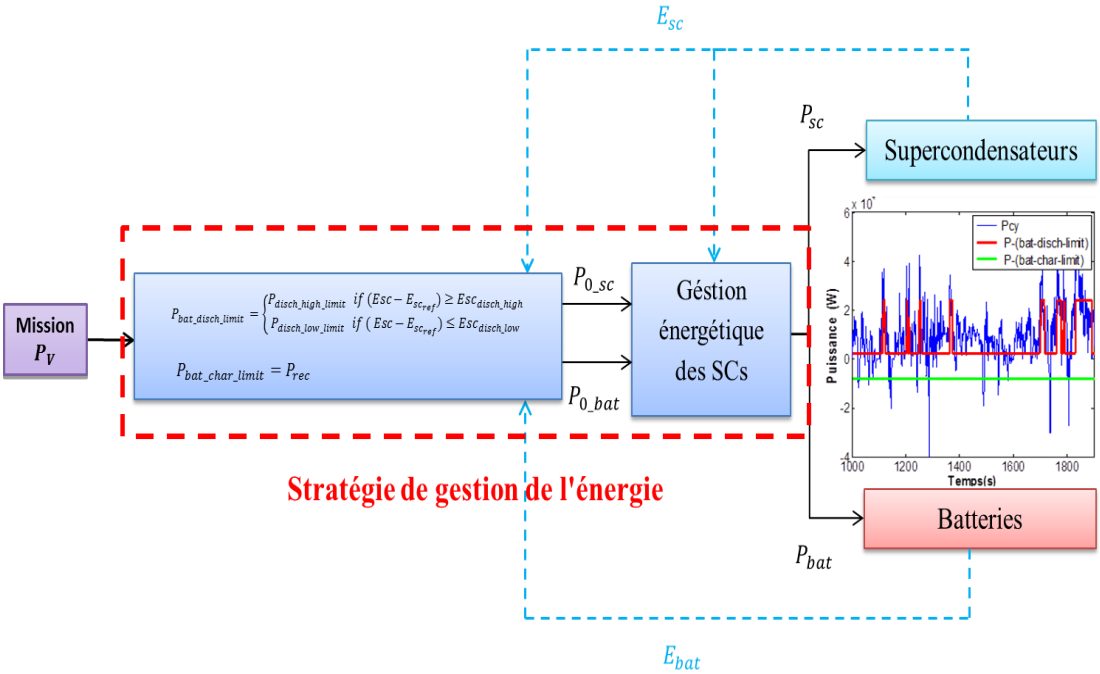


Figure III. 21: Variation des limites de partage de puissance avec «MGD1»

Pour cette stratégie, le seuil de puissance dans la phase de traction (phase de décharge) dépend de l'état de charge des supercondensateurs en basculant entre deux niveaux de limitation de puissance selon un cycle d'hystérésis dont la condition de basculement est définie par :

$$P_{bat_disch_limit} = \begin{cases} P_{disch_high_limit} & if(\ Esc - E_{sc_{ref}}) \geq Esc_{disch_high} \\ P_{disch_low_limit} & if\ \ (Esc - E_{sc_{ref}}) < Esc_{disch_low} \end{cases} \qquad \text{(III. 15)}$$

$P_{disch_high_limit}$ représente la puissance maximale de décharge des batteries donnée par le fabricant. L'autre limitation ($P_{disch_low_limit}$) est variable et est comprise entre zéro et la limite maximale. Sa valeur est calculée pour diminuer au maximum les contraintes de puissance de batteries tout en maintenant les contraintes de dimensionnement de l'ensemble (cf. Figure III. 22). Les deux niveaux d'énergie de basculement Esc_{disch_high} et Esc_{disch_low} sont calculés en utilisant les résultats de dimensionnement de la source hybride.

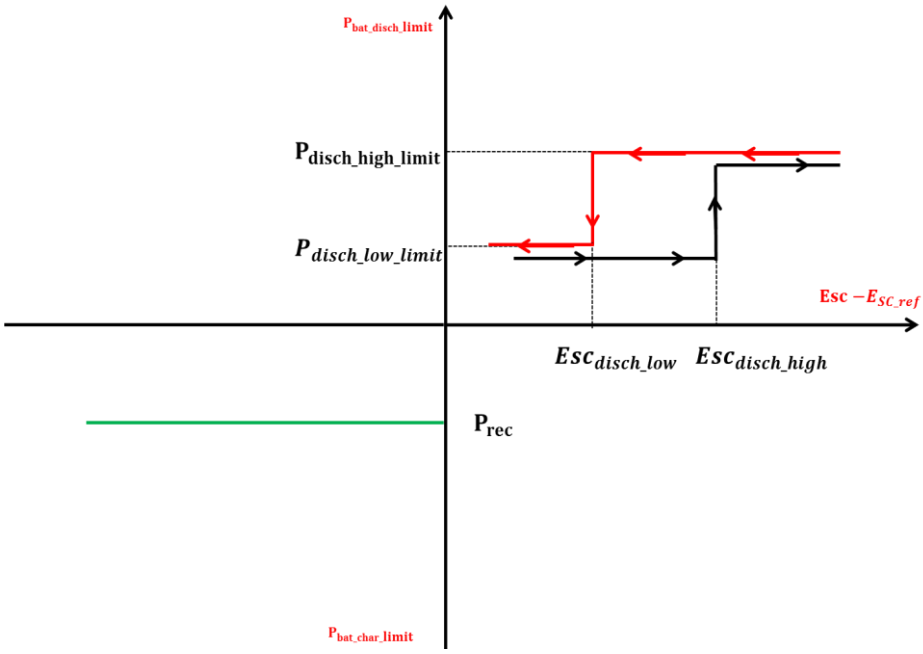


Figure III. 22 : Evolution de la puissance limite des batteries en fonction de l'état énergétique du supercondensateur (méthode MGD1)

Cette méthode ne gérant pas les variations de puissance lors des phases de freinage, elle se comporte alors de façon similaire à la méthode de référence MG4. Le seul changement concerne la valeur fixe de limitation de puissance P_{rec} qui n'est plus la valeur limite constructeur que peuvent supporter les batteries comme dans la stratégie MG4. Dans cette méthode MGD1, P_{rec} a été réglée de manière à ce que sur l'ensemble du cycle de conduite, l'énergie récupérée par la batterie corresponde à environ 33% de l'énergie de freinage E_{V_rec}, le reste étant bien sûr récupéré par les supercondensateurs. Ainsi, les paramètres variables sont le rapport entre les deux niveaux de puissance $P_{disch_low_limit}$ et $P_{disch_high_limit}$, l'hystérésis entre Esc_{disch_high} et Esc_{disch_low} et enfin, la proportion d'énergie récupérée au freinage directement par la batterie avec le choix de P_{rec}.

Le Tableau III. 5 représente une synthèse des valeurs optimales des paramètres utilisées dans la méthode MGD1.

MGD1	SOC_sc-ref (initial)	$P_{disch_high_limit}$	$P_{disch_low_limit}$	Esc_{disch_high}	Esc_{disch_low}	P_{rec}
Décharge / Charge	94%	$N_{S_B}.N_{P_B}.P_{bat}^{D}$	0	78% SOC	45% SOC	≈ f(33% E_{V_rec})

Tableau III. 5 : Paramètres de simulation de MGD1

III.5.3 Limitation de puissance de charge/décharge sur deux niveaux en fonction de l'énergie des supercondensateurs («MGD2»)

Cette stratégie est basée sur le même principe que la précédente mais avec un hystérésis à la recharge également. La Figure III. 23 illustre le principe de cette méthode de gestion

d'énergie. La puissance (P_V) requise pour la propulsion du véhicule électrique est divisée en deux parties par les limites dynamiques de partage de puissance que ce soit en charge ou en décharge. L'état de charge des supercondensateurs retrouve toujours son état initial à chaque fin de cycle grâce à la régulation implantée.

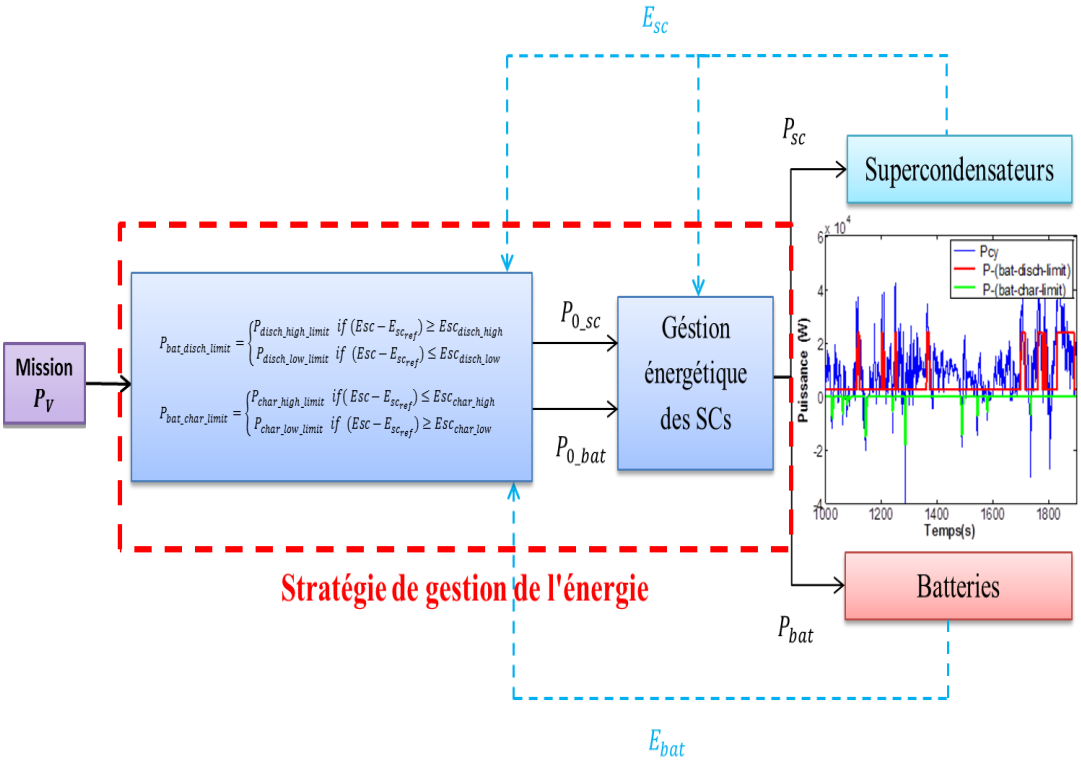


Figure III. 23: Variation des limites de partage de puissance entre deux niveaux en fonction de l'état de charge de supercondensateurs «MGD2»

Les limites de partage de puissance entre les deux sources dans la phase de traction (phase de décharge) sont définies par l'équation (**III.15**). Contrairement à la première stratégie, la répartition de puissance dans la phase de récupération de l'énergie lors du freinage du véhicule (phase de charge) est variable selon l'état de charge des supercondensateurs. Les deux niveaux de limite de puissance sont donnés par :

$$P_{bat_char_limit} = \begin{cases} P_{char_high_limit} & if\ (Esc - E_{sc_{ref}}) \leq Esc_{char_high} \\ P_{char_low_limit} & if\ (Esc - E_{sc_{ref}}) \geq Esc_{char_low} \end{cases} \qquad \text{(III. 16)}$$

$P_{char_high_limit}$ représente la puissance maximale de charge des batteries donnée par le fabricant. La limite $P_{char_low_limit}$ est variable entre zéro et la limite maximale de puissance. Esc_{char_high} et Esc_{char_low} représentent les deux niveaux de l'énergie qui déclenchent le passage de puissance d'un niveau à l'autre (cf. Figure III. 24).

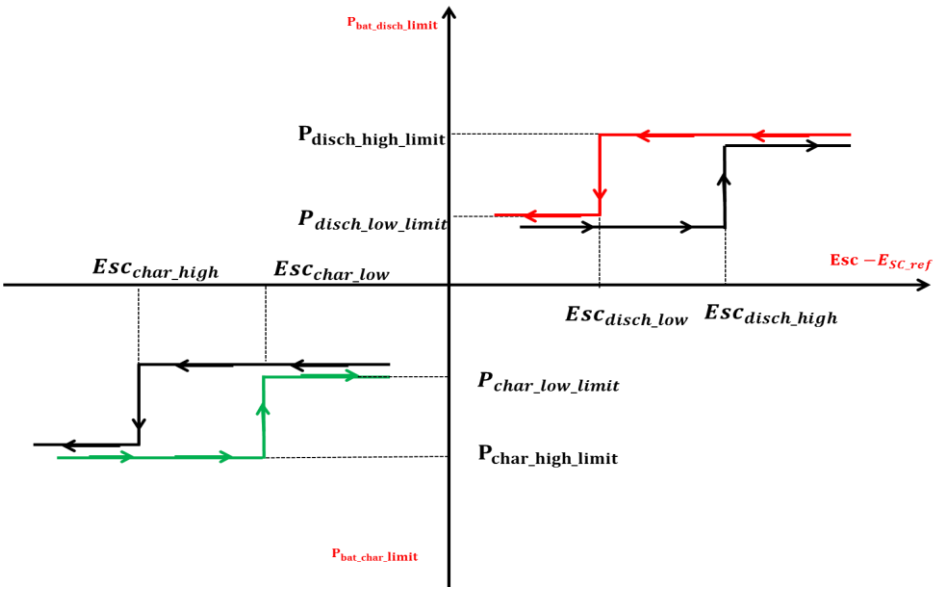


Figure III. 24 : Méthode MGD2 : puissances limite des batteries en fonction de l'état énergétique du supercondensateur

Pour cette méthode, les paramètres variables sont le rapport entre les deux niveaux de puissance à la décharge $P_{disch_low_limit}$ et $P_{disch_high_limit}$, le même rapport à la recharge entre $P_{char_low_limit}$ et $P_{char_high_limit}$ et enfin les hystérésis à la décharge entre Esc_{disch_high} et Esc_{disch_low} et à la charge entre Esc_{char_high} et Esc_{char_low}.

Le Tableau III. 6 montre une synthèse des valeurs optimales des paramètres utilisées dans la méthode MGD2.

MGD1	SOC_sc-ref (initial)	P_{high_limit}	P_{low_limit}	Esc_{high}	Esc_{low}
Décharge	94%	$N_{S_B}.N_{P_B}.P_{bat}^{D}$	0	78% SOC	45% SOC
Charge		$N_{S_B}.N_{P_B}.P_{bat}^{C}$	0	98% SOC	95% SOC

Tableau III. 6 : Paramètres de simulation de méthode de gestion MGD2

III.5.4 Limitation de puissance en charge/décharge linéaire en fonction de l'énergie des supercondensateurs («MGD3»)

Cette stratégie est basée sur le même principe que la précédente mais au lieu d'avoir un passage discret entre les deux limites de puissances, la transition se fait de manière continue dans la phase de traction et de récupération de l'énergie du véhicule. Le schéma de principe de cette stratégie de gestion d'énergie est montré sur la Figure III. 25. Comme pour les deux stratégies précédentes, la régulation de l'état de charge des supercondensateurs avec un correcteur PI est utilisée. Notons que le choix de la fonction linéaire et ses paramètres a été effectué par l'algorithme d'optimisation dans lequel l'objectif est de diminuer les contraintes de puissance appliquées aux batteries.

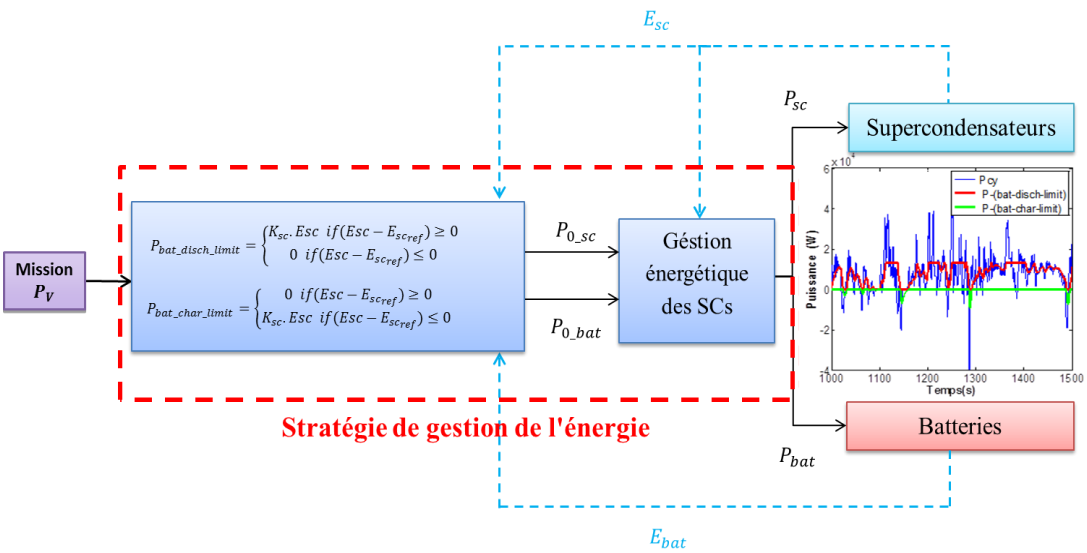


Figure III. 25: Variation de limites de partage de puissance par une fonction linéaire continue «MGD3»

Cela revient donc, par exemple pour la décharge, à faire varier continûment la puissance entre deux limites, $P_{disch_high_limit}$ et zéro avec un coefficient K_{sc} (cf. Figure III. 26). Les deux limites de puissance pour les phases de traction et de récupération sont donc calculées à l'aide des relations suivantes :

$$P_{bat_disch_limit} = \begin{cases} K_{sc}.Esc \ \ if \ (Esc - E_{sc_{ref}}) \geq 0 \\ 0 \ \ if \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ (Esc - E_{sc_{ref}}) \leq 0 \end{cases} \quad \text{(III. 17)}$$

$$P_{bat_char_limit} = \begin{cases} 0 \ \ if \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ (Esc - E_{sc_{ref}}) \geq 0 \\ K_{sc}.Esc \ \ if \ (Esc - E_{sc_{ref}}) \leq 0 \end{cases} \quad \text{(III. 18)}$$

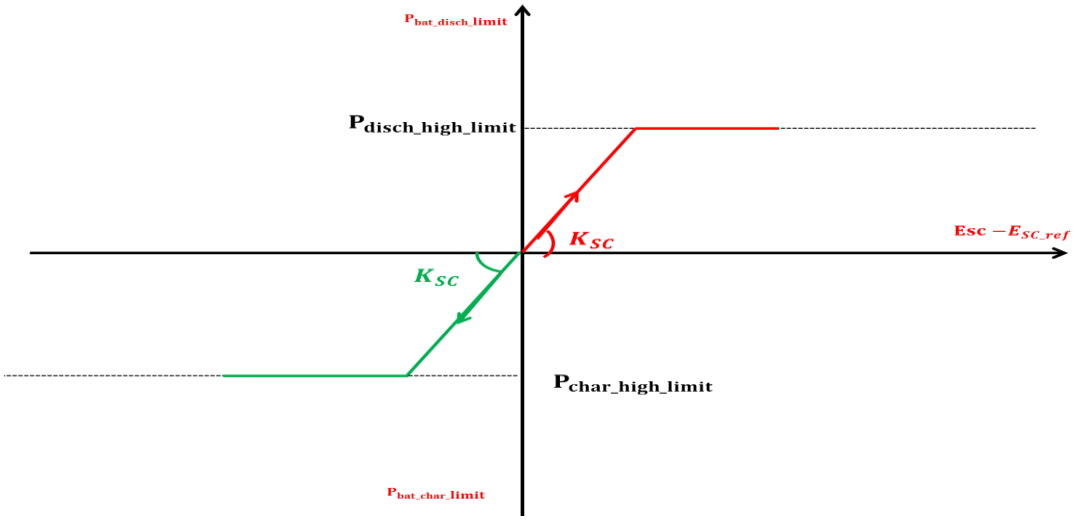


Figure III. 26: Méthode MGD3 : Evolution linéaire de la puissance limite des batteries en fonction de l'état énergétique du supercondensateur

Pour cette méthode, il n'y a qu'un seul paramètre variable, le gain K_{sc} = 0.05. Les puissances $P_{disch_high_limit}$ ($N_{S_B}.N_{P_B}.P_{bat}^{D}$) et $P_{char_high_limit}$ ($N_{S_B}.N_{P_B}.P_{bat}^{C}$) sont des données de dimensionnement.

III.5.5 Limitation de puissance de charge/décharge linéaire en fonction de l'énergie des supercondensateurs avec augmentation de la tension maximale des supercondensateurs («MGD3+»)

L'objectif de cette variante de la méthode MGD3 est d'augmenter la capacité de stockage du pack de supercondensateurs en allant au-delà de sa tension nominale de charge. Ceci permet de réduire encore les contraintes électriques appliquées aux batteries en « surchargeant » les supercondensateurs. Cela devrait alors entrainer une augmentation de la durée de vie des batteries, au détriment de celles des supercondensateurs, sachant que ceux-ci ont une durée vie bien trop grande par rapport à celui du système de stockage hybride. L'objectif est maintenant d'évaluer les gains potentiels en fonction de ce nouveau paramètre sur lequel nous nous proposons d'agir.

La tension maximale des supercondensateurs a été ***élevée arbitrairement à 3,2V*** pour la stratégie MGD3+. Il faut noter que la montée à 3,2 V n'est pas réaliste dans l'état actuel des technologies de supercondensateurs mais ce choix correspond à une augmentation de l'ordre de 50% l'énergie du pack supercondensateur. Cette solution permet d'allèger les contraintes des batteries de façon conséquente.

Nous nous proposons d'évaluer celle-ci en la comparant à la MGD3 pour laquelle la tension maximale vaut 2,7V (tension nominale), et ainsi d'identifier la marge de progression que l'on peut obtenir en agissant sur le paramètre « tension maximale » des cellules de supercondensateur de la source hybride.

III.5.6 Analyse et comparaison des contraintes de puissance

Afin de réaliser une comparaison entre les méthodes de gestion de l'énergie en termes de contraintes électriques et de vieillissement, le dimensionnement de la source hybride obtenu avec la méthode MG4 pour chaque autonomie dans la section précédente a été conservé (cf. Figure III. 27). La méthode MG4, associée à sa source hybride optimisée, devient la méthode de gestion de référence de cette partie. On montre alors les améliorations apportées par les méthodes (MGD1, MGD2, MGD3) relativement à la méthode MG4 initiale à source hybride identique.

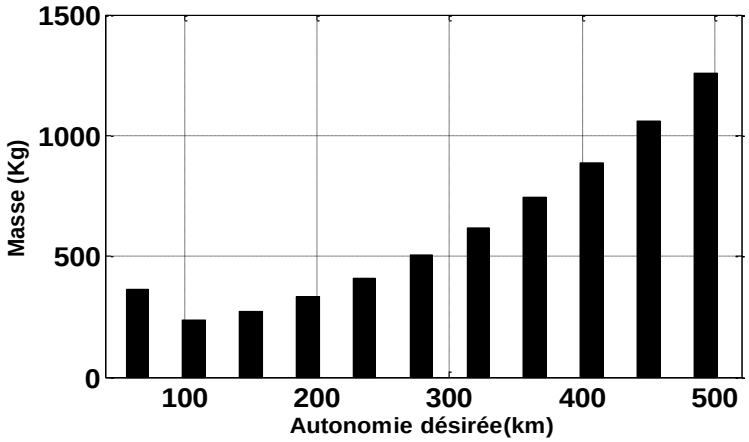


Figure III. 27 : Masse de la source hybride obtenue avec la méthode de référence MG4

La Figure III. 28–A, représente l'évolution de la puissance efficace d'un élément batteries avec les méthodes développées (MGD1, MGD2, MGD3, MGD3+) et la méthode de référence MG4 ainsi que les gains relatifs par rapport à cette dernière. En analysant les valeurs efficaces de la puissance, on peut observer que la contrainte de puissance diminue avec l'augmentation de l'autonomie puisque le nombre de cellules d'un pack batteries augmente. De plus, la puissance efficace avec les méthodes développées MGD1 et MGD2 est un peu moins importante que celle de la méthode de référence dans la plage d'autonomie de 80 km à 370 km, en diminuant respectivement la puissance efficace de 3% et 5% pour une autonomie de 150 km. Pour les autonomies inferieures à 80 km et supérieure à 370 km les méthodes MGD1et MGD2 donnent une contrainte de puissance efficace plus importante en comparaison avec notre méthode de référence MG4.

