

N° d'ordre : 222

ECOLE CENTRALE DE LILLE

THESE

Présentée en vue
d'obtenir le grade de

DOCTEUR

En

Spécialité : Génie électrique

Par

Redha SADOUN

DOCTORAT DELIVRE PAR L'ECOLE CENTRALE DE LILLE

Titre de la thèse :

**Intérêt d'une Source d'Energie Electrique Hybride pour véhicule
électrique urbain – dimensionnement et tests de cyclage**

Soutenue le 03/06/2013 devant le jury d'examen :

Président	Christophe FORGEZ, Professeur, Université de Technologie de Compiègne
Rapporteur	Jean-Michel VINASSA, Professeur, Université de Bordeaux
Rapporteur	Bernard MULTON, Professeur, ENS Cachan
Examineur	Mohamed BENBOUZID, Professeur, Université de Bretagne Occidentale
Examineur	Serge PÉLISSIER, Chargé de Recherche, IFSTTAR
Examineur	Philippe GYAN, Ingénieur R&D, Renault
Co-encadrant	Nassim RIZOUG, Enseignant chercheur, ESTACA
Co-encadrant	Patrick BARTHOLOMEUS, Enseignant chercheur, Ecole Centrale de Lille
Directeur de thèse	Philippe LE MOIGNE, Professeur, Ecole Centrale de Lille

Thèse préparée dans les Laboratoires ESTACA-Mécatronique et L2EP

Ecole Doctorale SPI 072 (EC Lille)

PRES Université Lille Nord-de-France

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse sont le fruit d'une collaboration entre l'Ecole des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile (ESTACA) et le laboratoire L2EP de l'Ecole Centrale de Lille. Je tenais tout d'abord à souligner la chance qui m'a été donnée pour pouvoir travailler sur une thématique très passionnante liée à automobile. Je remercie l'ESTACA et L2EP d'avoir financé mon doctorat, de m'avoir donné les moyens humains et techniques pour réaliser ce travail et de m'avoir accueilli.

Je tiens à dire un grand merci à mon directeur de thèse monsieur Philippe Le Moigne, professeur à l'Ecole Centrale de Lille, et à monsieur Patrick Bartholomeus, maître de conférences à l'Ecole Centrale de Lille pour leurs conseils, corrections et aides précieuses qui m'ont permis de progresser tout au long de ce travail.

A monsieur Nassim Rizoug, enseignant chercheur à l'ESTACA, je dis merci infiniment pour sa disponibilité, son aide précieuse, ses connaissances scientifiques et ses qualités humaines. Qu'il trouve dans ces quelques mots l'expression de ma profonde reconnaissance.

Monsieur Christophe Forgez, professeur de l'université de Technologie de Compiègne, m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude.

Monsieur Bernard Multon, professeur à l'ENS Cachan, et monsieur Jean-Michel Vinassa, professeur de l'université de Bordeaux, ont accepté de juger mon travail et de participer à mon jury de thèse en tant que rapporteurs. Je tiens ici à leur témoigner ma reconnaissance.

J'adresse mes sincères remerciements à : monsieur Mohamed Benbouzid, Professeur à l'université de Bretagne Occidentale, monsieur Serge Pélissier, chargé de Recherche à l'IFSTTAR, et monsieur Philippe Gyan, ingénieur R&D chez Renault, pour l'honneur qu'il m'ont fait en acceptant d'examiner mon travail de thèse.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres des équipes de recherche de l'ESTACA-Laval pour leur accueil et les moments agréables passés avec eux. Merci à Nacera, Mohcine, Stéphane, Mickael, Bertrand, Tedjani, pour nos discussions, les cafés et autres moments sympas.

A toute ma famille

Et toutes les personnes que j'ai peut-être oubliées...

MERCI

Table des matières

Chapitre I : Contexte, état de l'art et problématique

I.1. Contexte actuel de l'automobile	18
I.1.1. Quelle place pour l'automobile ?	18
I.1.2. Problèmes énergétiques	19
I.1.3. Pollutions dues au transport routier	19
I.1.3.1. Les Gaz à Effet de Serre (GES)	20
I.1.3.2. Pollution locale	21
I.1.4. Aspects réglementaires et technologiques	22
I.1.4.1. Aspects règlementaires	22
I.1.4.2. Les progrès technologiques	23
I.2. Electrification de la chaîne de traction	24
I.2.1. Véhicule Electrique Hybride (VEH)	24
I.2.1.1. Architectures des VEHS	24
A. Hybride série	25
B. Hybride parallèle	25
C. Hybride série/parallèle	25
I.2.1.2. Catégories par niveau d'hybridation	25
A. Le Micro hybrid	26
B. Mild hybrid	26
C. Full hybrid	27
D. Le Plug-in hybrid	27
I.2.2. Véhicule électrique (VE)	27
I.2.1.3. Réalisations actuelles	28
I.2.1.4. Stockage d'énergie, point faible ?	28
I.3. Systèmes de stockage d'énergie électrique	29
I.3.1. Batterie Li-ion	29
I.3.1.1. Fonctionnement et technologies	29
A. L'électrolyte	30
B. L'électrode négative	31
C. L'électrode positive	31
I.3.1.2. Grandeurs caractéristiques des batteries	32
A. La capacité	32
B. Régimes de courants de charge/décharge	33
I.3.1.3. Surveillance de la batterie	33
A. État de charge (State Of Charge-SOC)	33
B. État de santé (State Of Health-SOH)	34
I.3.1.4. Vieillessement des batteries Li-ion	35
A. La durée de vie calendaire	35
A. La durée de vie en cyclage	35
I.3.2. Le supercondensateur	36
I.3.2.1. Fonctionnement	36
I.3.2.2. Caractéristiques	37
I.4. Hybridation des sources d'énergie	37
I.4.1. Association batterie Li-ion/ supercondensateur	38
I.4.1.1. Architecture en cascade avec un convertisseur DC/DC	38
I.4.1.2. Architecture en cascade avec deux convertisseurs DC/DC	38
I.4.1.3. Architecture parallèle avec deux convertisseurs DC/DC	39
I.4.2. Stratégies de gestion de l'énergie	39
I.4.2.1. Stratégies de gestion à base de règles	40
I.4.2.2. Stratégies à base d'optimisation	41
I.5. Conclusion	41

Chapitre II : dimensionnement des sources d'énergie hybrides

II.1. Cahier des charges	44
II.1.1. Cycles de conduite	44
II.2.1.1. Cycle NEDC	44

II.2.1.2.	Cycle ARTEMIS.....	45
II.1.2	Caractéristiques et consommations du VE	45
II.2.1	Dynamique du VE.....	46
II.1.3	Influence de la masse de la SSE sur la consommation du VE.....	47
II.1.4	Architecture de la SEH.....	48
II.1.5	Caractéristiques des batteries et des supercondensateurs étudiés	49
II.1.5.1	Les batteries Li-ion	49
II.1.5.2	Supercondensateur	51
II.2.	Dimensionnement de la source d'énergie du VE	52
II.2.1	Approche générale de dimensionnement des batteries	52
II.2.2	Alimentation du VE par les batteries seules	54
II.2.2.1	Algorithme de dimensionnement du pack de batteries	54
II.2.2.2	Analyse des résultats du dimensionnement :	55
II.2.3	Alimentation du VE par une Source d'Energie Hybride (SEH).....	58
II.2.3.1	Gestion de l'énergie « avec limitation de puissance ».....	58
a.	Principe	58
b.	Algorithme de contrôle des puissances	60
II.2.3.2	Démarche de dimensionnement du pack de supercondensateurs	62
II.2.3.3	Démarche de dimensionnement du convertisseur DC/DC	63
a.	L'inductance	63
b.	Le dissipateur thermique	64
II.2.3.4	Algorithme de dimensionnement de la SEH	66
II.2.3.5	Résultats de dimensionnement de la SEH.....	67
II.2.3.6	Analyse des contraintes physiques des cellules de batteries.....	69
a.	Les contraintes physiques	69
b.	Analyse et comparaison	70
II.2.4	Comparaison SEH vs Batteries seules.....	71
II.3.	Etude de l'influence de certains paramètres sur le dimensionnement de la SEH	73
II.3.1	Influence du cycle de conduite	73
II.3.2	Combinaison des batteries Li-ion avec des batteries « Ultra Haute Puissance ».....	74
II.3.3	Influence de la tension du bus continu	76
II.3.4	Influence de la stratégie de gestion d'énergie	78
II.3.4.1	Principe de la gestion énergétique fréquentielle.....	78
II.3.4.2	Comparaison des résultats de dimensionnement : stratégie de Filtrage vs Limitation de puissance	80
II.3.5	Récapitulatif des comparaisons	82
II.4.	Conclusion.....	82

Chapitre III: Etude expérimentale du vieillissement des batteries Li-ion

III.1.	Introduction	85
III.2.	Les cellules de batteries Li-ion testées.....	85
III.3.	Banc de tests.....	87
III.3.1.	Acquisition des données	89
III.3.2.	pilotage et surveillance du banc de test	89
III.4.	Modélisation des batteries Li-ion	90
III.4.1.	Modèle de base.....	90
III.4.2.	Modèle de Thévenin.....	90
III.4.3.	Modèle à impédance de Warburg.....	91
III.4.4.	Modèle générique pour la simulation dynamique	91
III.5.	Protocole de test de vieillissement en cyclage des batteries Li-ion	94
III.5.1.	Norme de la Commission Internationale d'Electrotechnique (CEI).....	94
III.5.2.	Profils de cyclage accéléré basé sur le cycle d'usage réel du VE.....	96
III.5.2.1.	Grandeurs caractéristiques	96
III.5.2.2.	Création des profils de cyclage.....	97
III.5.3.	Profil de recharge des batteries.....	100
III.5.4.	Cycle de caractérisation.....	101
III.5.4.1.	Mesure de la capacité	101
III.5.4.2.	Mesures de la résistance interne	102
III.5.5.	Récapitulatif du protocole de test.....	103
III.6.	Quantification du vieillissement des cellules de batteries Li-ion testées	104
III.6.1.	Spécifications fournies par le fabricant	104

III.6.1.1.	Pertes de capacité en cyclage	104
III.6.1.2.	Caractéristiques thermiques	104
III.6.2.	Résultats expérimentaux des cellules de batteries Li-ion testées.....	105
III.6.2.1.	Comportement thermique en cyclage	105
III.6.2.2.	Comportement thermique pendant la caractérisation	107
III.6.2.3.	Estimation de vieillissement	108
III.7.	Conclusion	109
	Conclusion générale et perspective.....	112
	Annexes	116

Liste des figures

Figure.I. 3 :	comparaison des valeurs limites d'émissions des voitures dans l'Union Européenne, au Japon et aux Etats-Unis.....	23
Figure.I. 4 :	les familles de véhicules hybrides et électriques, [38].	26
Figure.I. 5 :	architecture de la chaîne de traction d'un VE.....	27
Figure.I. 6 :	principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion, [53].	30
Figure.I. 7 :	matériaux actuellement utilisés dans les accumulateurs Li-ion, [55], [56].....	31
Figure.I. 8 :	plage de SOC des batteries utilisées dans le domaine automobile, [58].	34
Figure.I. 9 :	variation en fonction de la température de la résistance interne et de la capacité d'une batterie Li-ion, cas du vieillissement calendaire, [60].	35
Figure.I. 11 :	schéma de principe d'un supercondensateur, [62].....	36
Figure.I. 12 :	niveau de performances des supercondensateurs (a), des batteries Li-ion (b) et des VE en 2010 et 2020 (c). [56], [55].	37
Figure.I. 13 :	architectures en cascade avec un convertisseur DC/DC.....	38
Figure.I. 14 :	architecture série avec deux convertisseurs DC/DC.....	39
Figure.I. 15 :	architecture parallèle avec deux convertisseurs DC/DC	39
Figure.I. 16 :	classification des stratégies de gestion d'énergie, [70], [71]	40
Figure.II.1 :	(A) cycle de conduite ARTEMIS, (B) cycle de conduite NEDC.....	45
Figure.II. 2 :	forces sur un VE en roulement.....	46
Figure.II. 3 :	profils de puissance et d'énergie nécessaires pour un VE (cycle ARTEMIS sur 150km)	47
Figure.II. 4 :	(A) influence de la masse du SSE sur la consommation d'un VE. (B) variations des contraintes maximales en fonction du poids du SSE.....	48
Figure.II. 5 :	structure d'hybridation batteries Li-ion/supercondensateurs étudiée.....	49
Figure.II. 6 :	chaîne d'assemblage de batteries pour VE : de la cellule au pack, [86].....	50
Figure.II. 7 :	critères pris en compte pour le dimensionnement d'un pack batteries d'un VE.	53
Figure.II. 8 :	algorithme de dimensionnement-cas d'alimentation du VE par des batteries « seules ».	55
Figure.II. 9 :	résultats de dimensionnement batteries "seules" en fonction de l'autonomie. (A) Masses, (B) volumes	56
Figure.II. 10 :	résultats de dimensionnement batteries "seules" en fonction de l'autonomie. (A) Coûts, (B) Tension du bus continu	56
Figure.II. 11 :	dimensionnement batteries "seules" en fonction de l'autonomie. Masses des batteries (A) Ko40HP, (B) Ko40HE	57
Figure.II. 12 :	quantité d'énergie non récupérée par les packs de batteries.....	57
Figure.II. 13 :	principe de fonctionnement de la méthode de gestion d'énergie « avec limitation de puissance ».....	58
Figure.II. 14 :	(A) profil de puissance du VE distribuée sur les batteries et les supercaps. (B) énergie consommée par le VE	59
Figure.II. 15 :	(A) profils de puissance des batteries avant et après gestion du SOC des supercaps, (B) énergie consommée par le VE et énergie demandée aux batteries	60
Figure.II. 16 :	(A) profils de puissance des SuperCaps avant et après gestion du SOC, (B) variation d'énergie des SuperCaps	60
Figure.II. 17 :	définition des modes de fonctionnement du VE.	61
Figure.II. 18 :	contrôle de la puissance en mode « traction ».....	61
Figure.II. 19 :	contrôle de la puissance en mode « freinage ».....	61
Figure.II. 20 :	contrôle de la puissance en mode « arrêt».....	62
Figure.II. 21 :	Influence de la masse sur la variation de : (A) la puissance, (B) l'énergie du supercondensateur	62
Figure.II. 22 :	hacheur « Boost ».....	63
Figure.II. 24 :	longueur de dissipateur en fonction de la résistance thermique	65
Figure.II. 25 :	algorithme de dimensionnement - cas d'alimentation du VE par une SEH.....	67
Figure.II. 26 :	résultats de dimensionnement de SEHs en fonction de l'autonomie. (A) Masses, (B) volumes	68
Figure.II. 27 :	résultats de dimensionnement de SEHs en fonction de l'autonomie. (A) coûts, (B) tension du bus continu.	68

Figure.II. 28: résultats dimensionnement de SEHs en fonction de l'autonomie. Masses des batteries (A) Ko40HP, (B) Ko40HE	69
Figure.II. 29 : puissances moyenne (A) et efficace (B) assurées par les batteries.....	70
Figure.II. 30 : puissances moyenne (A) et efficace (B) consommées, assurées par le pack de batteries.	70
Figure.II. 32: évolution des masses des batteries en fonction de l'autonomie désirée. (A) cas des batteries HP. (B) cas des batteries HE	71
Figure.II. 33: masse des batteries HP (cas de dimensionnement "seules") et batteries HE (cas de dimensionnement avec SEHs).....	72
Figure.II. 34 : masses de batteries, supercondensateur et hacheur pour un dimensionnement selon les cycles de conduite ARTEMIS et NEDC.....	73
Figure.II. 35 : (A) volume et (B) coût de la SEHs pour un dimensionnement selon les cycles de conduites ARTEMIS et NEDC.....	74
Figure.II. 36 : masse de batteries, supercondensateur ou des batteries UHP et hacheur pour un dimensionnement SEH.....	75
Figure.II. 37 : gains en masse, volume et coût avec l'utilisation des batteries UHP en remplacement des Supercaps.	76
Figure.II. 38: organigramme de dimensionnement en fonction de la tension du bus continu	77
Figure.II. 39 : masses des SEHs en fonction la tension du bus continu	77
Figure.II. 40: (A) Volume, (B) coût des SEHs en fonction de la tension du bus continu.	78
Figure.II. 41 : principe de la stratégie énergétique fréquentielle.....	79
Figure.II. 42: profils de puissance et énergie issus du filtrage. (A) batteries, (B) SuperCaps.....	79
Figure.II. 43: intégration de la limitation de puissance et la gestion du SOC des SuperCaps dans la stratégie de gestion fréquentielle.....	80
Figure.II. 44: profils de puissance et énergie après gestion du SOC des SuperCaps. (A) batteries, (B) SuperCaps. ..	80
Figure.II. 45 : masses de batteries, supercondensateur et hacheur pour un dimensionnement avec les stratégies de gestion « fréquentielle » et « limitation de puissance ».....	81
Figure.II. 46: (A) volume et (B) coût des SEHs selon les stratégies de gestion « fréquentielle » et « limitation de puissance ».....	81
Figure.II. 47: synthèse des performances et des contraintes appliquées des batteries Ko40HP et KO40HE pour un dimensionnement de SEHs avec « limitation de puissance ».....	83
Figure.III. 1 : profils de puissance des packs de batteries : (A) Ko40HP, (B) Ko40HE, pour 150km d'autonomie ...	86
Figure.III. 2: exemple de cellule de batterie testée, positionnement des capteurs de températures	86
Figure.III. 3 : schéma synoptique du banc de test (600A, 60V, 40kHz)	87
Figure.III. 4 : (A) étuve, (B) banc de test.....	88
Figure.III. 5 : contrôle de cyclage des cellules de batteries.....	89
Figure.III. 6 : interface IHM pour pilotage et surveillance du banc de test.....	89
Figure.III. 7 : modèle de résistance interne.....	90
Figure.III. 8 : modèle de Thévenin.....	90
Figure.III. 9 modèle de Randles d'une batterie. (A) circuit équivalent, (B) diagramme de Nyquist, [103].....	91
Figure.III. 10 : (A) modèle générique d'une batterie. (B) Courbe de décharge à courant constant, [104].....	92
Figure.III. 11 : variation de la tension pour une décharge à 1C (40A), comparaison des résultats expérimentaux avec la simulation du modèle identifié.	93
Figure.III. 13 : Protocole d'essai de durée de vie relatif à l'application VE, [108].....	95
Figure.III. 14 : essais de durée de vie pour batterie VE (A) profil-A de décharge dynamique. (B) profil-B de décharge dynamique incluant une pente, [108].....	95
Figure.III. 15 : essais de durée de vie pour batterie VEH. (A) profil de décharge dynamique. (B) profil de charge dynamique, [108]	95
Figure.III. 16 : Exemple de sollicitations d'un VE (Peugeot iOn) en roulage et son découpage en segments de 5 secondes, [110].	97
Figure.III. 17 : exemple simplifié de contraintes (puissance, énergie) appliquée à une cellule de batterie. (A) profil réel. (B) profil de cyclage après classification et simplification.	97
Figure.III. 18 : profil de courant de cyclage superposé avec le profil de courant réel (issu du dimensionnement). (A) courants de cyclage d'une cellule HP. (B) courants de cyclage d'une cellule HE.	98
Figure.III. 19 : courant de cyclage de référence et mesuré des batteries HP (A) et HE (B).....	99
Figure.III. 20 : variation de la tension pendant le cyclage des cellules de batteries HP (A) et HE (B). Comparaison des résultats expérimentaux avec la simulation.	99
Figure.III.21 : évolution du SOC d'une cellule de batteries HP (A) et HE (B). SOC en fonction du profil réel et le profil de cyclage.....	100
Figure.III. 22 : courant et tension des cellules de batteries HP (A) et HE (B) pendant la recharge à CC/CV.....	100
Figure.III. 23 : profils de courant de caractérisation des cellules de batterie HP (A) et HE (B)	101
Figure.III. 24 : variation des tensions des cellules de batteries HP (A) et HE (B) pendant la caractérisation.....	101

Figure.III. 25 : profil de courant et de tension d'une cellule de batterie durant le cycle charge/décharge de caractérisation. UE décharge à I_c (40A) et une recharge à CC/CV (Constant Current/ Constant Voltage) ont été utilisées.	102
Figure.III. 26 : organigramme des séquences d'essais de vieillissement en cyclage.	103
Figure.III. 27 : variation de la capacité en fonction du nombre de cycles d'une cellule de batterie Li-ion Kokam, [85]	104
Figure.III. 28 : température des technologies de batteries en fonction des régimes de courants, [85]	105
Figure.III. 29 : température des cellules Ko40HP et Ko40HE mesurées par les capteurs a, b et c pendant le cyclage	106
Figure.III. 30 : comparaison de l'évolution de la température des cellules Ko540HP et Ko40HE pendant le cyclage.	106
Figure.III. 31 : température des cellules Ko40HP et Ko40HE mesurées par les capteurs a, b et c pendant la caractérisation	107
Figure.III. 32 : comparaison de l'évolution de la température des cellules Ko540HP et Ko40HE pendant la caractérisation.	107
Figure.III. 33 : variation de la capacité en fonction du nombre de cycles.....	108
Figure.III. 34 : évolution de la résistance interne en fonction de du nombre de cycles	109

Liste des tableaux

Tableau.II. 2: données fabricants des batteries Li-ion étudiées, [85], [86].	49
Tableau.II. 3: données fabricants du supercondensateur, [87]	51
Tableau.II. 4: paramètres de calcul de l'inductance, [91].	64
Tableau.III. 1 : valeurs des contraintes des puissances moyennes et efficaces pour 150km d'autonomie	86
Tableau.III. 2 : paramètres du modèle générique d'une cellule de batterie.....	93
Tableau.III. 3 : comparaison des courants réel et de cyclage des cellules de batteries Ko40HP et KO40HE.....	99

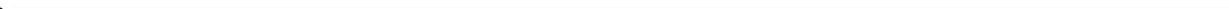
Liste des abréviations

ΔE_{Sc}^W	Variation de l'énergie du Supercap dimensionnante en fonction du poids
$C_{actuelle}^{tot}$	Capacité totale mesurée à l'état actuel de la batterie (après utilisation)
C_{neuve}^{tot}	Capacité totale de la batterie avant utilisation (état neuf)
E_{bat}^i	Energie de la cellule de batterie à l'instant i de cyclage.
E_{cha}^i	Energie nécessaire pour recharger la cellule de batterie à l'instant i de cyclage.
E_{dech}^0	Energie d'une cellule de batterie restituée par une décharge au début de cyclage.
E_{dech}^i	Energie d'une cellule de batterie restituée par une décharge à l'instant i de cyclage
$I_{el,B}^C$	Courant maximal de charge d'une cellule de batterie
$I_{el,B}^D$	Courant maximal de décharge d'une cellule de batterie
P_{Bat}^C	Puissance maximale de charge d'une cellule de batterie
P_{Bat}^D	Puissance maximale de décharge d'une cellule de batterie
γ_{Sc}^C	Facteur de variation de la puissance des Supercaps récupérée en fonction du poids
γ_{Sc}^D	Facteur de variation de la puissance consommée des Supercaps en fonction du poids
$\eta_{P,W}^{rec}$	Facteur de variation de la puissance récupérée des batteries en fonction du poids
$\eta_{P,W}^{cons}$	Facteur de variation de la puissance consommée des batteries en fonction du poids
ΔC^i	Variation de la capacité d'un élément de batterie à l'instant i de cyclage
ΔE_{Sc}	Energie dimensionnante du pack de supercondensateurs
$\Delta E_{V,cons}$	Variation de l'énergie consommée par le VE en fonction du poids
ΔP_V	Variation de la puissance totale du VE en fonction du poids
$\Delta P_{V,cons}$	Variation de la puissance consommée en fonction du poids
$\Delta P_{V,rec}$	Variation de la puissance récupérée en fonction du poids
ΔT	durée de temps qui sépare deux valeurs successives de courant
ΔTh	

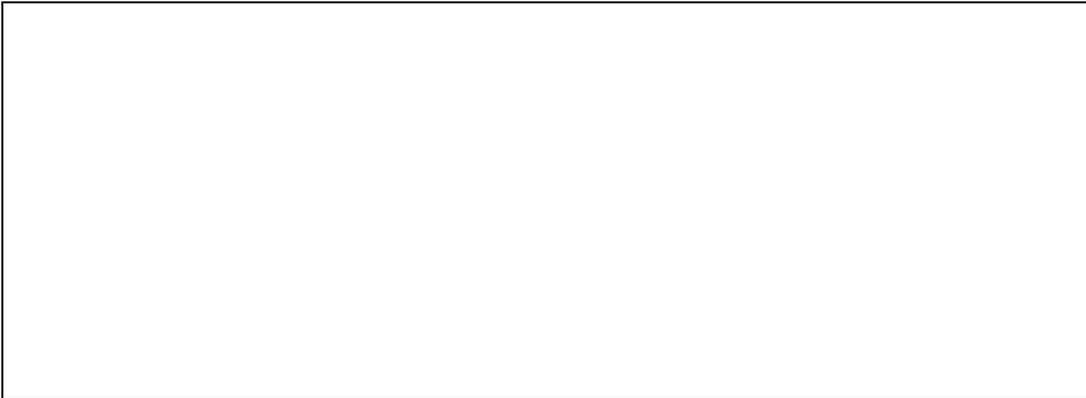
a	Variation de la température admissible par le dissipateur de chaleur
A	Rapport cyclique
A_e	Chute de la tension dans la zone exponentielle.
B	Section du circuit magnétique
C_0	Constate de temps inverse dans la zone exponentielle
C_1	Coefficient de résistance au roulement curviligne
$C_{actuelle}$	Coefficient de résistance au roulement rectiligne
C_{el_B}	Capacité des batteries mesurées à état de charge fixe
C_{el_Sc}	Capacité nominale d'un élément (cellule) de batterie
C_{exp}	Capacité nominale d'un élément de supercondensateur
C_{nom}	Capacité à la fin de la zone exponentielle
$Coût_{Bat}$	Capacité nominale
$Coût_{conv}$	Coût du pack de batteries
$Coût_{el_B}$	Coût du convertisseur DC/DC.
C_T	Coût d'un élément de batterie
C_{totale}	Couple mécanique total appliqué pour le déplacement du véhicule
C_x	Capacité des batteries complètement chargée.
d_E	Coefficient de pénétration dans l'air
DOD	Densité d'énergie
d_p	Profondeur de décharge (Depth Of Discharge)
E_{Bat}	Densité de puissance
E_{exp}	Energie disponible dans un pack de batteries
E_{max}	Tension de la fin de la zone exponentielle
E_{nom}	Tension maximale d'une cellule de batterie
E_{Sc}	Tension nominale d'une batterie
E_{Sc_max}	Energie disponible dans un pack de supercondensateurs
E_{Sc_min}	Maximum d'énergie fournie par le pack de supercondensateurs
E_{V_cons}	Maximum d'énergie récupérée (de signe négatif) par le pack de supercondensateurs
F_{aero}	Energie consommée par le véhicule électrique
F_c	Force aérodynamique
F_{gx}	Fréquence de coupure
F_{roue}	Force aux roues
F_T	Force de traction
g	Constante de champ de gravitationnel (9.81 m/s^2)
I	Courant
$I_{déch}$	Courant de décharge
I_{eff_Sc}	Courant efficace traversant le pack de supercondensateurs
I_{max}	Courant maximal
I_{max_Sc}	Courant maximal du pack de supercondensateurs
I_n	Courant du maximal du niveau n
I_{ni}	Courant d'indice i du niveau n
J	Densité de courant
K	Coefficient de polarisation de la tension
k_1	Coefficient de proportionnalité Inductance / poids
k_2	Coefficient de proportionnalité Poids/Volume
L	

L_d	Inductance
M_{SSE}	Longueur du dissipateur thermique
M_{VE}	Masse du système de stockage d'énergie
n	Masse du véhicule électrique (sans le poids de la source d'énergie électrique)
N	Indice de niveau d'intensité de courant
N_{P_B}	Nombre de niveau d'intensité de courant et nombre totale de classe n
N_{P_Sc}	Nombre de branches de batteries (parallèles)
N_{S_B}	Nombre de branches de supercondensateurs
N_{S_Sc}	Nombre d'éléments de batteries en série
P_n	Nombre d'éléments de supercondensateurs en série
P_v	Nombre d'individu dans chaque classe n
$Q(n)$	Puissance du véhicule
r	Quantité d'énergie échangée au niveau n
R_{0_elB}	Rayon de la roue
R_{ch}	Résistance interne d'un élément de batterie
$R_{dé}$	Régime de charge
R^i	Régime de décharge
R_{th}	Résistance interne d'un élément de batterie à l'instant i du cyclage
s	Résistance thermique
S_b	Surface frontale du véhicule
SEH	Surface de bobinage disponible.
SOC	Source d'Energie Hybride
SOH	Etat de charge (State Of Charge)
T(n)	État de santé (State Of Health)
t_c	Temps maximal du niveau n
t_{cy}	Durée (temps) de la phase de recharge
t_D	Durée du cycle de consommation (cycle de conduite)
t_{nom}	Durée de la phase de décharge
U_{Bus}	Temps de la tension nominale
U_{el_B}	Tension du bus continu
U_{Sc_max}	Tension nominale d'un élément de batterie
U_{Sc_min}	Tension maximale du pack de supercondensateurs
V_{Sc}	Tension minimale du pack de supercondensateur
V_{Bat}	Volume du pack de supercondensateurs
V_D	Volume du pack de batteries
VE	Volume du dissipateur thermique
VEH	Véhicule Electrique
V_{el_B}	Véhicule Electrique Hybride
V_{el_Sc}	Volume d'un élément de batteries
V_{VEH}	Volume d'un élément de supercondensateur
W_{Bat}	Vitesse du véhicule
W_D	Poids du pack de batteries
W_{el_B}	Poids de dissipateur de chaleur
W_{el-Sc}	Poids d'un élément de batterie
W_{Sc}	Poids d'un élément de supercondensateur
W_{SSE}	Poids du pack de supercondensateurs

α	Poids du système de stockage d'énergie
β_{\max}	Coefficient de foisonnement
η_{E_W}	Induction maximale
ρ	Facteur de variation de l'énergie consommée par le VE en fonction du poids
Ω_{roue}	Densité de l'air (kg/m ³) Vitesse de rotation de la roue



Introduction générale



Dans son rapport de 2007, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur L'Evolution du Climat (GEIC) estimait que la température de la planète pourrait s'élever de 1.8°C à 4°C d'ici la fin du 21^{ème} siècle. Cette hausse des températures, liée à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, notamment le dioxyde de carbone (CO₂), provoquent un accroissement de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles climatiques, la destruction de certains écosystèmes et la fonte massive des glaciers. À titre indicatif et selon le Centre National de Données sur la neige et la glace (NSIDC), la fonte des glaces a provoqué en 2008 une baisse de 33% de la surface de la banquise Arctique par rapport à la moyenne de surface minimum mesurée entre 1979 et 2000. Avec cette disparition des glaciers, c'est une partie importante de l'eau douce disponible en surface qui disparaît également.

Actuellement, le secteur des transports est à l'origine de 27% des émissions mondiales de CO₂. Il représente ainsi l'une des principales causes du réchauffement de notre planète. Pour réduire ces émissions, de nombreuses politiques ont été engagées afin d'améliorer l'efficacité énergétique des moteurs thermiques. La norme instaurée par la commission européenne, qui revoit à la baisse tous les quatre ans les émissions des véhicules neufs, et le dispositif du type « bonus-malus » écologique mis en place par le gouvernement français sont parmi les mesures qui ont poussé les constructeurs automobiles à l'amélioration des moteurs thermiques. Avec de tels dispositifs, l'Europe espère réduire de 20% les émissions de CO₂ dans le domaine du transport. Néanmoins les progrès réalisés sont insuffisants et une réelle mutation technologique est devenue nécessaire. Cette problématique est d'autant plus préoccupante que le parc automobile des pays émergents (Chine, Inde, Brésil...) est en très forte croissance. Il est donc vital de baser nos besoins énergétiques sur des sources d'énergies alternatives aux ressources fossiles productrices de CO₂ et qui sont de plus en plus coûteuses à exploiter.

C'est dans ce contexte que les constructeurs automobiles orientent leurs travaux de recherche & développement vers l'électrification des chaînes de traction. Les véhicules hybrides alliant moteur électrique et moteur thermique sont une bonne alternative afin d'augmenter le rendement des chaînes de traction. En revanche, la véritable rupture technologique n'est possible qu'avec des motorisations toutes électriques utilisant des sources d'énergie renouvelable.

Pour l'instant, les procédés de stockage d'énergie utilisés dans les véhicules tout électriques ne permettent pas de rivaliser avec leurs homologues thermiques : faible autonomie, longues périodes de recharge, prix d'achat important, etc.... Il est donc essentiel de lever ce verrou technologique pour permettre le développement des voitures électriques (VE).

Les batteries utilisées dans les VE de dernière génération sont basées sur la technologie Lithium-ion (Li-ion). C'est parce qu'elle a une énergie spécifique élevée ($\approx 140\text{Wh/kg}$) que cette technologie s'est imposée sur le marché de la téléphonie mobile, informatique et maintenant de l'automobile. Cependant, ces performances en termes de temps de recharge, de durée de vie, coûts, et même d'énergie spécifique doivent progresser davantage pour pouvoir remplacer les carburants d'origine fossile (essence et diesel) dont le pouvoir énergétique est supérieur à 12kWh/kg .

La transition énergétique dans le domaine du transport individuel passe d'abord par des changements de mode de pensée : A-t-on besoin d'autonomies aussi importantes dans nos déplacements de tous les jours ? Comment exploiter les temps d'arrêt du véhicule pour la

recharge des batteries?...etc. Mais cette transition énergétique passe également par des améliorations technologiques, principalement sur le stockage de l'énergie électrique.

Il existe des pistes pour améliorer les performances des sources d'énergie. Cela passe par le développement de nouveaux matériaux plus stables chimiquement et capable d'être produits à grande échelle et à faible coût. Des procédés prometteurs sont actuellement en développement [55]. Cependant, l'application VE est un domaine d'application assez particulier puisqu'il nécessite à la fois une forte autonomie mais également un besoin en puissance important. Celui-ci a tendance à n'être pas compatible avec les systèmes de stockage existants ou en cours de développement comme le montre la Figure.I.G. A titre d'exemple, nous avons placé sur ce graphe les performances d'une batterie d'un VE 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. On peut remarquer qu'il n'existe pas de sources d'énergie capables de convenir à cette application. La seule solution envisageable est la combinaison de deux sources complémentaires. C'est le principe d'hybridation des sources d'énergie électrique.