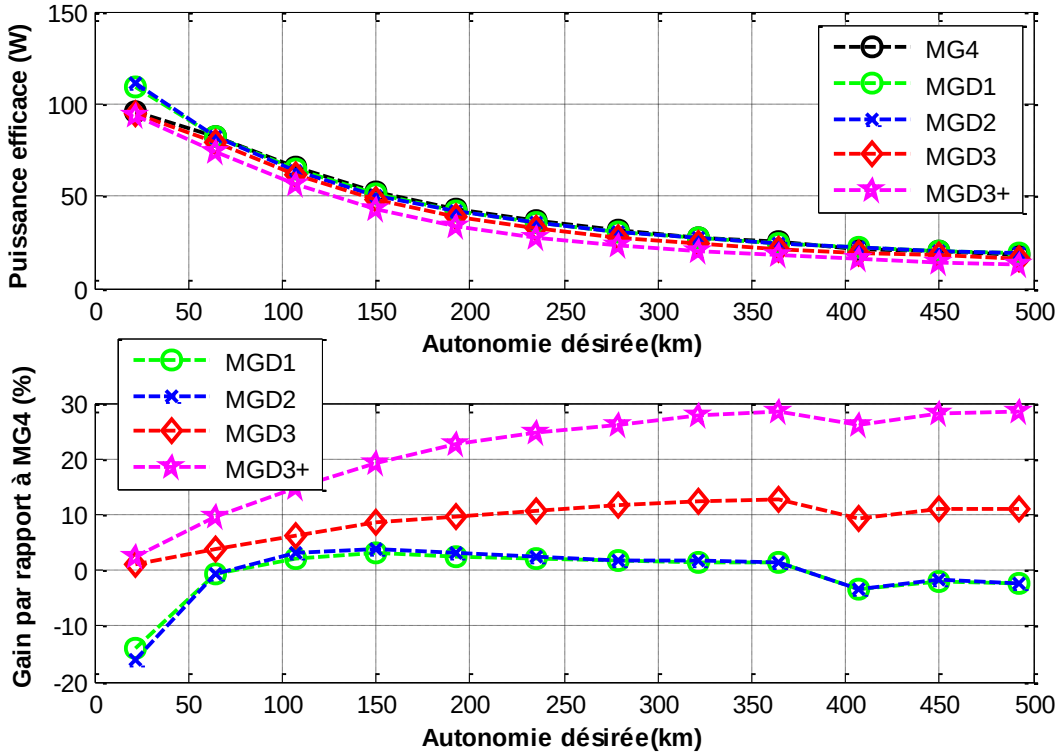


Figure III. 28: Puissance efficace batterie (A), Gain en pourcentage par rapport MG4 (B)

En ce qui concerne les deux autres méthodes développées MGD3 et MGD3+, On constate que la contrainte de puissance efficace est largement diminuée. On peut noter, par exemple, une diminution de 12 % et 20% pour une autonomie de 150 km. Contrairement aux deux premières méthodes, la diminution de puissance efficace des batteries persiste pour les fortes autonomies. Cela peut être expliqué par le fait que les deux méthodes développées MGD3 et MGD3+ utilisent une fonction continue liée à l'état de charge des supercondensateurs avec une répartition de puissance d'autant plus active que la puissance est importante.

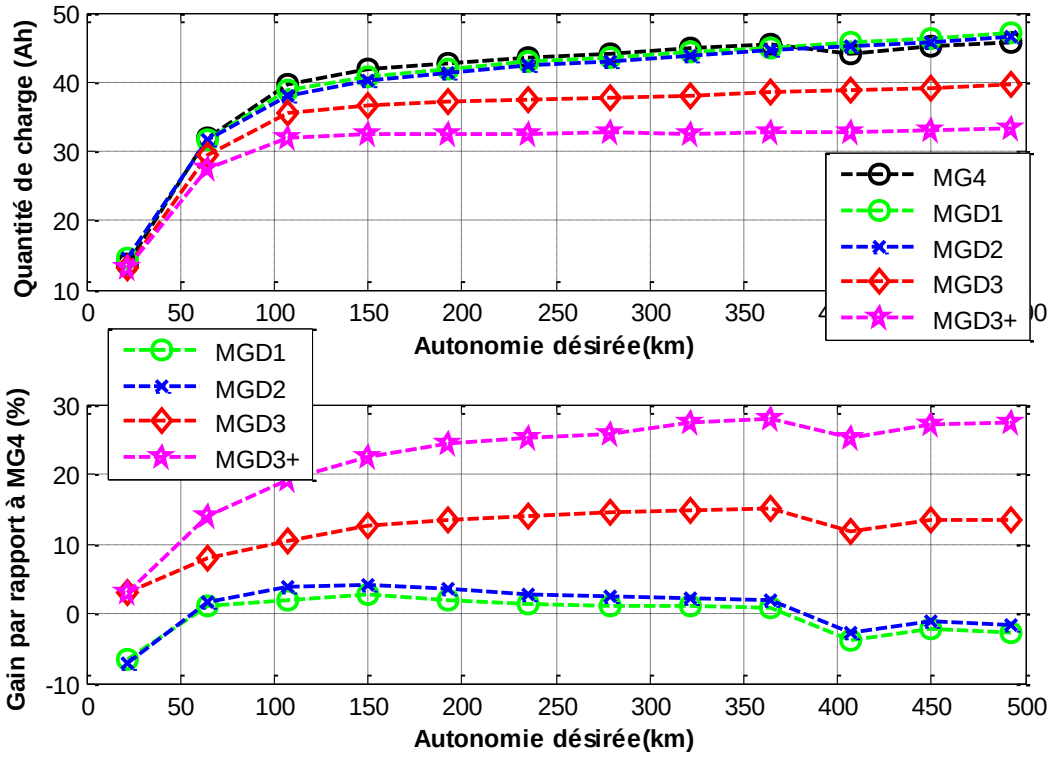


Figure III. 29: Quantité de charge Batterie échangée (A), Gain en pourcentage par rapport MG4 (B)

Le même constat est valable pour l'évolution de la quantité de charge échangée au niveau des batteries (cf. Figure III. 29). La Figure III. 30 montre l'évolution de la puissance efficace des supercondensateurs en fonction de l'autonomie désirée pour les méthodes de gestion développées. L'axe à gauche représente la valeur de puissance efficace (W) et celui de droite donne en pourcentage la puissance efficace par rapport la puissance maximale du composant supercondensateurs *MAXWELL* 350F/2.7V, soit 271W. Nous constatons que la puissance efficace des supercondensateurs avec toutes les méthodes de gestion testées évoluent en deux phases :

- Pour les faibles et moyennes autonomies, la puissance efficace augmente jusqu'à une valeur maximale. Cependant, cette valeur maximale de puissance est différente entre les méthodes de gestion testée et est atteinte pour une autonomie spécifique selon la méthode. On peut observer aussi que la méthode de gestion MGD3+ donne la valeur de puissance efficace la plus importante (47 W pour une autonomie de 280 km). Cette puissance représente seulement 18% de la puissance maximale des supercondensateurs.
- Pour les autonomies importantes, la batterie est dominante (lié au dimensionnement en énergie), la puissance efficace des supercondensateurs garde sa valeur maximale constante pour les méthodes développées MGD3 et MGD3+, et diminue progressivement en fonction de l'autonomie avec les autres méthodes de gestion testée.

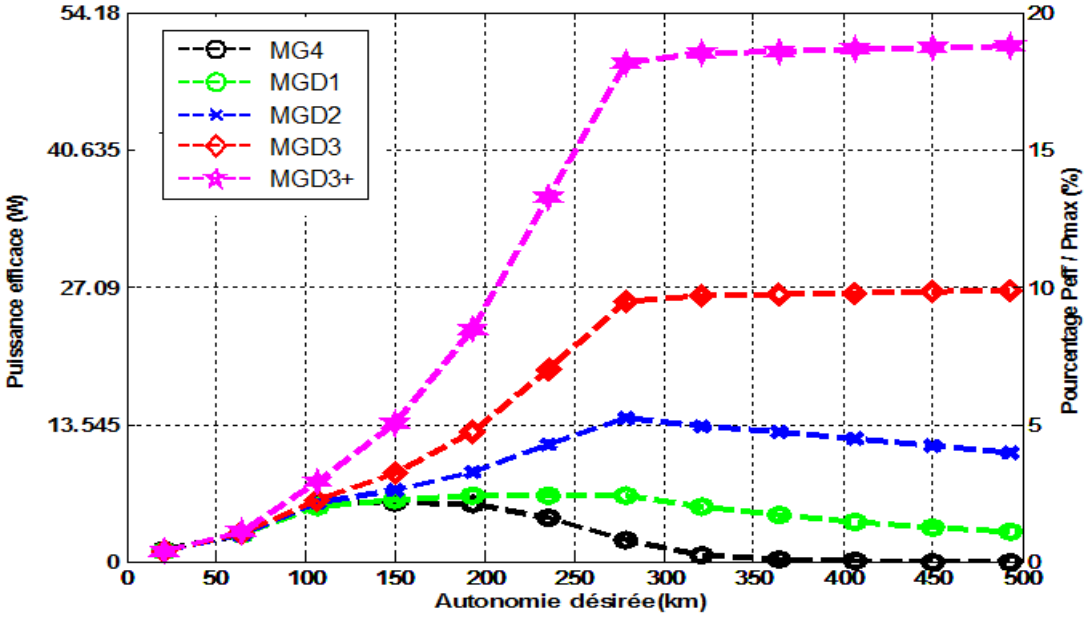


Figure III. 30: Evolution de la puissance efficace des supercondensateurs en fonction de l'autonomie désirée

Sur la Figure III. 31, on constate l'augmentation du nombre de cycles de charge/décharge des supercondensateurs en fonction de l'autonomie désirée pour toutes les méthodes de gestion testées. Cela peut être interprété par la forte utilisation des supercondensateurs pour les faibles et moyennes autonomies et leur diminution progressive en fonction de l'autonomie. Nous constatons aussi que le nombre de cycles de charge/décharge de supercondensateurs dépend de la méthode de gestion utilisée. Dans ce contexte, on peut observer que les méthodes développées MGD3 et MGD3+ donnent un grand nombre de cycles charge / décharge par rapport aux autres stratégies de gestion.

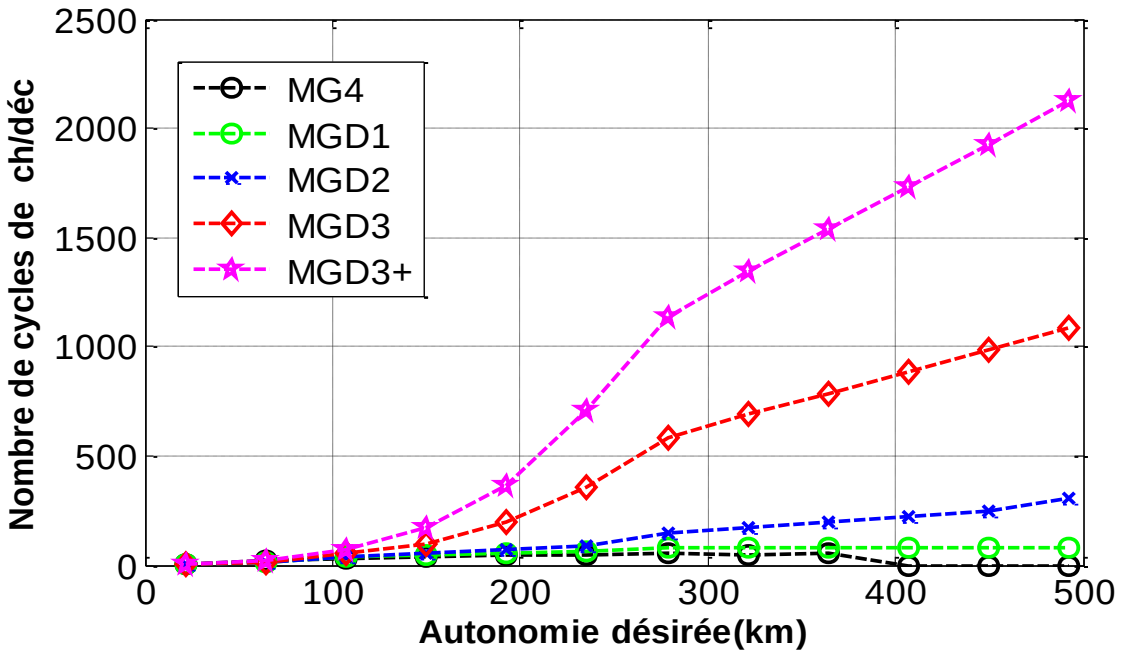


Figure III. 31: Evolution du nombre de cycles de charge/décharge supercondensateurs en fonction de l'autonomie désirée

Pour montrer l'amélioration globale obtenue dans cette partie, nous comparons les résultats de puissance efficace et de quantité de charge échangés obtenus avec les stratégies MG2 et MG4 par rapport aux résultats de MGD3. Les deux stratégies MG2 et MG4 ont déjà démontré leurs meilleures performances en termes de dimensionnement et contraintes électriques avec un avantage pour la MG2 du point de vue puissance efficace et quantité de charge échangés, avec un léger avantage pour MG4 concernant la masse.

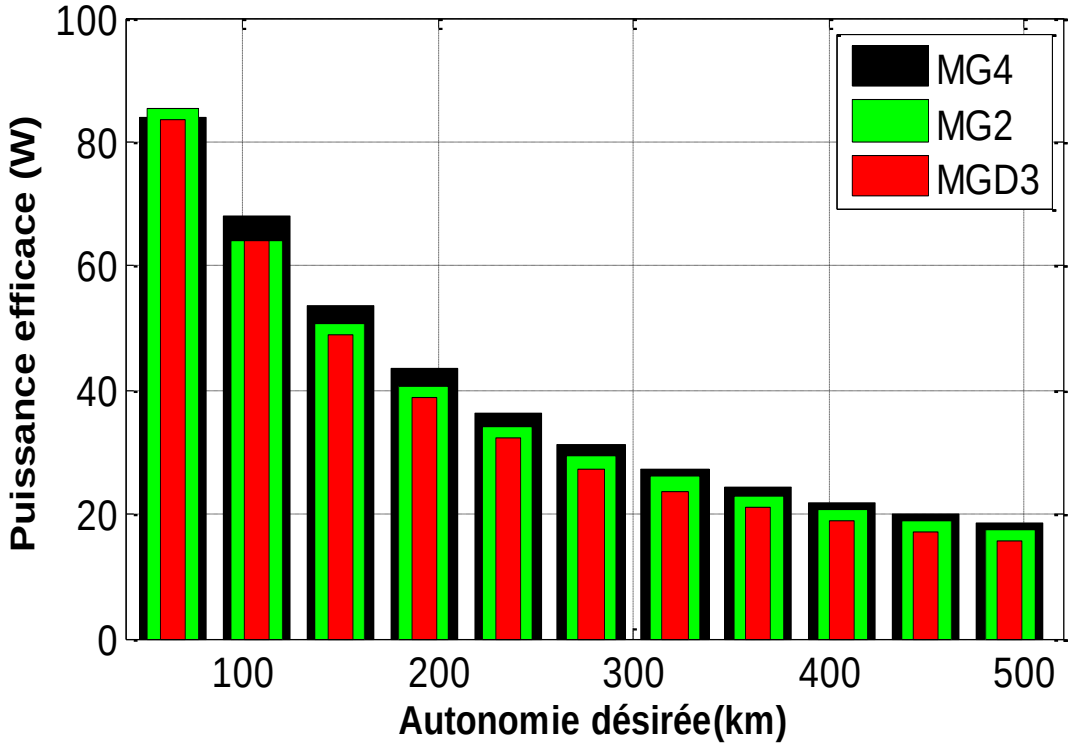


Figure III. 32: Puissance efficace de batteries avec les méthodes MG2, MG4 et MGD3

La Figure III. 32 illustre l'évolution de la puissance efficace d'un élément batteries avec les méthodes MG2, MG4 et MGD3. On peut remarquer globalement que l'amélioration apportée à MG4 en utilisant la limitation variable de partage de puissance en fonction de l'état de charge des supercondensateurs (MGD3) est concluante. Cette méthode est à ce stade la plus performante en maintenant le dimensionnement optimal de la source hybride obtenu avec MG4.

L'évolution de la quantité de charge échangée par la batterie en fonction de l'autonomie désirée avec les méthodes MG2, MG4 et MGD3 est représenté sur la Figure III. 33. On constate que la stratégie de gestion améliorée MGD3 offre globalement le meilleur niveau de performance. Cela confirme que cette stratégie améliorée est capable de satisfaire les besoins énergétiques du véhicule, de réduire les contraintes de puissances appliquées aux batteries et de donner une solution optimale pour le dimensionnement de la source hybride.

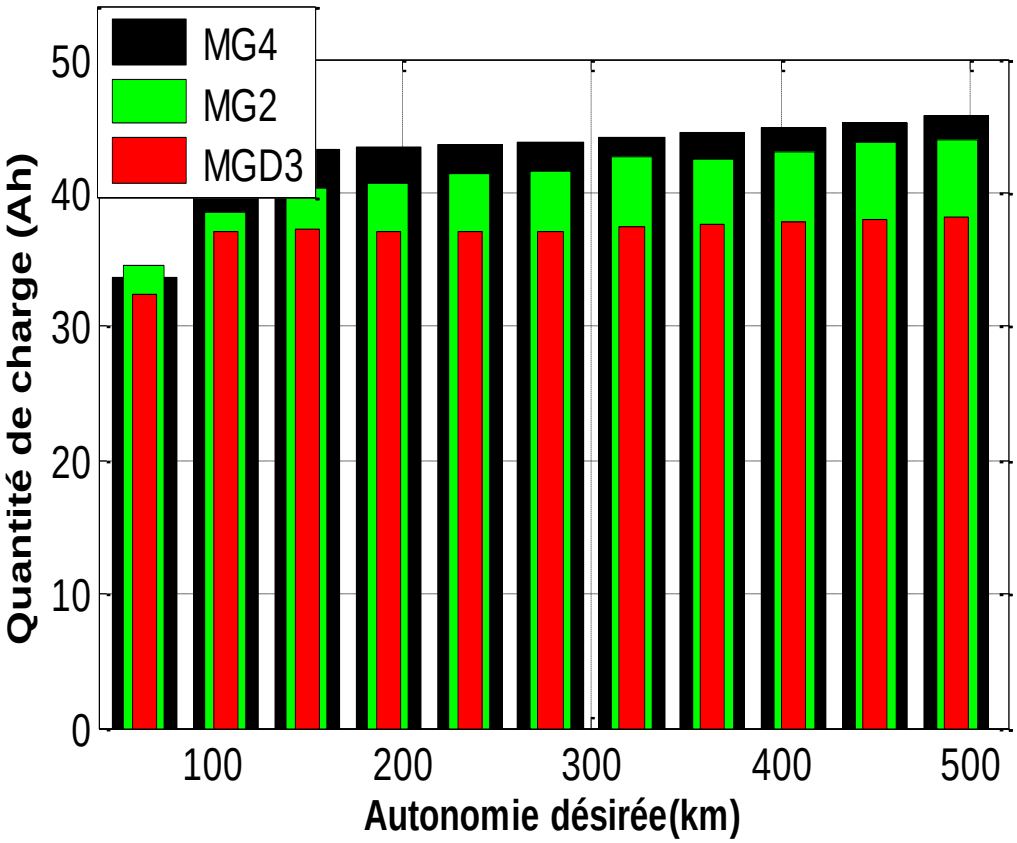


Figure III. 33: Quantité de charge Batteries échangée avec les méthodes MG2, MG4 et MGD3

III.5.7 Analyse comparative du vieillissement estimé selon la méthode de gestion appliquée

Nous proposons une étude comparative des différentes méthodes de gestion de l'énergie selon l'angle du vieillissement à l'aide du modèle multi-physique développé au chapitre II. Comme rappelé sur la Figure III. 34, ce modèle est une combinaison des modèles électriques, thermiques et de vieillissement de chaque composant de la source de stockage hybride [145].

Dans ce contexte, la modélisation électrothermique repose sur le couplage du modèle électrique alimenté par le courant de charge/décharge au modèle thermique du stockeur. Le modèle thermique utilise la puissance dissipée (*effet Joule*) comme entrée pour avoir la

distribution de la température dans les composants de stockage. Cette distribution est utilisée par le modèle de vieillissement, ainsi que l'état de charge (tension) issu du modèle électrique, pour évaluer à la fois la durée de vie du stockeur et corriger les valeurs des paramètres électriques. Ces nouvelles valeurs de paramètres électriques sont réinjectées à la fin de chaque cycle d'usage dans le modèle électrique.

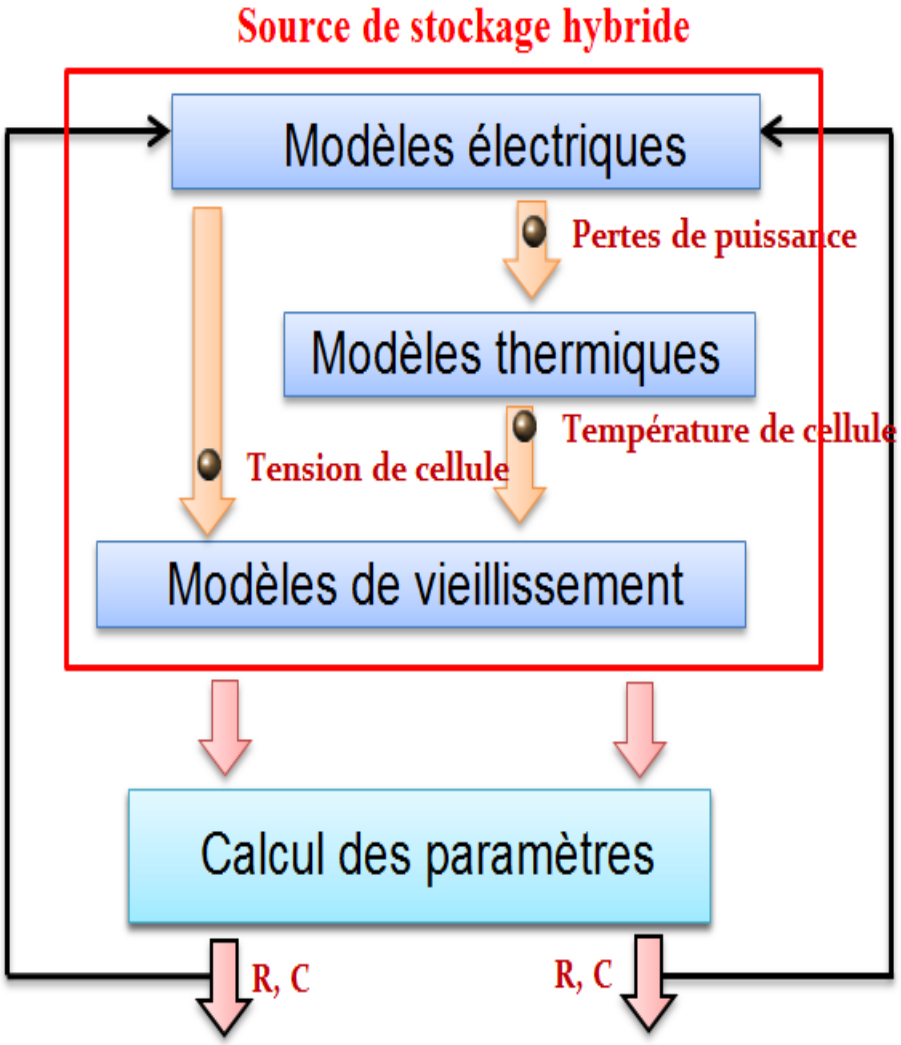


Figure III. 34: Couplage multi-physique des modèles de la source hybride

Le modèle multi-physique de la source hybride batteries Li-ion/supercondensateurs permet, à la fois, de tester les méthodes de gestion développées et d'étudier l'impact des températures et des variations de tension tout au long de la vie de ces stockeurs. Pour simplifier l'étude, les similations de vieillissement sont effectués ***pour un seul point d'autonomie à 150 km.***

Le modèle multi-physique développé est simulé sous MATLAB®/Simulink® en utilisant la station de calcul de l'ESTACA-Laval. Le compromis temps de simulation/ précision du modèle développé doit être pris en compte pour tous les tests afin d'éviter de longs temps de calcul et la consommation d'une quantité importante de mémoire informatique. C'est dans cette optique que nous avons choisi une période d'échantillonnage bien précise avec un pas de temps adapté à la dynamique des phénomènes électriques (à l'échelle de la seconde), des phénomènes thermiques (à l'échelle de l'heure) et enfin des phénomènes de vieillissement (à l'échelle de plusieurs semaines ou mois). Toutefois, la disparité des dynamiques de ces phénomènes physiques avec leurs constantes de temps très éloignées rend la tâche de simulation du modèle

multi-physique peu aisée. ***De ce fait, le temps de calcul en simulation de vieillissement reste pour l'instant relativement important avec une durée totale estimée à environ 25 jours de calcul continu pour un seul test de méthode de gestion.***

La Figure III. 35 représente la dégradation de capacité des batteries et des supercondensateurs avec la méthode référentielle MG4 en fonction du temps en semaine. La fin de vie des deux composants de stockage est fixée par définition à **20% de perte de capacité par rapport aux valeurs initiales**. Dans ce contexte, on peut constater que la fin de vie des batteries avec cette méthode de gestion de l'énergie est obtenue après **129 semaines** d'utilisation consécutive de la source de stockage hybride. Cette valeur est à comparer à la durée de vie obtenue avec la mono-source (batterie HP) qui n'était que de **105 semaines**. Nous remarquons que, pour les premières **20 semaines,** la perte de capacité (de l'ordre de **8 %)** est relativement importante. Par la suite, la dégradation ralentie avec une diminution quasi-linéaire en fonction du temps d'utilisation. Notons que durant la même période (jusqu'à la fin de vie batterie), les supercondensateurs perdent seulement **1.5%** de leur capacité initiale.

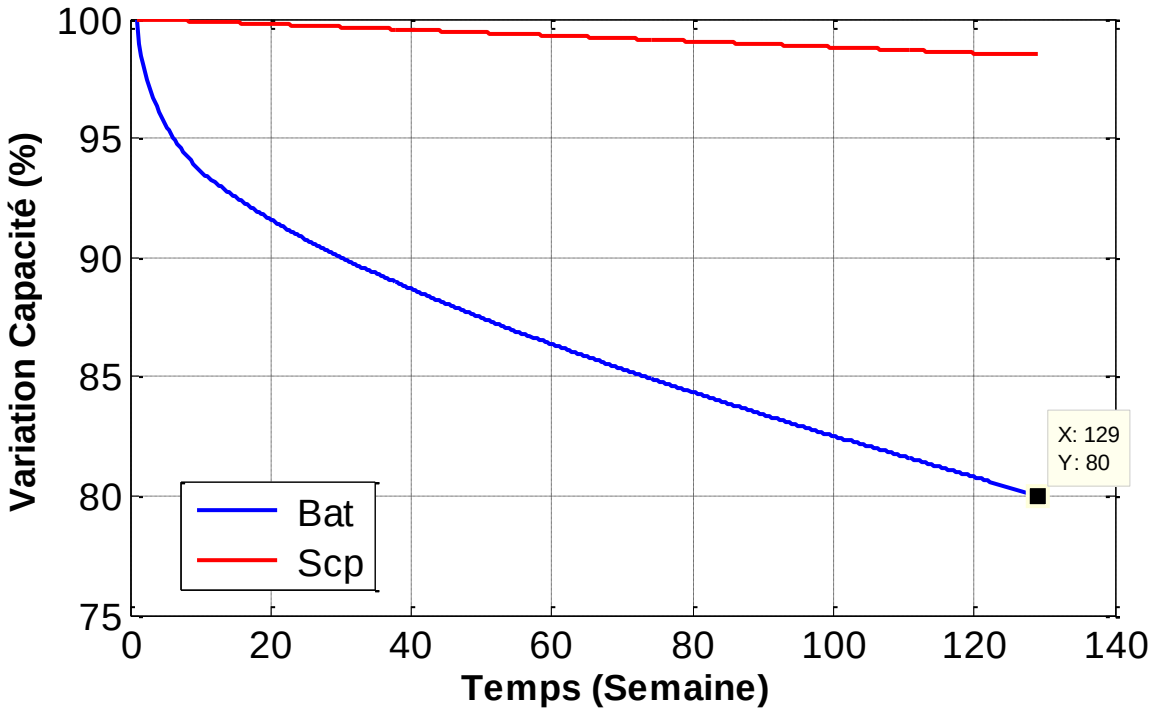


Figure III. 35: Dégradation de la capacité des batteries et des supercondensateurs avec la méthode de référence MG4

Le vieillissement inégal de ces deux composants de stockage est lié à leur principe bien différent. Dans ce contexte, pour prolonger la durée de vie de la source de stockage hybride, il est possible d'agir sur la méthode de gestion d'énergie afin de limiter les sollicitations du pack de batteries et réduire les contraintes physiques vues par ces cellules grâce aux méthodes de gestion proposées (MGD1, MGD2, MGD3, MGD3+). On sollicite plus les supercondensateurs afin de réduire les contraintes de puissance appliquées aux batteries. La comparaison des résultats de vieillissement, à savoir ici les variations de capacités des batteries et des supercondensateurs sont présentées sur la Figure III. 36.

Sur la Figure III. 36-A, nous pouvons voir l'évolution de capacité des deux composants de stockage avec la méthode développée MGD1 pour laquelle la fin de vie des batteries est obtenue après **129 semaines** d'utilisation, avec une évolution de vieillissement presque identique avec celle de la méthode de référence MG4. Pour les supercondensateurs, malgré

l'augmentation des contraintes de puissance vues par ces derniers, leur fin de vie est toujours loin des 20% de perte de capacité initiale (environ **1.8 %** après **129 semaines** d'utilisation).

La Figure III. 36-B montre la dégradation de capacité des batteries et des supercondensateurs avec la méthode MGD2 en fonction du temps. Nous constatons que la durée de vie totale des composants batteries avec cette méthode de gestion d'énergie est plus importante que la durée de vie avec la méthode référentielle MG4. Le gain en durée de vie des batteries est estimé de **4.65%** en comparant avec la méthode de référence MG4 (fin de vie batteries après **135 semaines** d'utilisation). En ce qui concerne les supercondensateurs, la dégradation de capacité avec cette méthode de gestion est un peu plus rapide que les autres méthodes, mais leur perte de capacité n'est encore que de l'ordre de **2.5 %** lorsque les batteries sont en fin de vie.

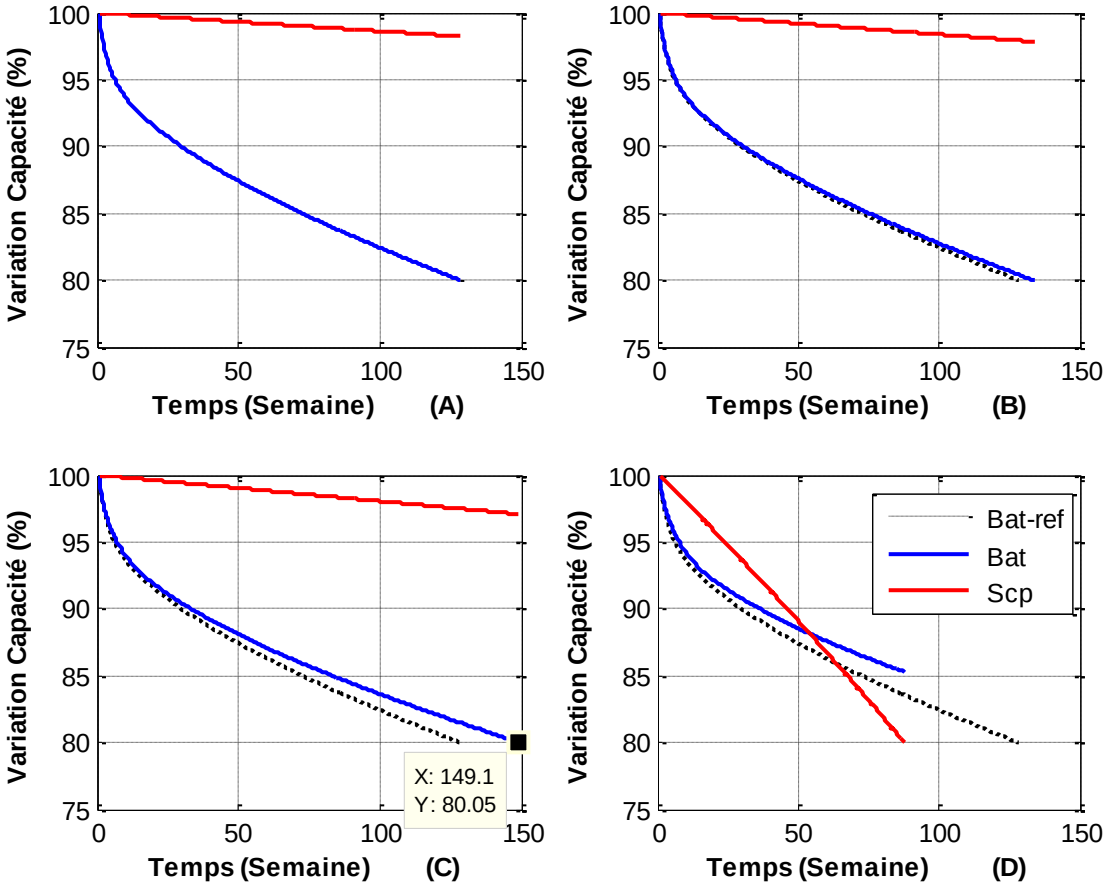


Figure III. 36: Dégradation de la capacité de batteries et de supercondensateurs avec les méthodes développées. MGD1 (A), MGD2 (B), MGD3 (C), MGD3+ (D)

Avec la méthode MGD3 (cf. Figure III. 36-C), on constate que la durée de vie totale des composants batteries est prolongée de **15.5 %** par rapport à la méthode MG4 (fin de vie batteries après **149 semaines** d'utilisation). Dans ce cas on sollicite fortement les supercondensateurs lorsque les contraintes en puissance sont élevées. Cela permet de réduire les contraintes de puissance vues par les batteries et prolonger leur durée de vie totale. Pour les supercondensateurs, le vieillissement est ici estimé de **3.1 %** lorsque les batteries sont en fin de vie. Cette valeur de dégradation de capacité des supercondensateurs est toujours très loin des 20% de perte de capacité et montre que l'on pourrait surcharger ces éléments selon le la durée de vie effective que l'on souhaite leur donner.

Ainsi, la méthode MGD3+ sollicite encore plus les supercondensateurs avec l'augmentation de la tension de fonctionnement afin de diminuer les contraintes de puissance vues par les batteries pour améliorer leur durée de vie. La Figure III. 36-D illustre l'évolution de la capacité des batteries et des supercondensateurs avec la méthode de gestion développée MGD3+ basée sur l'augmentation de tension de fonctionnement des cellules supercondensateurs qui passe de 2.7V à 3.2 V. On peut constater que la vitesse de dégradation de capacité de ces derniers devient trop importante en comparaison avec la dégradation de capacité des autres méthodes de gestion développées. La fin de vie des supercondensateurs est obtenue cette fois avant celle des batteries, après **88 semaines** d'utilisation. En ce qui concerne les batteries, nous pouvons voir que l'évolution de vieillissement est allongée par rapport à la méthode de référence MG4 et que la perte de capacité est estimée après **88 semaines** d'utilisation à **14.5%** de sa valeur initiale. Avec ce choix extrême de 3,2V comme tension maximale des cellules de supercondensateur, on aboutit au final à une baisse de **32 %** de la durée de vie de la source hybride par rapport la méthode MG4.

La méthode de gestion développée MGD3+ permet d'augmenter la durée de vie des batteries mais entraine un vieillissement exagéré des supercondensateurs. Le choix approprié de la tension maximale des supercondensateurs permettrait donc d'exploiter les deux sources de manière homogène en termes de vieillissement ou bien de définir le taux de vieillissement d'une source par rapport à l'autre si on souhaite les différencier (par exemple, une durée de vie des supercondensateurs double de celle des batteries…).

III.5.8 Méthode active de gestion de l'énergie d'une source de stockage hybride

A titre d'exemple et sur la base de méthodes de gestion d'énergie déjà développées, nous montrons une méthode de gestion d'énergie basée sur le basculement entre deux méthodes développées auparavant. L'objectif de cet exemple est de montrer l'amélioration de la durée de vie totale de la source hybride en maîtrisant les contraintes de puissance appliquées aux composants batteries et supercondensateurs. On choisit a priori ici d'arriver à une fin de vie simultanée des deux stockeurs. Ceci peut être réalisé de différentes façons.

La stratégie présentée consiste à faire fonctionner la source de stockage hybride en alternant la méthode MG4 (référence) avec sa variante MGD3+. On aurait pu aussi prendre un basculement entre MGD3 et MGD3+ selon le même principe. La Figure III. 37 montre l'algorithme de gestion active qui permet de définir les séquences de fonctionnement et le basculement entre les deux méthodes de gestion utilisées. L'idée de base de cet algorithme est de calculer instantanément la vitesse de dégradation de capacité (la pente de vieillissement) des batteries et des supercondensateurs. Par la suite, l'algorithme décide selon le résultat de la comparaison, quelle méthode de gestion appropriée va être utilisée pour la mission suivante. Cette approche permet de gérer instantanément le vieillissement des batteries et des supercondensateurs afin d'obtenir une perte de capacité identique pour les deux composants à la fin de vie de la source hybride.

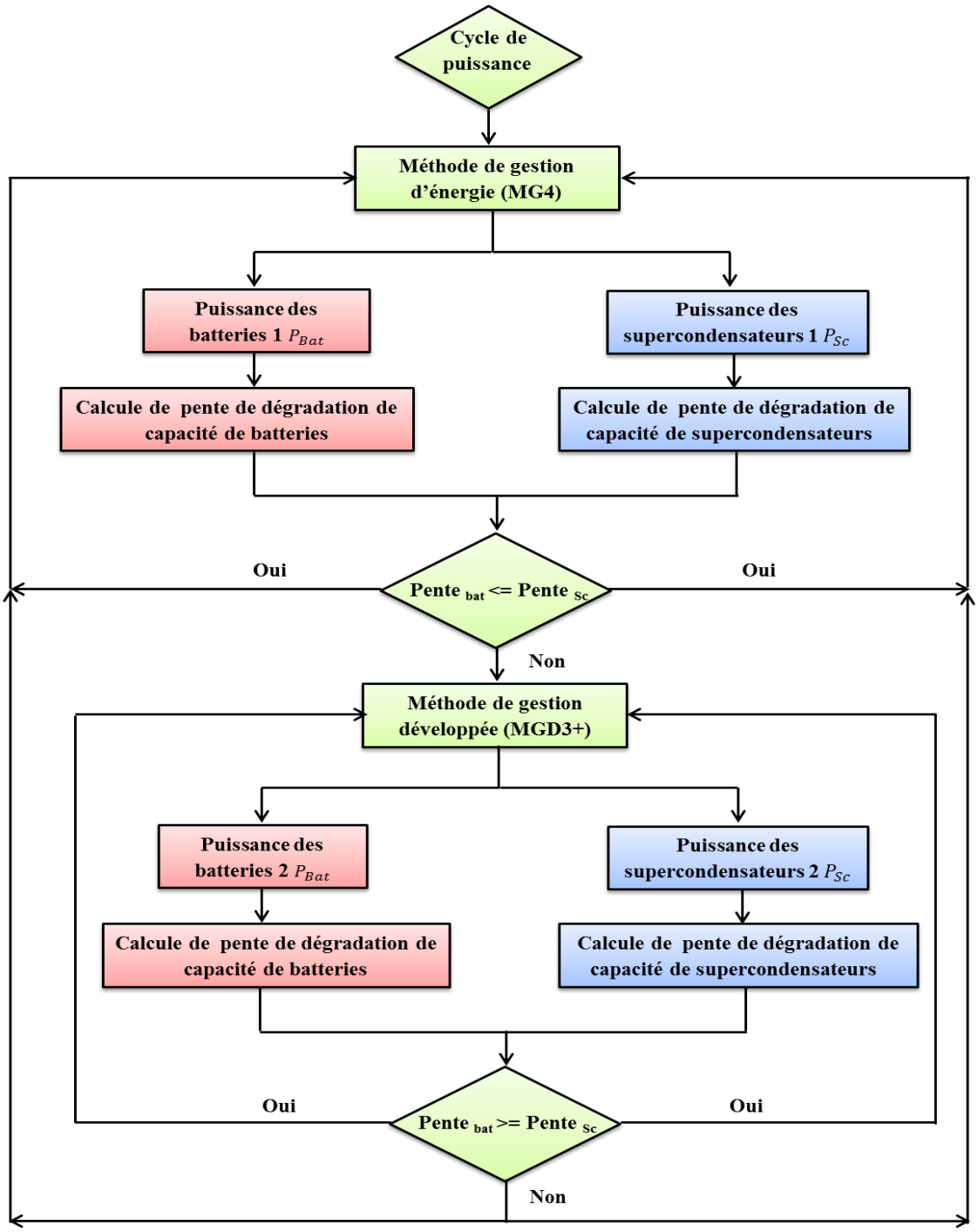


Figure III. 37: Méthode active - Algorithme de gestion de l'énergie

On peut constater sur la Figure III. 38 que l'évolution de la capacité des batteries et des supercondensateurs devient identique à partir de **54 semaines** d'utilisation et l'algorithme de gestion qui surveille le vieillissement des composants de stockage assure bien le contrôle de dégradation des capacités jusqu'à la fin de vie de la source de stockage hybride définie par 20% de perte de capacité par rapport à sa valeur initiale. Nous pouvons voir le principe de basculement entre les méthodes de gestion de l'énergie en fonction de la pente de vieillissement sur le zoom de Figure III. 38.

Nous observons aussi que la durée de vie totale de la source de stockage hybride a été prolongée avec cette méthode de gestion de **19 %** en comparant avec la méthode MG4 (les batteries en fin de vie après **153 semaines** d'utilisation). Le gain est réduit par contre par rapport

à MGD3 (**149 semaines**). D'autres méthodes plus efficientes en termes de vieillissement pourront être testées ultérieurement.

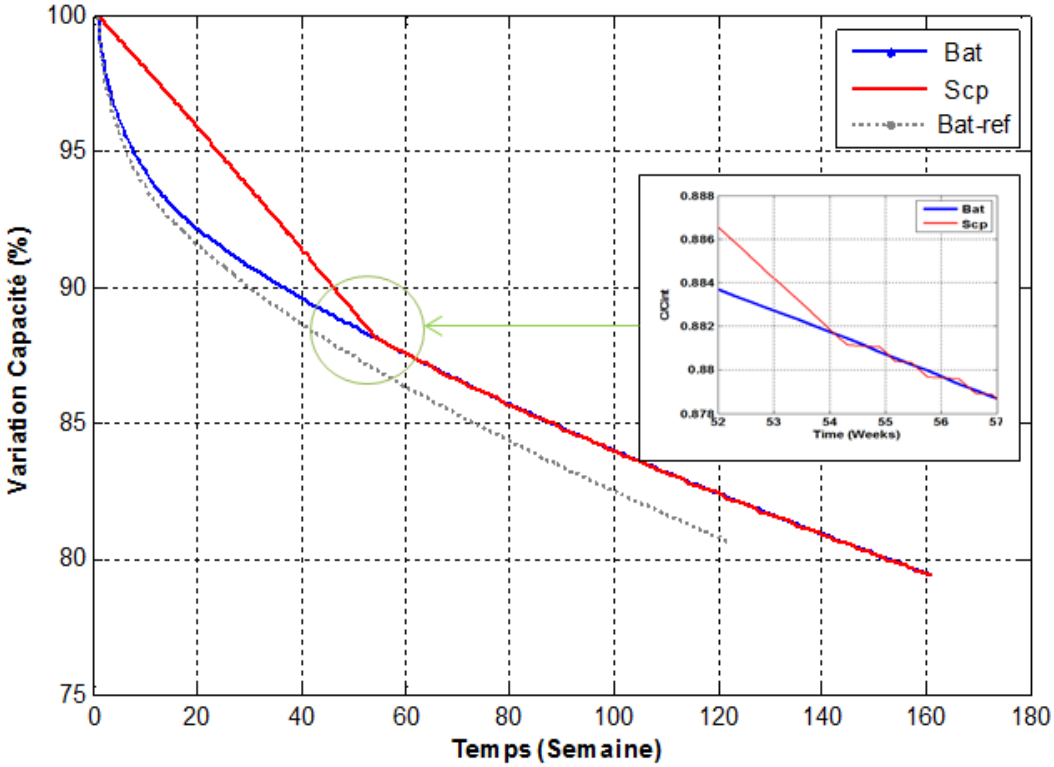


Figure III. 38: Dégradation de la capacité batteries et supercondensateurs avec la méthode active basée sur MGD3 et la référence MG4

Cette partie a montré que les méthodes de gestion d'énergie peuvent influencer le dimensionnement de la source de stockage hybride ainsi que sa durée de vie totale. Néanmoins le degré d'influence varie d'une méthode à l'autre, en fonction de l'autonomie désirée. Cependant, pour une mission de 150 Km, les résultats de vieillissement des batteries et des supercondensateurs montrent l'importance du choix de la méthode de gestion sur la durée de vie des deux stockeurs.

Les méthodes de gestion d'énergie basées sur l'approche de variation de répartition de puissance en fonction de l'état de charge des supercondensateurs offrent une amélioration significative de la durée de vie de la source hybride. Cette approche permet d'établir une gestion optimale de l'énergie, tout en respectant les contraintes liées à chacune des deux sources d'énergie. D'autres méthodes, dans le même esprit que le dernier exemple, pourront permettre de contrôler le vieillissement des deux sources de façon active pour optimiser la durée de vie du système.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir confronté les différentes stratégies de gestion d'énergie pour une source de stockage hybride, les différents éléments de celle-ci (batteries Li-ion et supercondensateurs) ont été dimensionnés afin de satisfaire aux demandes de puissance de propulsion et de récupération complète de l'énergie lors du freinage du véhicule. Les résultats de dimensionnement mono-source et de source hybride avec différentes stratégies de gestion ont montré l'intérêt de l'hybridation et l'importance du choix de la méthode de gestion pour l'optimisation de la source d'énergie.

Il a ensuite été montré l'intérêt d'une nouvelle approche de gestion de l'énergie basée sur la variation du partage de puissance en fonction de l'état de la charge des supercondensateurs. Des stratégies de gestion d'énergie pour la source de stockage hybride ont été présentées et comparées avec une méthode de référence de la littérature en termes de contraintes physiques vues par les composantes des batteries et des supercondensateurs. La comparaison a montré que les contraintes de puissance efficace et de quantité d'énergie échangée vues par les batteries peuvent être diminuées avec les méthodes de gestion proposées, en sollicitant plus les supercondensateurs. Cette augmentation est faible et est loin d'empêcher les supercondensateurs d'assurer les demandes de puissance imposées par le véhicule (moins de **20 %** de la puissance maximale supercondensateur).

Enfin, le modèle multi-physique de la source de stockage hybride développé dans le chapitre II a été utilisé afin d'estimer la durée de vie des batteries et des supercondensateurs pour chaque méthode de gestion proposée. Les résultats ont montré l'intérêt et l'impact de la gestion de l'énergie sur le vieillissement de la source hybride. Ainsi, une amélioration de **19 %** de la durée de vie a été estimée pour la méthode active de gestion et de **15,5%** avec la méthode MGD3 relativement à la méthode de référence MG4.

Conclusion générale et perspectives

Cette thèse s'inscrit dans la suite des travaux effectués depuis 2007 à l'**ESTACA LAVAL** dans le pôle **S2ET** du laboratoire **ESTACA'LAB,** dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe électronique de puissance **EP** du laboratoire **L2EP** de Lille et se situe dans le prolongement direct de travaux sur l'amélioration des dimensions de la source embarquée par hybridation [7]. Notre objectif est d'améliorer les performances des sources de stockage d'énergie embarquée dans le domaine du transport et d'étudier le potentiel de sources d'énergie hybrides alimentant un véhicule électrique. Cette étude repose sur la comparaison des performances d'une source conventionnelle dite « mono-source » à base de cellules Li-ion Haute Puissance (HP) avec celles d'une source hybride composée de Batterie Li-ion Haute Energie (HE) et de supercondensateurs.

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'impact des méthodes de gestion sur la durée de vie du stockeur. L'objectif est bien-sûr d'augmenter celle-ci sans compromettre le gain en volume et en masse de l'ensemble. Ceci a été possible grâce au développement de nouvelles méthodes de gestion basées sur des critères liés au vieillissement des deux technologies utilisées.