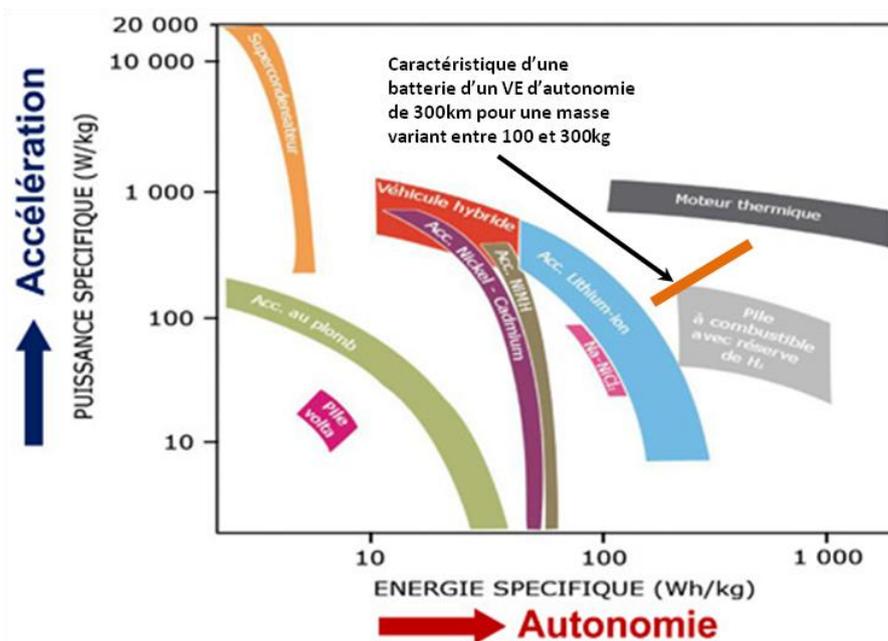


Figure.I.G : Diagramme de Ragone permettant de comparer les performances énergétiques de différents systèmes dans le cadre de la propulsion des véhicules automobiles,[1]

Le travail présenté dans ce rapport s'inscrit dans cette approche et concerne l'hybridation des batteries Li-ion avec une source de puissance, notamment le supercondensateur, pour l'alimentation d'un véhicule tout électrique.

Dans le domaine du transport, l'aspect d'hybridation a été initialement consacré à l'étude de la gestion d'énergie entre une source fossile et une source d'énergie électrique et à l'amélioration des performances des moteurs thermiques en présence d'un moteur électrique auxiliaire. Cependant dans cette étude, l'hybridation (batteries Li-ion/supercondensateurs) vise à améliorer les performances en termes de masse, volume, coût et durée de vie de la source d'énergie embarquée dans un véhicule électrique (VE).

Ce travail de thèse s'intéresse au dimensionnement des sources de stockage d'énergie et à l'étude du vieillissement des batteries Li-ion d'un véhicule électrique. L'étude portera essentiellement sur la comparaison des batteries Li-ion de type Haute densité de Puissance (HP)

d'une part, et de type Haute densité d'Énergie (HE) d'autre part, et sur l'influence de l'hybridation sur leurs durées de vie. De manière plus précise, ce manuscrit est structuré en trois chapitres.

Le premier chapitre est dédié à une étude bibliographique concernant l'électrification de chaînes de traction. Le rôle de l'automobile, les mesures réglementaires et les progrès technologiques pour faire face aux problèmes environnementaux introduisent ce chapitre. Nous y présentons en détail le fonctionnement et les caractéristiques des chaînes de traction de véhicules hybrides et électriques avec des exemples de réalisations actuelles. Les technologies de batteries et de supercondensateurs, leurs avantages et leurs limites sont également présentés. La dernière partie de ce chapitre traite de l'aspect hybridation du point de vue architectures d'association de source de stockage et stratégies de gestion de l'énergie.

Le deuxième chapitre est consacré au dimensionnement de sources d'énergie hybride associant batteries Li-ion Haute Énergie et supercondensateurs. Une méthode de gestion d'énergie originale, basée sur l'approche des règles déterministes et les régimes de charge/décharge des batteries Li-ion, est développée. Ce chapitre présente les résultats de dimensionnement utilisant cette stratégie dans le cas de sources hybrides et compare les résultats de dimensionnement des batteries Li-ion alimentant seules le véhicule électrique. Ce chapitre montre également l'influence des paramètres du cahier des charges (cycle de conduite, stratégie de gestion d'énergie, tension d'alimentation) sur le dimensionnement, réalise l'étude de l'intérêt de l'hybridation en termes de masse, volume et coût, et compare les contraintes physiques appliquées aux batteries.

Le troisième chapitre traite l'étude expérimentale du vieillissement des batteries Li-ion. Le choix des batteries Li-ion testées et les contraintes physiques auxquelles elles sont soumises pendant le cyclage, sont issus des résultats du chapitre II. La première partie de ce chapitre présente le banc de test développé au laboratoire de l'équipe *ESTACA-Mécatronique*, ainsi que son fonctionnement. Nous détaillons ensuite le protocole de test des batteries et particulièrement la méthode de création des profils de cyclage à partir des profils d'usage réel. Des résultats montrant l'évolution des caractéristiques, notamment la capacité et la résistance interne, des cellules de batteries sont présentés.

Chapitre I : Contexte, état de l'art et problématique.

- 1. Contexte actuel de l'automobile**
- 2. Electrification de la chaine de traction**
- 3. Systèmes de stockage d'énergie électrique**
- 4. Hybridation des sources d'énergie**

I.1. Contexte actuel de l'automobile

En introduction de ce premier chapitre, la première partie est dédiée à la définition du rôle, à la fois positif et négatif, que joue le secteur de transport routier, plus précisément l'automobile, dans notre quotidien. Nous allons réaliser un bilan des problèmes énergétiques et environnementaux liés à l'utilisation de ressources d'énergie fossile par les véhicules thermiques traditionnels. Par la suite, nous évoquerons les démarches politiques et les progrès technologiques effectués pour améliorer les véhicules particuliers.

I.1.1. Quelle place pour l'automobile ?

Le transport est, par définition, l'action de déplacer quelque chose, ou quelqu'un, d'un endroit à un autre, c'est donc consommateur d'énergie. La révolution industrielle fut l'ère des changements profonds des activités socio-économiques des populations, l'innovation apportée dans le domaine des transports est l'une des causes majeures de ces mutations. Grâce à l'invention, au XIXe siècle, de la machine à vapeur puis du moteur à combustion interne, le transport devient alors un des piliers de nos sociétés modernes. En effet, cette période est, notamment, marquée par l'apparition de l'automobile qui a amélioré la mobilité des individus et qui s'est imposée comme le mode de transport le plus utilisé dans les pays développés. Aujourd'hui dans les pays de l'OCDE¹, près de 50% des déplacements sont réalisés en voiture, Figure.I.1, [2]. De ce fait, le parc automobile mondial est passé de 34 millions de véhicules à plus de 700 millions entre 1938 et 2000, [3]. Selon le PwC pour PricewaterhouseCoopers, la production mondiale d'automobiles a progressé de 8.8% entre 2011 et 2012, [4].

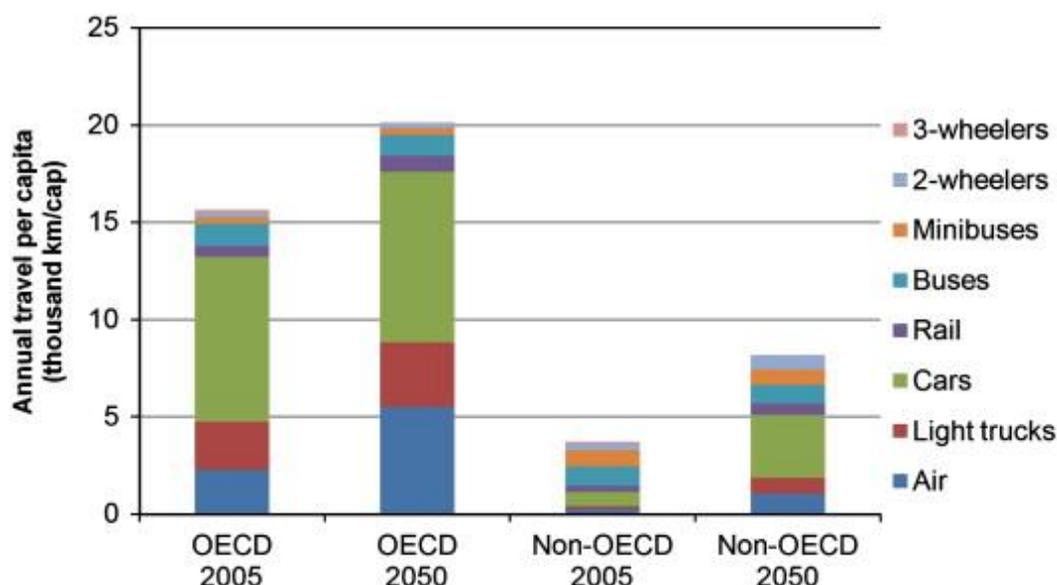


Figure.I. 1 : répartition des modes de transport de voyageurs dans les pays de L'OCDE, [2].

En Europe, le taux de ménages possédant une voiture était de 80% en 2007 contre 21% dans les années 50, [5], [6]. En moyenne, un ménage européen réserve un budget de 13.6% pour les transports (tout mode confondu) et la part du budget des ménages français se situe un peu au-dessus de cette moyenne, environ 14.9%. Les dépenses liées à l'achat et l'utilisation de la voiture

¹ OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques, créée en 1948 par 18 pays européen, les Etats Unis et la Turquie. Aujourd'hui elle compte 34 pays membres.

sont les plus importantes puisque la voiture est le mode «principal²» dans 65% des déplacements quotidiens (travail, études, loisirs ...) des citoyens français, [7].

Cependant, le succès qu'a connu le secteur automobile est accompagné par des problèmes énergétiques et environnementaux qui ne cessent de s'aggraver.

I.1.2. Problèmes énergétiques

Les hydrocarbures (pétrole et gaz) représentent 60% de l'approvisionnement mondial en énergie, [8]. Le transport domine le bilan énergétique et la majorité des carburants utilisés dans ce secteur sont des combustibles liquides issus du pétrole. Le transport routier, de personnes et de marchandises, affiche une dépendance au pétrole de 97% et représente 58% de la consommation mondiale, [9].

Les experts d'Exxon³ et de l'Agence Internationale de l'Energie⁴ prévoient une augmentation de 70% de la demande en énergie fossile par le secteur des transports routiers d'ici 2040, [10]. Le développement économique des pays comme la Chine et l'Inde, entrainera une amélioration du pouvoir d'achat de leurs populations et un accès plus large à l'automobile et aux déplacements en général. Dans ces pays, la demande d'énergie devrait presque doubler et la production mondiale de pétrole devrait passer de 93 à 170.6 millions de barils par jour (Mb/j) sur la période allant de 2011 à 2020, soit une augmentation de la demande d'environ 18%, [11].

Face aux chiffres cités ci-dessus, qui traduisent la dépendance et la demande grandissante du pétrole, ce dernier devient une source d'inquiétude et de tensions géopolitiques. En effet, les chocs pétroliers de 1973 et 1979 sont témoins de la guerre israélienne et de la révolution iranienne, ainsi que de la flambée des prix du baril de pétrole avec des hausses de 160% et de 108% pendant les deux crises respectivement. Cependant, le summum des prix du pétrole (147\$/baril) a été enregistré en 2008 appelé, par certains spécialistes, le 3^{ème} choc pétrolier dû à une demande supérieure à la production.

Plus tard, malgré une demande plus importante, la production du pétrole va finir par baisser à cause de la difficulté grandissante à trouver de nouveaux gisements. En effet, même si le pronostic sur les réserves fossiles est un point de controverse⁵, les pétro-géologues considèrent, unanimement, qu'il s'agit bien de ressources limitées épuisables.

I.1.3. Pollutions dues au transport routier

L'utilisation du pétrole par les moyens de transport n'est pas qu'un problème de consommation et d'approvisionnement. La combustion des liquides hydrocarbonés rejette des polluants dits « primaires » issus directement du pot d'échappement et des polluants « secondaires » formés par la transformation chimique des premiers dans l'atmosphère, [12], [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

² Quand plusieurs modes de transport sont utilisés pour un déplacement, un mode « principal » est attribué à ce déplacement. L'attribution repose sur hiérarchie allant du mode le plus lourd au plus léger. Ainsi on affecte comme principal le bus à un déplacement qui combinerait par exemple bicyclette et bus, [6].

³ Compagnie pétrolière américaine.

⁴ IEA, International Energy Agency

⁵ Colin J. Campbell, fondateur de l'ASPO (Association for the Study of Peak Oil&Gas), estime que: 45% des chiffres sur les réserves déclarés par les pays de l'OPEP sont douteux.

la dégradation de la santé publique et ils sont responsables des changements climatiques dus à l'effet de serre.

I.1.3.1. Les Gaz à Effet de Serre (GES)

L'atmosphère terrestre est composée de gaz tels que : le dioxyde de carbone CO_2 , le méthane CH_4 , le protoxyde d'azote N_2O , les gaz fluorés, la vapeur d'eau H_2O , l'ozone O_3 ... L'atmosphère absorbe les rayons solaires et émet une partie sous forme de rayons infrarouges sur notre planète. Une partie de ces infrarouges réfléchissant à la surface de la terre est interceptée par les Gaz à Effet de Serre (GES), [14].

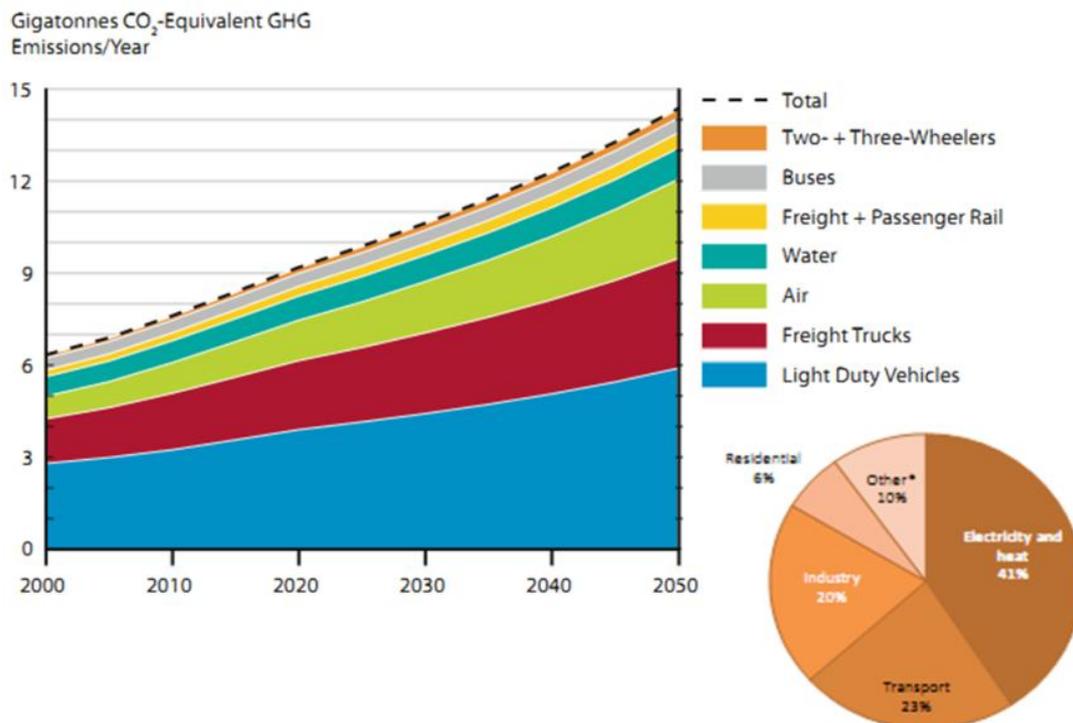


Figure.I. 2:répartition des émissions de CO₂ annuelle dans le monde. A gauche : par mode de transport. A droite : par secteur d'activité, [14]

L'effet de serre est un phénomène naturel, a priori bénéfique, qui conserve actuellement la température moyenne sur terre à environ 15°C. En revanche, c'est l'augmentation des concentrations des GES qui pose problème, entre autre, le réchauffement climatique. Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) prévoit un réchauffement moyen de 1 à 3,5°C d'ici à 2100. Ceci élèverait le niveau de la mer de 15 à 95cm. Cela menacerait de disparition quelques îles des océans Pacifique et Indien et leurs écosystèmes et amplifierait également la fréquence et la gravité d'événements climatiques comme les inondations et les sécheresses, [15], [16], [17]. Le GIEC associe, directement, ce réchauffement à la croissance des concentrations des GES due à l'activité humaine depuis l'ère préindustrielle, (cf. Annexe-1).

La concentration des GES a augmenté de 50% entre le début du XX^e siècle et aujourd'hui. Le dioxyde de carbone, ou CO_2 , le principal GES, représente 77% des émissions totales. Entre 1970 et 2004, les rejets annuels de CO_2 sont passés de 21 à 38 gigatonnes (Gt), soit une progression d'environ 80 %. Le transport, avec en 2009 une part de 23%, domine le bilan des émissions mondiales de CO_2 , Figure.I. 2.B [18], [19]. La Figure.I.2 représente le taux d'émission de CO_2 par

moyen de transport et met en évidence que 44,5% de ces émissions est due à l'utilisation des véhicules particuliers.

Mais le CO₂ n'est pas le seul GES rejeté par les automobiles. Cinq autres gaz (CH₄, N₂O, HFC, PFC et SF₆) désignés par le protocole de Kyoto comme étant les principaux GES sont produits en grande quantité. Mais les GES ne sont pas les seuls polluants rejetés par l'automobile. Le transport routier est responsable de 59% des oxydes d'azotes (NO_x), de 27% du monoxyde de carbone (CO) et de 49% des Composés Organiques Volatiles⁶ (COV), [20], [12]. Le véhicule particulier à lui seul est responsable de 73% des COV émis en France. A titre d'exemple, en 2000 dans la région Île-de-France, 45% de NO_x et 67% de CO ont été produit par le déplacement des voyageurs en voiture, [13]. De plus, les systèmes de climatisation des voitures provoquent une surconsommation de carburant et rejettent (par usure de l'étanchéité) des gaz fluorés, ou l'hydrofluorocarbure HCF, dont le Pouvoir de Réchauffement Global⁷ (PRG) est beaucoup plus élevé comparé à celui du CO₂, (les PRG et les durées de vie des principaux GES sont donnés par le tableau de l'annexe-A.1). En France, la généralisation de la climatisation dans les différentes gammes de véhicules a fortement participé à l'accroissement des rejets du HCF (+2966 ktCO₂-e)⁸ depuis 1993, [21].

I.1.3.2. Pollution locale

Contrairement aux GES, les polluants locaux ont un impact direct sur la santé et le confort des usagers de la voiture et d'autrui. L'impact est plus perceptible dans les zones à forte densité de circulation, notamment, dans les villes. Les polluants sont dus à la combustion du carburant ou bien tout simplement au roulage du véhicule, comme :

- *Les particules fines* : notées PM pour **Particulate Matter**, ce sont des particules minérales, organiques ou un mélange des deux, [12]. Elles sont classées en fonction de leur taille; les plus fines de moins de 2.5µm nommées PM_{2,5} et les plus grossières ont un diamètre compris entre 2.5µm et 10µm appelées PM₁₀, [22], [23]. En 2007 en France, le transport routier a occupé la 4^{ème} place des sources d'émissions de ces deux types de particules, avec 12% et 11% respectivement, [24]. Les PM proviennent des pots d'échappement des moteurs thermiques et plus spécifiquement les moteurs diesels. Le taux de particules émises est très important à faible et grande vitesse du véhicule (40km/h < vitesses > 90km/h, cf. Annexe A-2). Des essais, sur un véhicule « léger » diesel, réalisés selon la procédure européenne (cycle MVEG- Motor Vehicle Emissions Group) ont mesuré des émissions de 10¹⁰ particules/km bien plus élevées que la limite (6.10⁶ particules/km) fixée par la norme EuroV de 2009, [25].
- *Les métaux lourds* : d'autres particules fines de métaux lourds tels que le cuivre (Cu) et le plomb (Pb) sont aussi émises par le secteur de transport. Le cuivre est lié à l'usure des plaquettes de freins des véhicules routiers, mais il provient majoritairement de l'usure des caténaires dans le transport ferroviaire. Les émissions de cuivre sont en augmentation

⁷ Pouvoir de Réchauffement Global – PRG : est un indicateur de la capacité d'un gaz à accroître l'effet de serre. Le PRG représente l'effet combiné des temps de séjour différents de ces gaz dans l'atmosphère et de leur pouvoir relatif d'absorption du rayonnement infrarouge thermique sortant. Le Protocole de Kyoto est basé sur des PRG à partir d'émissions d'impulsions sur une durée de 100 ans, [15].

⁸ CO₂-e, pour « équivalent dioxyde de carbone » : c'est l'unité de mesure des émissions de GES définie par la norme ISO-14064. Par exemple : 1kg de CO₂ équivaut CO₂-e, et 1kg de méthane (CH₄) équivaut à 21 Kg de CO₂-e, [22].

continue avec la croissance du trafic. Quant au plomb, il est dû à l'utilisation de l'essence plombé et la consommation d'une partie des huiles « moteur » contenant des traces de plomb. Les rejets de plomb sont liés à sa teneur dans le carburant, [26]. A l'arrivée de l'essence sans plomb, les émissions ont drastiquement baissées. Depuis l'année 2000, le transport routier contribue à hauteur de 4% contre 91% en 1990 des émissions totales de Pb en France, [27], [25].

- *Le bruit* : les nuisances sonores dues au transport, contrairement aux rejets des gaz et des particules, ont peu de conséquences néfastes sur la santé publique. Cependant, elles représentent une source de gêne pour 40% des français et 25% de la population européenne. 17% de ces bruits est causé par l'automobile, [28]. En effet, les émissions des voitures classiques sont mesurées à une intensité moyenne de 70dBA⁹. Le véhicule électrique émet des bruits de même intensité que les véhicules classiques au-delà de 30Km/h. Néanmoins le véhicule électrique enregistre une baisse de 10dBA et 6.5dBA pour les vitesses de 5km/h et 10km/h, respectivement, [77]. Sachant que le bruit se caractérise par son intensité et sa durée, [23], les habitants des zones urbaines sont les plus affectés et la réduction de bruit peut être un argument de plus pour l'électrification du transport, [29], [30], [31].

I.1.4. Aspects réglementaires et technologiques

Dès les années 70, la question de préserver l'environnement est devenue préoccupante. Les autorités internationales ont commencé à prendre des mesures concrètes afin de réduire les rejets de polluants. Le protocole de *Kyoto* adopté en 1997 est l'une de ces mesures. Il avait fixé pour objectif la réduction moyenne de 5.2% des émissions de GES des pays industrialisés. Et, bien que tous les secteurs d'activité soient concernés, les émissions dues au transport et à l'automobile en particulier, ont été la cible des mécanismes réglementaires mis en place par les gouvernements. De ce fait, les constructeurs automobiles sont constamment contraints d'améliorer leurs technologies tout en maintenant des coûts réduits.

I.1.4.1. Aspects règlementaires

Le cadre réglementaire des émissions polluantes est différent d'un pays à l'autres. Cependant, toutes les normes adoptées par les pays industrialisés tels que l'Union Européenne et ses états membres, les Etats-Unis et le Japon, visent à limiter les rejets de : CO, NO_x, HC et les PM, (cf. [Figure.I.3](#)). Chaque norme s'appuie sur des procédures d'essais spécifiques. A titre indicatif, la norme Tier-2 adoptée en 1999 aux Etats-Unis ne fait pas de distinction entre les carburants, tandis que la norme japonaise prend en compte l'état (chaud ou froid) du véhicule. La [Figure.I.3](#) montre un comparatif de ces normes. On peut remarquer que les normes japonaises sont les plus sévères. Elles sont suivies de la norme européenne Euro-V appliquée à partir de 2009 et enfin des normes des USA. Les normes européennes sont, comme toutes les normes, à chaque fois revisitées et les seuils d'émissions sont revus continuellement à la baisse. Les valeurs limites des émissions des véhicules de type M (essence et diesel) fixées par la norme Euro depuis sa première application en 1992 jusqu'à la 6^{ème} version prévu pour septembre 2014 sont données dans l'annexe.A.3.

⁹ Le dBA est variante de l'unité de mesure d'intensités sonores dB. Le dBA correspond à un filtre, celui qui permet de reproduire le comportement de l'oreille normale moyenne pour une intensité perçue identique à celle de 40 dB à 1 kHz.

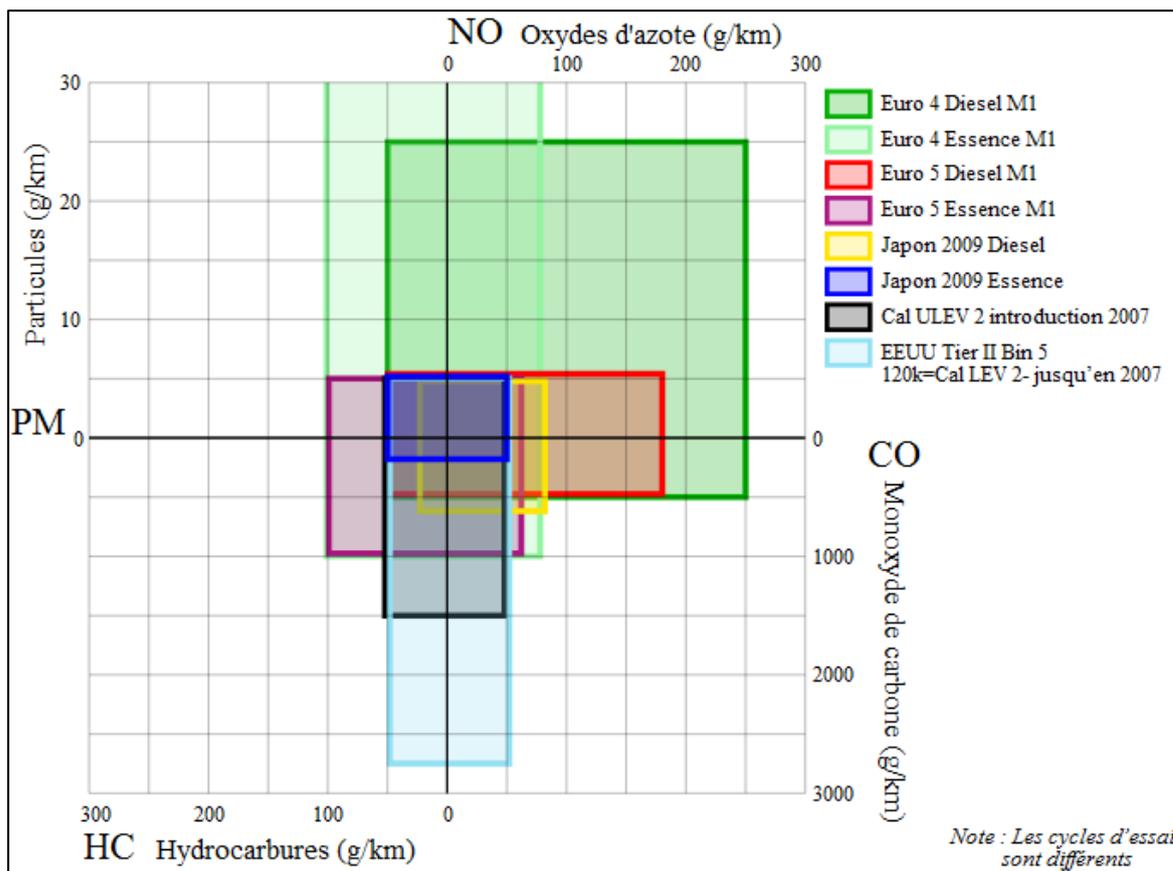


Figure.I. 3 : comparaison des valeurs limites d'émissions des voitures dans l'Union Européenne, au Japon et aux Etats-Unis

Les émissions de CO₂ ont fait objet d'un accord volontaire entre la Communauté Européenne et l'Association des Constructeurs Européens d'Automobile (ACEA). Cet accord visait à ramener les émissions des voitures particulières à 120g/km en 2012 et 95g/km en 2020. Pour y parvenir, la France et d'autres pays ont imposés, depuis Mai 2006, aux constructeurs automobiles l'étiquetage de leurs véhicules neufs par classes¹⁰ afin d'encourager l'achat de modèles moins polluants. Des incitations financières à acheter des véhicules moins polluants ont également été mises en place grâce à des écotaxes tel le Bonus/ Malus écologique mis en place en France depuis janvier 2008.

I.1.4.2. Les progrès technologiques

Pour diminuer l'impact environnemental des transports et répondre aux pressions réglementaires, les constructeurs automobiles ont effectués des améliorations technologiques de leurs véhicules. Les moteurs à combustion interne (essence et diesel) sont les premiers concernés :

- *Le « down sizing » et la suralimentation* : consiste à réduire la cylindrée pour accroître la pression effective moyenne pour un niveau de puissance bien défini, ce qui permet une meilleure efficacité énergétique.

¹⁰ L'étiquetage comporte sept classes de couleurs différentes, du vert foncé (classe A) pour les voitures les moins polluantes (-100g/km) au rouge (classe G) pour les voitures émettant plus de 250g/km. Rapportée à ce classement, l'émission moyenne des véhicules neufs vendus en France en 2005 se situe dans la classe D avec 152g de CO₂ par km.

- *La distribution variable* : ajustement en continu (avance ou retard) de l'ouverture et la fermeture des soupapes d'admission et d'échappement. Elle réduit les pertes énergétiques et surtout les émissions de NO_x et HC.
- *L'injection directe* : offre au moteur diesel une flexibilité du contrôle de l'injection dans chaque cycle moteur. Cela a permis des gains de consommation de l'ordre 15 à 20% et c'est une technologie qui tend à se généraliser dans les moteurs à essence.
- *Les Systèmes de post-traitement* : tel que les pots catalytiques pour diminuer les émissions des hydrocarbures imbrulés et les filtres à particules.

D'autres efforts ont aussi été réalisés au niveau des pneumatiques et la dynamique du véhicule (réduction du coefficient de pénétration dans l'air) pour réduire la consommation et l'émission de CO₂.

Bien que les progrès techniques réalisés sur les voitures pour réduire la consommation d'énergie et les rejets de polluants soient significatifs, ils restent insuffisants pour satisfaire les exigences d'une société de plus en plus dépendante de la voiture et consciente de l'impact environnemental. Afin de répondre à ces exigences contradictoires, une avancée vers l'électrification de tout ou partie des chaînes de tractions automobiles paraît inéluctable !

I.2. Electrification de la chaîne de traction

L'électrification des chaînes de traction consiste :

D'une part à incorporer dans les véhicules thermiques traditionnels des composants électriques pour jouer un rôle plus ou moins important dans la traction du véhicule et la récupération d'énergie. On parle dans ce cas des véhicules hybrides, qui réalisent des gains en consommation et en rejets de polluants variables selon le degré d'électrification.

D'autre part, les véhicules électriques utilisent la seule motorisation électrique pour la traction et parcourent des distances dites à zéro émission de CO₂.

Nous allons détailler dans la partie ci-dessous le fonctionnement de ces véhicules électrifiés

I.2.1. Véhicule Electrique Hybride (VEH)

Les véhicules hybrides permettent par rapport aux véhicules conventionnels des économies de carburant significatives et des émissions considérablement réduites, grâce à la participation d'un moteur électrique à la propulsion du véhicule. Tout véhicule hybride est classé selon un type d'architecture. Selon la position du moteur thermique et électrique par rapport aux roues et le rôle de chaque source d'énergie on peut distinguer les architectures détaillées ci-après.

I.2.1.1. Architectures des VEHs

Dans ce paragraphe on s'intéresse au classement des VEHs selon la position des moteurs thermique et électrique par rapport aux roues. Les schémas de fonctionnement des différentes architectures de chaînes de traction citées ci-dessous sont donnés par l'annexe-A.4.

A. Hybride série

L'hybride série est le plus simple des principes, la puissance de propulsion est fournie uniquement par le moteur électrique. La puissance provenant du moteur thermique est utilisée pour alimenter le moteur électrique ou recharger les batteries à travers une génératrice. Dans ce type de structure, le moteur thermique fournit généralement une puissance moyenne, quant aux pics de puissance ils sont assurés par le dispositif de stockage d'énergie. Le moteur thermique n'étant pas couplé directement aux roues, la stratégie de type «*Range Extender*» peut être adoptée par ce type d'architecture afin de faire fonctionner le moteur thermique dans une plage de fonctionnement optimale. Ceci permet d'obtenir des véhicules à émissions faibles, [32], [33], [34].

B. Hybride parallèle

Dans une structure hybride parallèle, les sources d'énergie primaire (le réservoir de carburant) et secondaire (la batterie), sont liées directement et séparément aux deux moteurs du véhicule, (cf. Annexe. A-4). Les moteurs thermique et électrique sont couplés mécaniquement de manière à ce qu'ils puissent agir pour assurer la propulsion du véhicule avec un confort de conduite et un régime moteur optimum. L'avantage de l'hybride parallèle, est que les deux moteurs peuvent être dimensionnés à la moitié de la puissance maximale de propulsion, tout en supposant que les batteries ne déchargent pas complètement, [34]. En revanche, le contrôle et l'addition des flux de puissances provenant des deux sources d'énergie augmentent la complexité de couplage mécanique liant les deux moteurs, [35], [36].

C. Hybride série/parallèle

Bien qu'au départ les véhicules hybrides évoluaient dans des architectures série ou parallèle, les constructeurs automobiles ont rapidement réalisés l'utilité de fusionner ces deux configurations dans une architecture combinée, dite hybride série/parallèle. L'idée principale est d'utiliser le véhicule en tout électrique à basse vitesse, et ainsi éviter le fonctionnement du moteur thermique dans ses mauvaises zones de rendement. Le moteur thermique est allumé et participe à la traction dans le cas des vitesses élevées (ex. autoroute) ou dans le cas d'une forte demande de puissance (ex. pente de la route élevée).