Ceci a nécessité deux phases principales de travail :

- Le développement et l'identification d'un modèle multi-physique des deux systèmes de stockage (chapitre II)
- La simulation du système embarqué par couplage de ce modèle multi-physique aux stratégies de gestion d'énergie classiques, puis à de nouvelles stratégies (chapitre III)

Le premier chapitre a présenté une synthèse concernant le développement des véhicules hybrides et électriques et les verrous technologiques freinant leur développement, ainsi que le contexte général lié aux problèmes énergétiques et environnementaux engendrés par le développement des transports individuels. Nous nous sommes ensuite concentrés sur le véhicule électrique urbain dont le principal point faible est le stockage d'énergie. Les technologies actuelles de stockage sont présentées et la notion d'hybridation de source est introduite comme alternative crédible dans certaines conditions. Les différentes solutions connues d'hybridation de sources de stockage sont rappelées, ainsi que le choix particulier d'hybridation Batterie Li Ion/supercondensateur pour véhicule électrique urbain, dont le cahier des charges est décrit en annexe A.

Le deuxième chapitre s'attache à la modélisation multi-physique des deux composants de stockage de la source hybride étudiée. Ce modèle multi-physique a été un outil nécessaire à la comparaison des différentes méthodes de gestions étudiées dans le troisième chapitre. Cet outil intégrant sur un seul et même algorithme, les aspects électrique, thermique et vieillissement, permet de mieux analyser le système en simulant fidèlement le comportement des batteries Li-ion et des supercondensateurs. Du fait de l'interdépendance des différents phénomènes, il nécessite des représentations électrique, énergétique et thermique suffisamment fines, afin d'éviter l'accumulation d'erreurs qui pourrait entrainer une dérive. Il doit de plus permettre de simuler la dégradation des performances sur de très longues périodes de façon fiable avec un bon compromis précision/temps de calcul. Dans cette optique de compromis, une modélisation à base de circuits équivalents a été retenue pour les parties électrique et thermique, et un modèle semi-empirique pour le vieillissement. L'identification de chacun des modèles a été principalement faite dans le domaine temporel sur la base de résultats expérimentaux. De plus, l'utilisation de l'algorithme d'optimisation hybride (PSO / NM) [179] a facilité l'identification des paramètres du modèle multi-physique avec une très bonne efficacité,

puisque les erreurs constatées sont inférieures à 2%. Nous ne doutons pas que ce modèle associé à la méthode de caractérisation puisse être utilisé dans de nombreux cas.

La problématique de gestion d'énergie de la source hybride dans les véhicules électriques a été abordée au troisième chapitre. L'objectif principal était de connaître l'impact de ces méthodes sur la durée de vie des éléments de stockage pour le véhicule électrique de référence (Annexe A). Un grand nombre de méthodes de gestion existent et il a donc été nécessaire de les répertorier et de les classer, ce qui a permis d'identifier leurs avantages et leurs inconvénients. Quatre stratégies de gestion basées sur des règles déterministes ont alors été sélectionnées. Dans un premier temps, leurs impacts sur les performances des sources de stockage en termes de masse, volume, coût ont été comparés. Ces méthodes ont ensuite été évaluées selon des critères ayant une influence sur la durée de vie, à savoir la puissance efficace et la quantité de charge échangée. Deux méthodes se sont démarquées (MG2, MG4), et MG4 a alors été choisie comme « méthode de référence » pour la suite de l'étude.

De nouvelles méthodes basées sur MG4, en y implantant une variation des seuils de puissance imposés à la batterie en fonction de l'état de charge des supercondensateurs, ont été proposées. Ces méthodes ont été comparées à MG4 à l'aide du modèle multi-physique développé précédemment. On a ainsi identifié une amélioration de la durée vie des batteries dans certains cas. Un gain de 19% a été évalué sur la durée de vie de batterie par rapport à MG4. Cette démarche a également débouché en fin d'étude sur le concept de « méthode active » de gestion d'énergie, dont l'optique est d'ajuster le vieillissement des deux stockeurs de manière à mieux tirer profit de la batterie, élément le plus sensible au vieillissement de la source hybride dans des conditions normales d'utilisation.

En guise de bilan, cette étude a montré que l'utilisation de sources de stockage hybrides associée à des méthodes de gestion d'énergie adaptées permet d'augmenter de manière significative la durée de vie des sources, quand elles sont une alternative possible aux solutions mono-source. Les tests de comparaison du vieillissement d'un stockeur mono-source utilisant une batterie de technologie Haute Puissance (HP) et d'un stockeur hybride composé de batterie HE et de supercondensateurs avaient montré antérieurement [7] que le gain en durée de vie de la solution hybride atteignait 10% pour le véhicule électrique de référence. Nous avons pu montrer qu'en modifiant la méthode de gestion, un gain supplémentaire de 19% pouvait être obtenu, ce qui au final conduit à environ 31% de gain estimé par rapport à la solution mono-source, à volume et masse de stockeur similaire, voire moindre.

Dans ces travaux de thèse, de nombreux domaines ont été abordés, allant du dimensionnement à l'optimisation de gestion d'énergie d'une source de stockage hybride, en passant par la modélisation dans les domaines électrique, thermique et le vieillissement. L'outil multi-physique développé au chapitre II nous a permis d'avoir une vision globale sur la problématique d'optimisation des performances d'une source hybride alimentant un véhicule électrique, problème complexe dont les enjeux technico-économiques sont importants et les durées de fonctionnement très longues. Un choix adapté de modèles, une analyse des paramètres influents sur le vieillissement et l'utilisation d'une méthode d'optimisation hybride efficace (PSO / NM) pour l'identification des paramètres du modèle nous ont permis de mettre en place cet outil et simuler de nouvelles stratégies de gestion en maitrisant de plus l'aspect dimensionnement.

A la lumière des résultats obtenus, les **perspectives** suivantes à court ou à moyen terme peuvent être évoquées :

L'outil multi-physique développé est performant, mais malgré tout encore trop lourd en temps de calcul, puisqu'il faut 1 mois pour obtenir une caractéristique de vieillissement sur un

serveur de calcul sous MATLAB. L'un des premiers objectifs serait de travailler à la simplification du modèle multi-physique développé en essayant d'améliorer son compromis simplicité/précision.

En ce qui concerne les méthodes de gestion, la « méthode active », basée sur l'utilisation du modèle multi-physique, a illustré le fait qu'il était possible de maitriser les contraintes imposées aux deux composants de stockage (batteries et supercondensateur) en essayant d'obtenir une durée de vie identique pour les deux composants. Un grand nombre de variantes sont envisageables en utilisant par exemple la méthode MGD3, et en jouant notamment sur la tension nominale de fonctionnement des supercondensateurs pour un vieillissement «couplé» des deux éléments. Un protocole de validation expérimental sera également à mettre en place pour valider et affiner les gains identifiés à l'aide de l'outil multi-physique avec ces stratégies pour les cycles envisagés, mais aussi sur des cycles plus aléatoires et plus proches de l'utilisation réelle du véhicule.

Par ailleurs le choix d'évolution de MG4, lié à sa simplicité relativement à MG2, a permis d'élaborer simplement et rapidement des variantes simples et efficaces au vu des résultats obtenus. La méthode MG2, basée sur une répartition fréquentielle de la puissance, présente également des avantages, mais son évolution n'a pu été investiguée, faute de temps, car plus complexe à appréhender et mettre en œuvre.

Dans cette étude, on a dissocié l'optimisation du dimensionnement (masse + coût) de la source hybride, de celui de son vieillissement en commençant par optimiser sa masse pour ensuite travailler sur la réduction des contraintes électriques, à masse constante. On peut aussi rassembler les deux critères (dimension + puissance efficace) dans un seul et même objectif. Ainsi, cette étude, l'algorithme d'optimisation hybride (PSO/NM) a été utilisé pour le processus d'identification du modèle multi-physique avec succès. Dans une optique multi-critère, nous avons déjà commencé à travailler sur l'optimisation combinée du dimensionnement et de la gestion d'énergie d'une source hybride avec cet outil. Son utilisation peut certainement aussi être envisagée pour travailler sur l'influence des stratégies de gestion de l'énergie et sur le dimensionnement de façon globale. On pourrait systématiser le dimensionnement ou le réglage de paramètres en évaluant directement leur impact. Cette approche peut nous aider à travailler sur le développement de nouvelles variantes de stratégies de gestion plus complexes mais éventuellement plus efficaces. Dans le même esprit, mais sur une autre application, une thèse CIFRE vient de commencer entre **l'ESTACA-Laval** et l'entreprise **GRUAU** sur l'optimisation du coût total de possession d'un véhicule électrique ou Total Cost of Ownership (TCO), en utilisant notre outil d'optimisation couplé au modèle multi-physique.

Dans cette étude, les variations thermiques des paramètres internes des deux systèmes de stockage ont été limitées en maintenant la température ambiante à environ 25°C dans l'enceinte ou dans le modèle, quelle que soit la méthode de gestion testée. Si on veut aller plus loin et se rapprocher des conditions réelles, une étude plus approfondie sur l'influence de la température sur une plus large plage de variation doit être réalisée afin d'investiguer sur ses conséquences et les choix à faire.

Quelle que soit l'amélioration proposée, le véhicule électrique à base de batterie reste un moyen de transport urbain avec autonomie limitée (<300km). On peut faire évoluer cette barrière en utilisant d'autres couples d'hybridation. Ainsi, l'association Pile à combustible/batterie Li-ion est actuellement étudiée dans le cadre d'une thèse en cotutelle entre l'**ESTACA-Laval** et **l'université des sciences et technologies d'Alger (USTHB)**. Le but est d'adapter les méthodes de gestion et de dimensionnement développées relativement aux

nouvelles contraintes de cette source. De façon plus générale, d'autres couples de stockage hybride pourraient être étudiés afin d'obtenir le meilleur compromis investissement/performance pour l'application considérée.

Annexes

Annexe. A : Cahier des charges

Dans cette partie, on aborde le cahier des charges de notre application dédiée à l'optimisation du dimensionnement et de la durée de vie d'une source hybride batteries Li-ion / supercondensateurs alimentant un véhicule électrique. Nous présentons le choix de cycle de conduite utilisé, les caractéristiques du véhicule électrique sélectionné, ainsi que le modèle dynamique du véhicule.

1) Quel cycle parmi les cycles existants ?

La modélisation de la phase d'utilisation passe par le choix de cycles de conduite représentant la cinématique des déplacements de véhicules. Ces cycles sont définis par une courbe de vitesses en fonction du temps [48]. Plusieurs familles de cycles de conduite représentatifs des conditions normales d'utilisation et de fonctionnement des véhicules ont été proposées ces dernières années [259]. Cependant, ces cycles étaient développés à l'origine pour évaluer les émissions des gaz polluants et la consommation de carburant pour les véhicules thermiques. Ils ont ensuite, été utilisés pour comparer les performances des véhicules hybrides en termes de coût et de consommation de carburant [260]. L'élaboration de ces cycles normalisés inclut plusieurs aspects tels que la définition des conditions de démarrage, la prise en compte des gammes des véhicules, l'utilisation des véhicules dans leur diversité (urbains, routiers et autoroutiers, etc.). Dans ce contexte, on cite par exemple le cycle FTP-75 (Federal Test Procedure) utilisé aux Etats-Unis, le cycle (10-15 Mode Cycle) utilisé au Japon, et le Cycle Européen Normalisé (CEN) appelé encore le cycle NEDC (New European driving cycle) utilisé en Europe qui contient deux parties : une partie urbaine et une autre extra-urbaine (cf. Figure. A. 1) [32].

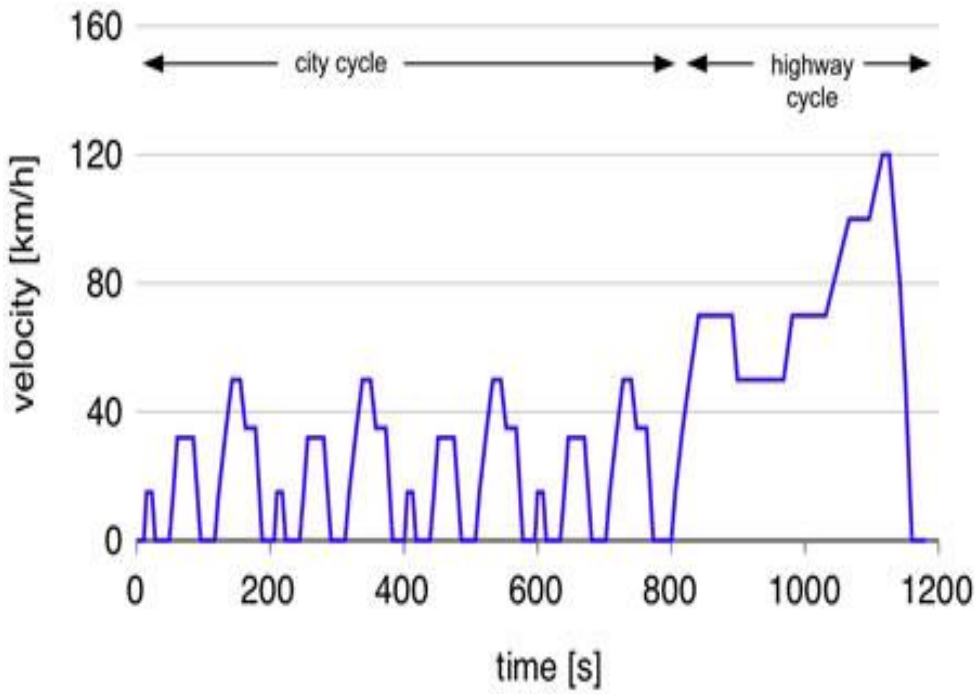


Figure. A. 1: Cycle de conduite NEDC[261]

Néanmoins, ces cycles normalisés ne reflètent pas les conditions d'usage réel du véhicule et ne sont pas adaptés au dimensionnement de véhicule électrique, car ils ne sont pas représentatifs des puissances mises en jeu réellement [7]. Or la puissance consommée a un impact très important sur le dimensionnement du pack batterie [7]. C'est pour cette raison que

les cycles issus des mesures dans des conditions d'usage réel sont préférés pour les tests de véhicules électriques. A titre indicatif, les cycles *HYZEM* et *ARTEMIS* réalisés par l'*INRETS* dans le cadre de projets Européens, cherchant à proposer un jeu de cycle de conduite de référence. Ils ont l'avantage de proposer une segmentation de la mobilité selon le trafic (congestionné, fluide, dense) pour chacun des modes de conduite : urbain, route, et autoroute. Ce découpage facilite le travail de la spécification des usages et, par la même occasion, de dimensionnement de sources d'énergie électrique [48].

En ce qui concerne les futurs cycles envisagées par les instances européennes, on cite la procédure WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) qui vise à développer un nouveau standard international d'homologation pour mesurer la consommation de carburant, les émissions de CO2, les polluants gazeux et particulaires, l'autonomie ainsi que la consommation électrique des véhicules particuliers neufs et utilitaires légers. Cette procédure se compose de deux volets complémentaires, le cycle de conduite (WLTC) et les procédures d'essais associées, dont le développement est basé sur une synthèse des différents cycles usités à travers le monde (Europe, Japon, Inde, USA, Chine, Corée du Sud). Le cycle de conduite (WLTC) qui est basé sur une suite de différentes phases de roulage (lente, moyenne, rapide et très rapide) va remplacer les cycles actuels en Europe à l'horizon 2017. La Figure. A. 2 présent le cycle de conduite (WLTC) [262].

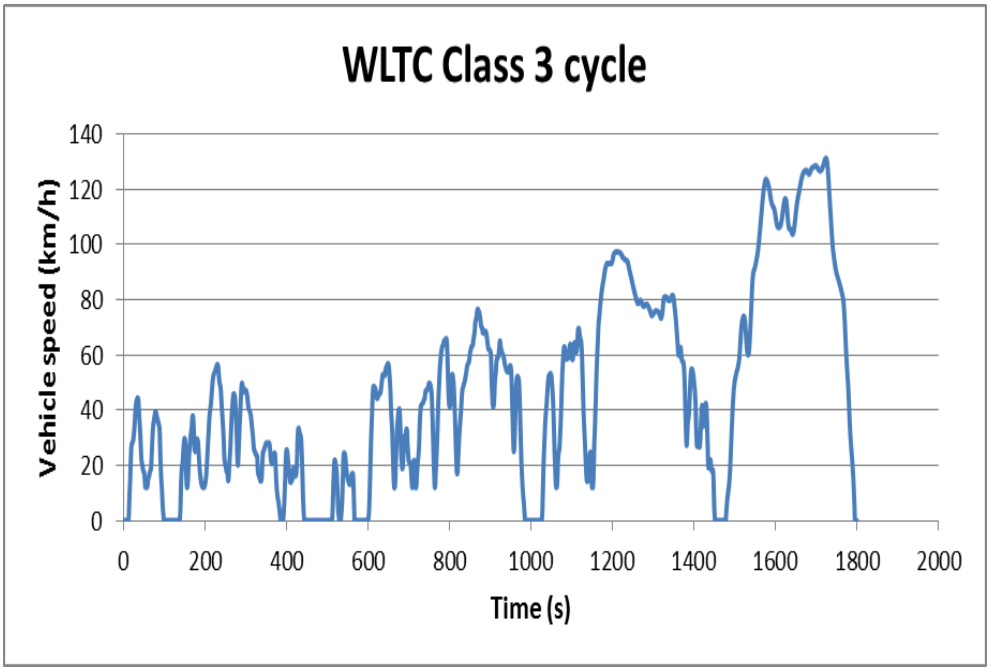


Figure. A. 2: Cycle de conduite WLTC

Le cycle ARTEMIS (*Assesment and Reliability of Transport Emission Models Inventory Systems*) a été sélectionné pour cette étude car il possède des dynamiques de conduite beaucoup plus proche de la réalité que les cycles normalisés existants. Ce cycle d'essai est composé d'une partie urbaine avec vitesse moyenne de 7.5km/h et d'une autre de type routier, dans laquelle la vitesse moyenne est de 61,3km/h avec une vitesse maximale de 110,7 km/h. L'association des deux parties (urbain et routier) permet de donner une distance de roulage de 22km sur une durée d'environ 34 minutes [7]. Le cycle ARTEMIS, comme illustrée sur la Figure. A. 3, semble actuellement le plus représentatif des trajets et des conditions d'usage des véhicules.

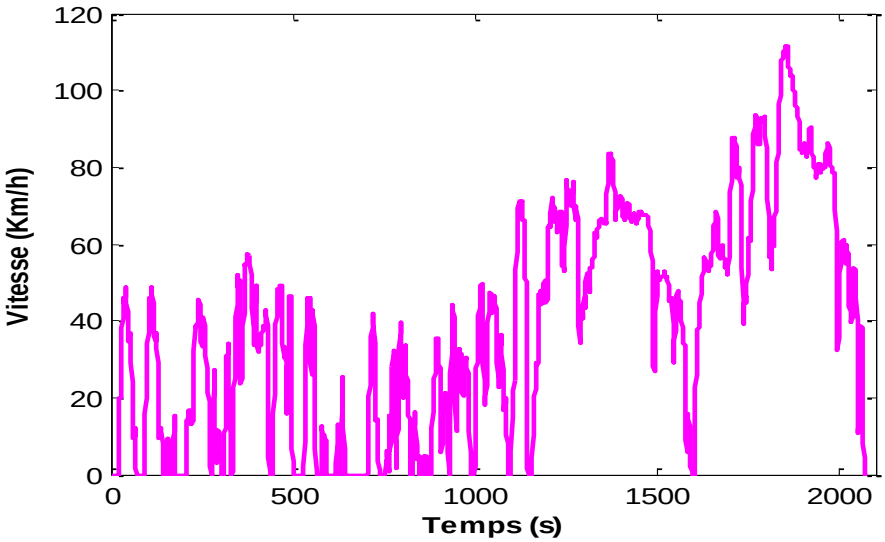


Figure. A. 3: Cycle de conduite ARTEMIS

2) Caractéristiques du véhicule étudié

Plusieurs véhicules électriques ont été commercialisés ces dernières années. La liste n'est pas exhaustive mais à titre d'exemple, on cite la *Bluecar* de la société *Bolloré, la Citroën* C-*Zero* de, la *Smera LUMENEO, Nissan LEAF, Peugeot iOn, etc*. Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi un véhicule électrique de type urbain dont les caractéristiques sont comparables à celles de la *Bolloré Bluecar*. Ses caractéristiques techniques sont détaillées dans le Tableau. A. 1. La masse totale de 860kg correspond à la somme du châssis roulant et des autres organes du véhicule sans inclure la masse du système de stockage d'énergie. Ce petit véhicule de 4 places qui ne dépasse pas les 3,65 mètres de longueur et 1.70 mètres de largeur dispose d'une chaîne de traction électrique de puissance nominale 35kW et maximale de 50kW. Elle est alimentée par des batteries Li-ion de type LMP (Lithium Métal Polymère) de capacité 30kWh, tension nominale de 410V et une masse de 300kg, fabriquées par la filiale du groupe *Bolloré*, *BatSca*p. Cette batterie se charge en huit heures en moyenne, sur une prise de 220 V, 16 A ou en quatre heures, sur une prise 220 V, 32A. Sa durée de vie est de l'ordre de 400 000 km. La vitesse de *Bluecar* est limitée électroniquement à 130Km/h ainsi que l'accélération de 0 à 60 km/h en 6,3 secondes [263].

Paramètres	**Valeurs**
Masse du VE sans SSE (kg)	860
Surface frontale (m2)	2.75
Densité de l'air (kg/m3)	1.2
Coefficient de pénétration dans l'air	0.3
Coefficient de résistance au roulement à l'état statique	0.008
Coefficient de résistance au roulement à l'état dynamique	1.6e-6
Rayon de la roue(m)	0.33

Tableau. A. 1: Paramètres du véhicule électrique urbain de type *Bluecar* [7][264][265]

3) Modélisation dynamique du véhicule

La consommation de puissance et d'énergie d'un véhicule électrique dépendent du cycle de conduite, mais également des caractéristiques du véhicule en terme de : masse, volume, coefficient de pénétration dans l'air (C_x)… etc [7]. Pour cette raison, le développement d'un modèle dynamique avec tous ces paramètres devient indispensable afin de définir la puissance

et l'énergie nécessaire au déplacement du véhicule. Ce modèle sera utilisé pour le dimensionnement du système hybride de stockage et l'évaluation des stratégies de gestion de l'énergie. Les deux caractéristiques principales qui influent la dynamique du véhicule sont : sa masse et le volume qu'il occupe dans l'espace. La masse, implique qu'une force est nécessaire pour accélérer ou freiner le véhicule et vaincre les forces de résistance à l'avancement. Le volume du véhicule implique, quant à lui, un effort à fournir pour lutter contre les frottements de l'air lors du déplacement [37]. Comme présenté dans la Figure. A. 4, le système de propulsion doit fournir un effort de traction au niveau de la roue égal à la somme des forces pour surmonter la traînée aérodynamique, la résistance au roulement et l'inclinaison de la route. Il doit également fournir l'effort nécessaire à l'accélération/décélération du véhicule.

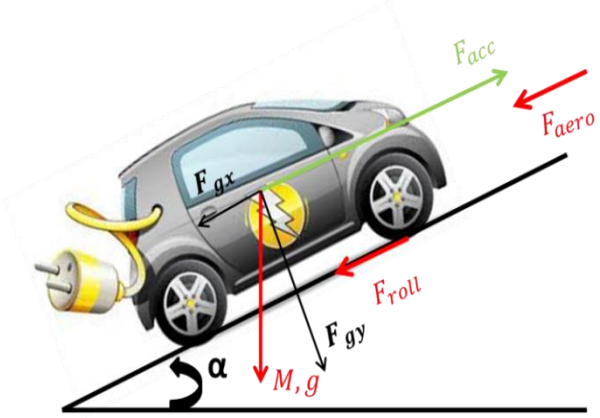


Figure. A. 4: Forces sur un véhicule en roulage

Cette force globale de traction nécessaire au déplacement du véhicule est donnée par l'équation suivante :

$$F_T = F_{aero} + F_{roue} + F_{gx} + F_{acc} \tag{A. 1}$$

Avec :

$$\begin{cases} F_{aero} = 0.5.\rho.S.C_x.V_{veh} \\ F_{roue} = M.g.(C_0 + C_1.V_{veh}^2) \\ F_{gx} = M.g.\sin(\alpha) \\ F_{acc} = M.\dfrac{dV_{veh}}{dt} \end{cases} \tag{A. 2}$$

Où, F_T est la force de traction, F_{aero} la force aérodynamique, F_{roue} la force de résistance au roulage, F_{gx} la force due à l'inclinaison, F_{acc} la force pour l'accélération du véhicule.

La force aérodynamique F_{aero} est, d'une part, proportionnelle au coefficient de pénétration dans l'air (C_x) , d'autre part, à la surface frontale du véhicule S, ainsi, une réduction de ces deux paramètres, minimise la consommation d'énergie [37].

La puissance P_V équivaut à la puissance présente au niveau des roues du véhicule en roulement et s'exprime par :

$$P_V = C_T.\Omega_{roue} \tag{A. 3}$$

Où le couple total C_T et la vitesse de rotation de la roue Ω_{roue} sont calculés directement à partir de la force de traction F_T et la vitesse V_{veh} du véhicule :

$$\begin{cases} C_T = F_T.r \\ \Omega_{roue} = V_{veh}.r \end{cases} \quad \text{(A. 4)}$$

Avec r est le rayon de la roue du véhicule.

En remplaçant la force de traction F_T dans l'équation (A.3 et A.4) par sa valeur de l'équation (A.1), la puissance du véhicule requise pour une mission peut être exprimée de nouveau par :

$$P_V = \left(F_{aero} + F_{roue} + F_{gx} + F_{acc}\right).V_{veh} \quad \text{(A. 5)}$$

A partir de cette puissance, il est possible d'estimer l'énergie consommée E_{V_cons} lors de la mission, en intégrant la puissance du véhicule P_V par rapport au temps du parcours t_{cy}. L'énergie consommée est donc calculée selon :

$$E_{V_cons} = \int_0^{t_{cy}} P_V\,(t).dt \quad \text{(A. 6)}$$

Cette énergie consommée E_{V_cons} représente l'autonomie nécessaire du véhicule électrique pour atteindre la distance désirée. Dans notre cas, le véhicule doit parcourir **150Km** de distance**,** soit **7** fois respectivement du cycle ARTEMIS avec une pente moyenne de **2.5%** pour l'ensemble du trajet. La Figure. A. 5, illustre la puissance du véhicule P_V et l'énergie consommée E_{V_cons} pour notre mission. Cependant, la puissance positive représente la propulsion et la négative correspond à la récupération. Les paramètres P_{V_cons} et P_{V_rec} sont les valeurs extrêmes de puissance dans les deux phases (charge et décharge).

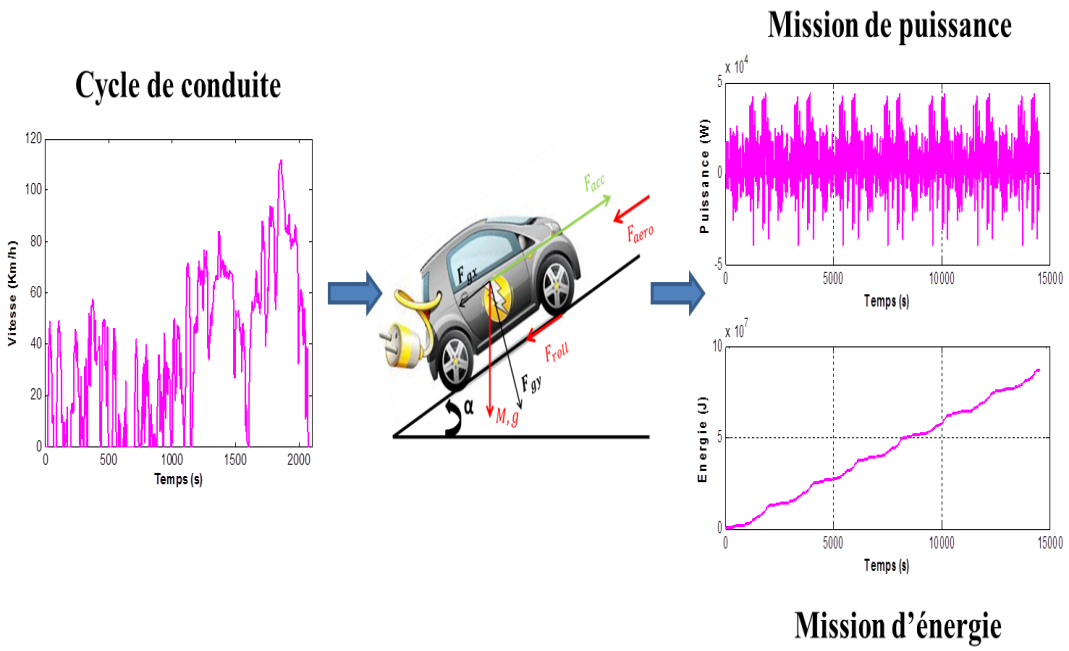


Figure. A. 5: Puissance et énergie consommés par le véhicule

Annexe. B : Banc de test de vieillissement

1) Description du banc de test

Le banc de test a été mise en œuvre au pôle **S2ET** du laboratoire **ESTACA'LAB** de **Laval** pour le cyclage et la caractérisation des composants de stockage (batteries, supercondensateurs). En effet, l'utilisation de ce banc de test permet désormais de réaliser une étude complète sur le système de stockage qui va de la caractérisation électrique et thermique, aux essais de vieillissement. La Figure B. 1 présente le synoptique du banc de test, dont le cyclage est assuré par le contrôle du transit d'énergie entre des modules à tester et un module servant de tampon d'énergie. Ce dernier est dimensionné pour assurer l'appel de puissance des cellules testées dans les conditions les plus défavorables. Par exemple au moment où les contraintes en puissance se cumulent toutes simultanément [7]. Pour cela, la capacité du module tampon est beaucoup plus importante que celle des cellules à tester (7 fois supérieures).

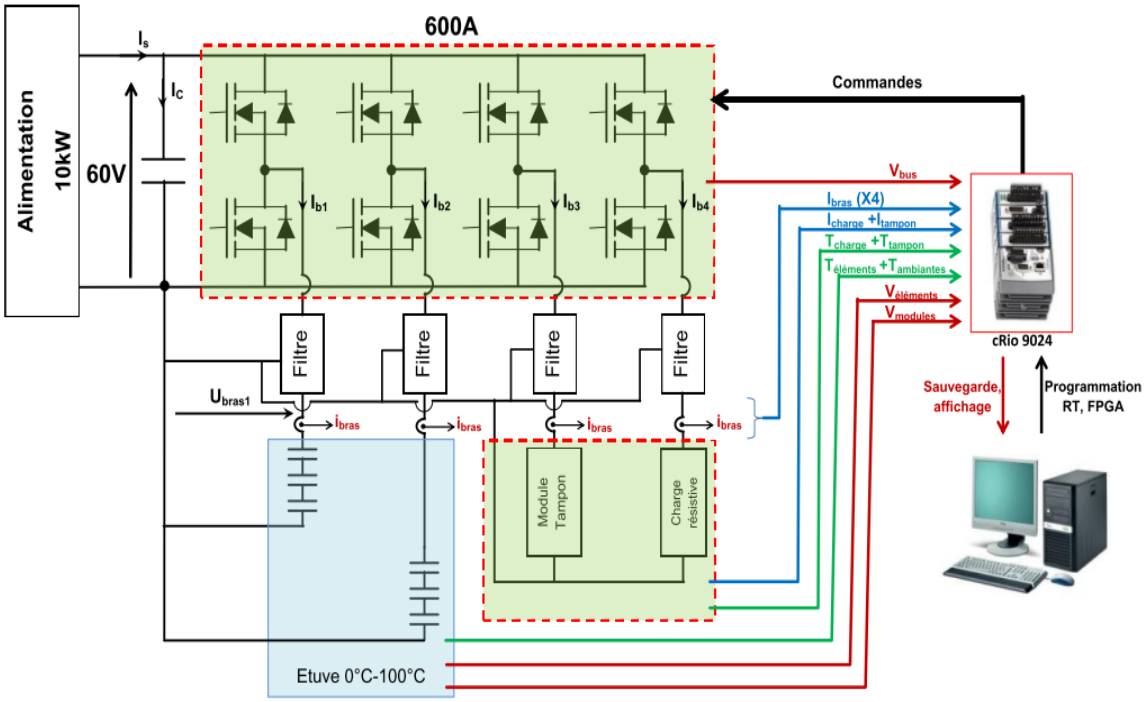


Figure B. 1 : Schéma synoptique du banc de test (600A, 60V, 40kHz)

Une charge résistive de 9,6kW est utilisée afin de dissiper l'excès de puissance en cas de besoin de décharge des cellules testées. Cette énergie dissipée durant le cyclage est compensée par une alimentation de 10kW. Le transit d'énergie entre les modules à tester et module tampon est contrôlé par des cartes d'interface et du convertisseur quatre bras (60V/ 600A). Le contrôle et la supervision de banc de test est assurée par un module FPGA Compact RIO, NIcRio-9024, de National Instruments associé à l'environnement LabVIEW et cadencé avec une fréquence d'échantillonnage de 10kHz. Le contrôle de la température est assuré par une enceinte climatique (0-100°C) qui permet de fixer la température extérieure des cellules testées à environ 25°C.

2) Le convertisseur

L'échange de puissance dans notre banc de test est assuré par un convertisseur statique (cf. Figure B. 2). Ce dernier change le mode de fonctionnement (élévateur/abaisseur) suivant la différence de tension entre le module tampon et le module testé. Un filtre en « T » avec une

fréquence de découpage de 40kHz et des boucles de régulation adaptées est placé à la sortie des bras du convertisseur afin de limiter l'ondulation de courant dans les batteries.

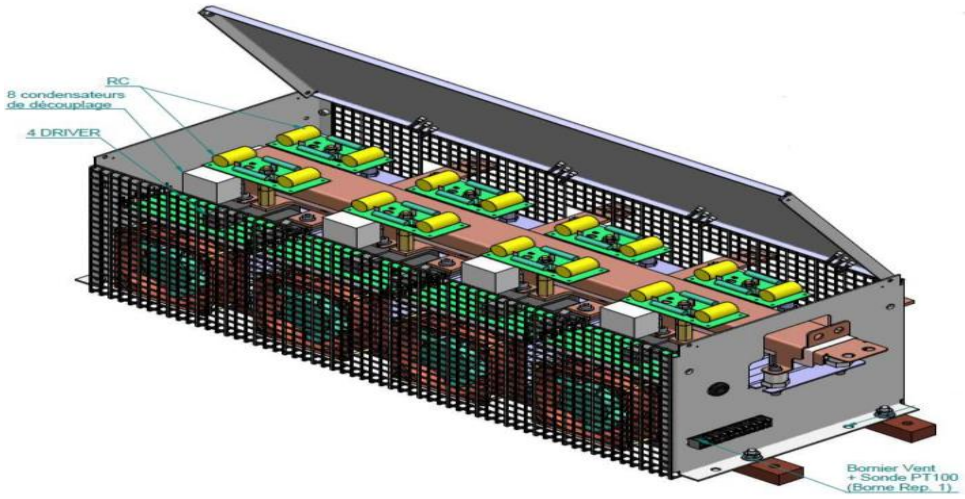


Figure B. 2: Convertisseur 4 bras (600A, 60V, 40kHz)

3) Le module tampon

Le module tampon, comme son nom l'indique sert de tampon d'énergie afin d'alimenter correctement le module testé. Ce module compose l'énergie correspondant aux pertes apparaissant sur un cycle de fonctionnement, de façon à pouvoir fonctionner en régime établi et garder l'état du module testé le même au début de chaque cycle. De ce fait, le banc ne consomme que ses pertes. Celles-ci ne sont d'ailleurs pas négligeables compte tenu des niveaux de tensions et de puissances appliqués [84]. La Figure B. 3 présente notre le tampon constitué de 9 éléments de 100Ah en série (tension du module 34V). La puissance de décharge est de l'ordre de 16,6kW et celle de charge atteint pratiquement 7kW.

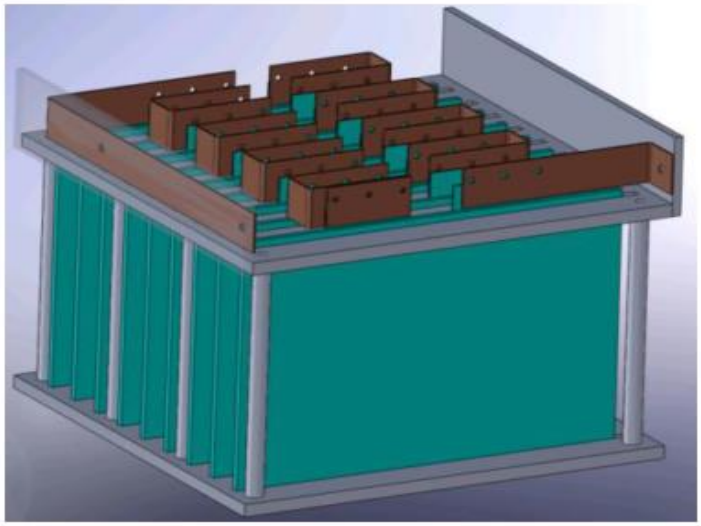


Figure B. 3: Module tampon (100AH, 34V, 500A/200A)

4) Contrôle du banc de test

Le cyclage sécurisé des batteries nécessite des phases de contrôle de courant (CC) et des phases à tension constante (CV), dont le passage entre les deux phases doit être réalisé sans perturbations. Dans notre cas, une stratégie basée sur l'utilisation de deux boucles imbriquées a été adoptée pour atteindre cet objectif.

5) Système de gestion des cycles et d'acquisition

Le système d'acquisition supervise l'ensemble du banc de test. Il gère la génération des profils de cyclage, l'acquisition et stockage des données, la gestion des sécurités et la procédure d'initialisation du banc. Les données analogiques et numériques d'acquisition sont des données électriques, thermiques et des informations sur l'état du banc (défauts divers). La fréquence d'acquisition de toutes les grandeurs électriques est fixée à 1kHz.

Différents types de cartes d'acquisition ont été utilisées :

- Des cartes NI-9239 (4Voies/24bits/±10V), sont utilisées pour l'acquisition des tensions élémentaires et des courants.
- Des cartes NI-9229/4voies/24bits/±60V pour l'acquisition des tensions des bras (tension<60V).
- Et enfin, des thermocouples sont reliés à des cartes NI9213/24bits qui ont une sensibilité inférieure à 0,02°C afin de contrôler l'état thermique des batteries testées.

6) Gestion des défauts

L'ensemble des défauts est centralisé sur la carte de commande du convertisseur de puissance de manière à pouvoir stopper instantanément le transit de puissance même en cas de défaillance de la partie programme. En conséquence, l'information défaut est ensuite transmise par le système d'acquisition et répertorié dans un fichier d'historique afin d'analyser les défauts et améliorer les performances du banc de test. Ce dernier peut ensuite, si le type défaut le permet, redémarrer automatiquement avec la procédure adéquate.

7) Pilotage et surveillance du banc de test L'interface

A l'exécution de programme, l'interface IHM de la Figure B. 4, apparait et le cyclage débute ensuite. Cette interface permet de saisir les paramètres liés à la commande, à l'acquisition, ainsi que la gestion de la sécurité du banc (limites max et min des tensions et courants tolérés par les composants, limite max de la température,…). Des graphes déroulants permettent également de suivre l'évolution du courant et de la tension du module testé ainsi que des températures.

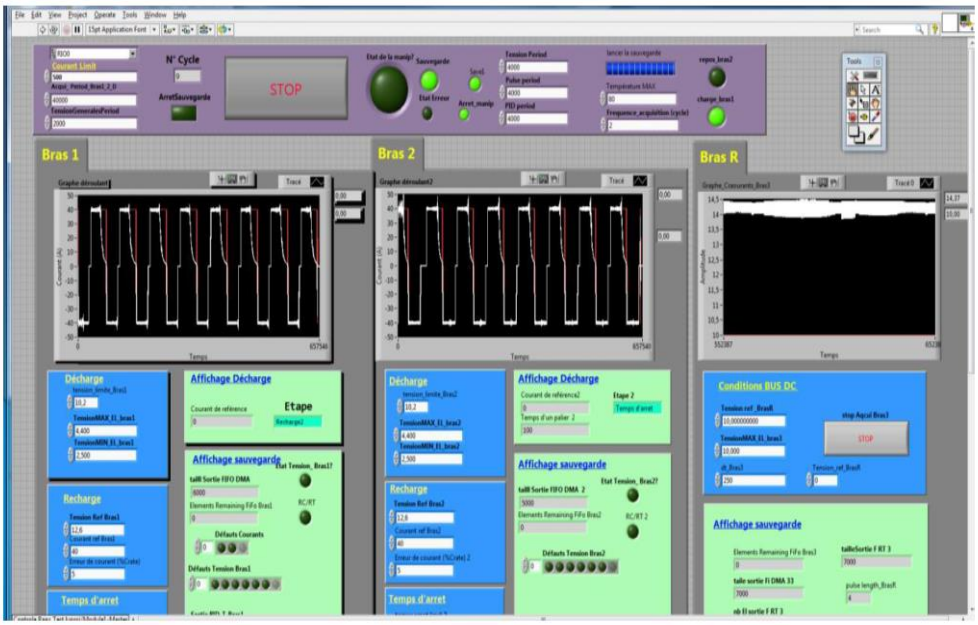


Figure B. 4 Interface IHM pour pilotage et surveillance du banc de test

Annexe. C : Algorithme d'optimisation hybride (PSO / NM)

Les problèmes d'optimisation en électrotechnique présentent plusieurs difficultés liées aux besoins de l'utilisateur (recherche d'une solution globale, fiabilité et précision de la solution, diversité des problèmes traités, temps de calculs raisonnable, …), aux caractéristiques du problème d'optimisation (non linéarité, dérivées difficilement accessibles, …) et au temps de calculs importants [266][267]. Afin d'analyser ou de résoudre de manière efficace ces problèmes d'optimisation, plusieurs méthodes d'optimisation sont proposées. Dans ce contexte, les méthodes déterministes (e.g. descende de gradient, newton ou Nelder-Mead **NM**) qui se basent sur la valeur de la fonction objectif et des contraintes, ainsi que sur la valeur de leurs dérivées premières et parfois leurs dérivées secondes[268]. Ce sont des méthodes itératives convergeant vers un minimum local et la convergence vers un optimum global n'est pas toujours assurée. Les méthodes déterministes sont généralement efficaces quand l'évaluation de la fonction objective est très rapide, ou quand sa forme est connue a priori. Néanmoins, dans les problèmes d'optimisation en électrotechnique, on ne possède pas suffisamment d'information sur la fonction objectif ni sur ses dérivées. Pour cela, l'utilisation des méthodes stochastiques (également nommées métaheuristiques), en général, évitent ce problème et ayant une grande capacité de trouver l'optimum global du problème. Les méthodes stochastiques les plus prometteuses sont les algorithmes basées sur l'intelligence collective, inspirées de la nature, les plus répandus sont à savoir : les algorithmes génétiques (AGs) et l'optimisation par essaims particulaires soit en anglais (Particle Swarm Optimization (**PSO**)) [268] [269].

Pour notre étude, nous avons choisi une technique d'optimisation hybride basées sur méthode stochastique **PSO** pour effectuer la recherche global et un algorithme simplex de Nelder-Mead **NM** pour la recherche locale. Cet algorithme hybride est développé dans notre pôle **S2ET** du laboratoire **ESTACA'LAB -Laval** par l'équipe de **système embarqué SE** et nous avons utilisé pour identifier les paramètres des modèles (électriques, thermiques et vieillissement) de batteries Li-ion testées.

1) Principe de fonctionnement

Cet algorithme est basé sur la théorie du déplacement des criquets d'une place à une autre déclenché par la pénurie de nourriture. L'idée de cette approche repose sur l'optimisation par essaims particulaires **PSO** qui assure le déplacement des criquets migrateurs [270][271]. Celui-ci offre un espace de recherche pour un autre algorithme d'optimisation locale comme le Nelder-Mead **NM** qui peut donner une meilleure exploitation de cette espace[179]. Par la suite, les criquets font un autre déplacement avec l'algorithme PSO pour trouver un autre espace de recherche jusqu'à trouver un optimum globale pour tous les criquets. La Figure C. 1 montre l'organigramme de l'algorithme d'optimisation hybride (PSO / NM) :

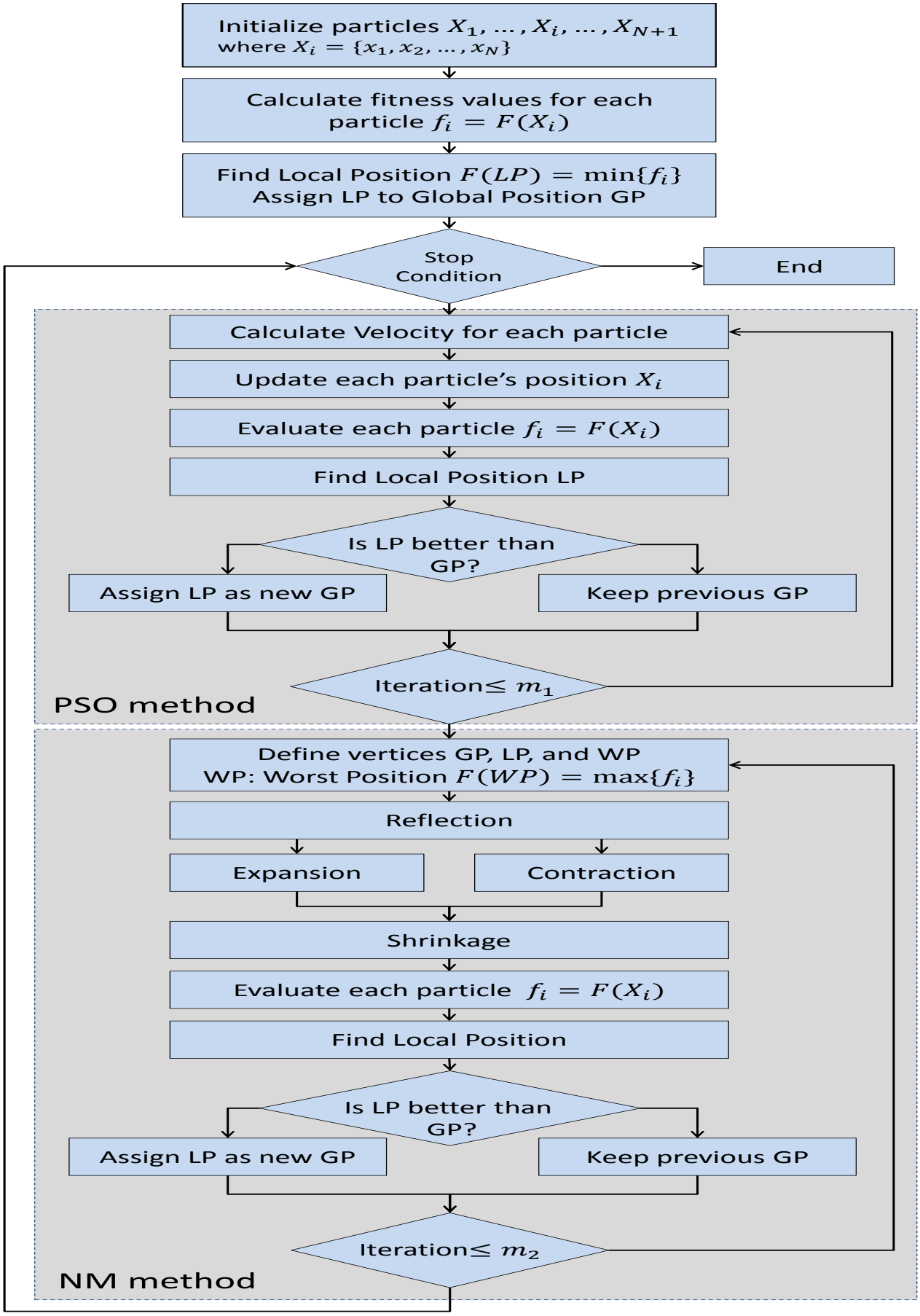


Figure C. 1: Organigramme de l'algorithme d'optimisation hybride (PSO / NM) [179]

On peut résumer les étapes principales de l'algorithme hybride (PSO / NM) par :

1. Créer une population initiale avec distribution aléatoire des particules ;
2. Exécuter le PSO avec n itération;
3. Exécuter l'algorithme de Nelder-Mead avec m itération;
4. Retourne à l'étape 2 (exécuter le PSO avec n itération)

Cette procédure est exécutée jusqu'à ce que le nombre d'itération prédéfini soit atteint. Dans cet algorithme le nombre de criquets (particules) dépend au nombre de variable et la dimension de problème d'optimisation.

a) Sous-algorithme d'optimisation par essaims particulaires PSO

L'utilisation du sous-algorithme par essaim de particules permet de définie l'espace de recherche dans l'algorithme hybride (PSO / NM) afin de trouver l'optimum local avec la méthode Nelder-Mead[272]. Cet algorithme d'optimisation **PSO** apparu pour la première fois au début des années 90 est inspiré des actions des groupes d'animaux (essaims) dans leur recherche des meilleures régions de subsistance. Ainsi, chaque individu de la population a la mémoire de son expérience antérieure et l'information fourni par l'ensemble du groupe sur les régions les plus prometteuses[273] [274]. Cette contribution de l'expérience globale, en plus de l'expérience personnelle est une des particularités de PSO ce qui lui assurent le succès dans les recherches globales. En général, l'algorithme d'optimisation par essaims particulaires PSO est constitué des étapes suivantes :

1. Créer une population initiale avec distribution aléatoire de particules et de leurs vitesses ;
2. Calculer le vecteur de vitesse pour chaque particule, en utilisant l'expérience de chaque particule et l'acquisition de vitesse de la population ;
3. Mise à jour de la position de chaque particule en utilisant le vecteur de vitesse et la position précédente ;
4. Evaluer la convergence.