Ce type de véhicule est constitué d'un moteur thermique, de deux machines électriques et d'une batterie. La première machine (quelques kW) et la seconde (quelques dizaines de kW) réalisent respectivement l'addition de vitesse et l'addition de couple. Cette architecture porte aussi le nom d'hybride à dérivation de puissance, car l'énergie mécanique est prélevée à un endroit de la chaîne de traction (ex: du moteur thermique) et réinjectée à un autre endroit de la chaîne (ex: au moteur électrique), [37]. La dérivation de puissance est réalisée via un train planétaire tel qu'il est utilisé dans TOYOTA Prius. Ce concept est connu sous le nom de *Power Split Device*. Ce composant réalise un accouplement entre le moteur thermique, le moteur électrique et la génératrice.

I.2.1.2. Catégories par niveau d'hybridation

Les véhicules hybrides sont classés en trois architectures comme décrit précédemment mais ils peuvent être également classés en fonction de ce que l'on appelle, niveau d'hybridation (cf. Figure.I.4). Celui-ci est réalisé sur la base des distances parcourues par le véhicule en mode tout

électrique et le niveau de puissance du ou des moteurs électriques à bord du véhicule. La Figure.I.4 illustre cela.

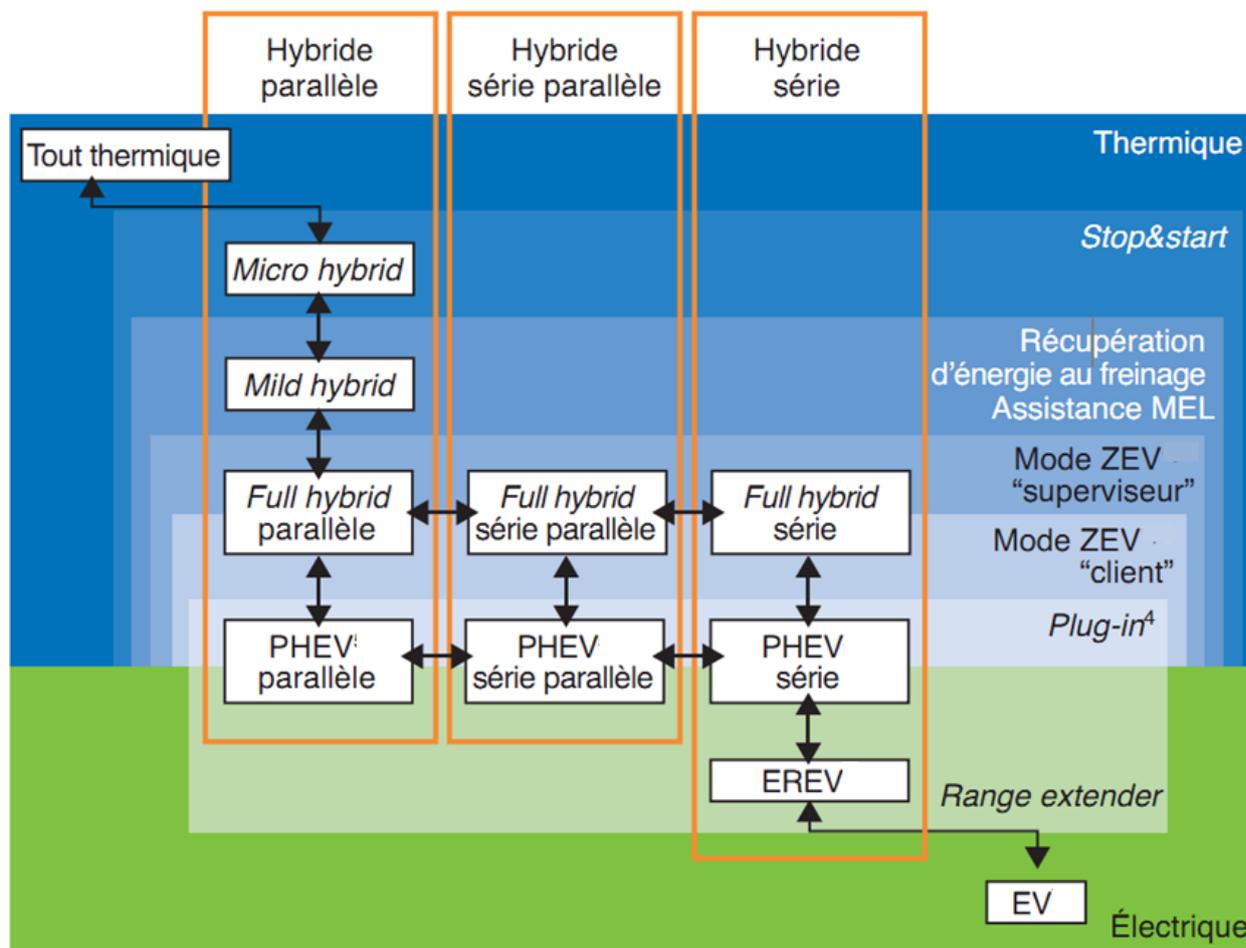


Figure.I. 4: les familles de véhicules hybrides et électriques, [38].

A. Le Micro hybrid

Une telle hybridation s'apparente aux véhicules ayant la fonctionnalité dite « Stop&Start ». L'équipementier automobile Valeo est le premier à avoir proposé le système «Start-Stop», il a notamment équipé la C3 de PSA. Ce système à alternateur réversible développe une puissance faible (<10kW) pour assurer le démarrage et la coupure du moteur thermique dans les phases d'arrêt, [39], [40].

B. Mild hybrid

Dans cette catégorie, l'utilisation d'une machine électrique plus importante de 10kW à 20kW, permet, en plus des fonctions assurées par l'alternateur réversible dans le « micro hybride», de récupérer de l'énergie au freinage et d'assister le moteur thermique en fournissant un couple additionnel durant les phases motrices comme l'accélération et l'ascension d'une pente, mode dénommé également *Boost*, [41]. A titre d'exemple, la Honda Insight s'inscrit dans cette catégorie avec une architecture parallèle. Le gain de consommation de l'Insight peut atteindre 20% et peut avoir une autonomie en mode purement électrique de 12.5km, [42].

C. Full hybrid

Le véhicule est équipé d'un moteur thermique et d'un moteur électrique d'une puissance du même ordre de grandeur et l'usage du mode électrique, dit « Zéro Emission », est plus étendu que dans la version Mild hybrid. La Toyota Prius est le parfait exemple des « *full hybrid* ». Sa dernière génération, équipée du système « *Hybrid Synergy Drive* », est composée d'un moteur électrique de 60kW alimenté par une batterie sous tension maximale de 500V. Il en résulte une diminution de la pollution, qui est passée de 120g/km de CO₂ pour la Prius de première génération à 89g/km pour la Prius modèle 2009, [43], [44]. Cependant, la gestion des flux énergétiques est plus complexe car la recharge de la batterie nécessite une machine électrique supplémentaire¹¹.

D. Le Plug-in hybrid

Cette version, connue sous l'acronyme PHEV pour « *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* », est simplement un véhicule hybride avec une batterie de plus grande capacité qui peut être rechargée à partir du réseau. Le PHEV réalise à la fois les performances d'un véhicule *full hybrid* et d'un véhicule électrique. Il est capable de maintenir l'état de charge de la batterie autour d'une valeur moyenne de 50 à 60%, c'est le mode « *Charge Sustaining* », et de rouler 60km en mode tout électrique. D'un point de vue écologique, une étude réalisée par ACEEE (*American Council for an Energy Efficient Economy*) prévoit qu'en moyenne un conducteur américain typique réalise une réduction d'environ 15% des émissions de CO₂ nettes, par comparaison aux hybrides conventionnels, [45].

I.2.2. Véhicule électrique (VE)

La chaîne de traction d'un Véhicule Electrique (VE) moderne est nettement plus simple que celle d'un véhicule thermique ; elle est constituée principalement d'un moteur électrique, d'une source d'énergie électrique et d'une transmission mécanique nettement plus simple, Figure.I.5. Les moteurs électriques utilisés pour la traction ont un meilleur comportement à faible vitesse de rotation et délivrent une puissance plus importante. Cela permet d'accélérer rapidement lors du démarrage, [46], [33]. De plus, les moteurs électriques présentent de nombreux avantages comparés aux moteurs thermiques ; ils sont plus légers, réversibles et ont un très bon rendement.

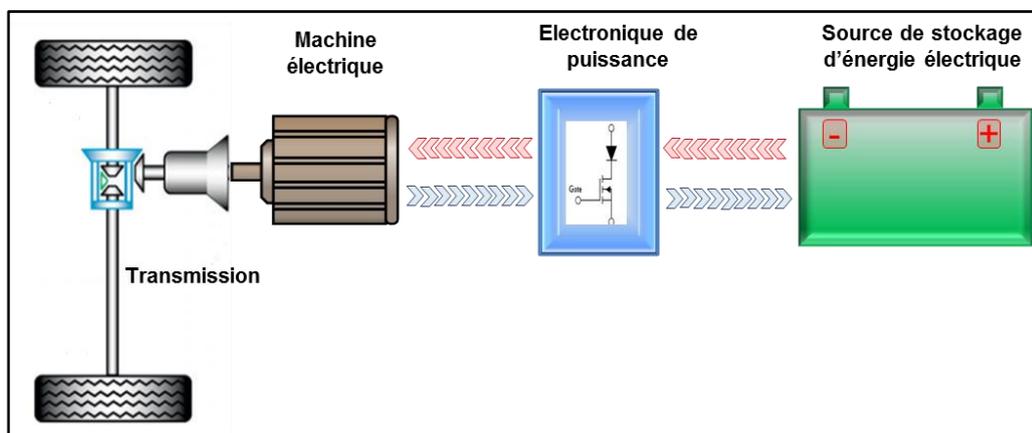


Figure.I. 5:architecture de la chaîne de traction d'un VE.

¹¹ La batterie est rechargée par une génératrice, voir Annexe.A.4, qui transforme l'énergie mécanique provenant du moteur thermique ou du système de freinage en énergie électrique. L'avantage dans ce cas revient au fait que le moteur thermique peut être sollicité en continu sur son point de fonctionnement optimal.

I.2.1.3. Réalisations actuelles

Depuis quelques années, le développement du véhicule électrique a connu une avancée significative, grâce à la prise de conscience globale de l'enjeu environnemental énoncé précédemment et la volonté des constructeurs automobiles de réaliser la transition énergétique et technologique. Dès 2010, plusieurs constructeurs ont lancé la commercialisation de leurs modèles de VE (cf. Annexe-5), [47]. La plupart de ces véhicules sont de taille relativement petite pour réduire la consommation. Ils se présentent en bonne alternative aux véhicules essence et diesel à usage urbain, la *Bluecar* mise à disposition des usagers par le service Autolib¹² en est un bon exemple. Elle est équipée d'une batterie Lithium Métal Polymère (LMP) qui offre, selon ses concepteurs, une autonomie de 250km et une recharge complète en 8 heures, [48]. En ce qui concerne la recharge de la batterie, Renault propose pour la *Fluence.ZE* trois procédés : la charge lente sur secteur (8h environ), la charge partielle rapide sur bornes (80% en 20 minutes environ), et enfin un système d'échange rapide de batteries « Quickdrop » permettant de remplacer la batterie en 3 minutes. Pour ce type de véhicule, l'autonomie annoncée est de 160km.

I.2.1.4. Stockage d'énergie, point faible ?

Comme on vient de le mentionner, le VE utilise uniquement l'énergie électrique pour la propulsion. De nos jours, les batteries utilisées pour l'alimentation des véhicules électriques ont une faible densité énergétique comparée à celle des carburants. Il faut en moyenne environ 100kg de batterie pour contenir autant d'énergie qu'un kilogramme d'essence. C'est la raison pour laquelle la plupart des travaux menés pour faire en sorte que les performances des VE s'approchent de celles des véhicules thermiques se portent sur les batteries. Les principaux points d'amélioration sont :

- *L'Autonomie* : Le plein du réservoir d'un véhicule classique permet de parcourir environ 1000km. L'autonomie d'un véhicule électrique se compte en quelques centaines de kilomètres. Cette limitation de l'autonomie freine bien sûr la vente des VE. A titre indicatif, 55% des Européens seraient favorables à l'achat d'un VE si l'autonomie dépassait les 250km¹³.
- *La recharge* : en plus de la faible autonomie, la recharge de la batterie est un autre obstacle. En effet, la recharge de la batterie nécessite plusieurs heures de connexion au réseau domestique. D'autres modes de recharge tels que le système de stations « *Better Place* » ou des bornes de charge rapide sont envisagés. Le premier consiste à remplacer la batterie en quelques minutes et le second permet une recharge partielle en 30mn. Cependant, les informations sur l'impact de la recharge rapide sur la durée de vie des batteries sont peu crédibles pour le moment et ces systèmes nécessitent de nouvelles infrastructures. En France, les estimations prévoient un surcoût de 3000€/VE pour l'adaptation urbaine, [49].
- *Le Coût et la rentabilité* : le coût de possession d'un VE est actuellement 25% plus élevé qu'un véhicule classique et la batterie représente un tiers du prix du VE. De plus, selon des évaluations « puits à la roue » réalisées par *Torchio et Al* [78], le coût énergétique des VE

¹² L'Autolib' : c'est un service simple et local qui permet de louer un véhicule 24/24h et 7/7 jours dans plus de 250 stations situées en Ile-de-France. Il a vu le jour à Paris en décembre 2011.

¹³ L'autonomie de 250km est plus un frein psychologique qu'un besoin réel. 82% des européens roulent moins de 100km et ils sont 45% à parcourir environ 30km par jours, [49].

(3.4c€/km¹⁴) est plus élevé que celui des véhicules essence et diesel actuels (2,8 et 2,6c€/km). Néanmoins, les estimations prévoient l'inversion de la tendance d'ici 2030, avec 4,8c€/km pour les VEs contre 5 et 5,2c€/km pour les véhicules diesel et essence, respectivement.

Cette partie nous a permis d'avoir un aperçu général sur le fonctionnement des véhicules électrifiés. Le véhicule électrique a été évoqué par une présentation de son architecture et quelques exemples de réalisations. Nous avons montré l'intérêt, surtout en réduction des émissions de CO₂, du développement des véhicules électriques et hybrides. Néanmoins, des progrès restent à faire au niveau des batteries ou d'autres systèmes de stockage d'énergie pour améliorer les performances des véhicules électriques.

I.3. Systèmes de stockage d'énergie électrique

Il existe plusieurs moyens de stocker de l'énergie électrique. Les batteries sont les plus utilisées dans les applications embarquées. De nombreuses technologies de batteries, définies par le couple électrochimique, sont proposées par les fabricants : Plomb-Acide, Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion...etc. Ces deux dernières sont particulièrement utilisées pour l'alimentation des véhicules électrifiés. Pour les VEHs, le rôle de la batterie est d'assurer les pics de consommations notamment dans les phases d'accélération et de freinage. Pour ce besoin spécifique, la technologie Ni-MH est la mieux adaptée pour ce type de véhicules grâce notamment à un coût financier qui est plus faible que les batteries Li-ion.

Cependant, la technologie Li-ion a supplanté les batteries NI-MH dans les applications de véhicule tout électrique (cas de notre étude). En effet, le VE a pour seule source d'énergie le pack de batteries, et à volume égal les batteries Li-ion stockent davantage d'énergie ce qui offre une autonomie plus importante au VE.

Dans cette partie, nous nous intéresserons aux systèmes de stockage à base de batteries Li-ion. Le principe de fonctionnement, les caractéristiques et les indices d'état utilisés pour la surveillance des accumulateurs Li-ion seront présentés. Afin de situer précisément la problématique de ce travail de thèse, on met un accent sur le vieillissement et les performances des matériaux constituant les batteries pour montrer les différences existantes entre les batteries de type : haute puissance, ultra haute puissance et haute densité d'énergie. Par la suite, le fonctionnement et les caractéristiques des supercondensateurs seront présentés, car c'est un élément qui est souvent évoqué comme source de compensation de puissance instantanée dans des applications à puissance fluctuante.

I.3.1. Batterie Li-ion

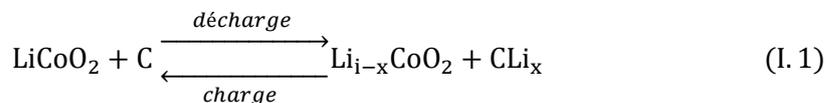
Un élément de batterie emmagasine de l'énergie grâce à des réactions électrochimiques. Après avoir présenté le principe, les matériaux utilisés dans les différentes technologies d'accumulateurs Li-ion seront présentés.

I.3.1.1. Fonctionnement et technologies

Dans l'accumulateur Li-ion, le lithium est inséré sous forme d'ions (Li⁺) dans la structure cristalline, généralement en graphite, de l'électrode négative. C'est ce procédé d'insertion qui

¹⁴ C'est le coût « du puits à la roue » de l'énergie spécifique par la distance parcourue. Il prend en compte les coûts externes des dommages provoqués par les polluants émis par le véhicule, [78].

différencie la batterie Li-ion de la batterie lithium¹⁵. Pendant la décharge d'une batterie Li-ion (Figure.I.6), le lithium est relâché du graphite, migre à travers l'électrolyte pour se loger dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive. A la charge, les ions Li^+ viennent se replacer dans la structure en graphite. La réaction électrochimique globale dans le cas d'une batterie Li-ion à base de cobalt est, [51], [52]:



Ce principe de fonctionnement est le même pour tous les types de batteries Li-ion. En revanche, la composition chimique des électrodes et de l'électrolyte varie d'une technologie à l'autre. Ces différences ont un impact sur ce qui fixe leurs caractéristiques en termes d'énergie spécifique, puissance spécifique, durée de vie...etc. Dans ce qui suit, nous allons décrire les principaux éléments des batteries Li-ion.

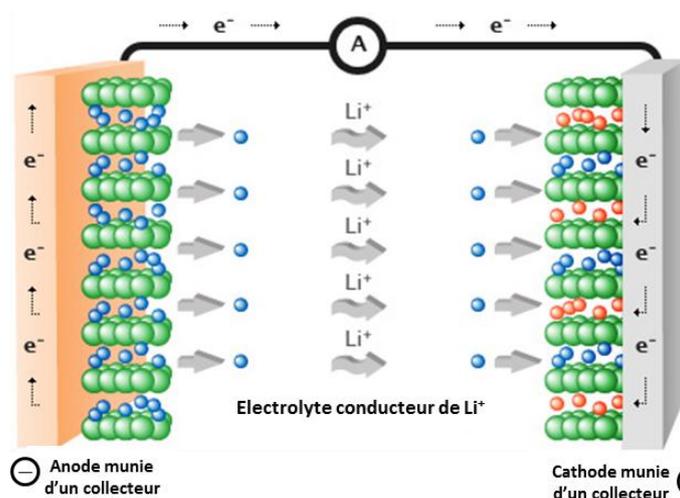


Figure.I. 6:principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion, [53].

A. L'électrolyte

Il assure le transport des ions entre les deux électrodes. On peut distinguer deux types d'électrolytes :

- *Electrolyte liquide* : il est composé de solvants organiques (généralement des carbonates d'alkyles) dans lesquels est dissout un sel de lithium. Il est caractérisé par une conductivité ionique relativement élevée ($>1\text{mS/cm}$), [54]. Cependant dans les batteries Li-ion, l'insertion de Li^+ dans le graphite est accompagné de molécules du solvant qui peuvent endommager l'électrode négative.
- *Electrolyte polymère* : il est fabriqué par la dissolution du sel de lithium et du polymère Poly-Oxyde d'Ethylène (POE) dans un solvant. Après évaporation du solvant on obtient l'électrolyte sous forme d'un film d'épaisseur comprise entre 50 et 1000 μm . L'électrolyte polymère assure la séparation entre les deux électrodes et diminue les risques de courts-circuits et donc d'explosion. Mais l'accumulateur doit fonctionner à température élevée ($+80^\circ\text{C}$) pour avoir une conductivité similaire à celle de l'électrolyte liquide, [55],

¹⁵ Dans la batterie lithium, connue aussi sous le nom batterie lithium métal, l'électrode négative est en lithium métallique; au fil des cycles de charge/décharge, des dendrites se déposent à sa surface et peuvent provoquer des courts-circuits internes et des explosions.

[54]. C'est particulièrement le cas des applications de type VE où les puissances de charge et de décharge sont importantes.

B. L'électrode négative

Les matériaux d'électrode négative des batteries Li-ion fonctionnent à bas potentiel (proche de 0V vs Li/Li+). Ce sont des composés d'insertion à base de carbone sous forme graphite ou dopé par de l'étain ou du silicium, ou enfin à base d'oxydes de métaux. Les électrodes les plus répandus sont les électrodes de carbone, sous forme de graphite. Ces dernières ont une grande capacité massique théorique (372mAh/g), [57]. Cependant, le graphite est sollicité mécaniquement par l'insertion du lithium, car il est soumis à des variations de volume pouvant aller jusqu'à 40%. Ceci peut entraîner des pertes de contact avec le collecteur de courant. Pour ces raisons, des nanocomposites à base de titane ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) ont été étudiés. Ce dernier a la propriété de ne pas se déformer selon le taux d'insertion du lithium, mais sa capacité de stockage est plus faible que les électrodes de graphite et sa tension plus élevée (cf. Figure.I.7), [55], [56].

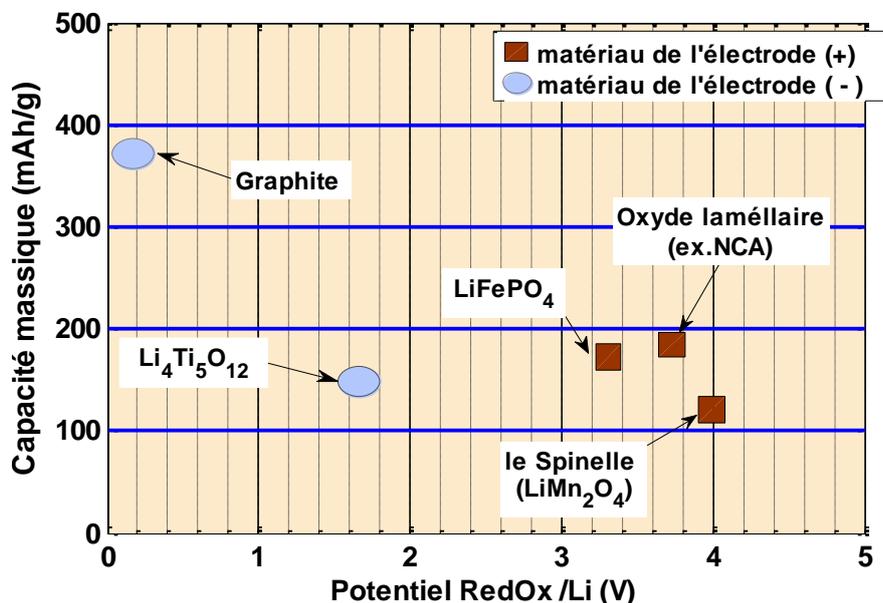


Figure.I. 7:matériaux actuellement utilisés dans les accumulateurs Li-ion, [55], [56]

C. L'électrode positive

Il existe également plusieurs matériaux qui sont utilisés pour les électrodes positives. Au sein des batteries Li-ion on retrouve, sans entrer trop dans les détails, trois grandes familles de cathodes :

- *Les oxydes lamellaires* : la structure est composée d'ions de lithium placés dans des couches de métaux de transition oxygéné. Usuellement, le Cobalt, le Nickel et le Manganèse sont les métaux utilisés. Les électrodes positives de ce type ont des densités élevées (160-200mAh/g) et une tension moyenne de 3.7V, mais elles sont peu stables. Les risques d'emballement sont donc élevés. Enfin, le métal tel le Cobalt est parfois très coûteux.
- *Les phosphates* : les électrodes en Phosphate de Fer, LiFePO_4 (LFP) sont les plus courantes. Le Phosphate est un matériau très stable, il offre un niveau de sécurité élevé et une meilleure tenue au vieillissement. Les cathodes LFP sont très utilisées, notamment en

chine par le manufacturier BYD, pour des applications VEs. Ceci, malgré une plage de tension et densité d'énergie, relativement, faibles.

- *Les spinelles* : dans cette structure LiMn_2O_4 (ou LMS), l'utilisation du Manganèse permet d'avoir des électrodes stables et à faible coût. Cette solution présente l'intérêt d'avoir une tension moyenne relativement élevée ($> 3.8\text{V}$). Par contre sa densité d'énergie est faible et la dissolution du manganèse dans l'électrolyte diminue, fortement, la durée de vie de cette batterie.

Comme nous venons de le voir précédemment, il existe plusieurs matériaux utilisés dans les accumulateurs Li-ion qui donnent des caractéristiques différentes. Ainsi, sur le marché, on trouve des batteries désignées par l'appellation : haute puissance, ultra haute puissance ou haute densité d'énergie. De par le nom, chaque technologie est conçue de manière à répondre à des applications spécifiques. Les principales différences entre ces technologies sont : la quantité relative des matériaux constituant la cellule (même si la composition est similaire), les dimensions de cette cellule ainsi que la taille des collecteurs de courants connectés aux électrodes (cf. [Figure.I.6](#)). Une batterie haute puissance, comparée à une de haute densité d'énergie (de même composition et même capacité), est de taille plus grande avec des collecteurs de courants plus épais pour réduire les pertes par effet joules, [57].

I.3.1.2. Grandeurs caractéristiques des batteries

Une batterie peut être caractérisée par une multitude de grandeurs, dont nous donnons ci-dessous les définitions.

A. La capacité

C'est la quantité de charge emmagasinée, que la batterie est capable de restituer au cours d'une décharge complète, précédée d'une charge complète. La capacité est généralement donnée par rapport à un courant de décharge et des critères correspondant à l'état initial et final de la batterie. Elle est exprimée en (Ah) et correspond à :

$$C_{el_B} = \int_{t_i}^{t_f} i \cdot dt \quad (I.1)$$

Avec : i l'intensité de courant (A)

t_i et t_f représentent l'état initial et final donnés, en général, par le critère de tension.

Les fabricants de batteries, fournissent souvent, ce que l'on appelle, la capacité nominale. C'est la capacité obtenue à un courant de décharge nominal, respectant les limites de tensions spécifiées et dans des conditions de température précises.

La résistance Pour calculer en temps réel la résistance instantanée qui résulte de la somme de la résistance interne (R_{int}) et de la résistance des connectiques, on utilise la formule suivante :

$$R(t) = \frac{U(t) - U(t=0)}{i(t) - i(t=0)} \quad (I.2)$$

Avec : U et i représentent respectivement la tension et le courant mesurés.

La résistance interne matérialise le phénomène de limitation du déplacement des ions dans l'électrolyte. Elle est influencée par de nombreux paramètres tels que : la composition chimique de l'électrolyte, la température et l'état de vieillissement de la batterie.

B. Régimes de courants de charge/décharge

Le régime de courant se réfère toujours à la capacité (C) donnée par le constructeur et mesurée dans des conditions bien définies. Dans la littérature il est défini par deux notations : Rég.C et $C/R_{\text{rég}}$. En effet, quand le régime de courant est donné par Rég.C, celui-ci représente l'intensité de courant nécessaire pour obtenir la capacité C pendant un temps de $(1/R_{\text{rég}})$ heures. Par exemple, pour obtenir la capacité nominale de 40Ah d'une batterie déchargée pendant une demi-heure on doit utiliser un courant 80A. D'autre part, $C/R_{\text{rég}}$ signifie que la batterie est déchargée pendant (Rég) heures pour obtenir la capacité C. Ainsi, lorsque que l'on parle de régime $C/2$ pour obtenir la quantité de charge de 40Ah, cela revient à décharger la batterie pendant deux heures avec un courant de décharge de 20A. Les limites d'utilisation en courant d'une batterie sont spécifiées par les régimes de charge et de décharge. En général, le régime de charge est souvent inférieur au régime de décharge. Dans nos travaux, ces régimes seront largement exploités et l'on définit les courants limites de charge et de décharge en utilisant la première notation, comme suit :

$$\begin{cases} I_{\text{el}_B}^C = R_{\text{ch}} \cdot C_{\text{el}_B} \\ I_{\text{el}_B}^D = R_{\text{dé}} \cdot C_{\text{el}_B} \end{cases} \quad (\text{I.3})$$

Avec : R_{ch} et $R_{\text{dé}}$ sont les régimes de charge et de décharge (h^{-1})

$I_{\text{el}_B}^C$ et $I_{\text{el}_B}^D$ représentent les limites de courants en charge et en décharge (A).

C_{el_B} est la capacité d'une cellule de batterie (Ah).

I.3.1.3. Surveillance de la batterie

A. État de charge (State Of Charge-SOC)

Le SOC (State Of charge), couramment utilisé en génie électrique, est un paramètre estimé pendant que la batterie est traversée par un courant électrique. Le SOC est donné par le rapport entre la capacité actuelle disponible et la capacité totale effective disponible à l'instant qui précède l'utilisation (à ne pas confondre avec la capacité initiale de la batterie neuve).

$$\text{SOC} = \frac{C_{\text{actuelle}}}{C_{\text{totale}}} = \text{SOC}(t_0) - \frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_1} i(t) dt \quad (\text{I.4})$$

Où, $\text{SOC}(t_0)$ est l'état de charge initial et $i(t)$ représente le courant traversant la batterie. Tout comme la capacité, cet indicateur dépend des conditions de mesures, notamment, la température.

La surveillance du SOC revient aussi à déterminer la quantité de charge utilisée. Cette dernière se traduit par la profondeur de décharge de la batterie (Depth Of Discharge-DOD), correspondant à :

$$\text{DOD} = 1 - \text{SOC} \quad (\text{I.5})$$

La connaissance de ces indicateurs permet d'identifier en temps réel le mode de fonctionnement de l'accumulateur. Dans le domaine automobile, on distingue deux modes de fonctionnement des batteries : le mode Charge Depleting (CD) qui désigne une utilisation entière de la capacité de la batterie et le mode Charge Sustaining (CS) qui signifie une exploitation partielle de la capacité totale de la batterie. Ces modes sont définis par la surveillance du SOC de la batterie. La [Figure.I.8](#) montre que tout comme la taille, le mode de fonctionnement de la

batterie dépend du type du véhicule. En effet, les véhicules hybrides disposent d'une batterie de taille relativement faible et seulement 20% de sa capacité est exploitée. Pour préserver son état de santé, cette batterie fonctionne en mode CS sur une fenêtre du SOC d'environ 45 à 65%. Pour les « Plug-in hybrid » le besoin d'énergie provenant de la batterie est plus important. Le véhicule est en mode tout électrique jusqu'à 35% du SOC de la batterie. Au-dessous de cette valeur, la batterie est surveillée et doit être rechargée par le moteur thermique pour garder son SOC supérieur à 25%, c'est le mode CS. Enfin, le véhicule électrique ne dispose pas de source d'énergie secondaire qui pourrait recharger la batterie à un instant désiré (le freinage régénératif n'est pas une source contrôlable car il est imposé par l'environnement extérieur tel que le profil de la route, la circulation ...etc.). De ce fait, la batterie ne pourrait pas fonctionner en mode CS et elle doit être exploitée au maximum de sa capacité pour assurer l'autonomie. Cependant, elle n'est utilisée qu'à 80%, car la décharge complète accélère le vieillissement et réduit sa durée de vie.

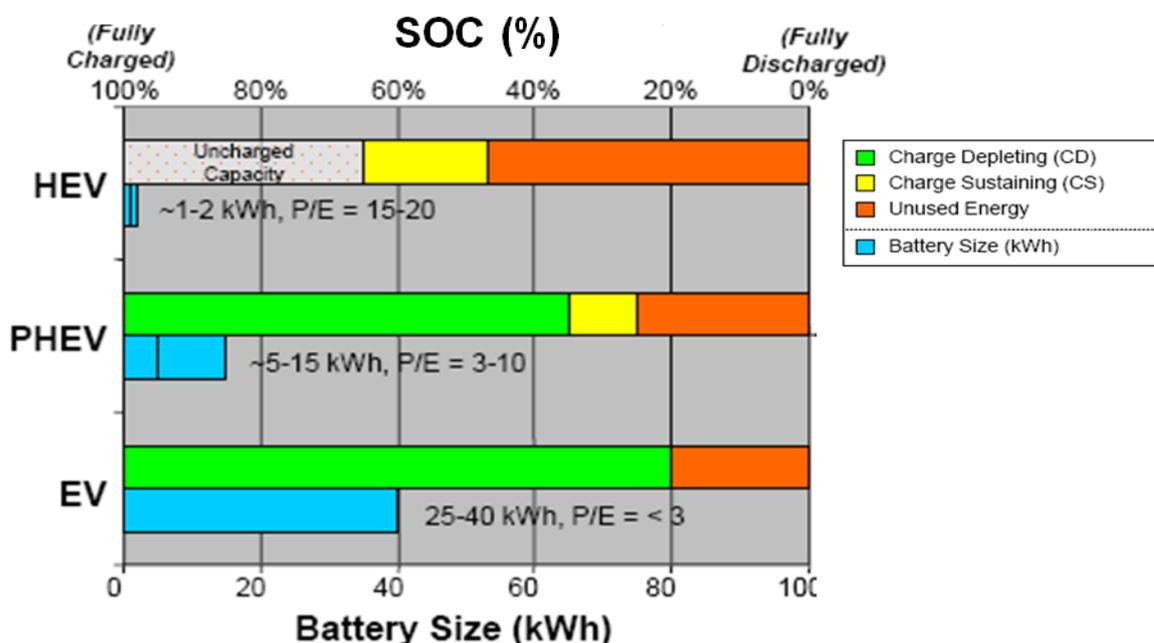


Figure.I. 8 : plage de SOC des batteries utilisées dans le domaine automobile, [58].

B. État de santé (State Of Health-SOH)

Le SOC ne prend pas en compte les pertes de capacité dues à la dégradation de la batterie, puisqu'il se réfère à la capacité actuelle. Pour quantifier le vieillissement d'une batterie on utilise la notion d'état de santé (SOH). Celui-ci est défini par le rapport entre la capacité totale actuelle ($C_{actuelle}^{tot}$) et la capacité totale obtenue lorsque la batterie était neuve (C_{neuve}^{tot}), [59] :

$$SOH = \frac{C_{actuelle}^{tot}}{C_{neuve}^{tot}} \quad (I.6)$$

Le SOH peut être aussi déterminé par rapport à un état de charge donné, à condition que la capacité actuelle et la capacité à l'état neuf soient mesurées au même SOC et dans les mêmes conditions de températures. De notre point de vue, pour estimer l'état de santé de la batterie on doit se baser sur des mesures de capacité, mais aussi sur l'évolution de la résistance interne et des pertes.

I.3.1.4. Vieillessement des batteries Li-ion

Les performances des batteries se dégradent au cours de leur vie. La diminution de leurs performances est due aux dégradations des propriétés physico-chimiques de leurs constituants. On parle alors de vieillissement. Il existe deux principaux modes de vieillissement d'une batterie liés à son mode d'utilisation :

A. La durée de vie calendaire

Le vieillissement peut être dû aux réactions de corrosion qui détériorent la batterie pendant son stockage sans qu'elle soit utilisée. On désigne par durée de vie calendaire le temps de stockage au bout duquel la batterie n'est plus fonctionnelle. Cette grandeur se traduit par l'augmentation de la résistance interne et une perte de sa capacité. Comme présenté dans la Figure.I.9, ces variations de résistance et de capacité dépendent essentiellement de la température de stockage de la batterie, mais aussi de son SOC.

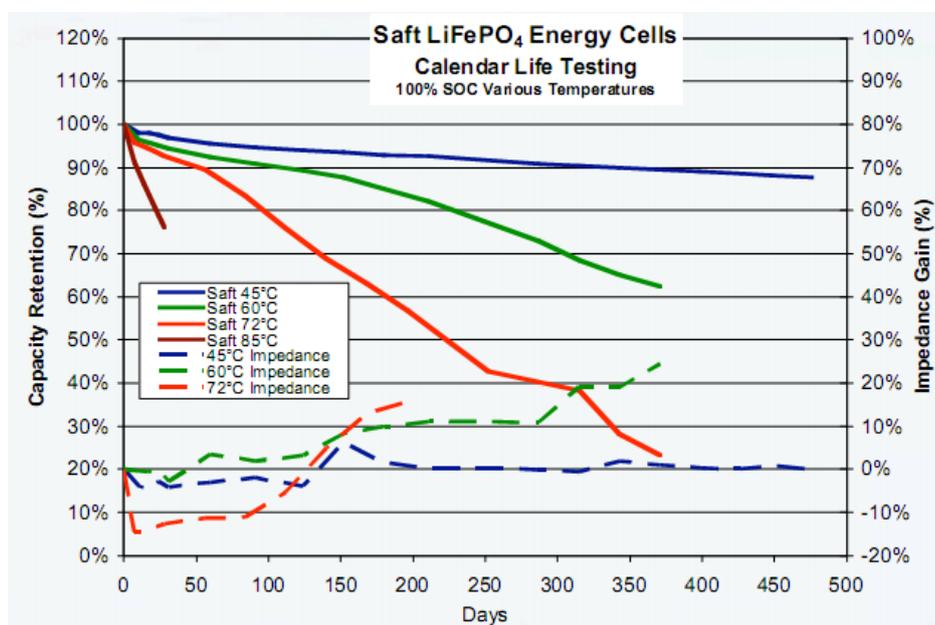


Figure.I. 9 : variation en fonction de la température de la résistance interne et de la capacité d'une batterie Li-ion, cas du vieillissement calendaire, [60].

A. La durée de vie en cyclage

La durée de vie en cyclage dépend de nombreux paramètres tels que le profil de cyclage, la fenêtre de SOC exploitée et la température de conditionnement de la batterie. Elle est exprimée en nombre de cycles ou par la quantité de charge fournie (elle-même donnée par le temps et le courant fourni). L'étude du vieillissement en cyclage dépend donc de l'application et de l'environnement de celle-ci. Dans le domaine de l'automobile de nombreux travaux ont été dédiés à l'étude de vieillissement. Dans ce cadre, on peut citer *Montaru* [20] qui a évalué le vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les VEHs. *Ecker et al* [61] ont développé un modèle prédictif de vieillissement de batteries Li-ion pour un VEH basé sur le cyclage accéléré, dont les résultats de variations de la capacité et de la résistance sont présentés en Figure.I.10.

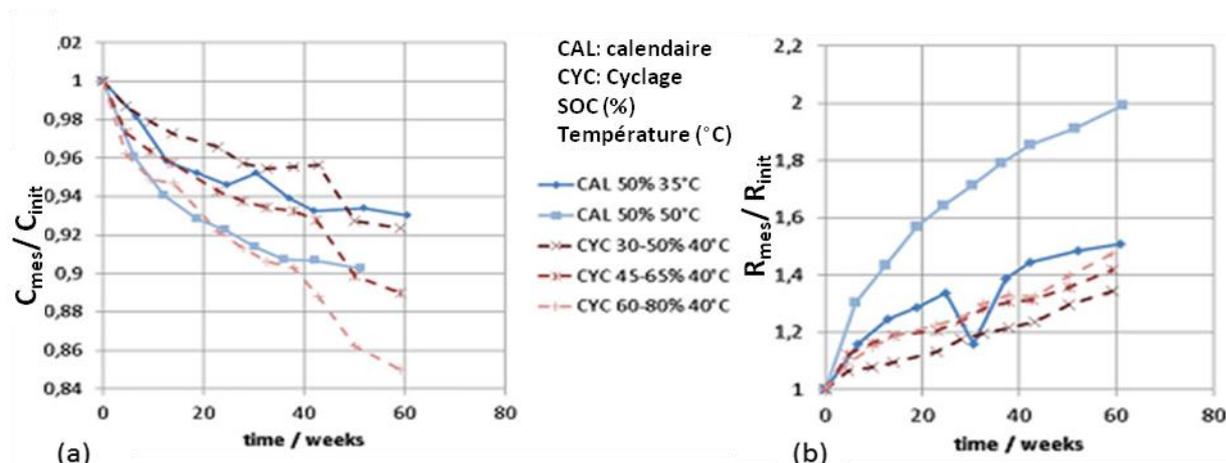


Figure.I. 10 : comparaison de variations de la capacité (a) et la résistance (b) entre les vieillissements calendaire et en cyclage en fonction du SOC et de la température, [61]

I.3.2. Le supercondensateur

I.3.2.1. Fonctionnement

Il existe très peu de système de stockage de l'électricité qui ne passe pas par une transformation sous une autre forme d'énergie. Le supercondensateur en fait partie. Il est composé d'une paire d'électrodes en charbon actif ou en fibres de tissus activés de surfaces spécifiques pouvant atteindre 3000m²/g. La notion de capacité apparait avec le déplacement des ions positifs et négatifs dans l'électrolyte sous l'effet du champ électrique appliqué aux bornes du supercondensateur. Les charges de signes opposés sont localisées sur les surfaces poreuses, (cf. Figure.I.11) et il y a création de deux zones de charge d'espace, c'est le principe de *double couche* électrochimique.

Le schéma équivalent de tout supercondensateur est donné par l'assemblage en série des deux condensateurs avec une résistance associée à l'électrolyte. La résistance d'un électrolyte aqueux est plus faible que celle d'un électrolyte organique. Malheureusement, cet avantage est atténué par le fait que la tension d'un supercondensateur à électrolyte aqueux est inférieure à celle d'un supercondensateur à d'électrolyte organique (1,23V contre 3V), [62].

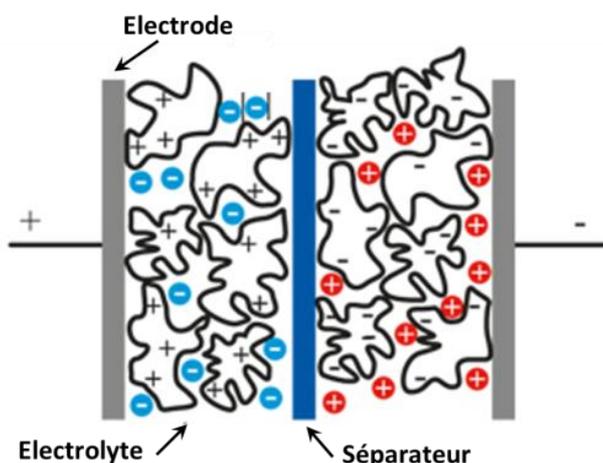


Figure.I. 11 : schéma de principe d'un supercondensateur, [62]

I.3.2.2. Caractéristiques

Du fait de la haute surface spécifique des électrodes, la surface active des couches doubles est très étendue. Elle permet ainsi un stockage d'énergie massique plus élevé (de l'ordre de 5Wh/kg) que celle d'un condensateur classique et une puissance massique d'environ 1.5kW/kg. Les réactions électrochimiques n'intervenant pas (ou très peu) aux interfaces des électrodes, il en résulte une cyclabilité pouvant dépasser le million de cycles, beaucoup plus importante que celle des accumulateurs électrochimiques [63], [64].

Grâce à une constante de temps très faible, le supercondensateur peut fournir des puissances importantes sur des temps très court et avec peu de pertes. Cela lui permet donc de s'imposer comme source d'énergie dans des applications présentant des pics de puissances importantes. Dans des applications comme les véhicules électriques, à titre d'exemple la *BlueCar* de Bolloré [48], le supercondensateur assiste la batterie (source de puissance moyenne) en fournissant les pics de puissances au démarrage et pendant l'accélération pour éviter les décharges profondes de cette dernière et augmenter ainsi sa durée de vie.

A défaut d'alternatives, ce sont les batteries Li-ion qui sont utilisées pour alimenter les VE, du fait de leur densité d'énergie. Ce paragraphe nous a permis d'identifier les performances des accumulateurs Li-ion et des supercondensateurs. La faible densité d'énergie de ces derniers ne leur permet pas d'être un concurrent des batteries. Cependant leur densité de puissance est une option intéressante pour la constitution d'une solution hybride avec les batteries Li-ion.

I.4. Hybridation des sources d'énergie

L'hybridation consiste à combiner plusieurs sources d'énergies pour répondre à la puissance globale demandée. C'est le cas des véhicules hybrides (cf. paragraphe 1.2.1) qui associent deux sources d'énergie de nature différente pour la propulsion du véhicule. Dans cette partie, nous nous intéressons au principe d'une Source d'Énergie Hybride (SEH) composée d'une batterie Li-ion et d'un supercondensateur. Comme nous l'avons déjà évoqué et comme la Figure.I.12 le montre, la batterie Li-ion et le supercondensateur ont des performances distinctes et complémentaires. Cette même figure montre les performances des VE actuels et celle envisagées d'ici 2020.

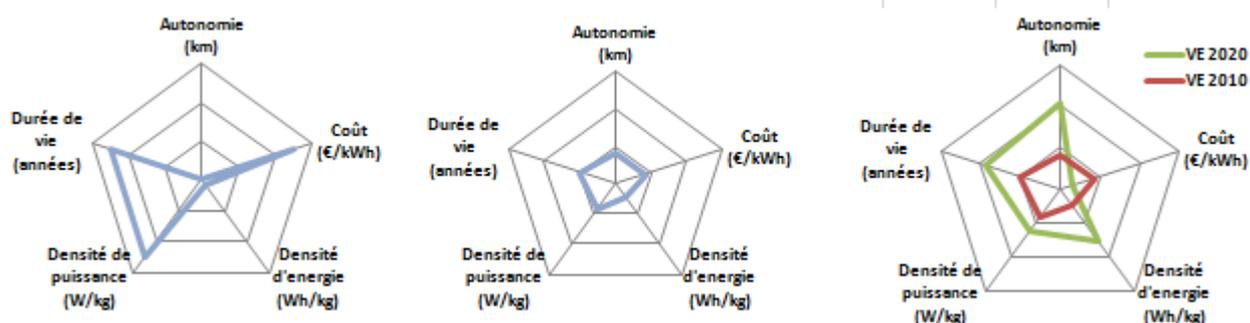


Figure.I. 12: niveau de performances des supercondensateurs (a), des batteries Li-ion (b) et des VE en 2010 et 2020 (c). [56], [55].

Les VE d'aujourd'hui utilisent souvent comme source d'énergie une batterie seule avec des performances très dépendantes de ce dispositif de stockage. Ceci sera également vrai pour les VE de futur. Ainsi, l'objectif à atteindre d'ici 2020 repose quasi exclusivement sur l'amélioration des

performances du stockage énergétique. Notre objectif est d'évaluer les performances des systèmes de stockage à hybridation de batteries et de supercondensateurs. L'hybridation nécessite des convertisseurs pour assembler les deux sources et contrôler le partage de puissance. Les architectures d'association de batteries/supercondensateurs et les stratégies de gestion de l'énergie font l'objet des paragraphes suivants.

I.4.1. Association batterie Li-ion/ supercondensateur

Il existe plusieurs configurations pour connecter les sources de stockage d'énergie à l'utilisation : série, parallèle et avec un ou deux convertisseurs. Le ou les convertisseurs peuvent être des onduleurs qui sont généralement utilisés dans des applications de fortes tensions de bus continu, Camara [65] a étudié une architecture à double étage d'onduleur pour l'hybridation d'une source (batterie / supercondensateur) dans le cas d'un véhicule Hybride. Cependant, les architectures, que nous détaillons ci-dessous sont composées de hacheurs et elles sont les plus fréquentes dans le domaine de l'automobile.

I.4.1.1. Architecture en cascade avec un convertisseur DC/DC

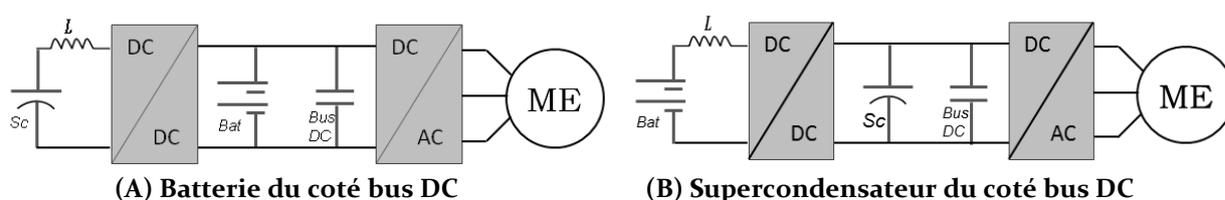


Figure.I. 13 : architectures en cascade avec un convertisseur DC/DC

Dans cette configuration, l'un des systèmes de stockage est, directement, connecté au bus continu. Le branchement de la batterie du côté DC bus (cf. Figure.I.13-A) maintient la tension du bus continu stable. Cette architecture a été adoptée par Dixon *et al* [68] et dans d'autres travaux, sur les véhicules électrifiés, visant à étudier une source d'énergie hybride, notamment, dans le cas de récupération d'énergie par le supercondensateur. Avec un seul convertisseur, les pertes et le coût financier de l'installation sont réduits, la commande des flux énergétiques est relativement simple. L'absence d'une isolation entre l'onduleur et la batterie peut endommager cette dernière lors des pics puissances. En revanche, la connexion du supercondensateur au bus continu comme présentée dans la Figure.I.13-B protège mieux la batterie. Cependant, la tension du bus est moins stable car la tension du supercondensateur varie considérablement en fonction du SOC. Cela rend cette configuration inadaptée pour une alimentation en continu (ex. alimentation du VE), mais peut être intéressante dans le cas d'assistance au démarrage des véhicules thermiques ou micro hybride, [66], [67].

I.4.1.2. Architecture en cascade avec deux convertisseurs DC/DC

Cette architecture dispose d'un convertisseur abaisseur-élévateur, supplémentaire, entre la batterie et le supercondensateur, cf. Figure.I.14. Ceci permet à la tension de la batterie d'être différente de celle du supercondensateur. Cependant, il est utile de mettre la batterie du côté entrée du convertisseur 1 afin d'être en mesure de contrôler le courant de sortie, et donc les contraintes en courant. Comme la tension du supercondensateur peut varier considérablement, la tension à l'entrée du convertisseur 2 peut connaître d'importantes fluctuations. De ce fait, ce

convertisseur et le supercondensateur doivent être surdimensionnés. Le rendement de cette solution est faible, car l'énergie doit traverser les deux convertisseurs avant d'arriver au moteur.

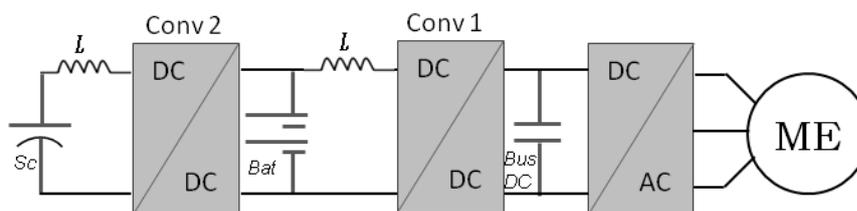


Figure.I. 14 : architecture série avec deux convertisseurs DC/DC

Le principal inconvénient des architectures séries est leur fiabilité face à une défaillance de l'un des systèmes de stockage. De plus la distribution de puissance entre les deux sources ne peut pas se faire d'une manière indépendante.

I.4.1.3. Architecture parallèle avec deux convertisseurs DC/DC

La deuxième configuration possible par association active utilise une entrée à deux convertisseurs bidirectionnels mis en parallèle, cf. Figure.I.15. Ils sont contrôlés en courant et en tension d'une manière indépendante en fonction des SOC de la batterie et du supercondensateur, respectivement. Cela signifie que le flux de puissance qui traverse les convertisseurs 1 et 2 n'est pas le même contrairement à l'association en série où le flux passant par les deux convertisseurs est identique.

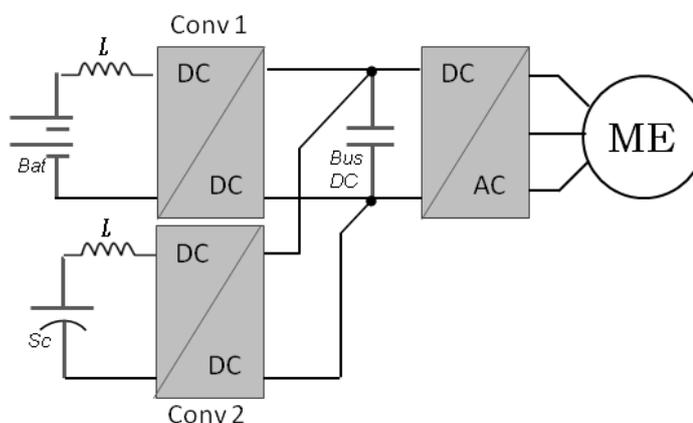


Figure.I. 15 : architecture parallèle avec deux convertisseurs DC/DC

L'association active parallèle offre la possibilité de fonctionner avec une seule source en cas de défaillance de la deuxième, ce qui augmente la fiabilité du système global.

I.4.2. Stratégies de gestion de l'énergie

Avec l'électrification de plus en plus présente dans les systèmes de transport et l'objectif d'améliorer leur efficacité énergétique, La thématique de la gestion d'énergie est un sujet suscitant de plus en plus d'intérêt de la part des chercheurs et des industriels. Avec l'apparition des véhicules hybrides, on a vu apparaître de nombreuses stratégies en vue d'optimiser au mieux la répartition de la puissance entre la source principale (le moteur thermique) et l'élément de stockage d'énergie. Cependant, la gestion de l'énergie dans le cas des véhicules électriques reste peu traitée, car l'hybridation de sources d'énergie est un concept relativement récent. Dans la

partie ci-dessous, nous allons présenter les principales stratégies, appliquées aux VEHS et pouvant être aisément adaptées au cas d'une SEH alimentant un VE. Ces stratégies, comme présenté dans la Figure.I.16 peuvent être classées en deux catégories : les stratégies à base de « règles » et les stratégies basées sur l'optimisation.

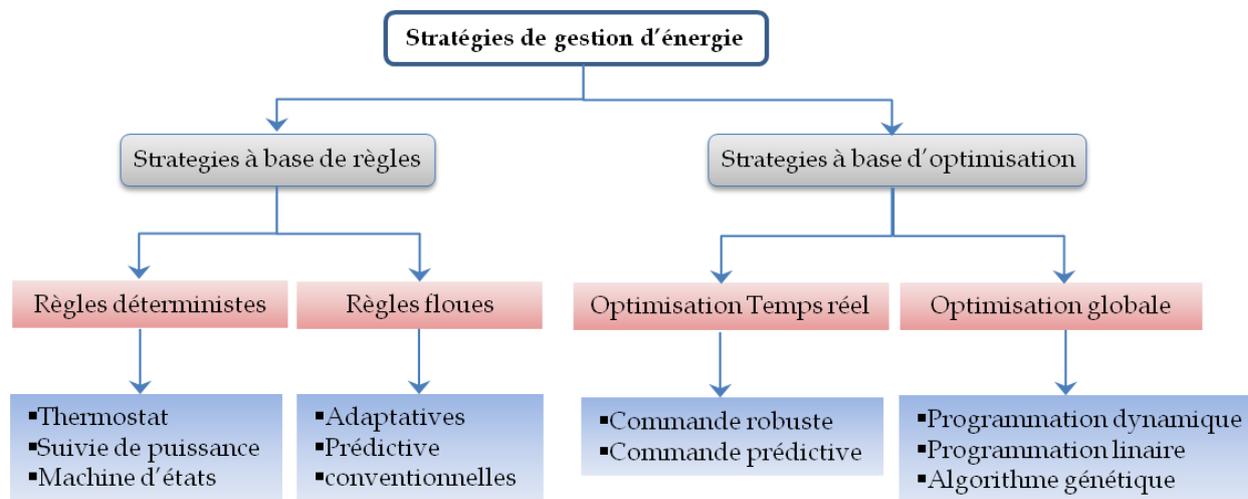


Figure.I. 16 : classification des stratégies de gestion d'énergie, [70], [71]

I.4.2.1. Stratégies de gestion à base de règles

Cette catégorie de stratégies permet de distribuer la puissance d'une manière efficace et de contrôler les flux énergétiques en temps réel. Néanmoins la solution obtenue n'est pas forcément optimale. Les règles de gestion sont définies au préalable, sur la base d'une expertise ou de modèles mathématiques, et ne nécessitent pas la connaissance du profil de puissance, entre autre le cycle de conduite. Ces règles sont définies par rapport à un ou plusieurs objectifs et elles peuvent être établies par une approche déterministe ou par logique floue par exemple :

- *Règles déterministes* : les règles sont fixées en lien direct avec l'objectif et c'est une stratégie simple à contrôler. On peut citer dans cette catégorie la méthode « Thermostat », utilisée par *Di Wu et al* [69] pour la gestion de l'énergie d'un VE alimenté par une pile à combustible et une batterie mises en parallèle. Dans ce cas, l'objectif est de minimiser la consommation de l'hydrogène. Pour cela, la pile doit fonctionner en son point de rendement optimal pour recharger la batterie et maintenir ainsi le SOC de cette dernière entre deux valeurs limites. C'est la méthode « suivie de puissance » qui est la plus exploitée¹⁶. Cette méthode, en plus du fonctionnement de la batterie en mode *Charge Sustaining*, prend en compte la vitesse du véhicule. A faibles vitesses, la voiture roule en mode électrique et le moteur thermique peut fonctionner en dehors de son point de rendement optimal, [70], [71].
- *Règles floues* : les règles sont définies au préalable et sont gérées à l'aide de la logique floue. Elles sont donc considérées comme une amélioration des règles déterministes. Sans entrer dans le détail du fonctionnement de ces méthodes, ces dernières tolèrent des imprécisions dans les mesures et sont facilement adaptables aux variations des valeurs initiales des règles, [72].

¹⁶ La méthode « suivie de puissance » est la stratégie de gestion d'énergie utilisée par la Toyota Prius et la Honda Insight.

I.4.2.2. Stratégies à base d'optimisation

Dans ces stratégies, les objectifs tels que : la consommation de carburant, les émissions de gaz et le SOC de la batterie, dans le cas des véhicules hybrides, sont présentés sous forme d'équations en fonction de contraintes physiques comme la vitesse et le couple du véhicule. Minimiser ces fonctions consiste à chercher les références optimales des contraintes physiques. Les stratégies basées sur l'optimisation se partagent en deux catégories :

- *Optimisation en Temps Réel* : elle permet d'obtenir une commande des flux énergétiques applicable en ligne et ne nécessite pas la connaissance du profil de conduite par avance. Mais, certains critères doivent être minimisés au détriment de l'optimisation instantanée. A titre d'exemple, *Kermani et al [73]* ont développé un algorithme contenant un modèle prédictif des conditions de conduite. Cet algorithme contrôle le SOC d'une batterie et optimise la consommation de carburant d'un VEH. Une autre méthode dite « ECMS » pour *Equivalent Consumption Minimization Strategy*, proposée par *Mustardo et al [74]*, est basée sur un algorithme adaptatif. Cet algorithme utilise une fonction qui calcule l'équivalent de recharge de la batterie en consommation de carburant. La consommation globale est égale à la somme de la consommation du VEH délivrée par le moteur thermique et l'équivalent délivré par le moteur électrique. Cette méthode ne nécessite pas de modèle prédictif, mais l'estimation de la consommation globale est peu précise avec prédiction au-delà de 20 secondes, [75], [72].
- *Optimisation globale* : cette approche nécessite la connaissance du profil de conduite et elle n'est pas applicable en ligne. C'est une méthode qui permet d'avoir une solution optimale et peut prendre en compte plusieurs critères d'optimisation. Sa complexité rend son implémentation en temps réel presque irréalisable, par contre elle est très utile pour l'ajustement d'autres stratégies de gestion. *Romaus et al [76]* ont étudié une SEH composée de batteries et supercondensateurs pour l'alimentation d'un VE urbain. Ils ont exploité, séparément, deux approches de programmation : la première était la programmation dynamique déterministe pour l'optimisation du dimensionnement des éléments de la source. La seconde était la programmation dynamique stochastique en vue de la gestion de la puissance.

Cette partie nous a permis de rappeler quelques architectures utilisées dans le cadre de l'hybridation de deux sources d'énergie pour l'alimentation des véhicules électriques. Une recherche bibliographique a été aussi réalisée sur les méthodes de gestion d'énergie développées pour les véhicules hybrides mais applicables également pour l'hybridation des sources d'énergie.

I.5. Conclusion

Nous avons vu précédemment que les performances des véhicules électriques, existant sur le marché aujourd'hui, sont loin d'être égales à celles des voitures thermiques classiques. Les contraintes liées au développement des VEs peuvent être classées en deux catégories en totale corrélation: des contraintes vues par le client (l'acheteur de la voiture), à savoir, la faible autonomie, le temps long pour l'approvisionnement en énergie et le coût d'achat du véhicule. La deuxième catégorie regroupe les contraintes vues par les constructeurs, qui sont, en plus de celles vues par le client, liées à la réduction de la consommation du véhicule et améliorer les niveaux de récupération de l'énergie. Donc, ces contraintes, sont étroitement liées aux performances de la source d'énergie du véhicule.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques des batteries Li-ion et des supercondensateurs. L'aspect technologique des batteries Li-ion a été volontairement mis en avant pour faire ressortir l'un des objectifs de cette thèse, l'analyse technologique comparative. Dans ce manuscrit la comparaison sera basée :

D'une part, sur la comparaison en termes de poids, volume et coût financier de sources d'énergie alimentant un VE urbain. Pour cela, une étude sur le dimensionnement des batteries Li-ion et de sources d'énergie hybrides (batteries Li-ion Supercondensateurs) fera l'objet du deuxième chapitre.

De l'autre part, la comparaison sera basée sur le critère de durée de vie des batteries Li-ion. Le troisième chapitre est consacré à l'étude expérimentale de vieillissement en cyclage de deux technologies de batterie Li-ion (Haute densité de puissance et Haute densité d'énergie). Les profils de cyclage seront directement issus de dimensionnement des sources d'énergie hybrides et ils représentent les contraintes appliquées à ces batteries dans le cas de l'alimentation du VE urbain.

Chapitre II : dimensionnement des sources d'énergie hybrides

- 1. Cahier de charge**
- 2. Dimensionnement de la source d'énergie du VE**
- 3. Etude de l'influence de certains paramètres sur le dimensionnement de la SEH**

Introduction

Ce chapitre concerne le dimensionnement des sources de stockage d'énergie électrique alimentant un VE. Le but de ce dimensionnement est de proposer une solution « optimale » qui permet d'améliorer les performances du VE et, le cas échéant, les performances des systèmes de stockage eux-mêmes. En effet, les solutions étudiées portent sur l'hybridation possible des systèmes de stockage et la recherche d'un bon compromis pour exploiter au mieux les avantages de chaque système. L'hybridation est envisagée par association de batteries Li-ion avec des supercondensateurs. Toutefois, la nature des batteries Li-ion sera largement discutée selon leur type : Haute Puissance (HP) et Haute densité d'Energie (HE).

Dans ce chapitre on s'intéresse aux stratégies de gestion d'énergie à base de règles dites déterministes. Nous appliquons une stratégie de gestion d'énergie nommée « limitation de puissance » qui sert de point de comparaison dans ce manuscrit. Cette stratégie présentée à la section-II.3.3, a pour avantage d'être basée sur les caractéristiques de charge et de décharge des batteries. Par ailleurs, cette stratégie est associée à une méthode de surveillance de l'état de charge des supercondensateurs. Les SEHs dimensionnées en utilisant cette stratégie sont comparées au système d'alimentation du VE par les batteries « seules » pour montrer l'apport éventuel de l'hybridation en termes de masse, volume et coût.

II.1. Cahier des charges

Cette étude a pour objectif le dimensionnement optimal de sources d'énergie électrique pour des applications automobiles. Un tel objectif est d'autant plus complexe qu'il existe plusieurs critères entrant en concurrence avec des impacts plus ou moins restrictifs. C'est pour cette raison que le cahier des charges doit être clairement défini. Nous allons aborder ce deuxième chapitre par la présentation des caractéristiques du véhicule électrique que l'on souhaite alimenter par une source de stockage d'énergie et d'autres éléments du cahier de charges tels que l'architecture de la source, le type de système de stockage...etc.

II.1.1 Cycles de conduite

Les cycles de conduite sont composés d'un profil de vitesse et d'un profil de pente de la route. À l'origine, ces cycles étaient utilisés pour évaluer les émissions des gaz polluants et la consommation de carburant pour les véhicules thermiques, [79], [80]. Les mêmes cycles ont été jugés utiles pour comparer l'efficacité des VEHs en termes de coût, de consommation de carburant, et d'autonomie en mode purement électrique, [81], [82], [83]. Toutefois, les tendances réelles de conduite sont souvent beaucoup plus complexes et exigeantes (vitesse, accélération...) que celles de ces cycles d'homologation.

Le principal problème est que ces cycles normalisés ne sont pas adaptés au dimensionnement de VE car ils ne sont pas représentatifs des puissances mises en jeu. De plus, il n'existe pas de cycles adaptés aux besoins de dimensionnement de ces nouveaux types de véhicules disponibles dans le domaine public. Pour cette raison, nous proposons dans cette partie, de comparer les cycles existants afin de choisir le plus approprié. Deux types de cycles sont ici comparés.

II.2.1.1. Cycle NEDC

Le *New European Drive Cycle* (NEDC) est un profil de conduite « homologation », proposé par le *Motor Vehicle Experts Group* en 1995 (MVEG-95) pour reproduire les modes de conduite sur les routes européennes. Il combine, comme montré par la [Figure.II.1-B](#), un cycle urbain (ECE-

15) répété quatre fois, plus une portion extra-urbaine qui représente un profil de vitesse sur autoroute. C'est ce cycle qui a été exploité lors de l'élaboration des normes Euro évoquées dans le paragraphe-1.1.4. Cependant, le cycle NEDC manque de « sévérité ». En effet, d'après ce cycle le véhicule va de 0 à 50km/h en 26s pendant la conduite urbaine, et sa vitesse maximale est de 120km/h sur autoroute. Cette dernière ne dure que 10s pendant tout le cycle d'essai. La distance parcourue est d'environ 11,4km pour un temps de 1200s avec une vitesse moyenne de 34,2km/h,

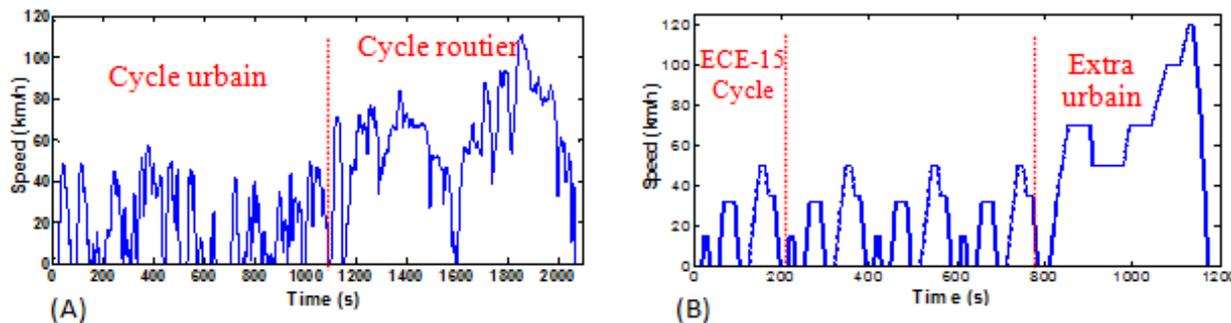


Figure.II.1 : (A) cycle de conduite ARTEMIS, (B) cycle de conduite NEDC.

II.2.1.2. Cycle ARTEMIS

Le cycle ARTEMIS (*Assesment and Reliability of Transport Emission Models Inventory Systems*) est le deuxième profil considéré dans notre étude. Celui-ci est basé sur l'analyse de données issues de travaux antérieurs tels que des projets de recherche *MODEM-HyZEM* et les cycles de conduite pour les véhicules légers (Inrets-PVU), [84]. Ces données ont été complétées par des mesures des émissions de gaz tenant compte de l'état (chaud ou froid) du véhicule au démarrage et les changements de rapports de vitesse. Trois cycles (urbain, routier et autoroutier) ont été établis pour décrire le parcours et reproduire les conditions réelles d'usage du véhicule. Dans notre cas, le cycle d'essai est composé d'un profil de conduite urbaine et d'un profil de conduite routier, (cf. Figure.II.1-A). La partie urbaine a une vitesse moyenne de 7,5km/h. Pour le profil routier, la vitesse moyenne est de 61,3km/h avec une vitesse maximale de 110,7 km/h. La combinaison des cycles urbain et routier permet de simuler une distance de roulage de 22km sur une durée d'environ 34 minutes [79].

Ce cycle ARTEMIS possède des dynamiques de conduite beaucoup plus proche de la réalité que le cycle NEDC. **C'est pour cette raison que nous l'avons sélectionné pour cette étude.** Une comparaison de l'influence de ces deux cycles de conduite est faite au paragraphe II.4.

II.1.2 Caractéristiques et consommations du VE

Les consommations de puissance et d'énergie d'un VE dépendent du cycle de conduite, mais également des caractéristiques du véhicule en terme de : poids, volume, coefficient de pénétration dans l'air (C_x)... etc. Notre travail est basé sur l'étude de la consommation d'un VE de type urbain, dont les paramètres sont donnés par le Tableau.II.1. A noter que la masse (M_{VE}), renseignée dans ce tableau, représente la masse de tous les organes du VE (châssis, habitacle ...), mais n'inclut pas la masse du système de stockage d'énergie (M_{SSE}). Son influence, dépendant de la solution technologique choisie, sera traitée à part dans le paragraphe II.2.4 pour permettre la solvabilité du problème sans avoir à faire appel à un processus itératif. En effet, la proportion de la masse du SSE dans le VE n'est pas négligeable.