Les équations formalisant le mouvement des particules sont données par :

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1 r_1 \big(P_i - x_i(t)\big) + c_2 r_2 \Big(P_g(t) - x_i(t)\Big) \qquad \text{(C. 1)}$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \qquad \text{(C. 2)}$$

La position des particules est mis à jour selon l'équation (C. 1), où $x_i(t+1)$représente la position de la particule i à l'instant $t+1$, $v_i(t+1)$ représente le vecteur de vitesse, il est donnée par l'équation (C. 2), où $r_1$et $r_2$sont des variables aléatoires générés d'une distribution uniforme dans l'intervalle [0, 1] afin de fournir un poids stochastique aux différentes composantes participant dans la définition de la vitesse de la particule, P_i est la meilleure position trouvée par la particule et $P_g(t)$ est la meilleure position de la population à l'instant t.

La Figure C. 2 présente un schéma de principe de l''algorithme d'optimisation par essaims particulaires PSO :

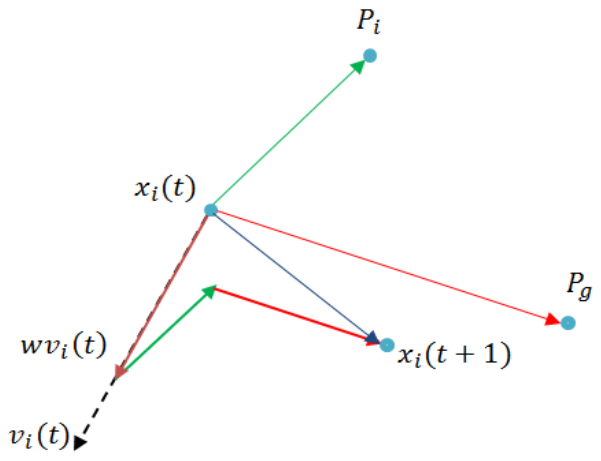


Figure C. 2: Schéma vectoriel du déplacement d'une particule

b) Sous-algorithme d'optimisation Nelder Mead NM

Ce sous-algorithme a été utilisé pour trouver l'optimum local dans un espace de recherche définie par l'algorithme PSO. La méthode est très efficace pour la recherche locale avec l'avantage du fait que ne demande pas au dérivé[275][276]. En partant de dimension du problème N, un simplexe de la même taille est construire, puis certaines transformations conditionnées par l'ordonnancement des points selon leurs valeurs sont appliquées à ce simplexe. A chaque itération, la résultant d'une transformation dépende des coordonnées du centroïde du simplexe (réflexion (coefficient(ρ), expansion(γ), contraction (χ) et raccourcissement (δ)). Les coefficients suivent typiquement les conditions ci-dessous :

$$\rho > 0, \chi > 1, \chi > \rho, 0 < \gamma < 1, 0 < \delta < 1 \qquad \text{(C. 3)}$$

Et sont généralement fixés avec les valeurs :

$$\rho = 1, \chi = 2, \gamma = \frac{1}{2}, \delta = \frac{1}{2} \qquad \text{(C. 4)}$$

Le simplexe de Nelder & Mead peut être défini de la façon suivante. Soit f la fonction - objectif que l'on cherche à optimiser (dans ce cas, trouver le minimum). Soit un simplexe S défini par $N + 1$ sommets, dans un espace de dimension N . Soit $x_j, j = 1, \dots, N + 1$ ces derniers sommets, tels que$f(x_1) \leq f(x_2) \leq \cdots \leq f(x_{N+1})$, donc x_{N+1}est le plus mauvais point et $x_1$est le meilleur point. x_1 est modifié à chaque itération.

2) Fonction d'évaluation (objectif)

Résoudre un problème d'optimisation, c'est rechercher, parmi un ensemble de solutions qui vérifient des contraintes données, la (ou les) solution(s) qui rend (ent) minimale (ou maximale) une fonction mesurant la qualité de cette solution. Cette fonction appelée fonction objectif ou fonction évaluation permet de mesurer l'efficacité de la solution [277]. La pertinence des solutions potentielles dépend essentiellement de la formulation de cette fonction. Dans notre cas, la fonction objectif est définie par formulation mixte de l'erreur carrée *sum of squares error (SSE)* et l'erreur absolue entre les réponses réelles et calculées pour l'identification des paramètres de modèles développées [179]:

$$\begin{cases} min_X \{F(X)\} \\ X_{min} \leq X \leq X_{max} \end{cases} \quad \text{(C. 5)}$$

$$F(X) = \sum_{i=1}^{n} (\hat{R}_{bat} - R_{bat})^2 + \sum_{i=1}^{n} \left|\hat{R}_{bat} - R_{bat}\right| \quad \text{(C. 6)}$$

Où $F(X)$ est la fonction objectif, X_{min} et X_{max}sont les limites inférieure et supérieure de la recherche de l'espace. $\hat{R}_{bat}$ représente la réponse calculée du modèle et R_{bat} est la réponse réelle de la batterie.

La Figure C. 3 illustre le schéma du principe d'optimisation des paramètres de modèles de batteries.

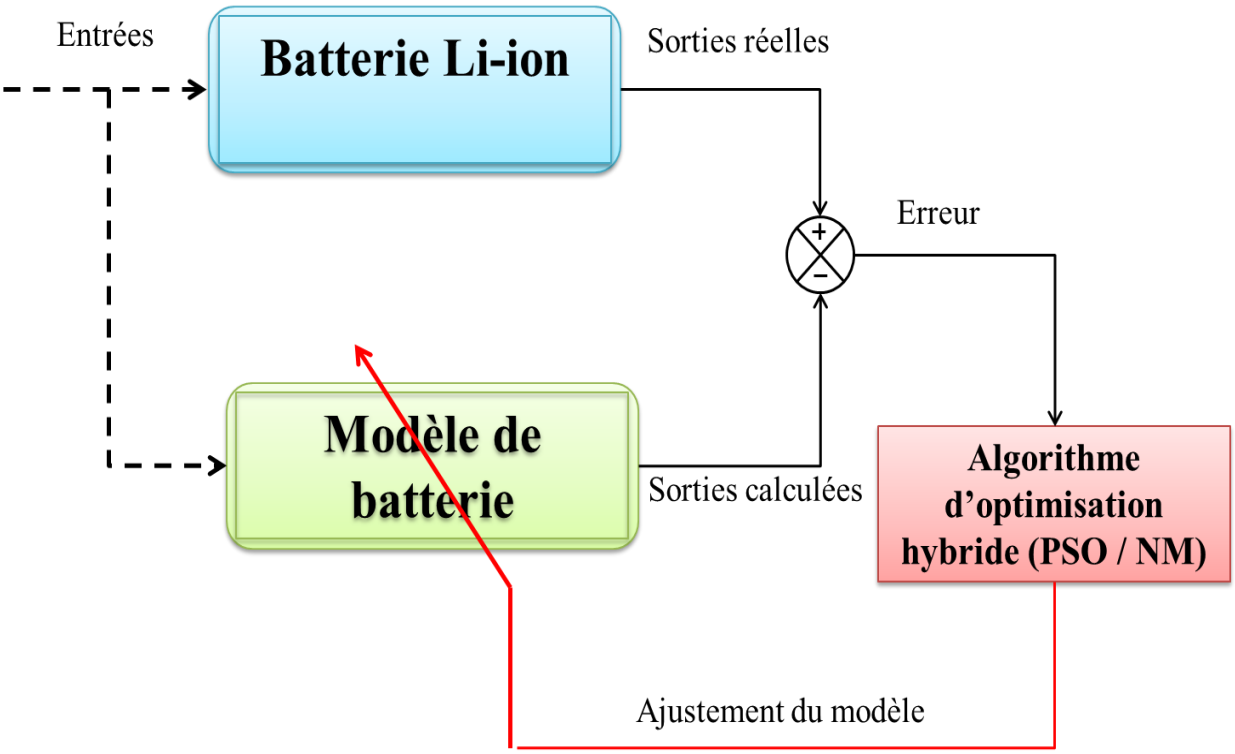


Figure C. 3 : Schéma du principe d'optimisation des paramètres du modèle [179]

Annexe. D: Identification des paramètres du modèle multi-physique

L'identification des paramètres du modèle multi-physique est faite à l'aide de l'algorithme d'optimisation hybride (PSO / NM). Pour la batterie Li-ion (cf. Tableau D. 1), les paramètres sont ceux utilisés dans les équations II.8, II.11, II.12, II.13 et II.25 du chapitre II et identifiés à partir de nos essais. En ce qui concerne les supercondensateurs, les paramètres ont été obtenus à partir de l'utilisation des datasheets du fabricant *MAXWELL* et de travaux issus de la littérature (cf. Tableau D. 2)[114][143][144].

Modèle électrique	Modèle thermique	Modèle de vieillissement
$\boldsymbol{c_1 = -94.9572}$ $\boldsymbol{c_2 = -146.361}$ $\boldsymbol{c_3 = -96.2389}$ $\boldsymbol{c_4 = -44.8047}$ $\boldsymbol{c_5 = -18.3416}$ $\boldsymbol{c_6 = -1.10150}$ $\boldsymbol{c_7 = 0.99}00000$ $\boldsymbol{x_1 = 4.348237}$ $\boldsymbol{x_2 = 0.010670}$ $\boldsymbol{x_3 = 0.060152}$ $\boldsymbol{x_4 = 0.029244}$ $\boldsymbol{x_5 = 0.041223}$ $\boldsymbol{x_6 = -0.08919}$ $\boldsymbol{x_7 = -0.71743}$ $\boldsymbol{x_8 = 0.0000032}$ $\boldsymbol{R_{dll} = 0.002415}$ $\boldsymbol{C_{dll} = 460.5797}$ $\mathbf{R_{dif} = 0.00068}$ $\boldsymbol{C_{dif} = 61814}$	$R_{th} = a_1 + a_2.soc^3$ $a_1 = 0.59364$ $a_2 = 1.02000$ $C_{th} = 402$ J/°C	$C_{nom} = 40Ah$ $R_{int} = 0.9\text{ e} - 3\Omega$ $c_a = -0.0059$ $c_V = 0.0719$ $c_T = 0.0875$ $\Delta V = 0.1V$ $\Delta T = 10°C$ $V_0 = 3.7$ V $T_0 = 25°C$

Tableau D. 1 : Paramètres du modèle multi-physique de batterie Li-ion

Modèle électrique	Modèle thermique	Modèle de vieillissement
$\boldsymbol{C_{sc} = 350}$ **F** $\boldsymbol{r_s = 1.6e - 3}\ \Omega$ $\boldsymbol{R = 4.8e - 3}\ \Omega$ $\boldsymbol{n = 10}$	$R_{th} = 10.9$ °C/W $C_{th} = 60$ J/°C	$C_{nom} = 350$ F $R_{int} = 3.2e - 3\Omega$ $c_a = -0.0203$ $c_V = 1.94$ $c_T = 2.00$ $\Delta V = 0.1V$ $\Delta T = 10°C$ $V_0 = 2.7$ V $T_0 = 25°C$

Tableau D. 2 : Paramètres du modèle multi-physique de supercondensateur

Annexe. E: Caractéristiques techniques des batteries Li-ion et des supercondensateurs

Technical Specification-LC

2010-05-03

TYPE	MODEL	Capacity [Ah]	MAX Dimension (mm)			IR(max.)	Weight(max.)	Max discharger Rate(C)		Energy density (wh/kg)	Remarks
			L	W	T			Continious	Pulse		
XX106100	SLPB50106100										
	SLPB68106100										
	SLPB75106100	7.5	103	107	7.9	2.5mΩ	165.0g	5	8	168	
	SLPB98106100	10	103	107	10	3.0mΩ	210.0g	3	5	176	
XX205130	SLPB41205130H	7.5	132	210	3.9	2.2mΩ	205.0g	8	10	135	
	SLPB55205130H	11	132	210	5.6	1.6mΩ	280.0g	8	10	145	
	SLPB60205130H	13	132	210	6.3	1.1mΩ	325.0g	8	10	148	
	SLPB78205130H	16	132	210	7.7	1.0mΩ	400.0g	8	10	148	
XX216216	SLPB60216216	25	222	214	6.2	1.2mΩ	560.0g	5	8	165	
	SLPB68216216	30	222	214	7.1	1.2mΩ	685.0g	5	8	162	
	SLPB72216216	31	222	214	7.25	0.95mΩ	705.0g	5	8	163	
	SLPB78216216H	31	222	214	8	0.9mΩ	780.0g	8	12	147	
	SLPB90216216	40	222	214	9.3	0.9mΩ	885.0g	5	8	167	
	SLPB100216216H	40	222	214	10.7	0.8mΩ	1030.0g	8	12	144	
	SLPB120216216	53	222	214	12.3	0.7mΩ	1200.0g	5	8	163	
XX255255	SLPB96255255	60	262	257	9.5	0.6mΩ	1.35kg	3	5	164	
	SLPB110255255	70	262	257	0.7	0.6mΩ	1.50kg	3	5	173	
	SLPB110255255H	60	262	257	10.6	0.6mΩ	1.52kg	8	12	146	
	SLPB120255255	75	262	257	11.7	0.6mΩ	1.61kg	3	5	172	
	SLPB125255255	87	262	257	13.2	0.9mΩ	1.79kg	3	5	180	
	SLPB125255255H	75	262	257	12.3	0.5mΩ	1.73kg	6	10	160	
XX460330	SLPB53460330	70	327	453	5.3	0.65mΩ	1.68kg	3	5	154	
	SLPB60460330H	70	327	453	5.6	0.60mΩ	1.80kg	5	8	144	
	SLPB70460330H	80	327	453	6.2	0.60mΩ	2.10kg	5	8	141	
	SLPB70460330	100	327	453	7.2	0.65mΩ	2.25kg	3	5	164	
	SLPB80460330H	100	327	453	7.7	0.55mΩ	2.50kg	5	8	148	
	SLPB120460330	150	327	453	10.7	0.60mΩ	3.30kg	2	3	168	
	SLPB140460330	200	327	453	13.7	0.45mΩ	4.50kg	2	3	164	
	SLPB160460330H	200	327	453	15.2	0.35mΩ	4.90kg	3	5	151	
	SLPB160460330	240	327	453	15.7	0.45mΩ	5.00kg	2	3	178	

Figure E. 1 : Caractéristiques techniques des batteries kokam [80]

DATASHEET
BC ENERGY SERIES RADIAL D CELL 350F ULTRACAPACITOR

Maxwell TECHNOLOGIES

BCAP0350 E270 T11

FEATURES AND BENEFITS

- Round, radial mounting design for easy surface mount assembly
- Over 500,000 duty cycles
- 10 year life capability
- Ultra-low internal resistance

APPLICATIONS

- Industrial power back up
- Portable power tools
- Renewable energy systems
- Short term UPS (uninterruptible power supply) and telecom applications

PRODUCT SPECIFICATIONS

CAPACITANCE	
Nominal capacitance	350 F
Capacitance tolerance	+20% / -0%
VOLTAGE	
Rated voltage	2.7 V DC
Surge voltage	2.85 V DC
Maximum operating voltage	2.7 V DC
Isolation voltage	N/A
RESISTANCE	
ESR, DC	3.2mΩ
Resistance tolerance	Max.
Thermal resistance (Rth)	10.9C/W
TEMPERATURE	
Operating temperature range	-40°C to +65°C
Storage temperature range	-40°C to +70°C
Temperature characteristics	
Capacitance change % at 25°C	± 5%
Internal resistance % at 25°C	± 150%
POWER	
Pd	4,300 W/kg
ENERGY	
Emax	5.62 Wh/kg
LIFESPAN	
Endurance After 1,000 hours application of rated voltage at 65°C.	
Capacitance change	<20% decrease
Internal resistance	<25% increase
Life test At rated voltage and 25°C.	10 years
Capacitance change	≤20% decrease
Internal resistance	≤100% increase
CYCLES	
Cycles - Capacitors cycles between specified voltage and half rated voltage under constant current at 25°C (500,000 cycles)	
Capacitance change	20% decrease
Internal resistance	100% increase
CURRENT	
Leakage current After 72 hours at 25°C. Initial leakage current can be higher.	0.3 mA
Short circuit current (Isc) **CAUTION:** Current possible with short circuit from U_R. Do not use as an operating current.	840 A
Maximum continuous current	25 A
Maximum peak current, 1 sec	220 A
CONNECTION	
Terminal	Radial
SIZE	
Dimensions	See drawing
Volume	0.053 L
Mass	63g

MOUNTING RECOMMENDATIONS

Solder tabs to PCB. See application note for further information and slot spacing recommendations.

MARKINGS

Parts are marked with the following information: Rated capacitance, rated voltage, product number, name of manufacturer, positive and negative terminal, warning marking, serial number.

ADDITIONAL TECHNICAL INFORMATION

Capacitance and ESR, DC measured per document no. 1007239, available at www.maxwell.com.

I_c = leakage current after 72 hours at 25°C

Isc (short circuit current) = $\frac{V_{RATED}}{ESR}$

R_{th} = thermal resistance

$$Emax = \frac{\frac{1}{2} CV^2}{3{,}600 \times mass}$$

$$Pmax = \frac{\frac{V^2}{4R\,(1khz)}}{mass} \qquad Pd = \frac{\frac{0.12V^2}{R\,(DC)}}{mass}$$

Figure E. 2 : Caractéristiques techniques des supercondensateurs BCAP0350 E270T11 (350F/2.7V)[114]

Références bibliographiques

[1] "Le changement climatique." [Online]. Available: http://www.ladocumentationfrancaise.fr/dossiers/changement-climatique/index.shtml. [Accessed: 10-Dec-2015].

[2] "Les objectifs et la réalisation de la stratégie 20/20/20," *le magazine spécialisé sur l'efficacité énergétique.*, 2016. [Online]. Available: http://www.efficacite-electrique.fr/2015/10/les-objectifs-et-la-realisation-de-la-strategie-202020/. [Accessed: 20-Jan-2016].

[3] L. Stoyanov, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d ' énergie renouvelables," Thèse de doctorat, Université de corse Pasquale Paoli, 2011.

[4] Version française du site internet de la CCNUCC, "Accord de Paris COP 21," 2015. [Online]. Available: http://unfccc.int/portal_francophone/items/3072.php. [Accessed: 10-Jan-2016].

[5] S. Pelet-Prigent, "Rapport d ' étude bilan des émissions de gaz à effet de serre," Rapport d'étude, Allianz France, 2015.

[6] J. Nadeau, "Effets du vieillissement de la batterie li-ion sur les performances d 'un véhicule récréatif hybride," Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, 2013.

[7] R. Sadoun, "Intérêt d'une Source d'Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain – dimensionnement et tests de cyclage," Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2013.

[8] J. Percebois and C. Mandil, "Rapport énergies 2050," Rapport énergies 2050, Ministère français de l'économie et des finances et de l'industrie, 2012.

[9] Y. Steiner, "Impacts de la voiture électrique sur les émissions de CO 2 liées à la mobilité individuelle, Le cas de l'agglomération franco-valdo-genevoise," Master of science in geography, Université de Lausanne, 2010.

[10] "La question des réserves - La Voiture Electrique." [Online]. Available: http://tpesaintpaul.e-monsite.com/pages/la-fin-du-petrole.html. [Accessed: 22-Dec-2014].

[11] B. Aline and A. DE Montety, "Effet de serre et changements de climat : Pourquoi, comment et que pouvons-nous y faire ?," Rapport d'étude, Université catholique de Louvain, 2010.

[12] S. Marniesse and E. Filipiak, "Lutte contre l ' effet de serre Enjeux & Débats," Rapport technique , Agence Française de Développement, 2003.

[13] L. Servant and A. Sebek, "La pollution atmospherique et les transports franciliens," Rapport technique, Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile-de-France, 2004.

[14] "Le Gaz à effet de serre." [Online]. Available: http://www.aquaportail.com/definition-5212-gaz-a-effet-de-serre.html. [Accessed: 22-Dec-2014].

[15] "IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change." [Online]. Available: http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml. [Accessed: 18-Aug-2014].

[16] "SDEC Energie - Syndicat départemental d'énergies du Calvados - Le SDEC Energie." [Online]. Available: http://www.sdec-energie.fr/LeSDECEnergie.aspx. [Accessed: 22-Dec-2014].

[17] M. T. Demaze, "Les conventions internationales sur l'environnement : état des ratifications et des engagements des pays développés et des pays en développement," *Inf. Geogr.*, vol. 3, no. 73, pp. 84–99, 2009.

[18] M. T. Demaze, "Le protocole de Kyoto, le clivage Nord-Sud et le défi du développement durable," in *L'espace géographique*, 2012, pp. 139–156.

[19] "Climate Change Newsroom from the UNFCCC." [Online]. Available: http://newsroom.unfccc.int/. [Accessed: 18-Aug-2014].

[20] "L'après Kyoto - ClimateChallenge." [Online]. Available:

http://www.climatechallenge.be/fr/des-infos-en-mots-et-en-images/quelles-sont-les-solutions/au-niveau-politique/international/lapres-kyoto.aspx. [Accessed: 22-Dec-2014].

[21] "Toute l'Europe : Conférence climat de Lima : Paris déjà en ligne de mire ?" [Online]. Available: http://www.touteleurope.eu/actualite/conference-climat-de-lima-paris-deja-en-ligne-de-mire.html. [Accessed: 22-Dec-2014].

[22] S. Lacour, "Cours de pollution atmosphérique," Education support , Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2009.

[23] "ADEM,Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie." [Online]. Available: http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?id=11433&m=3&cid=96. [Accessed: 18-Aug-2014].

[24] P. Tritschler, "Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergie pour un système à pile à combustible embarquée dédié à l ' application agricole," Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2010.

[25] B. Dagusé, "Modélisation analytique pour le dimensionnement par optimisation d'une machine dédiée à une chaîne de traction hybride à dominante électrique," Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-P6, 2013.

[26] F. Vangraefschepe and P. Menegazzi, "Véhicules hybrides , quel avenir ?," IFP - Diffusion des Connaissances, 2005.

[27] P. Oliva, "Roulons électrique ! Véhicules hybrides et électriques," Les Cahiers du Challenge Bibendum, Berlin, 2011.

[28] G. Marlair, L. Dupont, and J. Lejosne, "Données de base sur les différentes technologies de stockage d'énergie," Rapport d'étude, INERIS, 2010.

[29] C. C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles," *Proc. IEEE*, vol. 90, no. 2, pp. 247–275, 2002.

[30] Q. Badey, "Étude des mécanismes et modélisation du vieillissement des batteries lithium-ion dans le cadre d'un usage automobile," Thèse de doctorat, Université Paris Sud, 2012.

[31] J. Bernard, "Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande," Thèse de doctorat, Université de valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2007.

[32] S. Kermani, "Gestion énergétique des véhicules hybrides : de la simulation à la commande temps réel," Thèse de doctorat, Université de valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2009.

[33] S. Delpart, "Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles," Thèse de doctorat, Université de valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2002.

[34] L. Walter, "Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique," Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2007.

[35] A. Sciarretta, M. Back, and L. Guzzella, "Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 352–363, May 2004.

[36] X. Hu, N. Murgovski, L. Johannesson, and B. Egardt, "Energy efficiency analysis of a series plug-in hybrid electric bus with different energy management strategies and battery sizes," *Appl. Energy*, vol. 111, pp. 1001–1009, Nov. 2013.

[37] 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.

[38] S. Grammatico, A. Balluchi, and E. Cosoli, "A series-parallel hybrid electric powertrain for industrial vehicles," *2010 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1–6, Sep. 2010.

[39] W. Xiong and C. Yin, "Design of Series-parallel Hybrid Electric Propulsion Systems

and Application in City Transit Bus," vol. 8, no. 5, pp. 578–590, 2009.

[40] W. Lajnef, "Modélisation des supercondensateurs et évaluation de leur vieillissement en cyclage actif à forts niveaux de courant pour des applications véhicules électriques et hybrides," Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 2006.

[41] C. Grosjean, "Usages de batteries lithium-ion comme fonction de stockage d'électricité à la convergence des besoins énergétiques de l'habitat solaire et du transport électrique," Thèse de doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, 2012.