Tableau.II. 1 : paramètres du véhicule électrique urbain de type *Bluecar*, [48]

Paramètres du VE	Valeurs
M : masse du VE sans SSE (kg)	860
s : surface frontale (m ²)	2,75
ρ : densité de l'air (kg/m ³)	1,2
C _x : coefficient de pénétration dans l'air	0,3
C ₀ : coefficient de résistance au roulement à l'état statique	0,008
C ₁ : coefficient de résistance au roulement à l'état dynamique	1,6e-6
r : rayon de la roue (m)	0.33

II.2.1 Dynamique du VE

La puissance et l'énergie sont imposées par la dynamique du VE sous des conditions (cycle de vitesse et profil de pente) définissant le trajet à parcourir. La puissance P_V équivaut à la puissance présente au niveau des roues et s'exprime par :

$$P_V = C_T \cdot \Omega_{roue} \tag{II.1}$$

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 VE :

$$\begin{cases} C_T = F_T \cdot r \\ \Omega_{roue} = V_{VEH} \cdot r^{-1} \end{cases} \tag{II.2}$$

Avec r est le rayon de la roue.

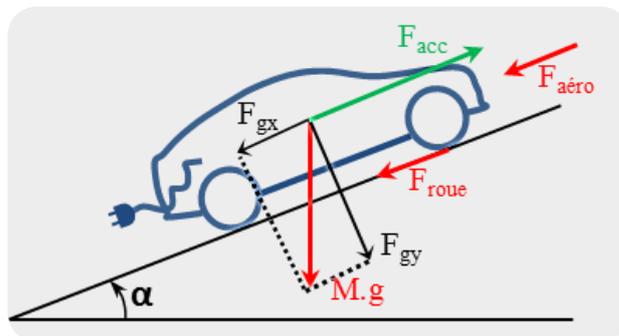


Figure.II. 2 : forces sur un VE en roulement.

La force de traction nécessaire au déplacement du VE est donnée par la somme des forces résistantes à l'avancement ajoutée à la force d'accélération F_{acc} . Comme présenté dans la Figure.II.2, les forces résistantes au roulement, détaillées par le groupe d'équations II.3, sont :

- la force aérodynamique F_{aero} ,
- la force F_{roue} due au contact des roues sur la chaussée
- la force gravitationnelle F_{gx} due à la pente α .

$$\begin{cases} F_{aero} = 0,5 \cdot \rho \cdot s \cdot C_x \cdot V_{VEH}^2 \\ F_{roue} = (M_{VE} + M_{SSE}) \cdot g \cdot (C_0 + C_1 \cdot V_{VEH}^2) \\ F_{gx} = (M_{VE} + M_{SSE}) \cdot g \cdot \sin(\alpha) \end{cases} \tag{II.3}$$

Ces forces sont donc exprimées en fonction des masses du VE et du SSE. Ainsi, la puissance du VE requise pour une mission peut être exprimée de nouveau par :

$$P_V = \left((M_{VE} + M_{SSE}) \cdot \frac{dV_{VEH}}{dt} + F_{aero} + F_{roue} + F_{gx} \right) \cdot V_{VEH} \tag{II.4}$$

La Figure.II.3 montre la puissance et l'énergie nécessaires pour la propulsion du VE selon le cycle de conduite ARTEMIS. La puissance positive correspond à la puissance que le système de propulsion transmet aux roues. P_{V_cons} étant la valeur maximale de cette puissance consommée. La partie négative représente la puissance récupérée durant les phases de freinage et P_{V_rec} est la valeur maximale de puissance récupérable par la source de stockage d'énergie.

L'énergie consommée est obtenue par l'intégration, selon l'équation II.5, de la puissance du véhicule par rapport au temps du parcours (t_{cy}). Le paramètre E_{V_cons} est la valeur maximale de l'énergie consommée nécessaire à l'autonomie du VE. Pour représenter l'autonomie, le VE répète le cycle de conduite autant que nécessaire pour atteindre la distance désirée. A titre d'exemple, dans la Figure.II.3 la distance représentée est de **150km**. Pour cela, les cycles NEDC et ARTEMIS seront donc répétés 14 et 7 fois respectivement.

$$E_{V_cons} = \int_0^{t_{cy}} P_V(t). dt \quad (II. 5)$$

Les puissances P_{V_cons} , P_{V_rec} et l'énergie E_{V_cons} sont les contraintes qui vont conditionner le dimensionnement de la SEH. Ces paramètres dépendent du profil de vitesse, de la pente et de l'autonomie désirée.

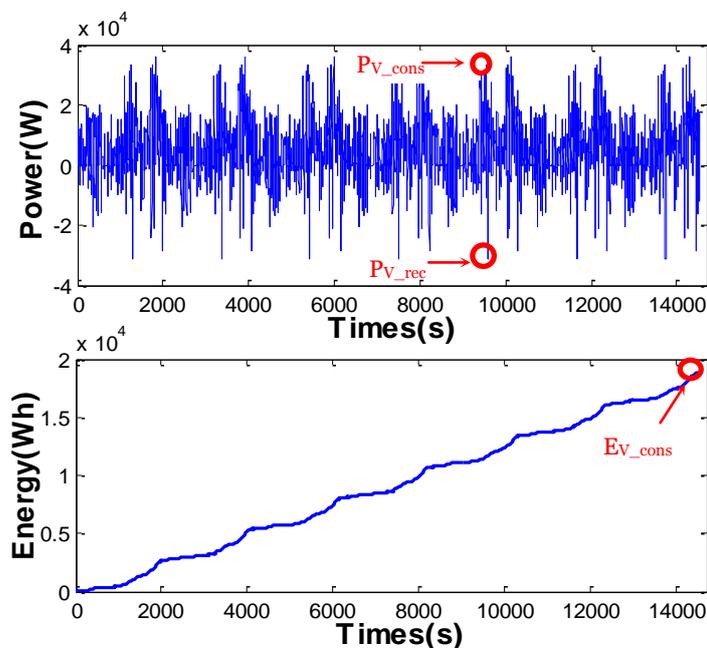


Figure.II. 3 : profils de puissance et d'énergie nécessaires pour un VE (cycle ARTEMIS sur 150km)

II.1.3 Influence de la masse de la SSE sur la consommation du VE

L'intégration de la masse du SSE dans le VE augmente la consommation du VE. En effet, la décomposition des équations II.3 et II.4 nous permet d'exprimer la variation de la puissance (ΔP_V) et de l'énergie consommée (ΔE_{V_cons}) provoquée par l'intégration du SSE dans le véhicule :

$$\Delta P_V = M_{SSE} \cdot \left(\frac{dV_{VEH}}{dt} + g \cdot \left((C_0 + C_1 \cdot V_{VEH}^2) + \sin(\alpha) \right) \right) \cdot V_{VEH} \quad (II. 6)$$

$$\Delta E_{V_cons} = \int_0^{t_{cy}} \Delta P_V(t). dt \quad (II. 7)$$

La surconsommation du VE due à la masse de la source d'énergie est d'autant plus élevée que la masse de cette dernière est importante. La Figure.II.4-A illustre cette surconsommation pour une masse de 400kg du SSE. De ce fait, il est nécessaire de vérifier que le SSE dimensionné au

préalable (sans la prise en compte de son poids) est capable de fournir la puissance et l'énergie totales requises. Durant ce travail de dimensionnement, nous ne considérons que les pertes au niveau d'alimentation et les pertes de la chaîne de traction liées à la machine électrique et les organes de transmission sont négligées.

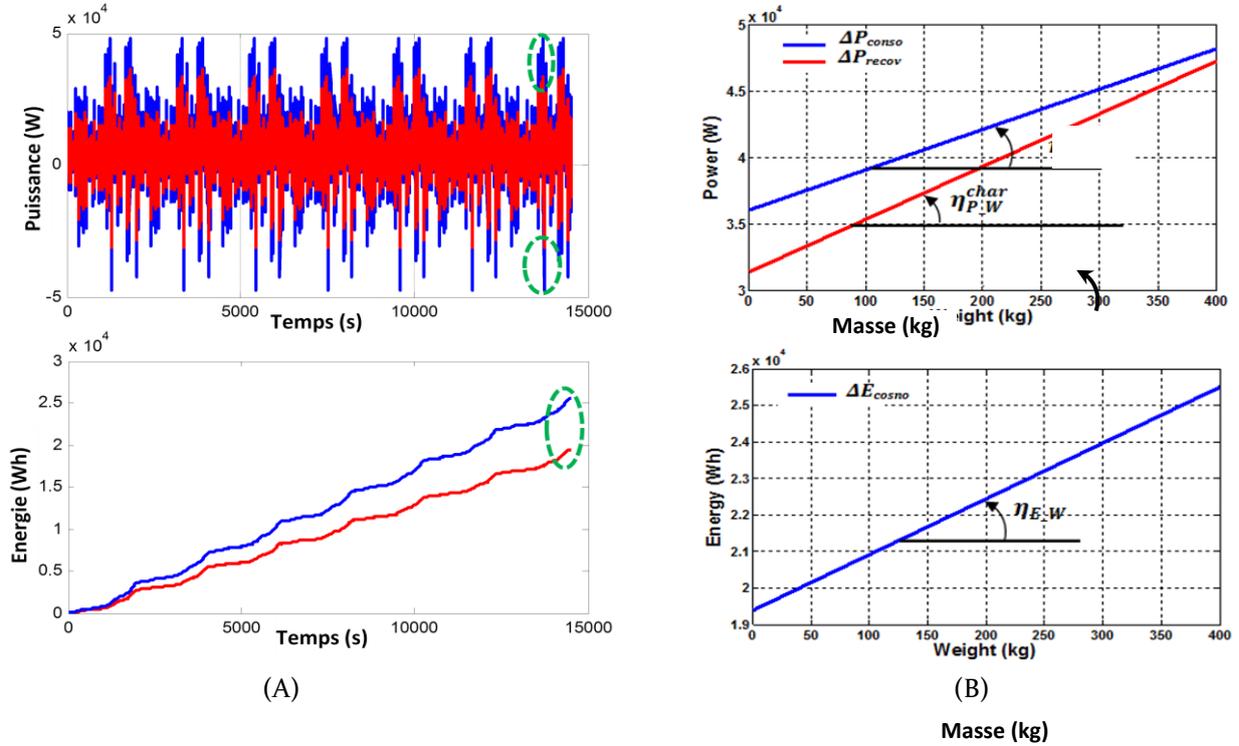


Figure.II. 4 : Cas de 150km d'autonomie et une pente de 2.5%. (A) influence de la masse du SSE sur la consommation d'un VE à (B) variations des contraintes maximales en fonction du poids du SSE.

Pour prendre en compte cette surconsommation, on s'intéresse au calcul de la variation des paramètres contraignants du dimensionnement, à savoir, $P_{V_{cons}}$, $P_{V_{rec}}$ et $E_{V_{cons}}$. La Figure.II.4-B illustre (pour 120km d'autonomie et une pente de 0% par exemple) les variations linéaires des puissances crêtes et de l'énergie qui peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{cases} \Delta P_{V_{cons}} = \eta_{P:W}^{cons} \cdot W_{SSE} \\ \Delta P_{V_{rec}} = \eta_{P:W}^{rec} \cdot W_{SSE} \\ \Delta E_{V_{cons}} = \eta_{E:W} \cdot W_{SSE} \end{cases} \quad (II.8)$$

Où : W_{SSE} représente la masse de SSE. $\eta_{P:W}^{cons}$, $\eta_{P:W}^{rec}$ et $\eta_{E:W}$ expriment les rapports de variation des puissances crêtes et l'énergie en fonction du poids. Ces paramètres dépendent de la vitesse et de l'accélération du VE.

II.1.4 Architecture de la SEH

L'architecture permettant d'associer la batterie Li-ion et le supercondensateur retenue pour cette étude est l'architecture dite en cascade présentée au paragraphe 1.4.1.1 du premier chapitre. Ce choix est justifié par la simplicité et le bon rendement énergétique de cette configuration. En effet le branchement direct de la batterie au bus continu (cf. Figure.II.5) permet d'éviter des pertes supplémentaires liées à l'utilisation d'un convertisseur. Le supercondensateur est connecté au bus continu via un convertisseur de type élévateur (Boost).

La distribution de la demande de puissance est réalisée par le contrôle de hacheur. Ce contrôle dépend du rôle attribué, lors du dimensionnement, à chaque système de stockage.

Cependant, dans cette configuration, la tension du pack de batteries doit être égale à la tension du bus continu. Cette dernière est donnée par :

$$U_{Bus} = N_{S_B} \cdot U_{el_B} \tag{II. 9}$$

Où : N_{S_B} et U_{el_B} représentent, respectivement, le nombre série d'éléments du pack de batteries et la tension nominale d'un élément de batterie.

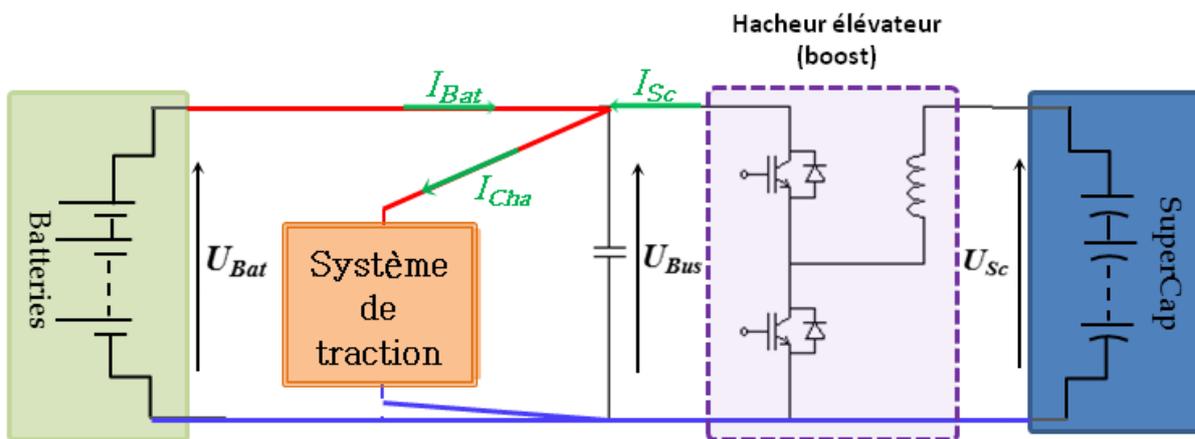


Figure.II. 5 : structure d'hybridation batteries Li-ion/supercondensateurs étudiée

II.1.5 Caractéristiques des batteries et des supercondensateurs étudiés

II.1.5.1 Les batteries Li-ion

Un VE est alimenté par un pack de batteries. Ce pack 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 de batteries (cf. Figure.II.6).

Tableau.II. 2: données fabricants des batteries Li-ion étudiées, [85], [86].

Acronyme	Batteries Li-ion HP			Batteries Li-ion HE		
	Ko40HP	Ko100HP	Sa34HP	Ko40HE	Ko100HE	Sa45HE
Fabricant	DowKokam	DowKokam	Saft	DowKokam	DowKokam	Saft
Nom commercial	SLB90216216H	SLB80460330H	VL 34P	SLB90216216	SLB80460330	VL45E Fe
Composition chimique (E. négative/ E. positive)	Graphite/ NMC	Graphite/ NMC	Graphite/ NCA	Graphite/ NMC	Graphite/ NMC	Graphite/ LFP
Tension nominale (V)	3,70	3,70	3,65	3,70	3,70	3,30
Capacité nominale (Ah)	40,00	100,00	33,00	40,00	100,00	44,00
Résistance interne (mΩ)	0,80	0,55	1,00	0,90	0,65	1,20
Courants Max charge/décharge (A)	(AC_1kHz, 23°C)	(AC_1kHz, 23°C)	(CC,25°C)	(AC_1kHz, 23°C)	(AC_1kHz, 23°C)	(CC,25°C)
Energie spécifique (Wh/kg)	80/200	200/500	120/500	40/40	100/100	6,28/50
Masse (kg)	143,68	148,00	128,00	167,25	164,44	155,55
Volume (l)	1,030	2,500	0,940	0,885	2,250	0,90
Coût (€)	0,508	1,140	0,410	0,441	1,066	0,48
	82,22	209,90		76,33		72,24

			67,80		190,81	
--	--	--	-------	--	--------	--

Lors de la composition d'un pack de batteries, les dispositifs d'assemblage et de protection représentent une masse et un volume supplémentaire. Une étude des packs de batteries existants sur le marché nous a permis d'évaluer la masse et le volume de ces dispositifs. On peut considérer que la masse et le volume supplémentaire peut être évalué à environ 40% de la masse et du volume des cellules. Cette hypothèse est valable aussi pour les packs de supercondensateurs.

Le [Tableau II.2](#) regroupe les caractéristiques des éléments de batteries Li-ion envisagés pour notre étude, représentatives des performances accessibles actuellement. De manière à étudier l'influence des performances d'une cellule sur le dimensionnement, nous avons sélectionné certaines batteries à Haute densité de Puissance (HP) et d'autres à Haute densité d'Energie (HE), commercialisées par les deux fabricants *DowKokam* et *Saft*. La particularité des batteries HP est qu'elles peuvent supporter des courants en charge et en décharge beaucoup plus importants que les batteries HE. Cette caractéristique, spécifiée par les régimes de charge et de décharge abordés dans le [paragraphe I.4](#), représente l'un des critères de base pour le dimensionnement des batteries.

En contrepartie, on constate que l'énergie spécifique des cellules HE est plus importante que celle des cellules HP. Au sein d'une même famille il existe également des disparités qui sont dus à la composition chimique de l'électrode positive.

Un pack de batteries Li-ion, tel qu'il est présenté par la [Figure.II.6](#), est composé d'éléments (ou cellules) mis en série et en parallèle. Pour déterminer les performances du pack on utilise comme base de calcul les caractéristiques d'un élément.

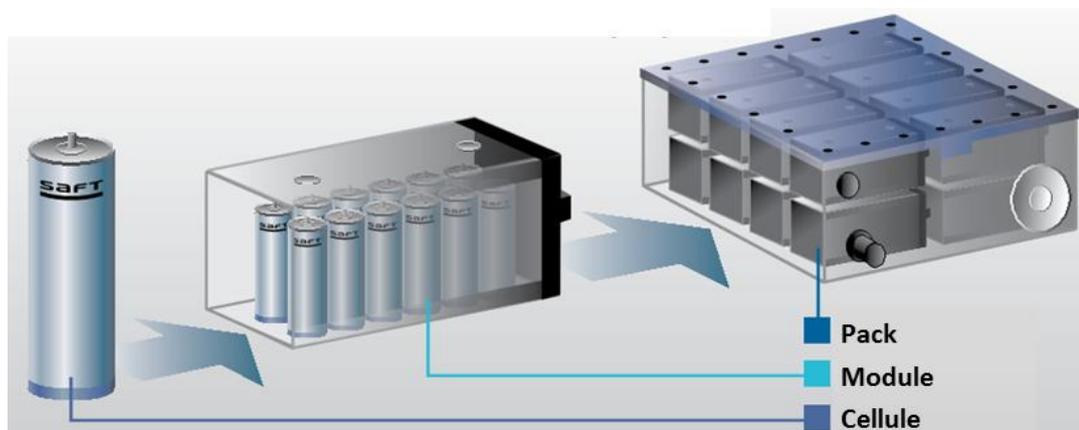


Figure.II. 6: chaine d'assemblage de batteries pour VE : de la cellule au pack, [86]

Les batteries utilisées pour l'alimentation des VEs, fonctionnent sur une plage de profondeur de décharge DOD=80%, (cf. [paragraphe-I.3.1.3](#)). L'énergie disponible dans un pack de batteries (E_{Bat}), exprimée en Wh, peut alors être calculée comme suit :

$$E_{\text{Bat}} = N_{S_B} \cdot N_{P_B} \cdot C_{el_B} \cdot U_{el_B} \cdot DOD \quad (\text{II. 10})$$

C_{el_B} et U_{el_B} représentent respectivement la capacité nominale en Ah et la tension nominale d'un élément de batterie.

Les limites de puissance de charge (P_{Bat}^C) et de décharge (P_{Bat}^D) d'une cellule de batteries représentent aussi des contraintes à prendre en compte pour le dimensionnement. Ces limites sont définies par les régimes de charge et de décharge fournis par le fabricant. En se référant aux limites de courants données par l'équation I.3 (paragraphe I.3.1.2), on écrit :

$$\begin{cases} P_{\text{Bat}}^D = N_{S_B} \cdot N_{P_B} \cdot I_{el_B}^D \cdot U_{el_B} \\ P_{\text{Bat}}^C = N_{S_B} \cdot N_{P_B} \cdot I_{el_B}^C \cdot U_{el_B} \end{cases} \quad (\text{II. 11})$$

La masse et le volume du pack batterie sont obtenus en multipliant le nombre de cellules par les masses (W_{el_B}) et volume (V_{el_B}) de ces mêmes cellules. Une majoration de 40% a été appliquée afin de tenir compte des boîtiers et cartes électroniques. On obtient ainsi :

$$\begin{cases} W_{\text{Bat}} = 1,4 \cdot N_{S_B} \cdot N_{P_B} \cdot W_{el_B} \\ V_{\text{Bat}} = 1,4 \cdot N_{S_B} \cdot N_{P_B} \cdot V_{el_B} \end{cases} \quad (\text{II. 12})$$

W_{Bat} et V_{Bat} représentent respectivement la masse et le volume d'un pack de batteries.

L'estimation du coût du pack est basé sur le prix d'achat « à l'unité » des cellules de batteries fournis par le fabricant *DowKokam* qui est de : 0,565€/Wh pour les batteries de type haute puissance et 0,516€/Wh pour les batteries énergétiques. Le coût total d'un pack de batteries (Coût_{bat}) s'exprime en fonction du coût d'un élément (Coût_{el_B}) comme suit :

$$\text{Coût}_{\text{Bat}}(\text{€}) = N_{S_B} \cdot N_{P_B} \cdot \text{Coût}_{el_B} \quad (\text{II. 13})$$

II.1.5.2 Supercondensateur

Pour cette étude, le système de stockage utilisé comme source secondaire (où de puissance) du SEH est composé de supercondensateurs *Maxwell 350F/2.7V* dont les caractéristiques sont données dans le [Tableau II.3, \[87\]](#). Pour ce composant, contrairement aux batteries, les contraintes en puissance ne sont pas limitatives puisque ses limitations sont bien supérieures à ce que demande l'application. La limitation vient surtout des besoins énergétiques. C'est pour cette raison que la méthode de gestion de son énergie est très importante. Néanmoins, pendant le dimensionnement, même si le nombre d'éléments de supercondensateurs est calculé par rapport à l'énergie, on y effectue une vérification par rapport aux valeurs maximales de courant que peut assurer le pack de supercondensateurs dimensionné.

Tableau.II. 3: données fabricants du supercondensateur, [87]

Supercondensateur	
Acronyme	Sc350F/2,7V

Fabricant	Maxwell
Tension nominale (V)	2,70
Capacité nominale (Ah)	0,2625
Résistance interne (mΩ)	3.20
Courants Max charge/décharge (A)	840/840
Energie spécifique (Wh/kg)	5.62
Masse (kg)	0,063
Volume (l)	0,053
Coût (€)	13,50

Du fait que l'on considère que la tension du pack de supercondensateurs varie entre une tension maximale U_{Bus} et minimale de $\frac{1}{2}U_{Bus}$, l'énergie utile représente 75% de l'énergie stockée dans les supercondensateurs. D'une manière générale, on exprime alors l'énergie utile disponible dans un pack de N_{S_Sc} éléments en série et N_{P_Sc} branches comme suit :

$$E_{Sc} = \frac{3 N_{P_Sc}}{8 N_{S_Sc}} \cdot C_{el_Sc} \cdot (U_{Sc_max})^2 \quad (II. 14)$$

Où C_{el_Sc} et U_{Sc_max} sont respectivement la capacité nominale et la tension maximale d'un élément supercondensateur.

Les indicateurs d'encombrement (masse et volume) et le coût de cette source de puissance peuvent être calculés de la même manière que ceux des batteries. Donc, avec l'hypothèse de surdimensionnement de 40% appliquée pour le pack de supercondensateurs, sa masse (W_{Sc}) et son volume (V_{Sc}) s'expriment par :

$$\begin{cases} W_{Sc} = 1,4 \cdot N_{S_Sc} \cdot N_{P_Sc} \cdot W_{el_Sc} \\ V_{Sc} = 1,4 \cdot N_{S_Sc} \cdot N_{P_Sc} \cdot V_{el_Sc} \end{cases} \quad (II. 15)$$

II.2. Dimensionnement de la source d'énergie du VE

Dans la section précédente, nous avons présenté les caractéristiques des systèmes de stockage qui seront utilisés pour alimenter le véhicule électrique étudié, de type urbain. Nous avons montré l'influence de la masse de la source d'énergie sur la consommation du VE. Ce qui suit représente la partie principale de ce chapitre et aborde le dimensionnement des sources d'énergie avec des configurations batteries Li-ion utilisées « seules » ou en combinaison avec des supercondensateurs pour constituer des Sources d'Energie Hybrides (SEHs).

II.2.1 Approche générale de dimensionnement des batteries

Le dimensionnement de la SSE d'un VE peut être calculé selon trois critères. Ces critères, comme montrés par la [Figure.II.7](#), sont définis par la contrainte que doit assurer le pack de batteries indépendamment des autres. Ceux-ci sont en concurrence et c'est, bien entendu, le plus contraignant des trois qui déterminera le nombre d'éléments permettant de répondre au cahier des charges.

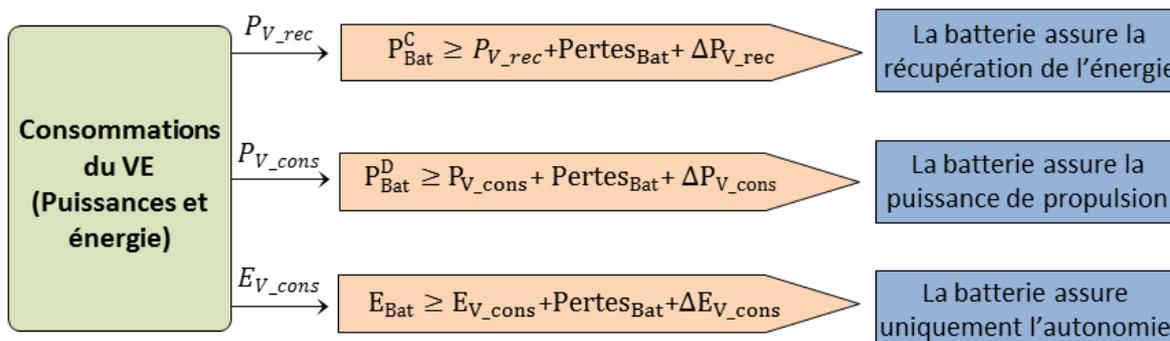


Figure.II. 7: critères pris en compte pour le dimensionnement d'un pack batteries d'un VE.

Le dimensionnement consiste à déterminer le nombre d'éléments $N_{S_B} \cdot N_{P_B}$ de batteries nécessaires pour assurer la mission.

On peut remarquer que toutes les équations permettant de dimensionner ce pack batteries (équations II.9 à II.13), comportent le terme $N_{S_B} \cdot N_{P_B}$ sauf celle qui permet de calculer la tension totale U_{Bus} (equation II.9). Pour cette dernière, seul le nombre d'élément en série entre en compte.

Durant cette étude, sauf indication contraire, on considère que toutes les cellules du pack de batteries sont mises en série, autrement dit : le nombre de branche parallèle est égale à 1 ($N_{P_B}=1$). Cette considération permet de simplifier les calculs et d'optimiser ainsi le dimensionnement. Ceci aura pour conséquence de ne pas pouvoir obtenir la tension du pack batterie mais une tension théorique bien supérieure à celle-ci dans le cas où le nombre de branche parallèle aurait dû être supérieur à 1. Nous verrons dans le paragraphe II.4.3 comment relier cette tension théorique à la tension du bus continu (U_{bus}) et obtenir le dimensionnement final du SSE.

Par conséquent, il reste à déterminer le nombre d'éléments en série (N_{S_B}) en tenant compte des variations de la consommation en fonction du poids du SSE et des pertes dues aux résistances internes des batteries, sachant que la résistante interne des cellules de batteries est considérée constante. N_{S_B} s'exprime (les détails de calcul sont exposés dans l'annexe. B.1) selon les trois critères de dimensionnement, comme suit¹⁷ :

- Dans le cas où les batteries assurent la récupération intégrale de la puissance de freinage (P_{V_rec}), N_{S_B} est donné en fonction de la puissance de charge maximale d'un élément de batterie ($P_{el_B}^C$) :

$$N_{S_B} = \frac{P_{V_rec} \left(1 + \sqrt{1 + 4 \cdot (P_{el_B}^C - \eta_{Pw}^{rec} \cdot 1,4 \cdot W_{el_B}) \cdot \frac{R_{0elB}}{U_{elB}^2}} \right)}{2 \cdot (P_{el_B}^C - \eta_{Pw}^{rec} \cdot 1,4 \cdot W_{el_B})} \quad (II. 16)$$

- Si les batteries doivent assurer le maximum de puissance consommée (P_{V_cons}) nécessaire pour la propulsion du VE, N_{S_B} s'exprime en fonction de la puissance de décharge d'un élément ($P_{el_B}^D$) :

¹⁷ Tous les paramètres utilisés pour le calcul de N_{S_B} sont en valeurs absolues, y compris la valeur de P_{V_rec} qui est positive.

$$N_{S_B} = \frac{P_{V_cons} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 4 \cdot (P_{el_B}^C - \eta_{P_W}^{cons} \cdot 1,4 \cdot W_{el_B}) \cdot \frac{R_{0_elB}}{U_{el_B}^2}}\right)}{2 \cdot (P_{el_B}^D - \eta_{P_W}^{cons} \cdot 1,4 W_{el_B})} \quad (II.17)$$

- Enfin, si le pack de batteries doit fournir l'énergie consommée (E_{V_cons}) pour assurer uniquement l'autonomie du véhicule, on détermine N_{S_B} par rapport à l'énergie disponible dans un élément de batterie (E_{el_B}) :

$$N_{S_B} = \frac{E_{V_cons} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 4(E_{el_B} - \eta_{E_W} \cdot 1,4 \cdot W_{el_B}) \cdot \frac{R_{0_elB}}{U_{el_B}^2}}\right)}{2 \cdot (E_{el_B} - \eta_{E_W} \cdot 1,4 \cdot W_{el_B})} \quad (II.18)$$

Nous venons de décrire les contraintes sur N_{S_B} qui permettent de dimensionner un pack de batteries et de fixer, puisque $N_{P_B}=1$, la tension théorique du bus continu (cf. équation II.9). Selon l'objectif de dimensionnement, on peut utiliser une, deux ou les trois expressions. En effet, si l'on considère que les batteries ont pour mission d'assurer uniquement l'autonomie, la vérification de la relation (II.18) suffit. En revanche, si les batteries seules assurent l'alimentation du VE avec un objectif de récupérer toute l'énergie au freinage, N_{S_B} doit vérifier les trois relations. Or, le dimensionnement par rapport à la puissance récupérée (P_{V_rec}) est le critère le plus contraignant, car la batterie est un composant énergétique et sa limite de puissance de charge est, généralement, plus faible que sa limite de décharge (cf. Tableau II.3). Pour cela, nous n'allons exploiter dans ce travail que les deux relations (II.17) et (II.18) pour l'étude de l'alimentation du VE par les deux solutions envisagées : batteries seules ou Source d'Énergie Hybride (SEH).

II.2.2 Alimentation du VE par les batteries seules

Dans cette partie nous allons procéder à l'étude de l'alimentation du VE par le seul pack de batteries. Les contraintes assurées par ce dernier sont le maximum de puissance consommée et l'énergie nécessaire pour l'autonomie. Dans ce cas, l'énergie de freinage n'est pas, nécessairement, totalement récupérée et doit donc être dissipée en freinage mécanique.

II.2.2.1 Algorithme de dimensionnement du pack de batteries

Sur la base des contraintes à assurer par le pack de batteries, nous avons élaboré l'algorithme de dimensionnement présenté par la Figure.II.8. Ces données d'entrée sont : les caractéristiques des éléments de batteries et la mission du VE définie par le profil de vitesse et la pente de la chaussée. Nous distinguons, globalement dans cet algorithme, deux étapes principales :

- La première étape concerne le calcul de N_{S_B} par rapport à la puissance consommée (équation II.17). Le dimensionnement par rapport à la puissance consommée a été délibérément choisi en premier, car à faible autonomie du VE, la puissance est un critère plus contraignant que l'énergie. Le N_{S_B} retrouvé fixe les caractéristiques du pack de batteries, entre autre, la limite de puissance de charge (P_{Bat}^C), la masse et l'énergie.

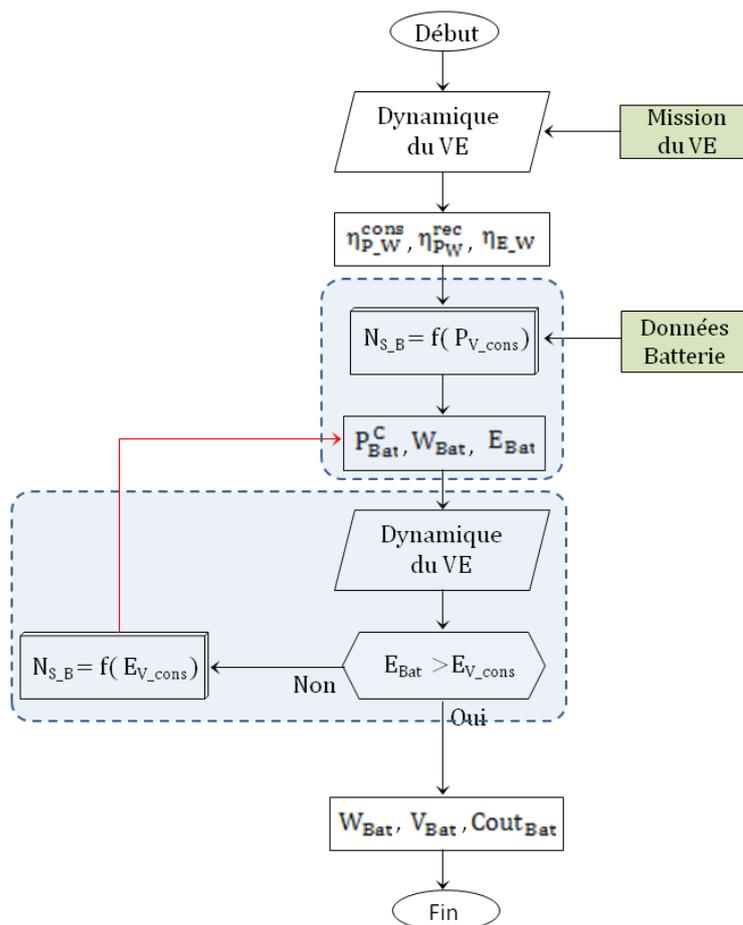


Figure.II. 8: algorithme de dimensionnement-cas d'alimentation du VE par des batteries « seules ».

- La limitation de la puissance de charge des batteries réduit la quantité de l'énergie récupérée notamment si le régime de charge de celles-ci est faible. De ce fait, une deuxième étape est nécessaire pour vérifier que l'énergie du pack dimensionné auparavant est suffisante afin d'assurer l'autonomie requise. Si tel est le cas, les caractéristiques de taille (masse et volume) et de coût du SSE alimentant le VE sont données directement en fonction de N_{S_B} exprimé par rapport à la puissance consommée. Par ailleurs, si l'énergie n'est pas suffisante, on redimensionne le pack de batteries par rapport à l'énergie consommée (i.e. on calcule $N_{S_{Bat}}$ suivant l'équation II.18).

II.2.2.2 Analyse des résultats du dimensionnement :

Le dimensionnement a été effectué pour le cycle de conduite ARTEMIS et une pente moyenne de 2.5%. Le profil de vitesse est répété autant de fois que nécessaire pour balayer une plage d'autonomie du VE allant de 22 à 400 km.

La Figure.II.9-A montre l'évolution de la masse des batteries dimensionnées en fonction de l'autonomie désirée. Nous constatons que les résultats obtenus évoluent en deux groupes distincts : le groupe des batteries hautes puissances (HP) pour lesquelles la masse augmente en fonction de l'autonomie, et le groupe des batteries hautes énergies (HE), où leur masse à faible autonomie est fixe et ne devient variable qu'au-delà de 267km d'autonomie.

La masse des batteries HP varie globalement, sauf pour les points à 22 et 44km où, dans ce cas, la masse est constante (cf. Figure.II.9-A). Ceci s'explique par le fait que pour ces batteries, l'énergie disponible est largement suffisante pour assurer l'autonomie. Le critère le plus

contraignant est donc la puissance consommée et la valeur de cette puissance est constante pour les deux cas de 22 et 44km d'autonomie.

Pour les batteries énergétiques, elles sont dimensionnées par rapport à la puissance pour des autonomies plus importantes. Comme le montre la Figure.II.9-B, les batteries Ko40HE sont dimensionnées par rapport à la puissance jusqu'à 267km d'autonomie. La masse ne varie pas, car la puissance consommée dimensionnante varie en fonction du profil de vitesse mais ne dépend pas de la longueur du trajet. Cela veut dire que, le pack de batteries dimensionné pour 22km (contraint par $P_{V_{cons}}$) dispose réellement d'un excès d'énergie qui peut couvrir une autonomie du VE plus importante. A partir de 267km l'énergie consommée requise devient plus importante, ce critère fixe alors le nombre d'éléments de batteries.

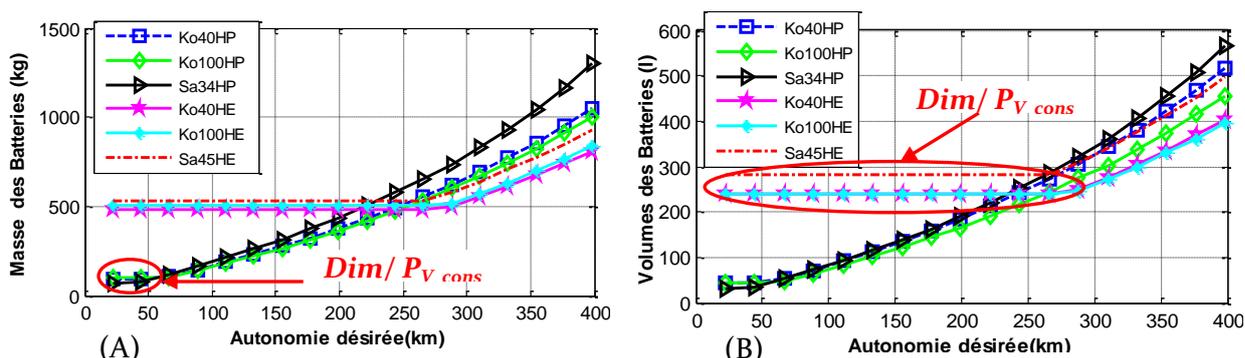


Figure.II. 9: résultats de dimensionnement batteries "seules" en fonction de l'autonomie. (A) Masses, (B) volumes

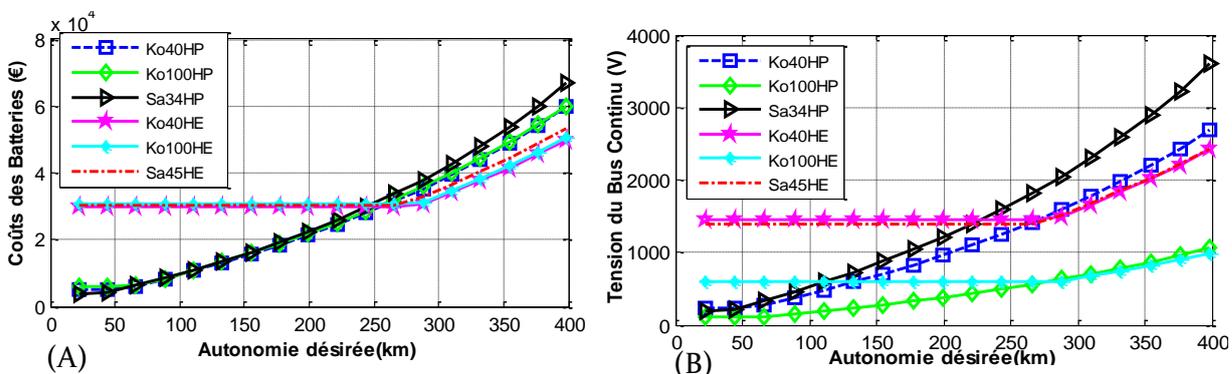


Figure.II. 10: résultats de dimensionnement batteries "seules" en fonction de l'autonomie. (A) Coûts, (B) Tension du bus continu

De point de vue technologie ou plus spécifiquement composition chimique des cellules de batteries, on peut remarquer que les batteries *Saft*, dont l'énergie spécifique est plus faible (cf. Tableau.II.2), ont une masse et un volume plus important (cf. Figure.II.9) que les packs de batteries *Kokam*. À titre d'exemple, la masse et le volume du pack de batteries Sa45HE sont supérieurs à ceux des batteries Ko40HE et Ko100HE, même si ces dernières et les cellules Sa45HE sont du même type (batteries énergétiques). Cela montre l'influence de la densité d'énergie, donc de la composition chimique, du savoir-faire et des choix technologiques des fabricants, sur la taille (masse et volume) de la SSE dimensionnée.

Les valeurs de la tension du bus continu obtenues par ce dimensionnement sont des valeurs virtuelles. Elles sont parfois très importantes (cf. Figure.II.10.B) mais elles permettent de calculer le courant et donc les pertes au niveau des batteries et du convertisseur.

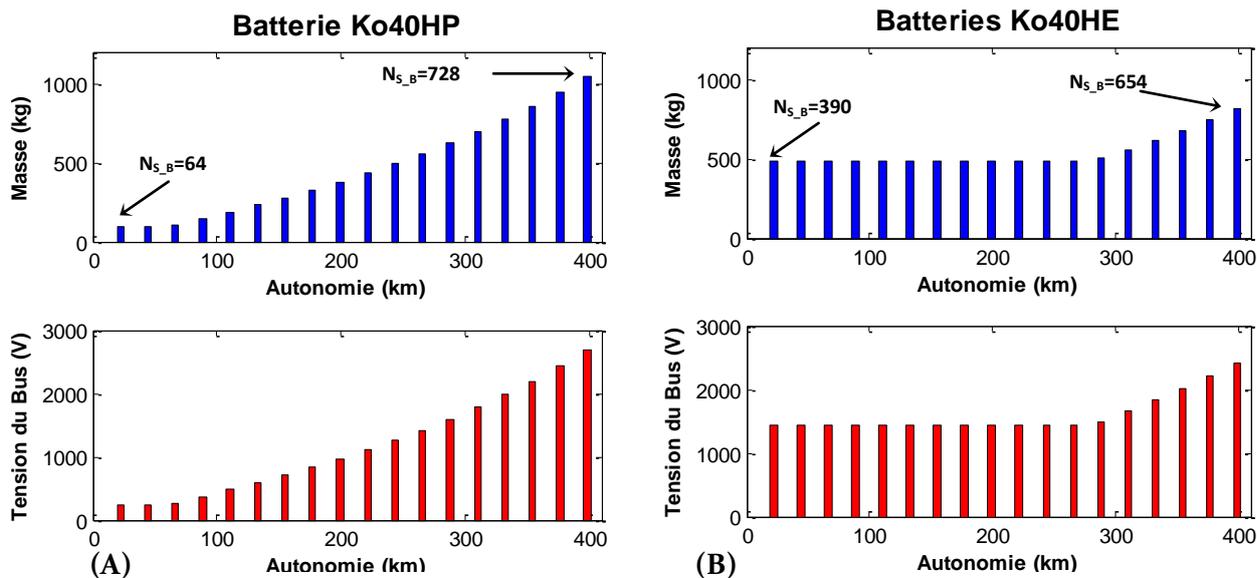


Figure.II. 11: dimensionnement batteries "seules" en fonction de l'autonomie. Masses des batteries (A) Ko40HP, (B) Ko40HE

À faible autonomie, Le dimensionnement des batteries HE n'est pas optimal et les batteries HP sont plus intéressantes du point de vue taille et coûts. En revanche, la tension du bus continu fixée par le dimensionnement de ces dernières est très faible par rapport à la puissance demandée (courant trop important par rapport à la tension). Par contre, pour des autonomies plus importantes, l'utilisation des batteries HE permet des gains en performances (poids, volumes, et coûts) d'environ 25% par rapport aux batteries HP (cf. Figure.II.11).

Energie non récupérée :

La récupération de l'énergie n'était pas un critère de dimensionnement dans cette section. Comme montré par la Figure.II.12, Les packs de batteries dimensionnés ne récupèrent pas forcément l'intégralité de l'énergie au freinage. La quantité récupérée est imposée par le régime de charge des cellules de batteries.

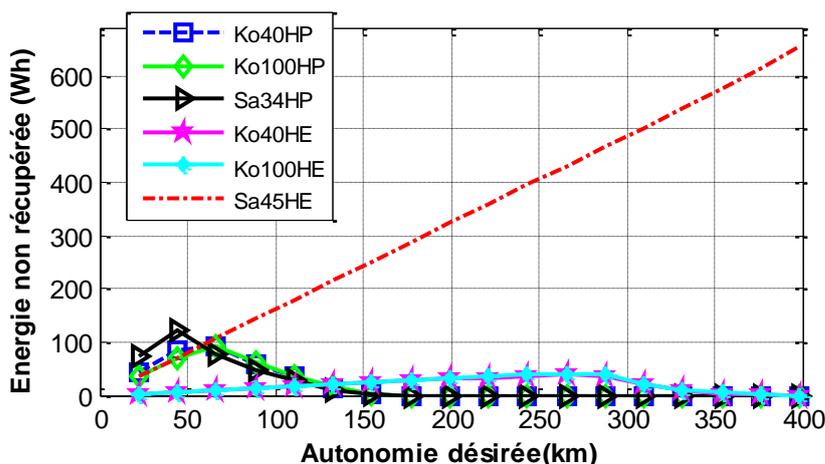


Figure.II. 12 : quantité d'énergie non récupérée par les packs de batteries.

Les batteries HP ont un régime de charge plus important que les batteries HE. Au delà de 150km les batteries HP récupèrent la totalité de l'énergie au freinage. En revanche, les batteries HE ne récupèrent qu'une partie de cette énergie. Ceci est dû à leur faible régime de charge. Le

pack composé de batteries Sa45HE est de loin le moins intéressant en terme de récupération d'énergie au vu de son régime de charge est très faible (C/7).

II.2.3 Alimentation du VE par une Source d'Energie Hybride (SEH)

Comme il a été souligné lors de l'étude de l'alimentation du VE par les batteries seules, le dimensionnement des batteries par rapport à la puissance est très contraignant et offre peu de degrés de liberté en vue de l'optimisation de la source d'énergie. De plus, il est pratiquement impossible, dans la plupart des cas, de récupérer toute l'énergie au freinage, à cause des contraintes technologiques (particulièrement, le faible régime de charge des batteries). Ainsi, dans le but de récupérer intégralement cette énergie et d'exploiter au mieux les caractéristiques des systèmes de stockage d'énergie, nous proposons dans cette partie l'étude d'une solution hybride.

L'idée générale de ce principe d'hybridation des systèmes de stockage d'énergie est basée sur le respect des natures intrinsèques des sources d'énergie et de puissance. Sur cette base nous allons dimensionner les composants de la SEH en considérant que le rôle du pack de batteries est d'assurer l'autonomie (source d'énergie) et que la présence des supercondensateurs permet de répondre aux exigences dynamiques du VE (les pics de puissance à l'accélération et au freinage).

Cependant, la présence de deux sources nécessite la détermination de la part de mission destinée à chacune d'elles. Ceci peut être établi par une stratégie de gestion de l'énergie, qui assure la distribution de la puissance avec la prise en compte des caractéristiques et les conditions d'exploitation des sources.

II.2.3.1 Gestion de l'énergie « avec limitation de puissance »

La méthode développée pour la gestion de l'énergie fait partie des stratégies à base de règles déterministes déjà évoquées dans le chapitre I. Cette stratégie, que nous nommons « limitation de puissance », a été utilisée dans d'autres travaux, [88], sous le nom de « saturation de courant ».

a. Principe

Cette méthode permet de limiter les flux de puissance traversant le pack de batteries par rapport à ces limites de courants liées aux données fabricant. Son fonctionnement peut être décomposé en deux étapes principales, (cf. Figure.II.13):

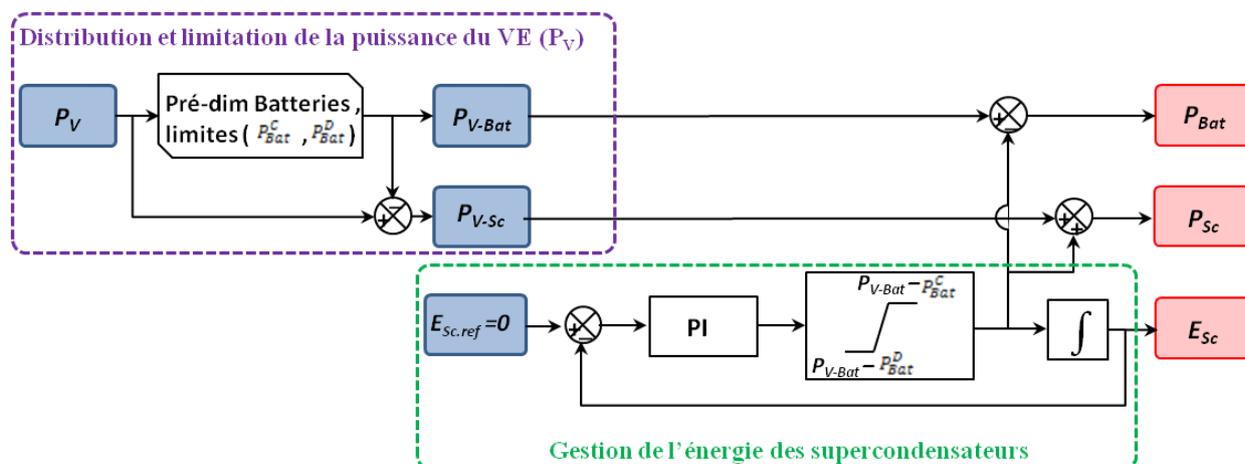


Figure.II. 13 : principe de fonctionnement de la méthode de gestion d'énergie « avec limitation de puissance »

La première étape réalise un pré-dimensionnement du pack de batteries. Le nombre de cellules de batteries est calculé, selon l'équation II.18, par rapport à l'énergie consommée par le

VE et nécessaire pour l'autonomie. Ce pré-dimensionnement permet également le calcul des puissances maximales de charge ($P_{\text{Bat}}^{\text{C}}$) et de décharge ($P_{\text{Bat}}^{\text{D}}$) du pack de batteries. Sur la base de ces dernières, la puissance totale (P_{V}) du VE (cf. Figure.II.14-A) est **initialement** distribuée sur les batteries et les supercondensateurs. Comme montré par la Figure.II.14-B, les batteries doivent assurer la puissance ($P_{\text{V-Bat}}$) sur une plage de variation définie par ces limites maximales ($P_{\text{Bat}}^{\text{C}}$ et $P_{\text{Bat}}^{\text{D}}$). Au-delà de ces limites, la puissance est fournie ou récupérée par le pack de supercondensateurs ($P_{\text{V-Sc}}$).

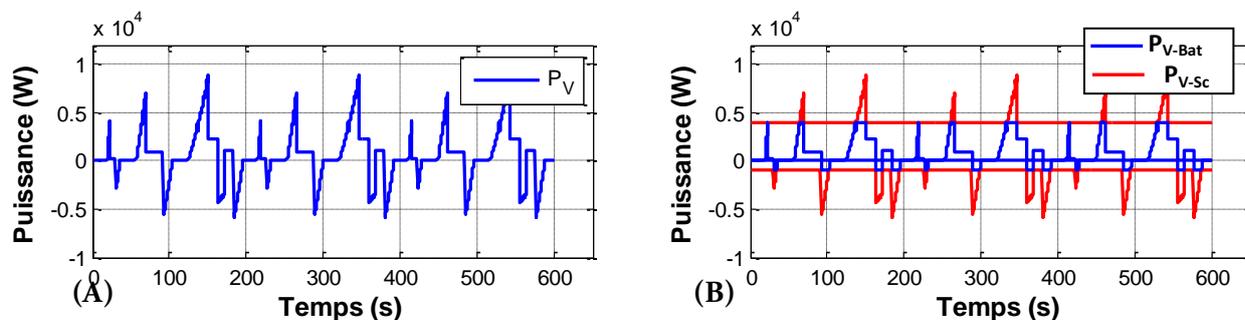


Figure.II. 14 : (A) Puissance totale du VE. (B) profil de puissance du VE distribuée sur les batteries et les supercaps.

Par ailleurs, les supercondensateurs stockant peu d'énergie, nous avons complété (cf. Figure.II.13) la méthode de gestion par une surveillance, en temps réel, de l'état de charge des supercondensateurs afin qu'ils puissent tout le temps assurer les demandes de puissance du système de traction, sans problème de saturation en tension (charge complète ou décharge complète). A propos de cette démarche, on peut citer les travaux réalisés par A. Allègre et Al [89], dans lesquels ils proposent de recharger les supercondensateurs, pendant que le véhicule est à l'arrêt, par un courant provenant des batteries.

Dans notre cas, la puissance du VE est contrôlée de manière à annuler l'énergie du pack de supercondensateurs (cf. Figure.II.13) et qu'il y ait un échange énergétique entre les batteries et les supercondensateurs pendant les deux phases d'alimentation (phases de consommation et de récupération d'énergie). En effet, en analysant le profil « initial » de puissance des batteries (uniquement avec la limitation de puissance, en trait bleu dans la Figure.II.14-B), on constate que ces dernières ne sont pas, en permanence, sollicitées au maximum. D'où la possibilité d'utiliser l'écart entre la puissance demandée par le VE (fournie par les batteries) et les seuils $P_{\text{Bat}}^{\text{C}}$ et $P_{\text{Bat}}^{\text{D}}$, pour pouvoir charger ou décharger les supercondensateurs.

L'échange énergétique entre les batteries et les supercondensateurs modifie les profils de puissance de chacune de ces sources. D'une part, le pack de batteries a tendance à fournir et récupérer des puissances plus stables (P_{Bat} dans la Figure.II.15-A) autour de ses valeurs limites $P_{\text{Bat}}^{\text{C}}$ et $P_{\text{Bat}}^{\text{D}}$. Le dimensionnement du pack de batteries effectué avant la surveillance de l'état de charge des supercondensateurs est valable, car l'énergie consommée par le VE ($E_{\text{V-cons}}$), à la fin d'une mission de conduite, est égale (cf. Figure.II.15-B) à l'énergie que doit fournir le pack de batteries (énergie du pack de supercondensateurs négligeable).

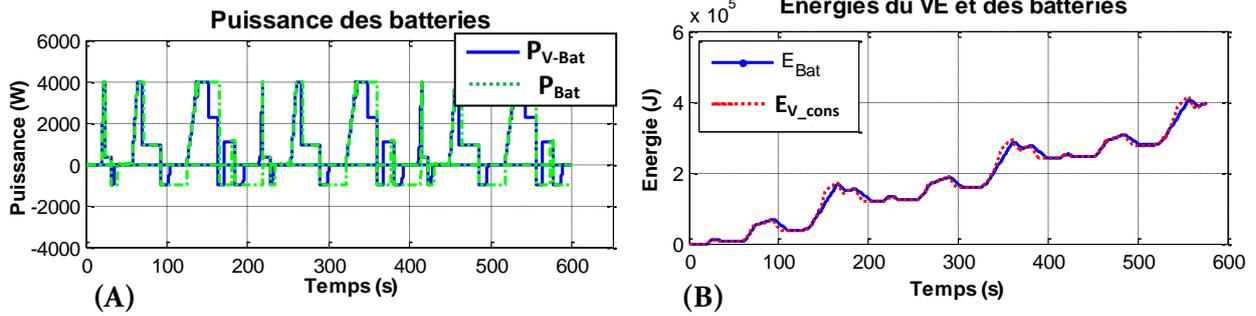


Figure.II. 15 : Cas avant la gestion du SOC des Supercaps : (A) profils de puissance des batteries avant et après gestion du SOC des supercaps, (B) énergie consommée par le VE et énergie demandée aux batteries

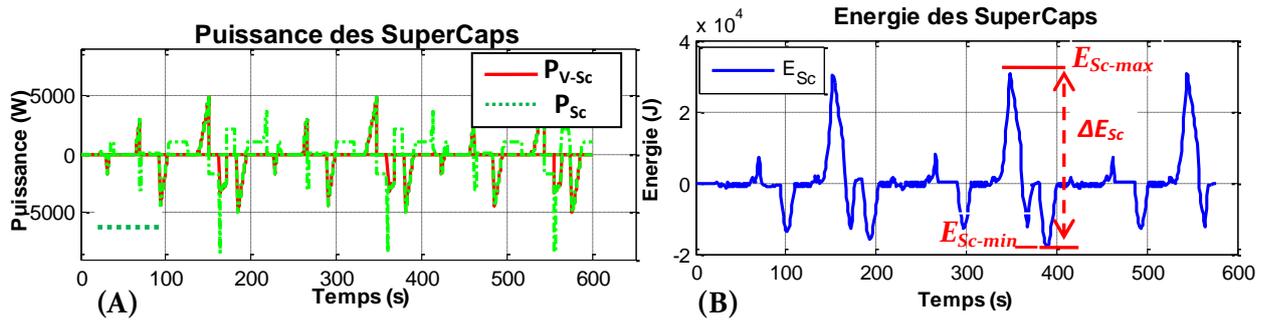


Figure.II. 16 : Cas après gestion du SOC des Supercaps : (A) profils de puissance des SuperCaps avant et après gestion du SOC, (B) variation d'énergie des SuperCaps

D'autre part, les supercondensateurs assurent davantage de pics de puissance et permettent, ainsi, le lissage de la puissance des batteries. Comme évoqué auparavant dans le paragraphe II.2, le supercondensateur est un composant capable de fournir une puissance très importante pendant de courtes durées. Il est également caractérisé par une très faible densité d'énergie (5,62Wh/kg pour le composant *Maxwell* de notre étude). De ce fait, le pack de supercondensateurs doit être dimensionné par rapport à l'énergie. La valeur de l'énergie qui sera exploitée pour le dimensionnement des supercondensateurs correspond à l'écart entre les maximums d'énergie fournie et récupérée (ΔE_{Sc}) définie dans la Figure.II.16-B et ; elle est égale à :

$$\Delta E_{Sc} = E_{Sc_max} - E_{Sc_min} \tag{II.19}$$

E_{Sc_max} et E_{Sc_min} représentent, respectivement, le maximum d'énergie consommé et récupéré, sachant que l'énergie récupérée est de signe négatif.

b. Algorithme de contrôle des puissances

Pour illustrer le fonctionnement de la stratégie de gestion d'énergie et le contrôle de puissance, nous distinguons trois modes de fonctionnement possible du VE, à savoir : le mode « arrêt », le mode « traction » et le mode « freinage ». Ces modes sont définis par la valeur de la puissance (P_V) du VE, (cf. Figure.II.17). Rappelons que la puissance fournie en traction par le SSE est définie de signe positif et la puissance récupérée, négative. Cette convention de signe est également valable pour l'énergie.

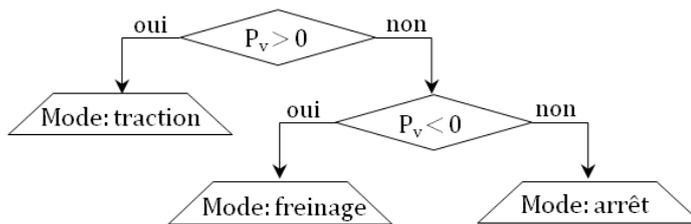


Figure.II. 17 : définition des modes de fonctionnement du VE.

Mode « traction »

Le véhicule est considéré en mode traction, si la puissance (P_v) requise est positive. Si cette puissance est supérieure à la limite de puissance de décharge maximale des batteries (P_{Bat}^D), les deux sources sont sollicitées. Dans ce cas, la méthode de gestion d'énergie impose aux batteries de fournir une puissance égale à P_{Bat}^D . Le complément ($P_v - P_{Bat}^D$) provient des supercondensateurs.

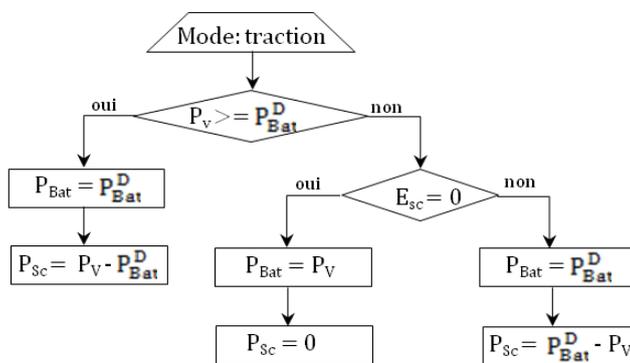


Figure.II. 18 : contrôle de la puissance en mode « traction ».

Si la puissance demandée par le VE est inférieure à P_{Bat}^D , le pack de batteries alimente le VE seul. De plus, si le pack de supercondensateurs était dans une phase antérieure de décharge ($\Delta E_{sc} > 0$), il reçoit des batteries une puissance correspondant à $(-P_{Bat}^D + P_v)$ pour le recharger et annuler ainsi la variation d'énergie, (cf. Figure.II.18).

Mode « freinage »

L'algorithme de contrôle gère la distribution de puissance en mode freinage, de façon similaire à ce qui a été proposé en traction (cf. Figure.II.19). Sachant que la puissance est négative et plus importante que la limite admissible des batteries en charge ($|P_{Bat}^C|$), les batteries et les supercondensateurs ont pour mission de récupérer les puissances correspondant à $-|P_{Bat}^C|$ et $|P_{Bat}^C| + P_v$, respectivement.

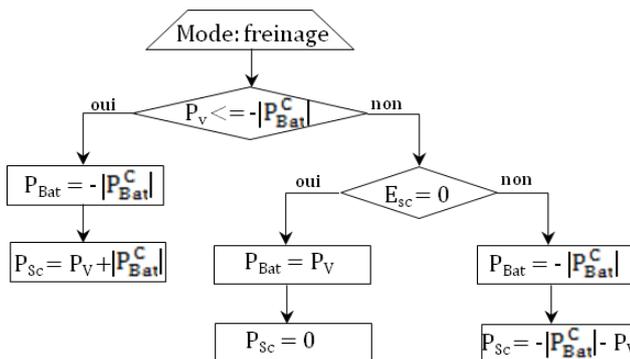


Figure.II. 19 : contrôle de la puissance en mode « freinage ».

Si la puissance du VE est inférieure à la limite de charge, contrairement au mode de traction, c'est le pack de supercondensateurs qui se décharge à $(-|P_{Bat}^C| - P_V)$ sur les batteries. En effet, tant qu'il reste de l'énergie stockée dans les supercondensateurs ($\Delta E_{Sc} < 0$), les batteries peuvent récupérer un maximum de puissance $(-|P_{Bat}^C|)$ jusqu'à l'équilibre énergétique ($\Delta E_{Sc} = 0$).

Mode « arrêt »

A l'arrêt, la puissance du VE requise est nulle. Dans cette situation et comme présenté par la Figure.II.20, le pack de batteries se décharge pour charger les supercondensateurs si $\Delta E_{Sc} > 0$ et vice-versa dans le cas où $\Delta E_{Sc} < 0$. Les phases d'arrêt permettent de rééquilibrer l'état de charge du pack de supercondensateurs, quel que soit son état de fonctionnement antérieur (charge ou décharge). Le seul paramètre pouvant limiter le rééquilibrage dans ces phases est le temps d'arrêt qui peut être court.

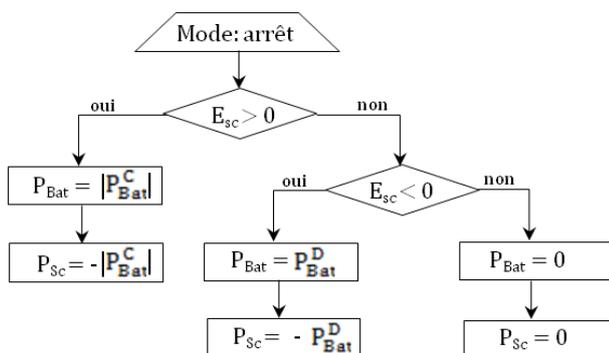


Figure.II. 20 : contrôle de la puissance en mode « arrêt ».

II.2.3.2 Démarche de dimensionnement du pack de supercondensateurs

Comme pour les batteries, la masse de la source de puissance (masse des supercondensateurs et du convertisseur) influence, comme montré par la Figure.II.21, la puissance et l'énergie destinées aux supercondensateurs. Afin de prendre en compte cette masse, nous définissons deux paramètres γ_{Sc}^C et γ_{Sc}^D qui représentent la variation des deux points d'énergie les plus contraignants (cf. Figure.II.21-B) et donc, permettent le dimensionnement du pack de supercondensateurs. L'impact de la masse sur l'énergie (ΔE_{Sc}^W) est calculé par :

$$\Delta E_{Sc}^W = N_{S_Sc} \cdot N_{P_Sc} \cdot (\gamma_{Sc}^C + \gamma_{Sc}^D) \cdot W_{el_Sc} \tag{II. 20}$$

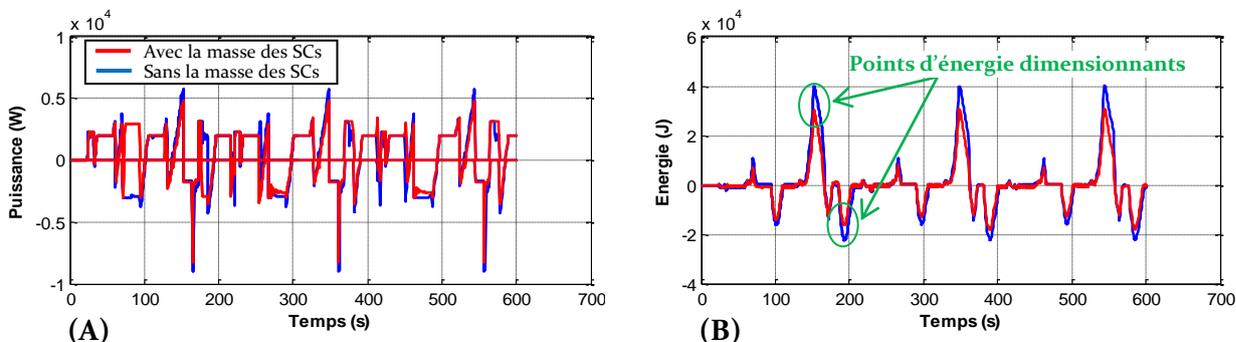


Figure.II. 21 : Influence de la masse sur la variation de : (A) la puissance, (B) l'énergie du supercondensateur

En négligeant les pertes dues aux résistances internes des supercondensateurs le pack dimensionné doit satisfaire la relation :

$$E_{Sc} \geq \Delta E_{Sc} + \Delta E_{Sc}^W \tag{II. 21}$$

On considère que le pack de supercondensateurs contient une seule branche ($N_{p_sc}=1$), c'est donc le nombre d'éléments en série N_{s_sc} qui dépend de l'énergie. Par conséquent, c'est le calcul de N_{s_sc} qui permet de vérifier la relation (II.22). En exploitant les équations II.14 et II.20 on obtient:

$$N_{s_sc} = \frac{\Delta E_{sc}}{\left(\frac{3}{8} C_{el_sc} U_{bus}^2 - (\gamma_{sc}^C + \gamma_{sc}^D) 1.4 \cdot W_{el_sc}\right)} \quad (II. 22)$$

II.2.3.3 Démarche de dimensionnement du convertisseur DC/DC

Le convertisseur qui assure la liaison entre le pack de supercondensateurs et le bus continu, tel qu'il a été fixé par le cahier des charges (paragraphe-II.2), est un hacheur de type élévateur (*Boost*). Ce convertisseur, comme présenté par la Figure.II.22, est composé de semi-conducteurs, d'une capacité de filtrage (C) et d'une inductance de lissage (L). S'ajoute à cela un dissipateur thermique destiné à l'évacuation des pertes Silicium (pertes de commutation et de conduction).