[42] "Voiture-electrique-populaire." [Online]. Available: http://www.voiture-electrique-populaire.fr/enjeux/marche-vehicule. [Accessed: 18-Aug-2014].

[43] N. Aiman, "Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers," Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008.

[44] A. Burke, B. Jungers, C. Yang, and J. Ogden, "Battery Electric Vehicles: An Assessment of the Technology and Factors Influencing Market Readiness," Rapport d'étude, Institute of Transportation Studies (ITS-Davis), California Energy Commission, 2007.

[45] V. Srinivasan, D. Hafemeister, B. Levi, M. Levine, and P. Schwartz, "Batteries for Vehicular Applications," in *AIP Conference Proceedings*, 2008, vol. 1044, pp. 283–296.

[46] A. González-Gil, R. Palacin, and P. Batty, "Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy," *Energy Convers. Manag.*, vol. 75, pp. 374–388, Nov. 2013.

[47] ***T. Mesbahi, A. Ouari, T. Ghennam, E. M. Berkouk, N. Rizoug, N. Mesbahi, and M. Meradji, "A stand-alone wind power supply with a Li-ion battery energy storage system," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 40, pp. 204–213, Dec. 2014.***

[48] M. Lou Picherit, "Evaluation environnementale du véhicule électrique : Méthodologies et application," Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2010.

[49] "Technologie batterie automobile électrique." [Online]. Available: http://www.expert-ve.fr/batterie-de-traction.html. [Accessed: 06-Apr-2015].

[50] A. Rousseau, "Véhicule hybride et commande optimale," Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008.

[51] T. Thanh-Ha, "Études thermiques du stockeur d'énergie électrique automobile," Thèse de doctorat, Université de Valenciennes Et Du Hainaut-Cambresis, 2014.

[52] C. Laegeot, "Développement de supercondensateurs carbone/carbone : relation entre la taille des ions de l'électrolyte et la taille des pores de la matière active," Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

[53] F. Ammann, "Conception d'un convertisseur d'électronique de puissance pour un système de stockage hybride batteries/super-condensateurs: application dans les véhicules électriques," Thèse de doctorat, Université de Québec, 2012.

[54] M. Guemri, "Heuristiques optimisées et robustes de résolution du problème de gestion d'énergie pour les véhicules électriques et hybrides," Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2013.

[55] G. Guidi, T. M. Undeland, and Y. Hori, "Effectiveness of Supercapacitors as Power-Assist in Pure EV Using a Sodium-Nickel Chloride Battery as Main Energy Storage," in *EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, 2009, pp. 1–9.

[56] M. B. Camara, "Supercondensateurs pour échange dynamique d'énergie à bord du véhicule électrique hybride: Modélisation, étude des convertisseurs et commande," Thèse de doctorat, UFR- Université de Franche-Comté, 2007.

[57] T. Azib, "Contribution à l ' Etude d ' Electro-générateurs à Pile à Combustible Conceptions d ' Architectures et de Leurs Commandes," Thèse de doctorat, Université

Paris-Sud XI, 2010.

[58] P. Thounthong, “Conception d’une source hybride utilisant une pile a combustible et des supercondensateurs,” Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005.

[59] P. Thounthong, V. Chunkag, P. Sethakul, B. Davat, and M. Hinaje, “Comparative Study of Fuel-Cell Vehicle Hybridization with Battery or Supercapacitor Storage Device,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 8, pp. 3892–3904, Oct. 2009.

[60] D. Wu, S. S. Williamson, “Status Review of Power Control Strategies for Fuel Cell Based Hybrid Electric Vehicles,” in *IEEE Canada Electrical Power Conference*, 2007, vol. 2.

[61] P. Thounthong, S. Pierfederici, J.-P. Martin, M. Hinaje, and B. Davat, “Modeling and Control of Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid Source Based on Differential Flatness Control,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 2700–2710, Jul. 2010.

[62] Y. Ates, O. Erdinc, M. Uzunoglu, and B. Vural, “Energy management of an FC/UC hybrid vehicular power system using a combined neural network-wavelet transform based strategy,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 774–783, Jan. 2010.

[63] T. Azib, O. Bethoux, G. Remy, C. Marchand, and E. Berthelot, “An Innovative Control Strategy of a Single Converter for Hybrid Fuel Cell/Supercapacitor Power Source,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 4024–4031, Dec. 2010.

[64] I. Lachhab and L. Krichen, “An improved energy management strategy for FC/UC hybrid electric vehicles propelled by motor-wheels,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 571–581, Jan. 2014.

[65] Z. Jiancheng, “An effective hybrid energy storage system based on battery-EDLC for distributed generation systems,” *2010 5th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, pp. 819–824, Jun. 2010.

[66] A. Payman, “Contribution à la Gestion de l ’ Energie dans les Systèmes Hybrides Multi-sources Multi-charges,” Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.

[67] C. Zheng and W. Lin, “Self-Optimizing Energy Management Strategy for Fuel-Cell / Ultracapacitor Hybrid Vehicles,” *Int. Conf. Connect. Veh. Expo*, pp. 87–93, 2013.

[68] P. Thounthong, P. Sethakul, S. Rael, and B. Davat, “Control of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid source for vehicle applications,” *2009 IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 1–6, Feb. 2009.

[69] L. Boulon, “Modélisation multiphyique des élément de stockage et de conversion d’énergie pour les véhicules électriques hybrides Approche systémique pour la gestion d'énergie,” Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2009.

[70] N. Abddallah, “Etude et développement d’un concept de locomotive hybride à chaîne de traction électrique autonome propre et durable,” Université de technologie de Belfort-Montbéliard, 2009.

[71] H. B. E. N. Ahmed, B. Multon, N. Bernard, and C. Kerzreho, “Le stockage inertiel électromécanique,” *Rev. 3EI*, vol. 48, pp. 18–29, 2007.

[72] B. Destraz, “Assistance énergétique à base de supercondensateurs pour véhicules à propulsion électrique et hybride,” Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008.

[73] O. Briat, J. M. Vinassa, W. Lajnef, S. Azzopardi, and E. Woirgard, “Principle, design and experimental validation of a flywheel-battery hybrid source for heavy-duty electric vehicles,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, no. 5, p. 665, 2007.

[74] O. Briat, J. M. Vinassa, C. Zardini, and J. L. Aucouturier, “Experimental study of sources hybridization electromechanical storage system integration into an electric vehicle structure,” in *2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE*

Cat. No.01CH37230), 2001, vol. 2, pp. 1237–1242.

[75] A. Allegre, "Méthodologies de modélisation et de gestion de l ' énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides," Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2010.

[76] R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeus, B. Barbedette, and P. Le Moigne, "Optimal sizing of hybrid supply for electric vehicle using Li-ion battery and supercapacitor," in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011, pp. 1–8.

[77] ***N. Rizoug, O. Bouhali, G. Feld, and T. Mesbahi, "Micro-hybrid vehicle supplied by a multi-source storage system (battery and supercapacitors): optimal power management," in 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 2014, pp. 3.2.05–3.2.05.***

[78] F. Ahmadkhanlou and A. Goodarzi, "Hybrid Lithium-ion/Ultracap energy storage systems for plug-in hybrid electric vehicles," *2011 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1–7, Sep. 2011.

[79] ***T. Mesbahi, N. Rizoug, P. Bartholomuse, and P. Le Moigne, "Prise en compte du vieillissement pour la modélisation d'une source hybride Batterie/ Supercondensateur," in Symposium de Génie Électrique,Cachan, France ,2014.***

[80] "Kokam Li-ion batteries." [Online]. Available: http://www.kokam.com/.

[81] S. Trieste, "Modélisation et optimisation technico-économique d'une chaîne de conversion et de stockage d'énergie d'un navire électrique zéro émission," Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2013.

[82] W. Hankache, "Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible," Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.

[83] "Manicore - Que peut-on espérer des piles à combustible ?" [Online]. Available: http://www.manicore.com/documentation/pile_combust.html. [Accessed: 09-Feb-2015].

[84] N. Rizoug, "Modélisation électrique et énergétique des Application au cyclage d ' un module de supercondensateurs basse tension en grande puissance," Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2006.

[85] M.-Y. Ayad, "Mise en œuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2004.

[86] A. W. Stienecker, T. Stuart, and C. Ashtiani, "An ultracapacitor circuit for reducing sulfation in lead acid batteries for Mild Hybrid Electric Vehicles," *J. Power Sources*, vol. 156, no. 2, pp. 755–762, Jun. 2006.

[87] L. Gao, R. A. Dougal, and S. Liu, "Power Enhancement of an Actively Controlled Battery/Ultracapacitor Hybrid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 1, pp. 236–243, Jan. 2005.

[88] N. Rizoug, G. Feld, B. Barbedette, and R. Sadoun, "Association of batteries and supercapacitors to supply a micro-hybrid vehicle," *2011 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1–6, Sep. 2011.

[89] B. Morin, "Hybridation d'une pile à combustible par des supercondensateurs : vers une solution passive et directe," Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2013.

[90] T. Laeser and S. Laveissiere, "Les recherches du CEA sur les batteries pour véhicules électriques," Dossier de presse, 2010.

[91] A. Devie, "Caractérisation de l'usage des batteries Lithium-ion dans les véhicules électriques et hybrides. Application à l'étude du vieillissement et de la fiabilité," Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2012.

[92] D. V. Do, "Diagnostic de batteries Lithium ion dans des applications embarquées Table des matières," Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2010.

[93] M. Montaru, "Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance

utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages," Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.

[94] R. Saisset, "Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire," Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2004.

[95] A. Eddahech, "Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de sante de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride," Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 2013.

[96] M. K. Abdennadher, "Etude et elaboration d'un systeme de maintenance predictive pour les condensateurs et les batteries utilises dans les alimentations sans interruptions," Thèse de doctorat, Universite Claude Bernard Lyon 1, 2010.

[97] G. Dillenseger, "Caractérisation de nouveaux modes de maintien en charge pour batteries stationnaires de secours," Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 2004.

[98] T. Wang, "Commande robuste pour une gestion énergétique fonction de l ' état de santé de la batterie au sein des véhicules hybrides," Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2013.

[99] F. Lamire, "La baisse rapide du prix des batteries Lithium Ion et la structuration de la filière," 09-Dec-2014. [Online]. Available: http://www.themavision.fr/jcms/rw_438628/la-baisse-rapide-du-prix-des-batteries-lithium-ion-et-la-structuration-de-la-filiere. [Accessed: 26-Dec-2014].

[100] C. Cabal and C. Gantignol, "Définition et implications du concept de voiture propre," Rapport d'étude, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2006.

[101] Y. Dandeville, "Analyse thermique et électrochimique de supercondensateurs carbone-MnO2 en milieu aqueux," Thèse de doctorat, Université Nantes, 2012.

[102] M. Ortuzar, J. Moreno, and J. Dixon, "Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for an Electric Vehicle: Implementation and Evaluation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 2147–2156, Aug. 2007.

[103] P. Kreczanik, "Étude de la fiabilité et du vieillissement d'un système de stockage par supercondensateurs pour l'alimentation partielle et ponctuelle d'un trolleybus grâce à la récupération de l'énergie de freinage. Approche du composant au système de stockage," Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2011.

[104] J. Schiffer, D. Linzen, and D. U. Sauer, "Heat generation in double layer capacitors," *J. Power Sources*, vol. 160, no. 1, pp. 765–772, Sep. 2006.

[105] A. Burke and M. Miller, "The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 1, pp. 514–522, Jan. 2011.

[106] R. L. German, "Etude du vieillissement calendaire des supercondensateurs et impact des ondulations de courant haute ferequence," Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2013.

[107] N. Bertrand, "Caractérisation électrique, mise en évidence des phénomènes physico-chimiques et modélisation fractionnaire des supercondensateurs à électrodes à base de carbone activé," Thèse de doctorat, Université bordeaux 1, 2011.

[108] P. Venet, "Amélioration de la sûreté de fonctionnement des dispositifs de stockage d'énergie," Habilitation à Diriger les Recherches, Université Claude Bernard – Lyon1, 2007.

[109] D. Paire, "Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entrainements électriques hybrides: application à un ascenseur avec récupération d'énergie," Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2010.

[110] A. Elmejdoubi, A. Oukaour, H. Gualous, and J. Sabor, "Diagnostic d'un état de vieillisement du Supercondensateur par l'algorithme des moindres carrés," in *Symposium de Génie Electrique,Cachan, France*, 2014.
[111] L. Delfour, "Simulation d'un supercondensateur a l'échelle atomique," Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, 2011.
[112] "FAQ sur les supercondensateurs - Supercondensateur." [Online]. Available: http://www.supercondensateur.com/faq. [Accessed: 29-Dec-2014].
[113] "Electro-Graph." [Online]. Available: http://electr.he175.vps.webenabled.net/sites/default/files/. [Accessed: 29-Dec-2014].
[114] "Maxwell Technologies D Cell Series Ultracapacitors Board Mounted Cells," 2015. [Online]. Available: http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/d-cell-series/documents.
[115] J. Groot, "State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries : Cycle Life Test Methods," Thèse de doctorat, Chalmers University of Technology, 2012.
[116] S. Pelissier, "Introduction au vieillissement des batteries Lithium-ion et aux protocoles expérimentaux de test de durée de vie," Article scientifique , Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité.
[117] X. Wei, B. Zhu, and W. Xu, "Internal Resistance Identification in Vehicle Power Lithium-Ion Battery and Application in Lifetime Evaluation," in *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2009, pp. 388–392.
[118] D. Dees, E. Gunen, D. Abraham, A. Jansen, and J. Prakash, "Electrochemical Modeling of Lithium-Ion Positive Electrodes during Hybrid Pulse Power Characterization Tests," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 155, no. 8, p. A603, Aug. 2008.
[119] P. Ramadass, B. Haran, P. M. Gomadam, R. White, and B. N. Popov, "Development of First Principles Capacity Fade Model for Li-Ion Cells," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 151, no. 2, p. A196, Feb. 2004.
[120] R. P. Ramasamy, J.-W. Lee, and B. N. Popov, "Simulation of capacity loss in carbon electrode for lithium-ion cells during storage," *J. Power Sources*, vol. 166, no. 1, pp. 266–272, Mar. 2007.
[121] M. Safari and C. Delacourt, "Simulation-Based Analysis of Aging Phenomena in a Commercial Graphite/LiFePO4 Cell," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 158, no. 12, p. A1436, Jan. 2011.
[122] R. G. Jungst, G. Nagasubramanian, H. L. Case, B. Y. Liaw, A. Urbina, T. L. Paez, and D. H. Doughty, "Accelerated calendar and pulse life analysis of lithium-ion cells," *J. Power Sources*, vol. 119–121, pp. 870–873, Jun. 2003.
[123] A. Mellit, M. Benghanem, and S. A. Kalogirou, "Modeling and simulation of a stand-alone photovoltaic system using an adaptive artificial neural network: Proposition for a new sizing procedure," *Renew. Energy*, vol. 32, no. 2, pp. 285–313, Feb. 2007.
[124] C.C. Chan, E. W. . Lo, and S. Weixiang, "The available capacity computation model based on artificial neural network for lead–acid batteries in electric vehicles," *J. Power Sources*, vol. 87, no. 1–2, pp. 201–204, Apr. 2000.
[125] H. Wenzl, I. Baring-Gould, R. Kaiser, B. Y. Liaw, P. Lundsager, J. Manwell, A. Ruddell, and V. Svoboda, "Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery," *J. Power Sources*, vol. 144, no. 2, pp. 373–384, Jun. 2005.
[126] D. U. Sauer and H. Wenzl, "Comparison of different approaches for lifetime prediction of electrochemical systems—Using lead-acid batteries as example," *J. Power Sources*, vol. 176, no. 2, pp. 534–546, Feb. 2008.
[127] M. Broussely, P. Biensan, F. Bonhomme, P. Blanchard, S. Herreyre, K. Nechev, and R. J. Staniewicz, "Main aging mechanisms in Li ion batteries," *J. Power Sources*, vol. 146,

no. 1–2, pp. 90–96, Aug. 2005.

[128] I. Bloom, B. . Cole, J. . Sohn, S. . Jones, E. . Polzin, V. . Battaglia, G. . Henriksen, C. Motloch, R. Richardson, T. Unkelhaeuser, D. Ingersoll, and H. . Case, "An accelerated calendar and cycle life study of Li-ion cells," *J. Power Sources*, vol. 101, no. 2, pp. 238–247, Oct. 2001.

[129] J. Pérès, F. Perton, C. Audry, P. Biensan, A. de Guibert, G. Blanc, and M. Broussely, "A new method to study Li-ion cell safety: laser beam initiated reactions on both charged negative and positive electrodes," *J. Power Sources*, vol. 97–98, pp. 702–710, Jul. 2001.

[130] E. V. Thomas, I. Bloom, J. P. Christophersen, and V. S. Battaglia, "Rate-based degradation modeling of lithium-ion cells," *J. Power Sources*, vol. 206, pp. 378–382, May 2012.

[131] P. Singh, C. Fennie, and D. Reisner, "Fuzzy logic modelling of state-of-charge and available capacity of nickel/metal hydride batteries," *J. Power Sources*, vol. 136, no. 2, pp. 322–333, Oct. 2004.

[132] P. Singh, R. Vinjamuri, X. Wang, and D. Reisner, "Fuzzy logic modeling of EIS measurements on lithium-ion batteries," *Electrochim. Acta*, vol. 51, no. 8–9, pp. 1673–1679, Jan. 2006.

[133] H. Al Jed, A. Mieze, J.-M. Vinassa, and R. Simon, "Mathematical modeling of aging factors for Li-ion battery cells," in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010, pp. 1–4.

[134] B. Yannliaw, "Modeling of lithium ion cells, A simple equivalent-circuit model approach," *Solid State Ionics*, vol. 175, no. 1–4, pp. 835–839, Nov. 2004.

[135] M. Ecker, J. B. Gerschler, J. Vogel, S. Käbitz, F. Hust, P. Dechent, and D. U. Sauer, "Development of a lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data," *J. Power Sources*, vol. 215, pp. 248–257, Oct. 2012.

[136] B. Y. Liaw, R. G. Jungst, G. Nagasubramanian, H. L. Case, and D. H. Doughty, "Modeling capacity fade in lithium-ion cells," *J. Power Sources*, vol. 140, no. 1, pp. 157–161, Jan. 2005.

[137] C. Guenther, B. Schott, W. Hennings, P. Waldowski, and M. a. Danzer, "Model-based investigation of electric vehicle battery aging by means of vehicle-to-grid scenario simulations," *J. Power Sources*, vol. 239, pp. 604–610, Oct. 2013.

[138] J. Schiffer, D. U. Sauer, H. Bindner, T. Cronin, P. Lundsager, and R. Kaiser, "Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems," *J. Power Sources*, vol. 168, no. 1, pp. 66–78, May 2007.

[139] D. U. Sauer, E. Karden, B. Fricke, H. Blanke, M. Thele, O. Bohlen, J. Schiffer, J. B. Gerschler, and R. Kaiser, "Charging performance of automotive batteries—An underestimated factor influencing lifetime and reliable battery operation," *J. Power Sources*, vol. 168, no. 1, pp. 22–30, May 2007.

[140] D. B. Loukakou, "Modélisation, Conception et Expérimentation d'un véhicule hybride léger pour usages urbains," Thèse de doctorat, Université de Franche-comté, 2012.

[141] R. Chaari, "Evaluation et modélisation du vieillissement des supercondensateurs pour des applications véhicules hybrides," Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 2014.

[142] R. Chaari, O. Briat, and J. M. Vinassa, "Capacitance recovery analysis and modelling of supercapacitors during cycling ageing tests," *Energy Convers. Manag.*, vol. 82, pp. 37–45, 2014.

[143] O. Bohlen, J. Kowal, and D. U. Sauer, "Ageing behaviour of electrochemical double layer capacitors," *J. Power Sources*, vol. 172, no. 1, pp. 468–475, Oct. 2007.

[144] O. Bohlen and J. Kowal, "Ageing behaviour of electrochemical double layer capacitors," *J. Power Sources*, vol. 173, no. 1, pp. 626–632, Nov. 2007.

[145] ***T. Mesbahi, P. Le Moigne, P. Bartholomeus, and N. Rizoug, "Improved Model of Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System Based on Thermo-Electrical and Aging Behaviors," in 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 2014, pp. 1–8.***

[146] L. Menard, "Modélisation et Caractérisation d ' Accumulateurs Lithium-Ion en vue d ' une Mise en Œuvre Système," Article scientifique , Laplace,Université de Toulouse.

[147] S. Butterbach, "Stockage d ' énergie électrique par association de batteries au plomb et de supercondensateurs pour véhicule lourd," Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2012.

[148] ***T. Mesbahi, N. Rizoug, P. Bartholomeus, and P. Le Moigne, "Li-Ion Battery Emulator for Electric Vehicle Applications," in 2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2013, pp. 1–8.***

[149] E. Levart, "Discussion of 'The Warburg Impedance in the Presence of Convective Flow' [Daniel A. Scherson and John Newman (pp. 110–113, Vol. 127, No. 1)]," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 127, no. 12, p. 2649, Dec. 1980.

[150] E. Prada, D. Di Domenico, Y. Creff, J. Bernard, V. Sauvant-Moynot, and F. Huet, "Simplified Electrochemical and Thermal Model of LiFePO4-Graphite Li-Ion Batteries for Fast Charge Applications," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 159, no. 9, pp. A1508–A1519, Aug. 2012.

[151] N. Mellgren, S. Brown, M. Vynnycky, and G. Lindbergh, "Impedance as a Tool for Investigating Aging in Lithium-Ion Porous Electrodes," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 155, no. 4, p. A304, Apr. 2008.

[152] M. Doyle, "Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/Insertion Cell," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 140, no. 6, p. 1526, Jun. 1993.

[153] T. F. Fuller, "Simulation and Optimization of the Dual Lithium Ion Insertion Cell," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 141, no. 1, p. 1, Jan. 1994.

[154] C.-V. Hémery, "Etude des phénomènes thermiques dans les batteries Li-ion," Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2013.

[155] K. Smith and C.-Y. Wang, "Solid-state diffusion limitations on pulse operation of a lithium ion cell for hybrid electric vehicles," *J. Power Sources*, vol. 161, no. 1, pp. 628–639, Oct. 2006.

[156] K. Smith and C.-Y. Wang, "Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles," *J. Power Sources*, vol. 160, no. 1, pp. 662–673, Sep. 2006.

[157] K. E. T.-A. J. Newman, *Electrochemical systems*, Third edit. Wiley, New York, 2004.

[158] S. Raël, M. Urbain, and H. Renaudineau, "Modèle multiphysique de batterie lithium-ion implanté dans un logiciel de simulation des systèmes électriques," in *Symposium de Génie Électrique 2014*, 2014.

[159] R. Darling, "Modeling Side Reactions in Composite LiMnO Electrodes," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 145, no. 3, p. 990, Mar. 1998.

[160] A. Zenati, P. Desprez, H. Razik, and S. Rael, "Impedance measurements combined with the fuzzy logic methodology to assess the SOC and SOH of lithium-ion cells," in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010, pp. 1–6.

[161] A. J. Salkind, C. Fennie, P. Singh, T. Atwater, and D. E. Reisner, "Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology," *J. Power Sources*, vol. 80, no. 1–2, pp. 293–300, Jul. 1999.

[162] B. Xia, C. Chen, Y. Tian, W. Sun, Z. Xu, and W. Zheng, "A novel method for state of charge estimation of lithium-ion batteries using a nonlinear observer," *J. Power Sources*, vol. 270, pp. 359–366, Dec. 2014.

[163] Y. Zou, X. Hu, H. Ma, and S. E. Li, "Combined SOC and SOH estimation over lithium-ion battery cell cycle lifespan for Electric vehicles," *J. Power Sources*, vol. 273, pp. 793–803, Oct. 2014.

[164] R. Xiong, X. Gong, C. C. Mi, and F. Sun, "A robust state-of-charge estimator for multiple types of lithium-ion batteries using adaptive extended Kalman filter," *J. Power Sources*, vol. 243, pp. 805–816, Dec. 2013.

[165] V. S. A. Buonarota, P. Menga, "An electrical model for discharge and recharge of lead-acid batteries, developed for industrial applications," *L'Energia Elettr.*, vol. 7, no. 8, pp. 325–332, 1987.

[166] D. Mayer and S. Biscaglia, "Modelling and analysis of lead acid battery operation," in *Conference Proceedings., Eleventh International Telecommunications Energy Conference*, 1989, pp. 23.3/1–23.3/6.