Pour l'étude, nous posons les hypothèses suivantes : les semi-conducteurs sont de type IGBT fonctionnant à une fréquence de commutation de 15kHz. La capacité de filtrage admet des variations de 5% de la tension de bus continu ($\Delta U_{bus}=5\%U_{bus}$). Le dimensionnement de ces composants n'est pas abordé dans cette étude, car on considère que leurs masses sont relativement faibles par rapport à celles du convertisseur, [90].

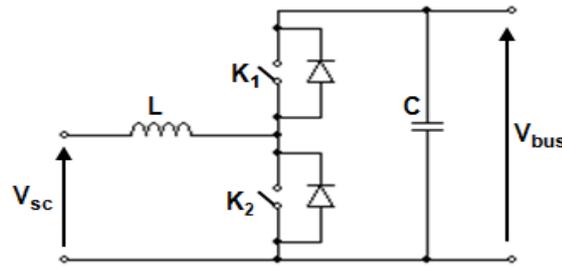


Figure.II. 22: hacheur « Boost ».

Cependant, la majeure partie de la masse et du volume du hacheur est due à la masse et au volume de l'inductance de lissage et du dissipateur thermique. Ces deux éléments sont dimensionnés (dimensionnement détaillé ci-dessous) par rapport à la valeur maximale (I_{max_sc}) du courant du pack de supercondensateurs (en charge ou en décharge), et à son courant efficace maximal (I_{eff_sc}).

a. L'inductance

Le dimensionnement d'une inductance (L) fait appel au calcul de la section (A_e) du circuit magnétique et à la surface de bobinage (S_b) effectivement disponible. Dans notre cas, ces deux paramètres sont exprimés par :

$$\begin{cases} A_e = \frac{L \cdot I_{max_sc}}{B_{max}} \\ S_b = \frac{\alpha \cdot I_{eff_sc}}{J} \end{cases} \quad (II. 23)$$

Où α est le coefficient de foisonnement, B_{max} l'inductance maximale et J la densité de courant. Le produit $A_e \cdot S_b$ est une image de l'énergie stockée dans la bobine, et il est exploité pour le calcul des indices d'encombrement (masse et volume) de l'inductance.

$$A_e \cdot S_b = \frac{\alpha \cdot L \cdot I_{max_sc} \cdot I_{eff_sc}}{J \cdot B_{max}} \quad (II. 24)$$

La valeur de l'inductance L en fonction de la fréquence (f) et pour des fluctuations maximales de 10%, [65] de courant ($\Delta I_{\max_Sc}=10\%.I_{\max_Sc}$) comme suit, [90], [91] :

$$L = \frac{a \cdot (1 - a) \cdot U_{\text{bus}}}{\Delta I_{\max_Sc} \cdot f} \quad (\text{II. 25})$$

La Figure.II. 23 représente les valeurs de l'inductance L en fonction de la fréquence (f) pour trois valeurs du rapport cyclique a (0.75, 0.5 et 0.25). Afin de prendre la valeur maximale de l'inductance, on dimensionne cette dernière pour le rapport cycle de $a=50\%$ [65]. Les valeurs de l'inductance sont donc données pour le rapport cyclique $a=0.5$ et une fréquence de coupure $f=15\text{kHz}$.

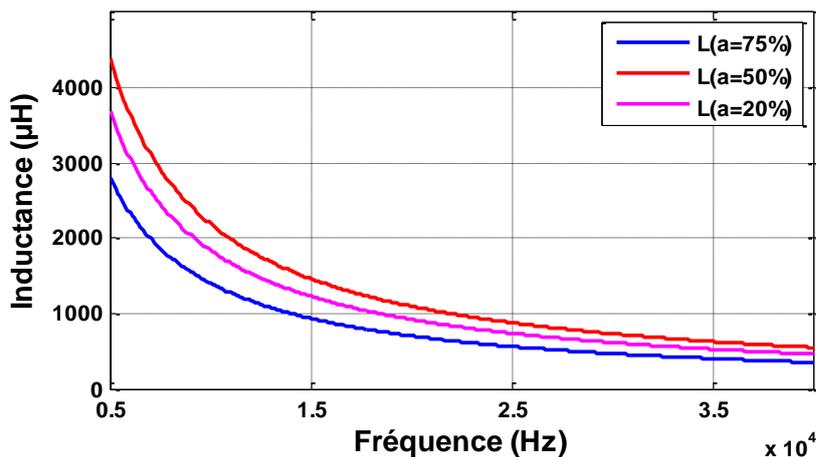


Figure.II. 23 : valeur de l'inductance en fonction de la fréquence pour trois valeurs de rapport cyclique (a)

Pour l'estimation des masses et volume de l'inductance on introduit deux paramètres k_1 et k_2 . Le premier (k_1), représente le coefficient de proportionnalité entre le produit $A_e \cdot S_b$ et la masse de l'inductance. Il a été établi, selon les travaux de *Marvier* [91], à partir d'un dimensionnement réalisé avec des données fabricant. Pour le calcul du volume on utilise le coefficient de proportionnalité masse/volume déduit des valeurs d'énergies massiques et volumiques issues de la littérature ($0,54 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$ et $0,59 \cdot 10^3 \text{ J/L}$). Les valeurs de ces paramètres et d'autres qui permettent de calculer (L) sont répertoriées dans le Tableau.II.4. Ainsi, on peut estimer la masse (W_L) et le volume (V_L) de l'inductance par :

$$\begin{cases} W_L = A_e \cdot S_c \cdot k_1 \\ V_L = W_L \cdot k_2 \end{cases} \quad (\text{II. 26})$$

Tableau.II. 4: paramètres de calcul de l'inductance, [91].

Paramètre	Valeur
Coefficient de foisonnement α	2.5
Induction maximale β_{\max} (T)	0.8
Proportionnalité L / masse k_1	$6,54 \cdot 10^6$
Proportionnalité masse/volume, k_2	0,91

b. Le dissipateur thermique

Dans les applications de véhicules électrifiés, les convertisseurs possèdent, généralement, un refroidissement liquide. A ce titre, le fabricant *Delphi* propose des convertisseurs DC/DC, d'une

puissance de 2.2kW pour une masse de 5kg, destinés à l'alimentation des accessoires et le système de climatisation dans les véhicules électriques et hybrides, [92]. Ce type de refroidissement est plus efficace qu'une convection naturelle ou forcée. En revanche, à volume égal, un refroidissement à air possède une capacité thermique plus importante. Ce dernier est plus intéressant pour des applications où les pointes de puissances sont de courte durée, [93]. Pour cette raison et comme exemple de dimensionnement, notre choix de dissipateur s'est porté sur le modèle de refroidissement *ARP201* à ventilation forcée du fabricant *ARCEL*, (les caractéristiques de ce produit sont détaillées dans l'annexe .B.2).

Pour calculer la résistance thermique (R_{Th}) de ce dissipateur, nous considérons que le rendement (η_{conv}) du convertisseur est de 95%, [65], et que la température varie sur une plage (ΔTh) de 60°C, [94]. R_{Th} est estimée par rapport à la valeur maximale de courant (en charge ou en décharge) du pack de supercondensateurs selon la formule :

$$R_{th} = \frac{\Delta Th}{(1 - \eta_{conv}) \cdot U_{bus} \cdot I_{max_Sc}} \quad (II.27)$$

La longueur de dissipateur thermique (L_d) nécessaire pour l'évacuation de la chaleur est estimée, et présentée par la Figure.II.24, en fonction de la résistance thermique comme suit :

$$\begin{cases} L_d = 61757 \cdot R_{th}^2 - 14479 \cdot R_{th} + 937,96 \\ \text{avec } R_{th} \in [0, 0.11] \end{cases} \quad (II.28)$$

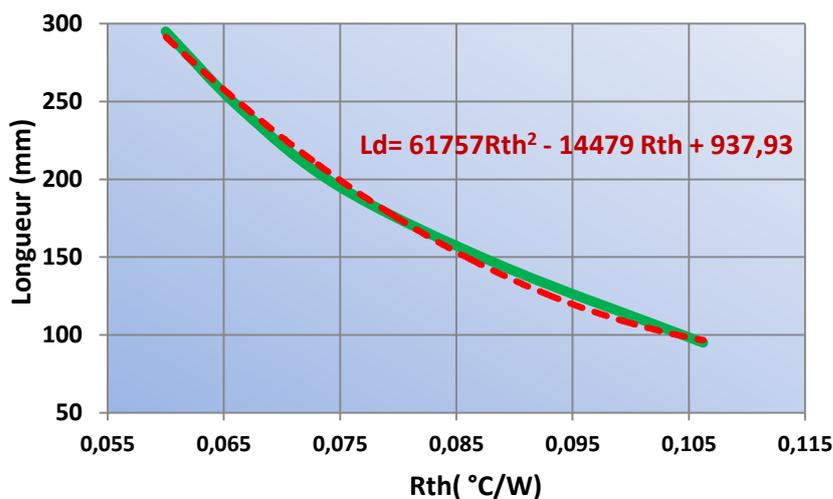


Figure.II. 24: longueur de dissipateur en fonction de la résistance thermique

Le fabricant *ARCEL* fournit un ratio de 17.5 kg/m pour une section (surface frontale) de 1,44dm², [94]. On exprime, ainsi, la masse (W_D) et le volume (V_D) du dissipateur thermique selon l'équation II.29.

$$\begin{cases} W_D = 17,5 \cdot L_d \\ V_D = 1,44 \cdot L_d \end{cases} \quad (II.29)$$

La masse et le volume (W_{conv} et V_{conv}) du convertisseur DC/DC sont donnés par la somme des masses et volumes de l'inductance et du dissipateur thermique. Le résultat obtenu est majoré de 20% pour tenir compte des paramètres d'encombrement du reste des composants de hacheur tel que la capacité, les semi-conducteurs, les éléments d'assemblage et de sécurité ...etc. Sur la base des ventes, [95], [92], on estime que le coût de fabrication du convertisseur ($Coût_{conv}$) est de 0.5€/W. Ce prix est donc basé sur la puissance du convertisseur.

II.2.3.4 Algorithme de dimensionnement de la SEH

Jusqu'ici, nous avons précisé toutes les formules et les conditions nécessaires au dimensionnement de la source d'énergie hybride. Rappelons, par ailleurs, que le nombre de branches de batteries est fixé dans un premier temps à un et que l'objectif de l'utilisation d'une source secondaire n'est pas l'amélioration de l'autonomie, puisque cette source, dimensionnée en puissance, dispose de peu d'énergie. La procédure de dimensionnement est organisée selon l'algorithme de la [Figure.II.25](#).

- A partir du modèle dynamique du VE et l'estimation de la variation de la consommation en fonction de la masse, nous réalisons un « premier » dimensionnement du pack de batteries en fonction de l'énergie consommée selon la formule donnée par l'équation [II.20](#). Les limites de puissances des batteries (P_{Bat}^D et P_{Bat}^C), définies par ce dimensionnement, sont par la suite intégrées dans l'algorithme de gestion d'énergie. Ceci permet de définir le profil de mission de la source de puissance (supercondensateurs et convertisseur).
- En exploitant les données fabricants et l'effet de la masse sur la consommation, on détermine le nombre d'éléments de supercondensateurs nécessaire pour assurer la mission et les dimensions du convertisseur approprié.
- La dernière étape consiste à vérifier, en tenant compte de la masse totale de la SEH, la capacité des deux systèmes de stockage à couvrir la consommation totale du VE. L'algorithme doit tout d'abord vérifier que le pack de batteries peut assurer l'autonomie demandée ($E_{\text{Bat}} \geq E_{V_cons}$). Dans le cas contraire le processus lance une nouvelle itération avec $N_{S_B}+1$. Ceci change les valeurs des limites de puissance admissible par les batteries et la mission de la source de puissance. Le processus prend fin lorsque le pack de supercondensateurs dimensionné est capable d'assurer les variations d'énergie ($E_{Sc} \geq \Delta E_{Sc}$) dues aux pics de puissance.

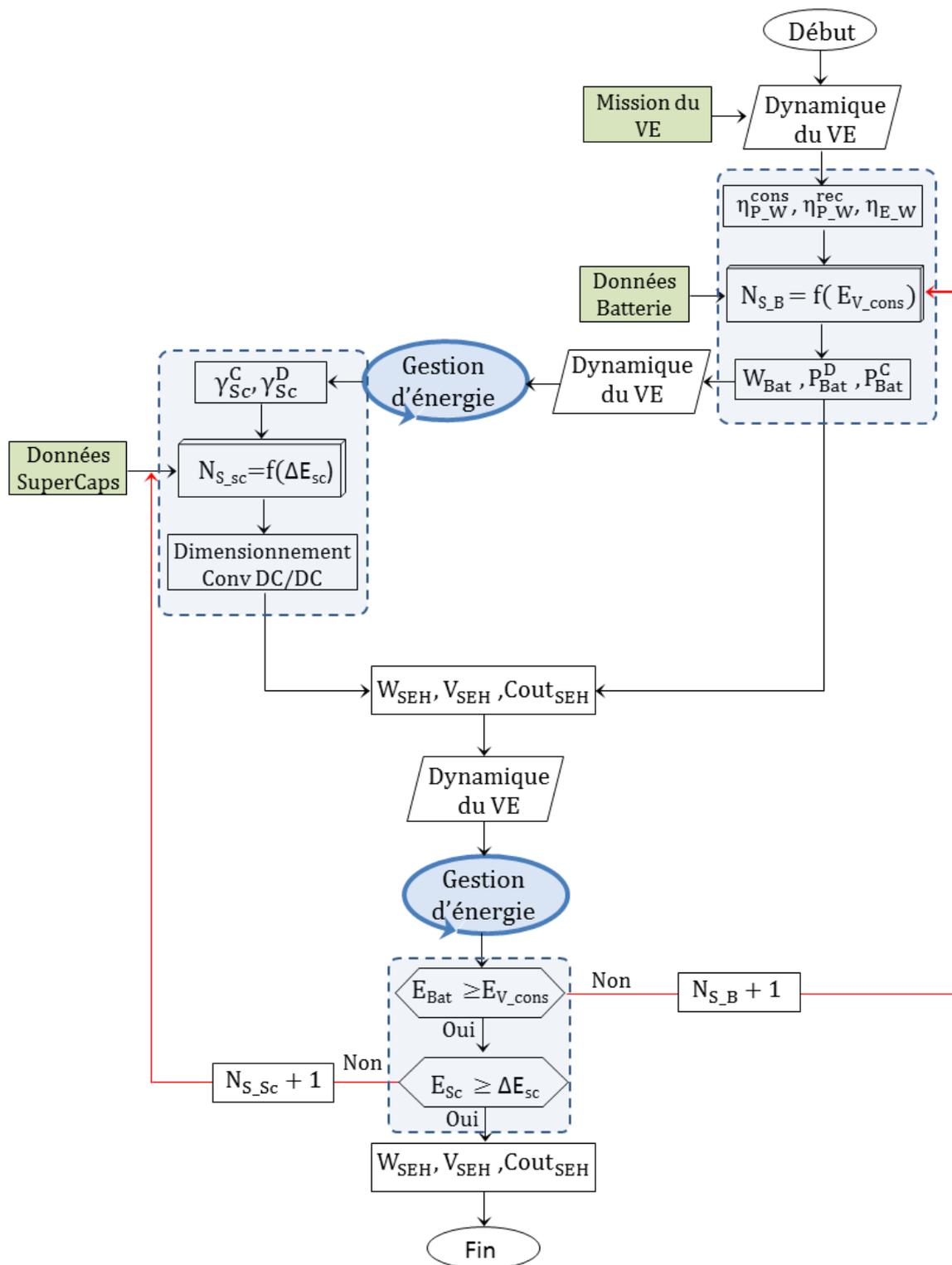


Figure.II. 25: algorithme de dimensionnement - cas d'alimentation du VE par une SEH.

II.2.3.5 Résultats de dimensionnement de la SEH

On peut constater que l'hybridation des batteries à haute densité d'énergie (HE) n'est intéressante (cf. Figure.II.26-A) que pour des autonomies suffisamment importantes (>88km), car le pack de supercondensateurs représente une part très importante de la masse et volume de la SEH. En effet, une trop faible énergie consommée nécessite moins d'éléments de batteries HE. Comme ces batteries ont de faibles densités de puissance de charge et de décharge, le pack

dimensionné assure la puissance sur une plage de variation très restreinte. Une grande partie de la consommation est donc renvoyée sur le pack de supercondensateurs.

Ce même constat est valable pour les batteries de type haute puissance (HP), mais à une autonomie plus faible (44km d'après la Figure.II.26-B). Ceci peut être expliqué par le fait que la densité d'énergie de ces batteries est inférieure à celle des batteries HE. Il faut donc plus d'éléments de batteries HP pour la même consommation d'énergie. De plus, leurs capacités de charge et de décharge sont plus importantes. Il en résulte que le pack de supercondensateurs est moins sollicité.

A partir de 132km d'autonomie (cf. Figure.II.26-A), l'intérêt de l'hybridation est clairement visible pour les batteries HE. Les tailles (masse et volume) et les coûts des SEHs composées de batteries énergétiques deviennent plus faibles que ceux des SEHs composées de batteries HP avec l'augmentation de l'autonomie car la contrainte d'énergie a davantage d'impact sur ces dernières.

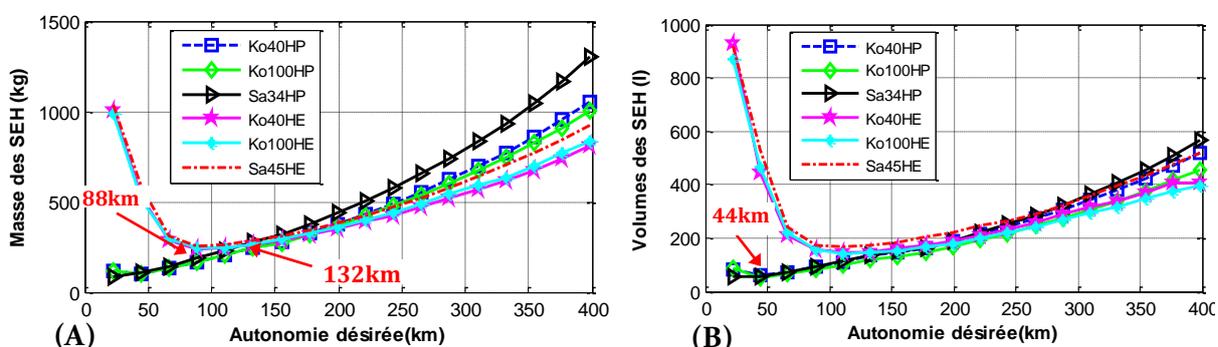


Figure.II. 26: résultats de dimensionnement de SEHs en fonction de l'autonomie. (A) Masses, (B) volumes

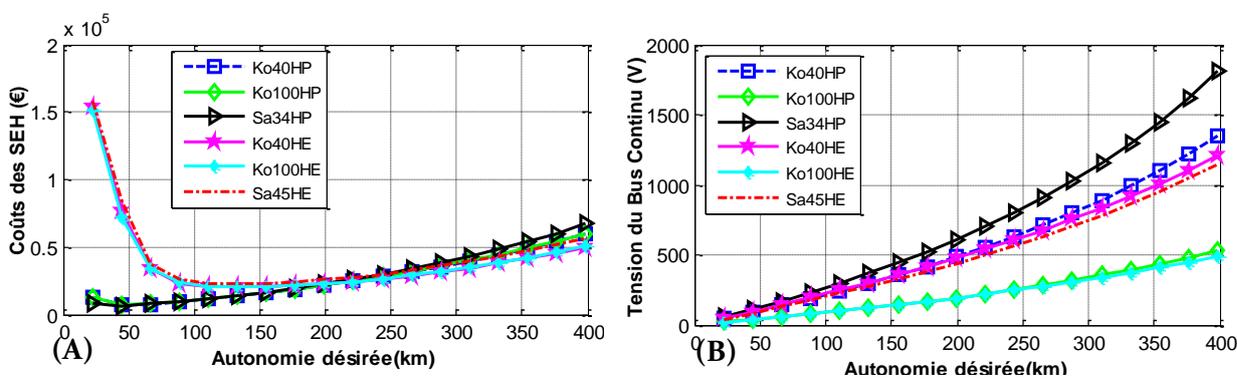


Figure.II. 27: résultats de dimensionnement de SEHs en fonction de l'autonomie. (A) coûts, (B) tension du bus continu.

À noter que l'impact du coût du pack de supercondensateurs, tout comme celui de sa masse et de son volume, sont plus important pour de faibles autonomies et rendent la solution hybride irréalisable. On observe encore dans la Figure.II.27-B que la tension du bus continu augmente en fonction de l'autonomie. Elle est, en réalité, proportionnelle au nombre d'éléments de batteries en série (N_{S_B}), sachant que N_{P_B} est fixé ici à une seule branche. Afin d'optimiser sa valeur, notamment pour des autonomies élevées, on peut réorganiser le nombre total ($N_{S_B} \times N_{P_B}$) d'éléments de batteries de manière à augmenter ou à diminuer N_{S_B} . La tension du bus correspondant aux batteries Ko100HP et Ko100HE est relativement faible, puisque ces dernières ont une capacité très importante (100Ah/élément). Ceci peut être vu comme un inconvénient car il réduit le degré d'optimisation des performances de la SEH.

Enfin, on peut remarquer que les SEHs composés de batteries *Kokam* présentent de meilleures performances que les batteries *Saft* de même type (cf. [Figure.II.26](#)). En effet, l'élément Sa34HP a une densité d'énergie plus faible que les éléments Ko40HP et Ko100HP et les cellules *Kokam* énergétiques ont des densités de puissance de charge plus importantes que celle d'une cellule Sa45HE. Cette dernière nécessite, donc, une source secondaire plus importante pour récupérer intégralement l'énergie au freinage.

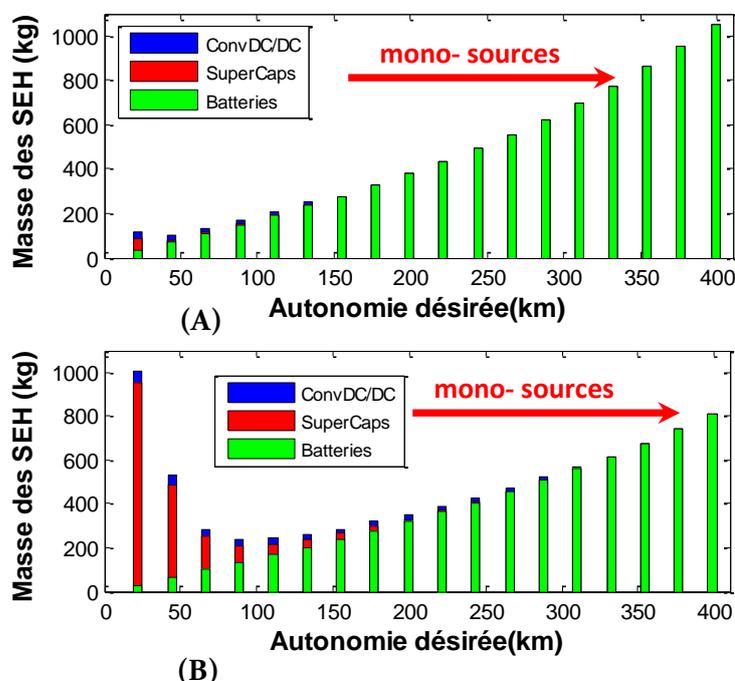


Figure.II. 28: résultats dimensionnement de SEHs en fonction de l'autonomie. Masses des batteries (A) Ko40HP, (B) Ko40HE

De la [Figure.II.28](#), on constate que l'hybridation diminue (la taille de la source puissance devient de plus en plus petite) en fonction de l'autonomie, mais aussi en fonction du type de batteries. Pour le cas des batteries Ko40HE, une part de la puissance est renvoyée sur les supercondensateurs pour des autonomies dépassant les 300km. Tandis que dans le cas des batteries ko40HP, la portion de la source secondaire (supercondensateurs et hacheur) disparaît au-delà de 150km. Ceci découle des régimes de charge/décharge des deux batteries, où la batterie Ko40HP a presque le double de puissance d'une batterie Ko40HE (5C/2C et 1C/1C, respectivement).

II.2.3.6 Analyse des contraintes physiques des cellules de batteries

Dans ce paragraphe on s'intéresse à la comparaison des contraintes physiques que doit subir chaque cellule de batteries Li-ion dans une configuration de SEHs après le dimensionnement. Ces contraintes physiques ont un impact sur le vieillissement des batteries et cette comparaison peut introduire le travail expérimental présenté dans le chapitre III.

a. Les contraintes physiques

Ce sont les valeurs moyenne et efficace de la puissance globale assurée par les cellules du pack de batteries sachant que la puissance efficace représente l'image du courant efficace. Cependant, pour une comparaison plus approfondie nous séparons les termes de puissances moyenne et efficace consommées et de puissances moyenne et efficace récupérées. En effet, puisque les maximales consommées et récupérées sont limitées par les régimes de charge/décharge des cellules de batteries, les valeurs moyennes et efficaces peuvent dépendre de ces

régimes. Il s'agit là de faire le lien entre les régimes de courants de charge/décharge et les contraintes physiques pouvant influencer la durée de vie des cellules batteries.

b. Analyse et comparaison

La Figure.II.29, représente les valeurs moyenne et efficace de la puissance globale des cellules des packs de batteries dimensionnés. Ces contraintes diminuent avec l'augmentation de l'autonomie puisque le nombre de cellules d'un pack augmente. Les contraintes propres aux cellules Ko100HP et Ko100HE sont les plus importantes, leur capacité étant plus élevée car les packs dimensionnés sont composés d'un faible nombre de cellules.

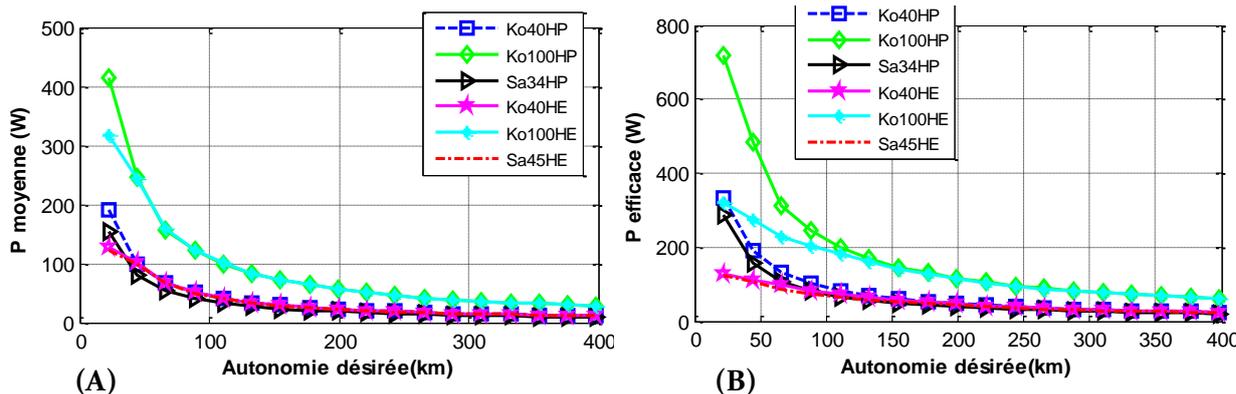


Figure.II. 29 : puissances moyenne (A) et efficace (B) assurées par les cellules de batteries

Les autres cellules de batteries ayant des capacités de valeur proche (34Ah, 40Ah et 45Ah), leurs puissances moyennes et efficaces sont quasi-identiques. Cela peut être expliqué par le fait que la dynamique du cycle est très rapide (pulses de charge et de décharge de courtes durées) et que la gestion de l'état de charge des supercondensateurs fait souvent appel aux batteries. En effet, les supercondensateurs assurent momentanément les pics de puissance, mais ces pics sont ensuite renvoyés sur les batteries pour le rééquilibrage du SOC des supercondensateurs. La puissance totale du VE est donc bien assurée par le pack de batteries.

Le même constat est valable pour les puissances moyenne et efficace consommées (positive, cf. Figure.II.30), car le régime de décharge des batteries est relativement important également. Ceci permet, à la fois, d'assurer plus de puissance consommée et en même temps recharger les supercondensateurs et ramener ainsi son SOC à l'équilibre.

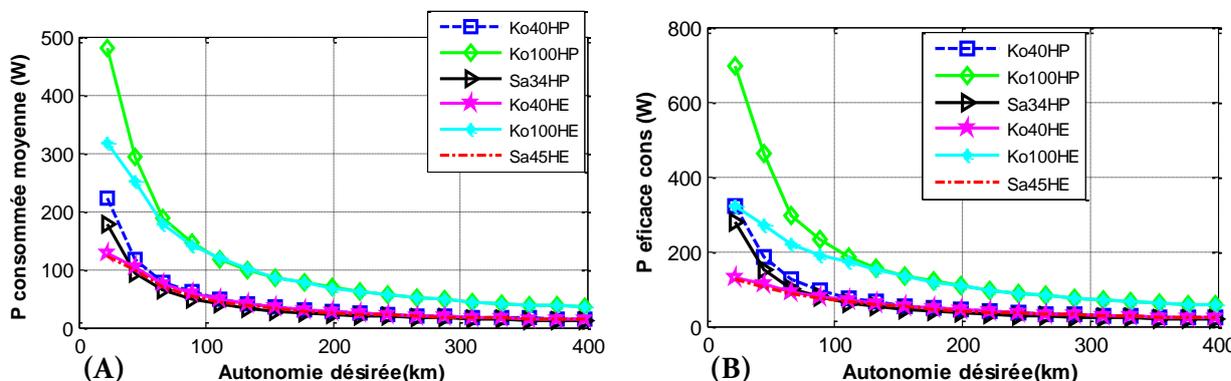


Figure.II. 30 : puissances moyenne (A) et efficace (B) consommées, assurées par une cellule de batteries.

En analysant les valeurs moyenne et efficace de la puissance récupérée, on peut observer l'effet du régime de courant (dans ce cas le régime de charge) sur les contraintes physiques des cellules en phase de recharge. Tel est montré par la Figure.II.31, le pack composé de batteries Sa45HE se distingue des autres packs (puissance moyenne et efficace plus faible). Car les cellules

Sa45HE ont un régime de charge très faible (C/7). En conséquence, non seulement ces cellules (Sa45HE) n'assurent qu'une faible partie de la puissance récupérée par le VE, mais elles ne sont pas non plus capables de recevoir la puissance que le supercondensateur doit décharger pour rééquilibrer son SOC. Quant aux batteries Ko100HP et ko100HP, les contraintes sont plus importante, car leur courant de charge maximal est plus important ce qui permet aux supercondensateurs de réinjecter de la puissance dans ces batteries.

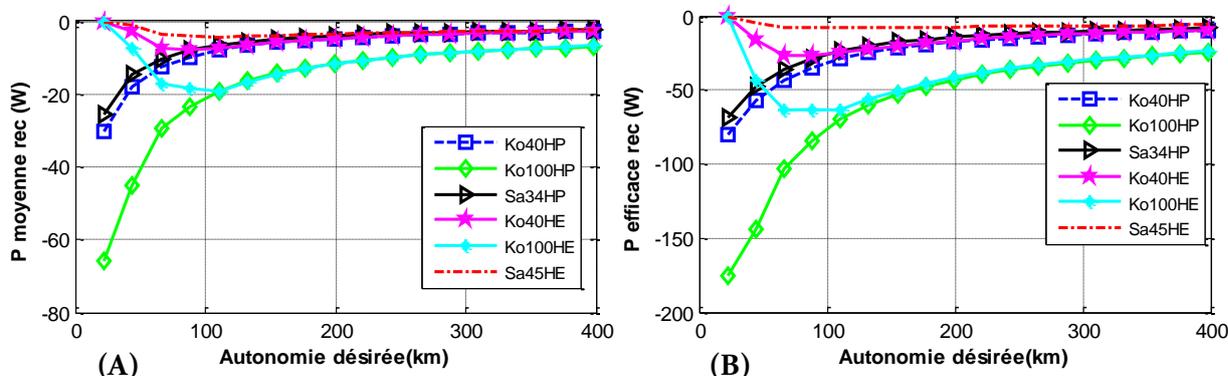


Figure.II. 31 : puissances moyenne (A) et efficace (B) récupérées, assurées par une cellule de batteries.

Donc, plus l'autonomie est importante, plus le pack de batteries est important et ceci permet de réduire les contraintes physiques vues par la cellule de batterie. Pour également réduire les contraintes, on doit améliorer la méthode de gestion d'énergie pour éviter de solliciter souvent le pack de batteries pour permettre la recharge ou la décharge du pack de supercondensateurs de

II.2.4 Comparaison SEH vs Batteries seules

Dans cette partie nous comparons les résultats de dimensionnement obtenus dans les cas où le VE est alimenté par les batteries Li-ion seules et par les SEHs (batteries Li-ion /supercondensateurs). Nous ne discutons, ici, que les résultats sur la masse, le reste des résultats de comparaison (volumes, coûts et tension du bus DC) sont donnés dans l'annexe-B.3.

Pour les batteries HP, l'influence de l'hybridation sur la masse de la source d'énergie est minimale. On observe sur la Figure.II.32-A, que la masse des SEHs est légèrement supérieure à la masse des batteries seules à faible autonomie (en moyenne 20kg et 10kg pour les autonomies de 22km et 44km respectivement). La différence est due à la masse de la source secondaire destinée à la récupération de l'énergie au freinage. Dans les autres cas, l'hybridation n'est pas nécessaire, du point de vue taille, pour les batteries HP car ces dernière peuvent assurer « seules » l'alimentation du VE notamment pour des autonomies plus importantes.