[167] M. Ceraolo, "New dynamical models of lead-acid batteries," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 4, pp. 1184–1190, 2000.

[168] F. Coupan, I. Sadli, I. Marie-Joseph, A. Primerose, and H. Clergeot, "New battery dynamic model: Application to lead-acid battery," in *2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, 2010, vol. 5, pp. 140–145.

[169] S. Bhide, "Development of improved Li-ion battery model incorporating thermal and rate factor effects," in *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009, pp. 544–550.

[170] A. Hentunen, T. Lehmuspelto, and J. Suomela, "Electrical battery model for dynamic simulations of hybrid electric vehicles," *2011 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1–6, Sep. 2011.

[171] D.-H. Shin, J.-B. Jeong, T.-H. Kim, and H.-J. Kim, "Modeling of Lithium Battery Cells for Plug-In Hybrid Vehicles," *J. Power Electron.*, vol. 13, no. 3, pp. 429–436, May 2013.

[172] J. Brand, Z. Zhang, and R. K. Agarwal, "Extraction of battery parameters of the equivalent circuit model using a multi-objective genetic algorithm," *J. Power Sources*, vol. 247, pp. 729–737, Feb. 2014.

[173] J. Gomez, R. Nelson, E. E. Kalu, M. H. Weatherspoon, and J. P. Zheng, "Equivalent circuit model parameters of a high-power Li-ion battery: Thermal and state of charge effects," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 10, pp. 4826–4831, May 2011.

[174] W. Waag, S. Käbitz, and D. U. Sauer, "Experimental investigation of the lithium-ion battery impedance characteristic at various conditions and aging states and its influence on the application," *Appl. Energy*, vol. 102, no. null, pp. 885–897, Feb. 2013.

[175] W. Waag, S. Käbitz, and D. U. Sauer, "Application-specific parameterization of reduced order equivalent circuit battery models for improved accuracy at dynamic load," *Measurement*, vol. 46, no. 10, pp. 4085–4093, Dec. 2013.

[176] E. Karden, S. Buller, and R. W. De Doncker, "A method for measurement and interpretation of impedance spectra for industrial batteries," *J. Power Sources*, vol. 85, no. 1, pp. 72–78, Jan. 2000.

[177] J.-B. Jorcin, "Spectroscopie d'impédance électrochimique locale : caractérisation de la délamination des peintures et de la corrosion des alliages Al-Cu," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.

[178] Y. Liu, S. Gorgutsa, C. Santato, and M. Skorobogatiy, "Flexible, Solid Electrolyte-Based Lithium Battery Composed of LiFePO4 Cathode and Li4Ti5O12 Anode for Applications in Smart Textiles," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 159, no. 4, p. A349, 2012.

[179] ***T. Mesbahi, F. Khenfri, N. Rizoug, K. Chaaban, P. Bartholomeüs, and P. Le Moigne, "Dynamical modeling of Li-ion batteries for electric vehicle applications based on hybrid Particle Swarm–Nelder–Mead (PSO–NM) optimization algorithm," Electr.***

Power Syst. Res., vol. 131, pp. 195–204, Feb. 2016.

[180] E. Planchais and F. Tertrais, "Supercondensateurs : applications et environnement," *Rapp. d'étude, Fourum Energies*, 2001.

[181] E. H. Brouji, "Prise en compte du vieillissement dans la modélisation des supercondensateurs," Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 2009.

[182] A. B. H. Gualous, R. Gallay, "Utilisation des supercondensateurs pour les stockage de l'énergie embarquée : applications transport," *Rev. l'Electricité l'Electronique*, no. 08, pp. 83–90, 2008.

[183] L. Zubieta and R. Bonert, "Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 199–205, 2000.

[184] L. Zubieta and R. Bonert, "Experimental 400 kW sec double-layer capacitor energy storage system," in *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370)*, 1999, vol. 4, pp. 2448–2453.

[185] F. Belhachemi, S. Rael, and B. Davat, "Supercapacitors electrical behaviour for power electronics applications," in *EPE-PEMC 2000*, 2000, p. CDROM.

[186] D. Riu, N. Retiere, and D. Linzen, "Half-order modelling of supercapacitors," in *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.*, 2004, vol. 4, no. 2, pp. 2550–2554.

[187] D. Linzen, "Impedance-Based Loss Calculation and Thermal Modeling of Electrochemical Energy Storage Devices for Design Considerations of Automotive Power Systems," Thèse de doctorat, RWTH Aachen University, 2006.

[188] S. Buller, E. Karden, D. Kok, and R. W. De Doncker, "Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 6, pp. 1622–1626, Nov. 2002.

[189] F. Belhachemi, S. Rael, and B. Davat, "A physical based model of power electric double-layer supercapacitors," in *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129)*, 2000, vol. 5, pp. 3069–3076.

[190] A. Hammar, P. Venet, R. Lallemand, G. Coquery, and G. Rojat, "Study of Accelerated Aging of Supercapacitors for Transport Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 3972–3979, Dec. 2010.

[191] N. Rizoug, P. Bartholomeus, and P. Le Moigne, "Study of the Ageing Process of a Supercapacitor Module Using Direct Method of Characterization," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 2, pp. 220–228, Jun. 2012.

[192] A. Smyshlyaev, M. Krstic, N. Chaturvedi, J. Ahmed, and A. Kojic, "PDE model for thermal dynamics of a large Li-ion battery pack," in *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, 2011, pp. 959–964.

[193] X. Hu, S. Asgari, S. Lin, S. Stanton, and W. Lian, "A linear parameter-varying model for HEV/EV battery thermal modeling," in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 1643–1649.

[194] A. Pruteanu, B. V. Florean, G. M. Moraru, and R. C. Ciobanu, "Development of a thermal simulation and testing model for a superior lithium-ion-polymer battery," in *2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2012, pp. 947–952.

[195] G. Guo, B. Long, B. Cheng, S. Zhou, P. Xu, and B. Cao, "Three-dimensional thermal finite element modeling of lithium-ion battery in thermal abuse application," *J. Power Sources*, vol. 195, no. 8, pp. 2393–2398, Apr. 2010.

[196] C. Forgez, D. Vinh Do, G. Friedrich, M. Morcrette, and C. Delacourt, "Thermal modeling of a cylindrical LiFePO4/graphite lithium-ion battery," *J. Power Sources*, vol.

195, no. 9, pp. 2961–2968, May 2010.

[197] X. Lin, H. E. Perez, S. Mohan, J. B. Siegel, A. G. Stefanopoulou, Y. Ding, and M. P. Castanier, "A lumped-parameter electro-thermal model for cylindrical batteries," *J. Power Sources*, vol. 257, pp. 1–11, Jul. 2014.

[198] C. Mi, B. Li, D. Buck, and N. Ota, "Advanced Electro-Thermal Modeling of Lithium-Ion Battery System for Hybrid Electric Vehicle Applications," in *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007, pp. 107–111.

[199] A. O. M. Yahya, A. O. Mahmoud, and I. Youm, "Modélisation d ' un système de stockage intégré dans un système hybride (PV / Eolien / Diesel)," vol. 10, pp. 205–214, 2007.

[200] N. Omar, M. Daowd, O. Hegazy, G. Mulder, J.-M. Timmermans, T. Coosemans, P. Van den Bossche, and J. Van Mierlo, "Standardization Work for BEV and HEV Applications: Critical Appraisal of Recent Traction Battery Documents," *Energies*, vol. 5, no. 12, pp. 138–156, Jan. 2012.

[201] A. Neffati, M. Guemri, S. Caux, and M. Fadel, "Energy management strategies for multi source systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 102, pp. 42–49, Sep. 2013.

[202] A. Neffati, "Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride.," Thèse de doctorat, Université de Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 2013.

[203] A. Hammani, R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeus, B. Barbedette, and P. Le Moigne, "Influence of the management strategies on the sizing of hybrid supply composed with battery and supercapacitor," in *2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology*, 2012, pp. 1–7.

[204] R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeus, B. Barbedette, and P. Le Moigne, "Influence of the drive cycles on the sizing of hybrid storage system battery-supercapacitor supplying an electric vehicle," in *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2011, no. 2, pp. 4106–4112.

[205] A. L. Allegre, R. Trigui, and A. Bouscayrol, "Different energy management strategies of Hybrid Energy Storage System (HESS) using batteries and supercapacitors for vehicular applications," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010, pp. 1–6.

[206] R. E. Araujo, R. de Castro, C. Pinto, P. Melo, and D. Freitas, "Combined Sizing and Energy Management in EVs with Batteries and Supercapacitors," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 9545, no. c, pp. 1–1, 2014.

[207] P. Thounthong, S. Rael, and B. Davat, "Control Strategy of Fuel Cell and Supercapacitors Association for a Distributed Generation System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 3225–3233, Dec. 2007.

[208] G. Guidi, T. M. Undeland, and Y. Hori, "Effectiveness of Supercapacitors as Power-Assist in Pure EV Using a Sodium-Nickel Chloride Battery as Main Energy Storage," *EVS24*, pp. 1–9, 2009.

[209] A. Florescu, "Gestion optimisée des flux énergétiques dans le véhicule électrique," Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2012.

[210] C. R. Akli, "Conception systémique d'une locomotive hybride autonome. Application à la locomotive hybride de démonstration et d'investigations en énergétique LHyDIE développée par la SNCF," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique Toulouse, 2008.

[211] P. Garcia, L. M. Fernandez, C. A. Garcia, and F. Jurado, "Energy Management System of Fuel-Cell-Battery Hybrid Tramway," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 4013–4023, Dec. 2010.

[212] M. C. Kisacikoglu, M. Uzunoglu, and M. S. Alam, "Fuzzy Logic Control of a Fuel

Cell/Battery/Ultra-capacitor Hybrid Vehicular Power System," in *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007, pp. 591–596.

[213] S. Dusmez, A. Khaligh, "A Supervisory Power Splitting Approach for a New Ultracapacitor-Battery Vehicle Deploying Two Propulsion Machines," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 3, pp. 1960–1971, 2014.

[214] M. Zandi, A. Payman, J.-P. Martin, S. Pierfederici, B. Davat, and F. Meibody-Tabar, "Energy Management of a Fuel Cell/Supercapacitor/Battery Power Source for Electric Vehicular Applications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 2, pp. 433–443, Feb. 2011.

[215] B. Vural, a. R. Boynuegri, I. Nakir, O. Erdinc, a. Balikci, M. Uzunoglu, H. Gorgun, and S. Dusmez, "Fuel cell and ultra-capacitor hybridization: A prototype test bench based analysis of different energy management strategies for vehicular applications," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 20, pp. 11161–11171, Oct. 2010.

[216] Q. Zeng and J. Huang, "The Design and Simulation of Fuzzy Logic Controller for Parallel Hybrid Electric Vehicles," in *2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 2007, pp. 908–912.

[217] H. He, R. Xiong, K. Zhao, and Z. Liu, "Energy management strategy research on a hybrid power system by hardware-in-loop experiments," *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 1311–1317, Dec. 2013.

[218] J. Moreno, M. E. Ortuzar, and J. W. Dixon, "Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 2, pp. 614–623, Apr. 2006.

[219] M. Ortúzar, J. Moreno, J. Dixon, "Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for an Electric Vehicle : Implementation and Evaluation," vol. 54, no. 4, pp. 2147–2156, 2007.

[220] E. Vinot, R. Trigui, and B. Jeanneret, "Optimal management of electric vehicles with a hybrid storage system," *2010 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, no. 1, pp. 1–6, Sep. 2010.

[221] E. Vinot and R. Trigui, "Optimal energy management of HEVs with hybrid storage system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 76, pp. 437–452, Dec. 2013.

[222] a. Sciarretta, M. Back, and L. Guzzella, "Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 352–363, May 2004.

[223] J. Bernard, S. Delprat, F. Buechi, and T. M. Guerra, "Global Optimisation in the power management of a Fuel Cell Hybrid Vehicle (FCHV)," *2006 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1–6, Sep. 2006.

[224] M.-G. Morteza and P. Amir, "Application of genetic algorithm for simultaneous optimisation of HEV component sizing and control strategy," *Int. J. Altern. Propuls.*, vol. 1, no. 1, pp. 63–78, 2006.

[225] L. Tribioli, M. Barbieri, R. Capata, E. Sciubba, E. Jannelli, and G. Bella, "A Real Time Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles based on Optimal Control Theory," *Energy Procedia*, vol. 45, pp. 949–958, 2014.

[226] C. Romaus, K. Gathmann, and J. Bocker, "Optimal energy management for a hybrid energy storage system for electric vehicles based on Stochastic Dynamic Programming," in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2010, pp. 1–6.

[227] S. Kelouwani, K. Agbossou, Y. Dubé, and L. Boulon, "Fuel cell Plug-in Hybrid Electric Vehicle anticipatory and real-time blended-mode energy management for battery life preservation," *J. Power Sources*, vol. 221, pp. 406–418, Jan. 2013.

[228] C. Musardo, G. Rizzoni, Y. Guezennec, and B. Staccia, "A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management," *Eur. J. Control*, vol. 11, no. 4–5, pp. 509–524, Jan. 2005.

[229] F. Tiefensee, M. Hilairet, D. Normand-Cyrot, and O. Bethoux, "Sampled-data energetic management of a Fuel Cell/Supercapacitor system," in *2010 IEEE Vehicle Power and*

Propulsion Conference, 2010, pp. 1–6.
[230] D. V. Ngo, T. Hofman, M. Steinbuch, and A. F. a Serrarens, "An optimal control-based algorithm for Hybrid Electric Vehicle using preview route information," *Proc. 2010 Am. Control Conf.*, pp. 5818–5823, Jun. 2010.
[231] M.-E. Choi, S.-W. Kim, and S.-W. Seo, "Energy Management Optimization in a Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 463–472, Mar. 2012.
[232] C. Romaus, J. Bocker, K. Witting, A. Seifried, and O. Znamenshchykov, "Optimal energy management for a hybrid energy storage system combining batteries and double layer capacitors," in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, pp. 1640–1647.
[233] L. Xu, M. Ouyang, J. Li, F. Yang, L. Lu, and J. Hua, "Application of Pontryagin's Minimal Principle to the energy management strategy of plugin fuel cell electric vehicles," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 24, pp. 10104–10115, Aug. 2013.
[234] F. R. Salmasi, "Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 5, pp. 2393–2404, Sep. 2007.
[235] S. G. Wirasingha and A. Emadi, "Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 111–122, Jan. 2011.
[236] H. Khayyam, A. Kouzani, S. Nahavandi, V. Marano, and G. Rizzoni, *Energy Management*. InTech, 2010.
[237] C. Vagg, C. J. Brace, S. Akehurst, and L. Ash, "Minimizing Battery Stress during Hybrid Electric Vehicle Control Design: Real World Considerations for Model-Based Control Development," *2013 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1–6, Oct. 2013.
[238] S. Delprat, T. M. Guerra, and J. Rimaux, "Optimal control of a parallel powertrain: from global optimization to real time control strategy," in *Vehicular Technology Conference. IEEE 55th Vehicular Technology Conference. VTC Spring 2002 (Cat. No.02CH37367)*, 2002, vol. 4, pp. 2082–2088.
[239] F. R. Salmasi, "Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 5, pp. 2393–2404, Sep. 2007.
[240] L. Zadeh, "Fuzzy sets," *Inf. Control*, vol. 8,338–353, 1965.
[241] H. Hannoun, "Minimisation de l'énergie consommée dans un véhicule hybride thermique-électrique," Univ Pierre et Marie Curie-P6- Supelec, 2005.
[242] M. H. Hajimiri and F. R. Salmasi, "A Fuzzy Energy Management Strategy for Series Hybrid Electric Vehicle with Predictive Control and Durability Extension of the Battery," *2006 IEEE Conf. Electr. Hybrid Veh.*, pp. 1–5, Dec. 2006.
[243] A. Wang, "Design of Energy Management Strategy in Hybrid Vehicles by Evolutionary Fuzzy System Part I: Fuzzy Logic Controller Development," *2006 6th World Congr. Intell. Control Autom.*, pp. 8324–8328, 2006.
[244] M. Zandi, "Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.
[245] Q. Li, W. Chen, Y. Li, S. Liu, and J. Huang, "Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 514–525, Dec. 2012.
[246] M. Ibrahim, "Approche adaptative de réseau de neurones autoregressifs non linéaires et de transformée en ondelettes pour la gestion temps réel de l'énergie dans les véhicules hybrides," in *JCGE, Journées des jeunes chercheures en génie électrique*, 2013.
[247] K. Le, "Gestion optimale des consommations d'énergie dans les bâtiments," Institut

Polytechnique de Grenoble, 2008.
[248] K. Framling, "Les réseaux de neurones comme outils d'aide à la décision floue," I.N.S.A de Lyon, 1992.
[249] S. G. Wirasingha and A. Emadi, "Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 111–122, Jan. 2011.
[250] C. S. T. De-wen and Z. Qian-fan, "Study of hybrid energy control strategy for hybrid electric drive system in All Electric Combat Vehicles," *2008 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1–5, Sep. 2008.
[251] Z. Yu, D. Zinger, and A. Bose, "An innovative optimal power allocation strategy for fuel cell, battery and supercapacitor hybrid electric vehicle," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 4, pp. 2351–2359, Feb. 2011.
[252] B. Chen, Y. Wu, and H. Tsai, "Design and analysis of power management strategy for range extended electric vehicle using dynamic programming," *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1764–1774, 2014.
[253] R. Carter and A. Cruden, "Strategies for control of a battery/supercapacitor system in an electric vehicle," *2008 Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, pp. 727–732, Jun. 2008.
[254] M. G. Arregui, "Theoretical study of a power generation unit based on the hybridization of a fuel cell stack and ultracapacitors .," Institut National Polytechnique Toulouse, 2007.
[255] O. Langlois, "Conception d ' un réseau de secours électrique pour l ' aéronautique," Institut National Polytechnique Toulouse, 2006.
[256] Z. Song, J. Li, X. Han, L. Xu, L. Lu, M. Ouyang, and H. Hofmann, "Multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles," *Appl. Energy*, vol. 135, pp. 212–224, Dec. 2014.
[257] H. Maker, "Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride : association Pile à Combustible et Supercondensateurs," Thèse de doctorat, Université de technologie Belfort Montbéliard, 2008.
[258] ***T. Mesbahi, N. Rizoug, P. Bartholomeüs, and P. Le Moigne, "A New Energy Management Strategy of a Battery / Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicular Applications," 7th IET Int. Conf. Power Electron. Mach. Drives, pp. 1–7, 2014.***
[259] R. Joumard, M. André, R. Vidon, T. Patrick, and C. Pruvost, "Influence du cycle de conduite sur les émissions unitaires de polluants des voitures particulières," Rapport d'étude, Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité, 1999.
[260] J. L. Torres, R. Gonzalez, a. Gimenez, and J. Lopez, "Energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles. A comparative study," *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 816–824, Jan. 2014.
[261] "Innas: innovators in fluid power." [Online]. Available: http://www.innas.com/home.html. [Accessed: 10-Feb-2015].
[262] "Présentation du cycle d'homologation NEDC." [Online]. Available: http://www.guillaumedarding.fr/presentation-du-cycle-d-homologation-nedc-8979202.html. [Accessed: 23-Jan-2015].
[263] "Les batteries LMP (lithium métal polymère) une batterie électrique haute performance." [Online]. Available: http://www.bluecar.fr/les-batteries-lmp-lithium-metal-polymere-une-batterie-electrique-haute-performance. [Accessed: 22-Oct-2014].
[264] "Bolloré Bluecar," 2015. [Online]. Available: www.bluecar.fr.
[265] R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholumeus, B. Barbedette, and P. LeMoigne, "Sizing of hybrid supply (battery-supercapacitor) for electric vehicle taking into account the weight of the additional Buck-Boost chopper," *2012 First Int. Conf. Renew. Energies Veh.*

Technol., vol. 2, no. 1, pp. 8–14, Mar. 2012.

[266] O. Hadjji, “Contribution au développement de méthodes d’optimisation stochastiques. Application à la conception des dispositifs électrotechniques,” Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2003.

[267] B. Leroy-beaulieu, “Etude et illustration de méthodes itératives d ’ optimisation non linéaire,” Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006.

[268] E. Zahara and Y.-T. Kao, “Hybrid Nelder–Mead simplex search and particle swarm optimization for constrained engineering design problems,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 2, pp. 3880–3886, Mar. 2009.

[269] Z. Chenghui, S. Qingsheng, and C. Naxin, “Particle Swarm Optimization for energy management fuzzy controller design in dual-source electric vehicle,” *2007 IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 1405–1410, 2007.

[270] M. T. Vakil Baghmisheh, M. Peimani, M. H. Sadeghi, M. M. Ettefagh, and A. F. Tabrizi, “A hybrid particle swarm–Nelder–Mead optimization method for crack detection in cantilever beams,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 12, no. 8, pp. 2217–2226, Aug. 2012.

[271] K.-H. Chang, “Stochastic Nelder–Mead simplex method – A new globally convergent direct search method for simulation optimization,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 220, no. 3, pp. 684–694, Aug. 2012.

[272] C.-C. Hsu and C.-H. Gao, “Particle swarm optimization incorporating simplex search and center particle for global optimization,” in *2008 IEEE Conference on Soft Computing in Industrial Applications*, 2008, pp. 26–31.

[273] S. Caux, D. Wanderley-Honda, D. Hissel, and M. Fadel, “On-line energy management for HEV based on Particle Swarm Optimization,” *2010 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1–7, Sep. 2010.

[274] D. Ilea, “Conception optimale des moteurs à réluctance variable à commutation électronique pour la traction des véhicules électriques légers,” Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 2011.

[275] S. Dusmez and A. Khaligh, “A Supervisory Power Splitting Approach for a New Ultracapacitor-Battery Vehicle Deploying Two Propulsion Machines,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 3, pp. 1960–1971, 2014.

[276] S.-K. S. Fan and E. Zahara, “A hybrid simplex search and particle swarm optimization for unconstrained optimization,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 181, no. 2, pp. 527–548, Sep. 2007.

[277] M.-C. Portmann and O. Ammar, “Optimisation discrète,” 2006. [Online]. Available: http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/electronique-automatique-th13/automatique-sequentielle-42395210/optimisation-discrete-s7211/.

Résumé

Titre de thèse : Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multi-physique.

Résumé :

Ce mémoire contribue à l'amélioration des performances d'une source de stockage hybride embarquée alimentant un véhicule électrique. La solution investiguée est composée de l'association de batteries Li-ion et de supercondensateurs, dans le but d'obtenir, par rapport aux solutions classiques, un gain en masse et en durée de vie pour une certaine plage d'autonomie du véhicule. Notre objectif est de mettre à profit l'utilisation de nouvelles méthodes de gestion de la source hybride et de quantifier le gain obtenu. Un modèle multi-physique incluant les aspects électrique, thermique et vieillissement a été développé et intégré dans l'algorithme de gestion d'énergie afin d'évaluer la dégradation progressive des performances des éléments de stockage au cours des cycles de conduite selon la stratégie de gestion implantée. De nouvelles stratégies de gestion ayant pour objectif d'agir sur la durée de vie ont été évaluées. Leur impact sur les performances de la source en termes de masse, coût et durée de vie a pu être quantifié et montre bien que par une meilleure gestion des puissances, il est possible de mieux utiliser le stockeur hybride, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles approches de gestion d'énergie pour ces systèmes.

Mots clefs : Sources de stockage hybride batteries Li-ion / supercondensateurs, véhicules électriques, modèle multi-physique, dimensionnement, vieillissement, cyclage, caractérisation, stratégie de gestion d'énergie, optimisation, cycle de conduite.

Thesis title: Influence of energy management strategies on sizing and lifetime of a hybrid source for an electric vehicle by using a multi-physic model.

Abstract:

This thesis contributes to the improvement of hybrid embedded source performances supplies an electric vehicle. The studied solution is composed of Li-ion batteries and supercapacitors hybridization, with an aim to achieve improved performances in terms of weight and lifetime over traditional solutions. Our main goal is to take the best advantage of new energy management strategies of the hybrid embedded source and quantify obtained improvements. A multi-physic model including electric, thermal and aging behaviors is developed and integrated into the algorithm of energy management in order to evaluate the gradual degradation of storage components performances during driving cycles and implemented control strategy. New energy management strategies intended to act on the lifetime of hybrid embedded source have been evaluated. Their impact on the performances of the source in terms of weight, cost and lifetime has been quantified and clearly shows that it is possible to make better use of hybrid embedded source thanks to a good power sharing, thus opening the way to new approaches of energy management for these systems.

Keywords: Li-ion battery/supercapacitor hybrid energy storage source, electric vehicles, multi-physic model, sizing, aging, cycling, characterization, energy management strategy, optimization, driving cycle.