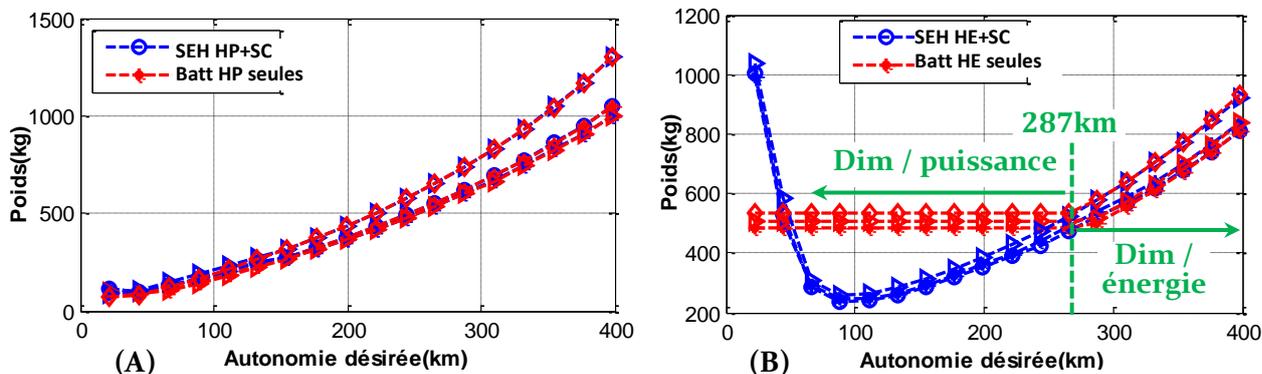


Figure.II. 32: évolution des masses des batteries en fonction de l'autonomie désirée. (A) cas des batteries HP. (B) cas des batteries HE

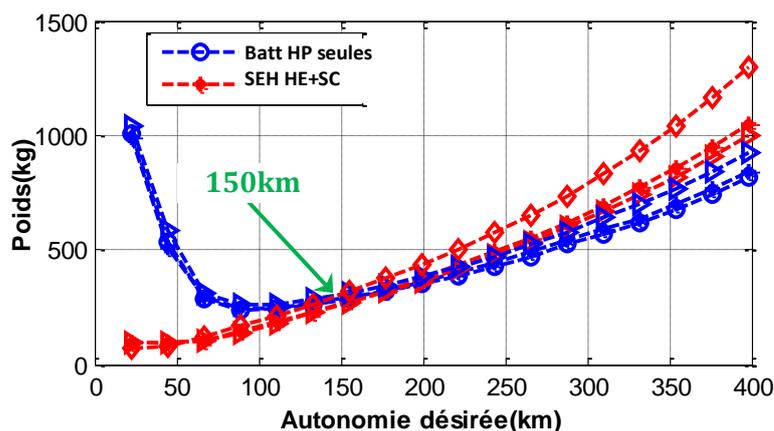


Figure.II. 33: masse des batteries HP (cas de dimensionnement "seules") et batteries HE (cas de dimensionnement avec SEHs)

L'hybridation des batteries HE présente beaucoup plus d'intérêt. Selon les résultats comparés dans la Figure.II.32-B, la combinaison batteries Li-ion/supercondensateurs permet de réduire la masse de la source d'énergie à partir de 44km. Pour l'autonomie de 110km, l'hybridation réduit la masse de la source d'énergie de 50% par rapport à l'utilisation des batteries seules. Elle permet de faire jusqu'à 10k€ d'économie sur le coût de la source d'alimentation du VE. A cela s'ajoute l'avantage de pouvoir récupérer toute l'énergie au freinage. Globalement, l'hybridation des batteries Li-ion HE est intéressante pour une autonomie comprise entre 44 et 287km (cf. Figure.II.32-B). Ceci est possible si les contraintes en puissance sont éliminées et que le pack de batteries a uniquement à assurer l'énergie nécessaire pour l'autonomie.

L'intérêt de l'hybridation des batteries Li-ion HE peut être confirmé par une comparaison avec les performances des batteries HP alimentant « seules » le VE, Figure.II.33. Le gain en masse des batteries HE avec hybridation est d'autant plus important que la distance à parcourir est plus grande. Pour 400km d'autonomie, la masse des SEHs est en moyenne 200kg plus faible que les batteries HP. Mais ces masses sont trop élevées pour envisager des autonomies aussi importantes. Sur la plage d'autonomie de 150 à 250 km (autonomie des VE actuels), l'hybridation des batteries HE permet d'atteindre des performances, en masse et en volume, meilleures que celles des batteries HP avec des coûts comparables. A titre d'exemple, à 150km la masse des batteries HP est la même que celle des SEHs. Cette dernière présente cependant l'avantage de moins solliciter la batterie puisque les pics de puissance sont pris en charge par les supercondensateurs. Il y a cependant un surcoût de réalisation d'environ 1000€ (cf. Figure-3 de l'annexe.B.3).

Dans cette partie, nous avons présenté de façon complète le dimensionnement des sources d'énergie pour l'alimentation d'un VE. Nous avons notamment présenté une approche générale de dimensionnement des batteries par des formules de calcul du nombre d'éléments d'un pack en fonction de toutes les contraintes possibles (Energie consommée, puissance consommée et récupérée). Ensuite nous avons traité les deux cas d'alimentation du VE : les batteries « seules » et les sources hybrides batteries / supercondensateurs. Dans ce dernier, nous avons détaillé la méthode de gestion d'énergie basée sur la limitation de puissance et la surveillance de l'état de charge des supercondensateurs. Nous avons montré pour chaque cas d'alimentation les performances (en termes de masse, volume et coût financier) de la source d'énergie en fonction de l'autonomie. Nous avons pu mettre en évidence la différence entre les batteries HP et HE par la comparaison des résultats de dimensionnement obtenus dans les deux cas d'alimentation. Dans ce qui suit nous allons évaluer le domaine de validité de la méthode de gestion d'énergie «avec limitation de

puissance » en étudiant l'influence des paramètres d'entrée de l'algorithme de dimensionnement, i.e. la mission du VE.

II.3. Etude de l'influence de certains paramètres sur le dimensionnement de la SEH

Nous réalisons ici une série de comparaisons avec les résultats obtenus dans la section II.3.3 pour un point d'autonomie unique et égal à 150km, car comme nous l'avons vu, les performances des SEHs composées de batteries HE sont presque identiques à celles des batteries HP pour cette distance. Le but de ces comparaisons est soumettre notre méthode de gestion d'énergie (limitation de puissance) à des tests afin d'évaluer l'influence de certains paramètres que nous allons faire varier et qui peuvent faire partie du cahier des charges tel qu'il a été défini dans le paragraphe II.1, comme le cycle de conduite, la technologie de la source secondaire (source de puissance), mais aussi la stratégie de gestion d'énergie...

II.3.1 Influence du cycle de conduite

Pour montrer l'influence du cycle de conduite, nous appliquons la démarche de dimensionnement des SEHs du paragraphe II.3.3 à la consommation du VE estimée sur un cycle NEDC (présenté dans le paragraphe II.2.1) et une pente de 2.5%. L'énergie requise pour l'autonomie de 150km est équivalente à l'énergie consommée sur un cycle ARTEMIS (19.5kWh sur NEDC contre 19.3kWh pour le cycle ARTEMIS). La principale différence entre les deux types de cycle est au niveau des puissances maximales récupérées. Pour le cycle NEDC la puissance récupérée est 12kW alors qu'elle est de 40kW dans le cas du cycle ARTEMIS.

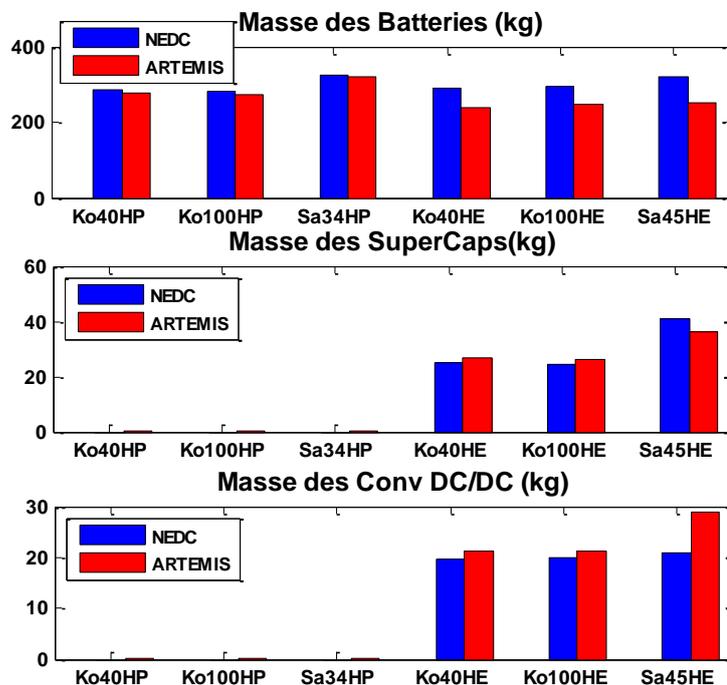


Figure.II. 34 : masses de batteries, supercondensateur et hacheur pour un dimensionnement selon les cycles de conduite ARTEMIS et NEDC.

Les résultats de dimensionnement par rapport aux deux types de cycles montrent que les masses des batteries sont pratiquement identiques (cf. Figure.II.34). Ceci s'explique par le fait que les batteries sont dimensionnées par rapport à l'énergie consommée. En revanche, la différence se

situé au niveau de la masse de la source secondaire, qui a un impact plus au moins important sur le volume et le coût de la SEH (cf. Figure.II.35).

La masse des supercondensateurs combinés avec les batteries Sa45HE est plus importante dans le cas du cycle NEDC. La masse du convertisseur est, quant à elle, plus importante dans le cas du cycle ARTEMIS. En effet, le pack de supercondensateurs est dimensionné par rapport à l'énergie d'un pic de puissance, or les pics de puissance dans le cas du cycle NEDC sont plus faibles en intensité (valeur maximale de puissance) mais durent plus longtemps. Le convertisseur est dimensionné par rapport au courant, et les valeurs instantanées de celui-ci sont plus importantes dans le cas du cycle ARTEMIS.

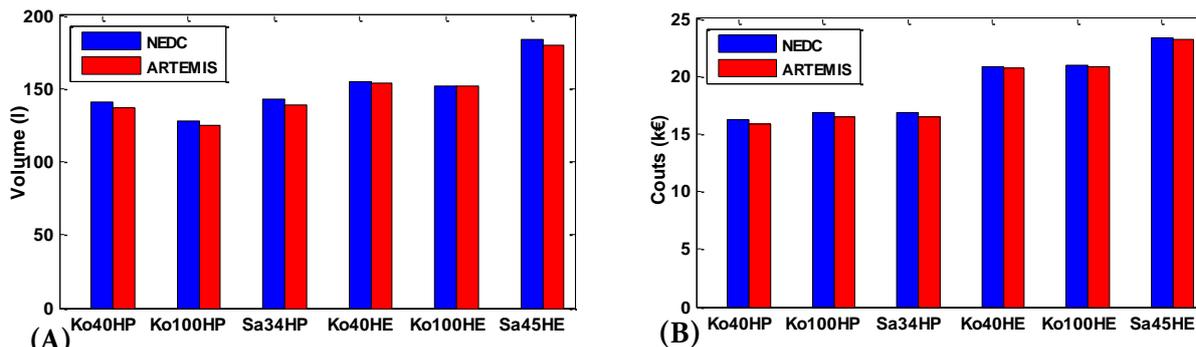


Figure.II. 35 : (A) volume et (B) coût de la SEHs pour un dimensionnement selon les cycles de conduites ARTEMIS et NEDC.

En résumé, les cycles de conduite ont une faible influence sur le dimensionnement des SEHs à autonomie équivalente, car les batteries représentent la majeure partie de la SEHs et leur dimensionnement dépend de l'énergie consommée. Cependant, d'autres résultats obtenus pour des pentes de la chaussée de 2.5% et 0%, [96], [97], ont montré que l'énergie consommée et le dimensionnement varient sensiblement en fonction de la pente.

II.3.2 Combinaison des batteries Li-ion avec des batteries « Ultra Haute Puissance »

Très récemment sont apparus sur le marché des batteries Li-ion de type Ultra Haute Puissance (UHP) qui concurrencent les supercondensateurs en terme de puissance massique avec des énergies massiques bien plus élevées. Nous proposons, dans ce paragraphe, d'étudier le dimensionnement d'un SEH où les supercondensateurs sont remplacés par des batteries Li-ion de type Ultra Haute Puissance (UHP) du fabricant *DowKokam*, dont les données spécifiques sont regroupées dans le Tableau.II.5.

Tableau.II.5 : données fabricant des éléments Kokam UHP, [85]

Acronyme	Batterie UHP Ko0.45UHP
Fabricant	DowKokam
Tension nominale (V)	3.7
Capacité nominale (Ah)	0.45
Résistance interne (mΩ)	17
Courants Max charge/décharge (A)	22.5/22.5
Energie spécifique (Wh/kg)	119
Masse (kg)	0,014
Volume (l)	0,0073
Coût (€)	4.6

Les caractéristiques de ces dernières sont plus proches des supercondensateurs que des batteries Li-ion « classiques », grâce notamment à leur capacité de décharge à des courants très élevés (22.5A, ce qui correspond au régime de décharge 50C). Cependant, la tension (3.7V) et l'énergie spécifique (119Wh/kg) de l'élément Ko0.45UHP sont plus importantes que celles du supercondensateur (2,7V et 5.62Wh/kg). Comme le pack de supercondensateurs est dimensionné par rapport à l'énergie, nous exploitons cette différence (de tension et d'énergie spécifique) pour étudier l'influence du choix de la source secondaire (de puissance) sur les performances globales de la SEH.

Le dimensionnement du pack de batteries Ko0.45UHP suit le même processus que celui appliqué aux supercondensateurs (paragraphe II.3.3). Néanmoins, on considère que le pack de batteries UHP peut fournir de l'énergie jusqu'à 80% de profondeur de décharge, alors que l'énergie restituable par le pack de supercondensateurs représente 75% de l'énergie disponible.

De la Figure.II.36, représentant les masses des composants des SEHs, on constate que l'utilisation des supercondensateurs dans un cas et des batteries UHP dans l'autre n'a pas d'influence sur les tailles de la source principale d'énergie (les batteries HP et HE) et du convertisseur DC/DC. En revanche, la masse de la source secondaire varie. Cette variation est plus importante pour l'hybridation liée aux batteries HE. En effet, la baisse du poids, due à l'utilisation des batteries UHP à la place des supercondensateurs, représente en moyenne 10% de la masse totale de la SEH. Le gain est plus perceptible sur les critères de volumes et coûts avec des réductions d'environ 20% et 22% respectivement, (cf. Figure.II.37). Ceci s'explique par la densité d'énergie des batteries UHP qui est plus importante que celle des supercondensateurs, surtout que la source secondaire, comme indiqué au paragraphe. II.3.3.2, est dimensionnée par rapport à l'énergie.

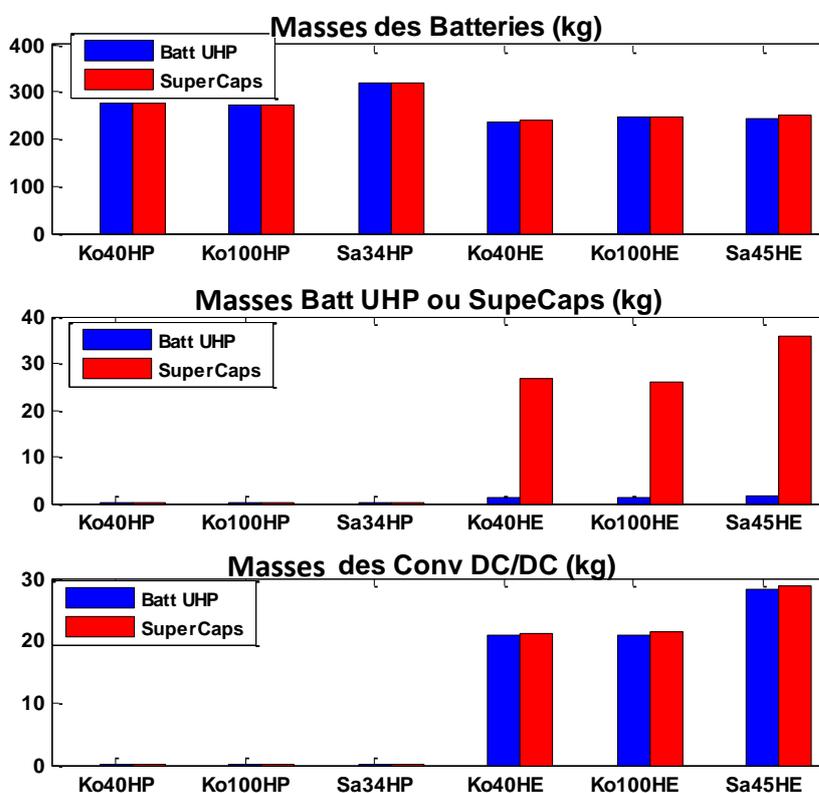


Figure.II. 36 : masse de batteries, supercondensateur ou des batteries UHP et hacheur pour un dimensionnement SEH.

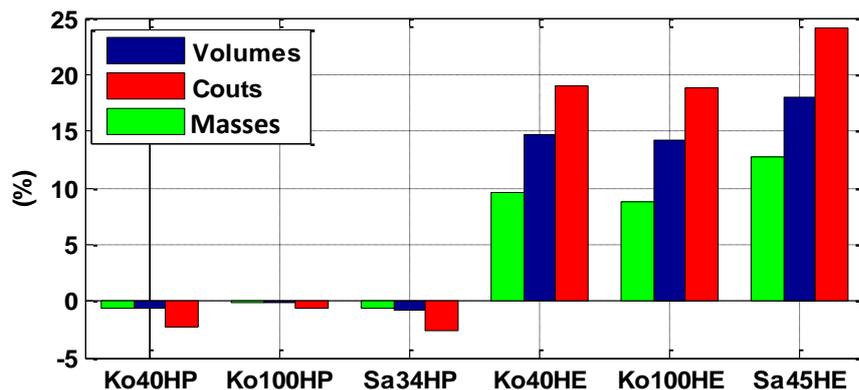


Figure.II. 37 : gains en masse, volume et coût avec l'utilisation des batteries UHP en remplacement des Supercaps.

Pour les SEHs composées de batteries HP (comme source principale d'énergie) la variation est faible comparée au cas des batteries HE. Contrairement au cas des batteries HE, la combinaison des batteries UHP avec les batteries HP mène à une dégradation (augmentation de la masse...) des performances des SEHs (cf. Figure.II.37). Cette augmentation est très faible en masse et volume, elle est de l'ordre de 2% pour le coût de la SEH et peut être justifiée par : la présence de la source secondaire qui a pour mission de récupérer uniquement une partie de l'énergie au freinage, car la puissance consommée est entièrement assurée par les batteries HP. Cette énergie est faible, mais reste le critère dimensionnant des supercondensateurs. Par contre, pour les batteries UHP le critère de dimensionnement est la puissance (la puissance des batteries UHP est plus faible que la puissance des supercondensateurs) et non pas l'énergie.

II.3.3 Influence de la tension du bus continu

Dans la démarche que nous avons élaborée pour le dimensionnement des SEHs, ou même des batteries « seules » alimentant le VE, la tension théorique du bus continu (U_{Bus}) était donnée par le calcul du nombre d'éléments de batteries en série (N_{S_B}). En d'autres termes, la valeur de la tension du bus continu était, non pas un paramètre d'entrée, mais un résultat du dimensionnement. Or, dans le processus de développement d'un VE, la tension du bus continu est fixée par les caractéristiques d'autres composants de la chaîne de traction telle que le moteur électrique utilisé et l'onduleur associé. Pour en tenir compte, nous adoptons une organisation du dimensionnement qui permet d'utiliser, comme montré par la Figure.II.38, la tension du bus continu comme paramètre d'entrée. De ce fait, le nombre d'éléments de batteries (N_{S_B}) est calculé par rapport à U_{Bus} (équation II.30).

$$N_{S_B} = \frac{U_{bus}}{U_{el_bat}} \tag{II.30}$$

Par ailleurs, les objectifs de dimensionnement restent les mêmes. I.e. les batteries sont dimensionnées pour assurer l'autonomie et le pack de supercondensateurs sert d'appoint dans les phases de forte puissance. C'est donc le nombre de branches de batteries (N_{P_B}) qui s'exprime cette fois-ci en fonction de l'énergie consommée par le VE (démonstration exposée dans le paragraphe-4 de l'annexe B.1) :

$$N_{P_B} = \frac{E_{V_cons} \cdot \left(\frac{1}{N_{S_B}} + \sqrt{\frac{1}{N_{S_B}^2} + 4 \cdot (E_{el_B} - \eta_{EW} \cdot 1,4 \cdot W_{el_B}) \cdot \frac{R_{0_elB}}{U_{el_B} \cdot U_{Bus}}} \right)}{2(E_{el_B} - \eta_{E_B} \cdot 1,4 \cdot W_{el_B})} \tag{II.31}$$

Retenons que, pour montrer l'influence de la tension du bus continu, nous recherchons par itération les performances des SEHs pour plusieurs valeurs de la tension. La variation de la tension du bus continu correspond à une augmentation d' U_{el_bat} après chaque itération, (cf. Figure.II. 38).

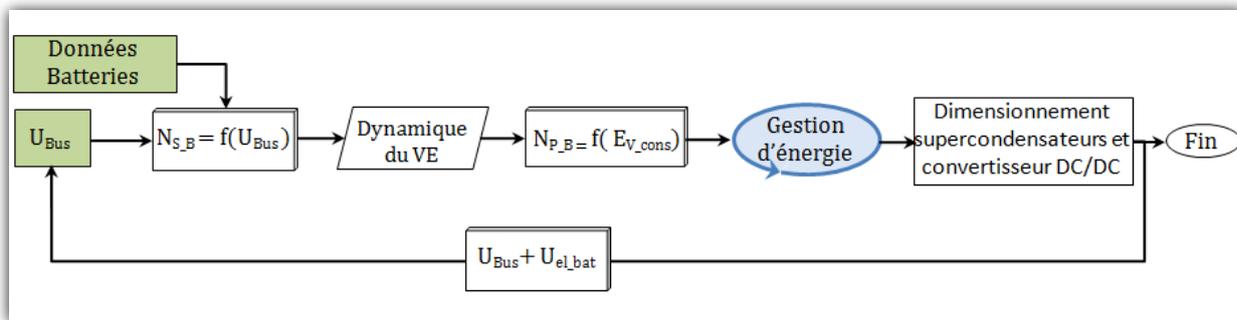


Figure.II. 38: organigramme de dimensionnement en fonction de la tension du bus continu.

L'analyse de l'évolution des masses des SEHs, de la Figure.II. 39, montre l'influence de la tension du bus continu sur le dimensionnement. Notons globalement que le volume et le coût des SEHs ont les mêmes tendances (cf. Figure.II.40). De ce fait, nous nous appuyons sur la Figure.II.39 pour analyser les résultats. De cette dernière, on remarque qu'il existe des valeurs de tension qui permettent d'avoir un dimensionnement optimal où la masse des SEHs est minimale. Le point commun entre ces valeurs est le nombre total ($N_{S_B} \times N_{P_B}$) d'éléments de batteries, qui représente le minimum d'éléments capables d'assurer l'énergie consommée par le VE.

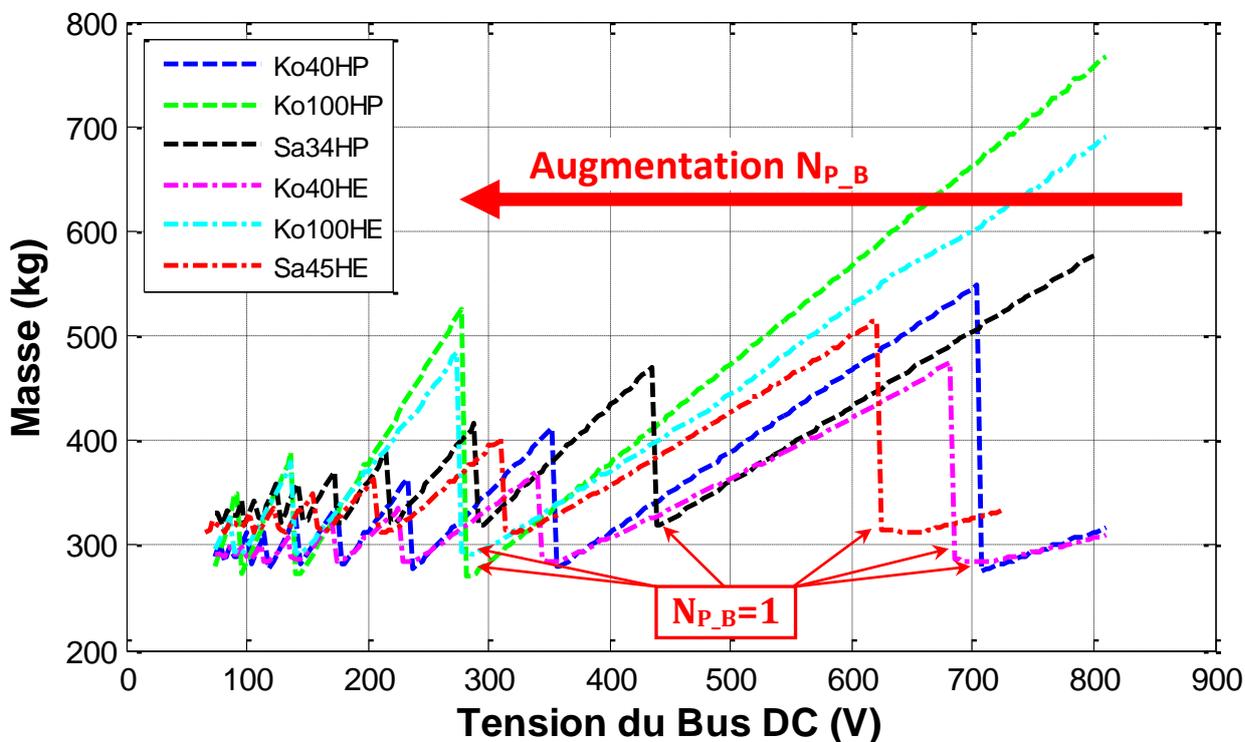


Figure.II. 39 : masses des SEHs en fonction la tension du bus continu

Pour les tensions situées entre deux valeurs « optimales » le nombre total d'éléments est supérieur au minimum nécessaire pour l'autonomie (qui est fixée dans cette section à 150km), le pack de batteries dispose, dans ce cas, d'un excès d'énergie et donc d'autonomie. La tension du bus continu fixe le nombre d'éléments en série mais elle a aussi une influence sur le nombre de

branches (N_{p_B}). N_{p_B} diminue en fonction de l'augmentation de la tension. Cependant, l'augmentation de N_{p_B} (faibles tensions) réduit la marge d'erreur et permet d'avoir un dimensionnement plus proche de l'optimal.

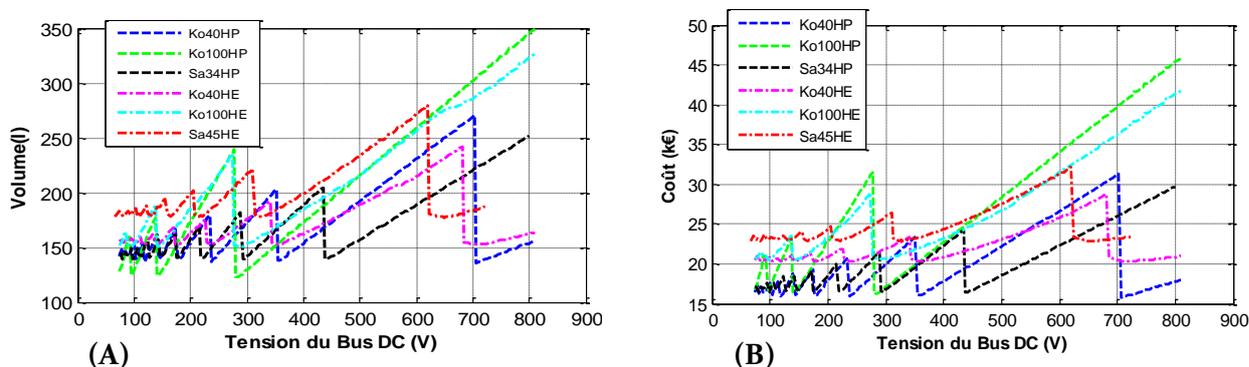


Figure.II. 40: (A) Volume, (B) coût des SEHs en fonction de la tension du bus continu.

Dans ces résultats, on retrouve les performances des SEHs obtenues auparavant (paragraphe II.3.3) avec le nombre de branches fixé à « un ». Les points indiqués dans la Figure.II.39 ($N_{p_B}=1$) ont les mêmes tensions en abscisse que celles des SEHs donnée par la Figure.II.40-B. Cela permet de confirmer que le dimensionnement basé sur le calcul du nombre d'éléments en série minimise la marge d'erreur et donne une solution plus optimale.

II.3.4 Influence de la stratégie de gestion d'énergie

Pour vérifier l'influence de la stratégie de gestion d'énergie sur le dimensionnement, nous comparons les résultats obtenus en utilisant la méthode « de limitation de puissance » par rapport aux résultats issus de l'application de la méthode de gestion dite « fréquentielle ».

II.3.4.1 Principe de la gestion énergétique fréquentielle

Pour appliquer cette stratégie, on se base sur les travaux de thèse réalisés par C.R.Akli [98] sur le dimensionnement de multi-sources, entre autre les batteries et les supercondensateurs pour l'alimentation de trains hybrides. L'objectif de cette stratégie est de définir la mission de chaque source de stockage d'énergie en se basant sur une vision fréquentielle, dont le principe est illustré sur la Figure.II.41 la puissance (P_V) requise pour la propulsion du VE est filtrée par un filtre passe-bas. La partie constituée de basses fréquences est assurée par les batteries (P_{Bat}) et elle est utilisée pour le dimensionnement de ces dernières. La partie d'harmonique de hautes fréquences est renvoyée sur le pack de supercondensateurs. C'est donc la valeur de la fréquence de coupure qui détermine la mission de chaque source. Cette valeur est liée aux caractéristiques des systèmes de stockage et elle s'exprime en fonction de la puissance spécifique (d_p) et la densité d'énergie (d_E) comme suit :

$$F_C = \frac{d_p [W/kg]}{d_E [J/kg]} \tag{II. 26}$$

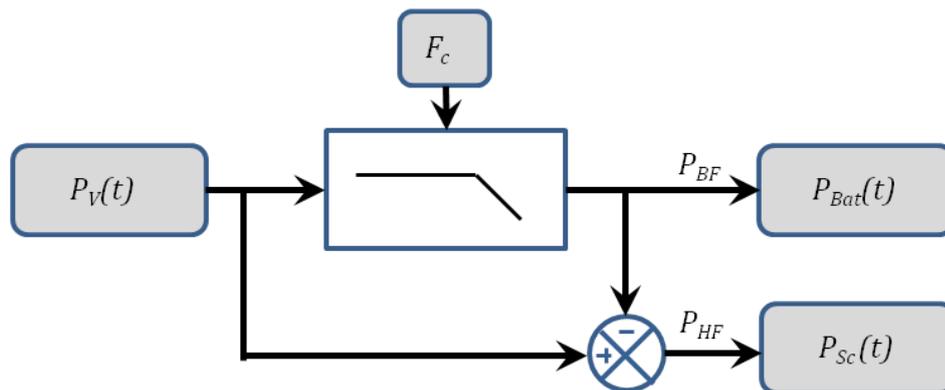


Figure.II. 41 : principe de la stratégie énergétique fréquentielle.

Dans notre cas, nous avons fixé la valeur de la fréquence de coupure à 0.0069Hz par rapport à des travaux antérieurs [99], où cette valeur de fréquence nous a permis d'obtenir la masse optimale de la SEH, (voir la Figure.5 de l'annexe-B.3).

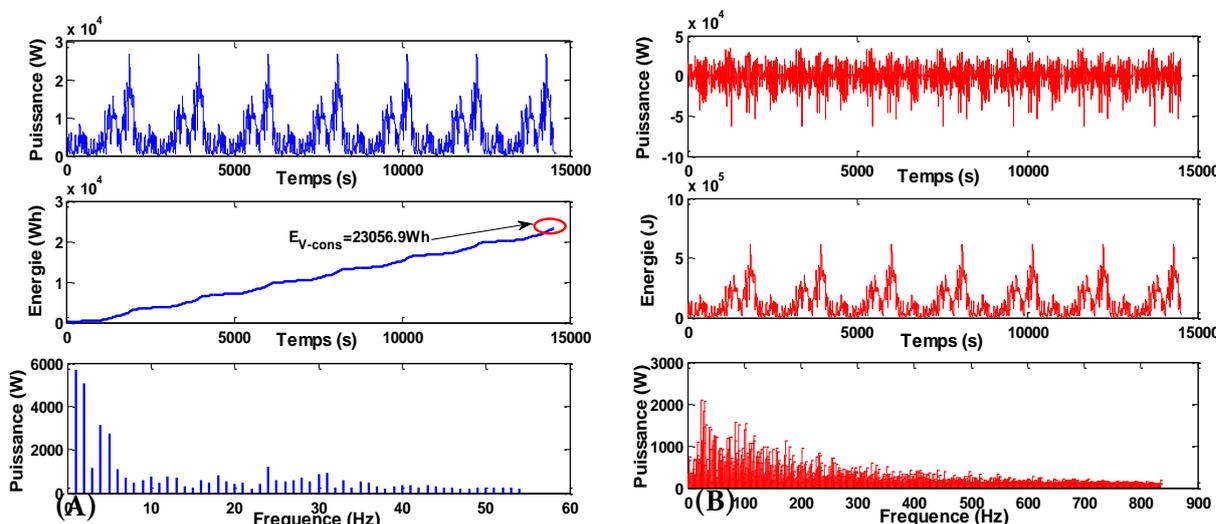


Figure.II. 42: profils de puissance et énergie issus du filtrage. (A) batteries, (B) SuperCaps.

Les profils de missions (puissance et énergie) des batteries et des supercondensateurs, donnés par le filtrage, sont représentés sur la Figure.II.42. On constate que la puissance récupérée par les batteries est nulle et que les supercondensateurs ont, la plupart du temps, pour mission de récupérer cette énergie. De plus, les fortes puissances renvoyées sur le pack de supercondensateurs ne sont pas nécessairement des puissances d'harmoniques hautes fréquences.

Pour répondre aux mêmes objectifs imposés pour la méthode de limitation de puissance, à savoir l'utilisation de batteries pour assurer l'autonomie et de supercondensateurs pour les pics de puissance. Ces derniers doivent être rechargés jusqu'à l'équilibre énergétique à la fin du cycle de conduite. Pour cela, on a apporté des modifications au niveau de la stratégie de gestion fréquentielle, en intégrant une saturation de puissance des batteries et une gestion de l'état de charge des supercondensateurs (cf. Figure.II.43).

En effet, le profil de mission imposé par le filtrage, permet de réaliser un pré-dimensionnement du pack de batteries et d'obtenir ainsi ces limites de charge et de décharge (P_{Bat}^C, P_{Bat}^D). Le pack de supercondensateurs aurait la possibilité de se décharger sur les batteries et vice-versa pour retrouver l'équilibre énergétique.

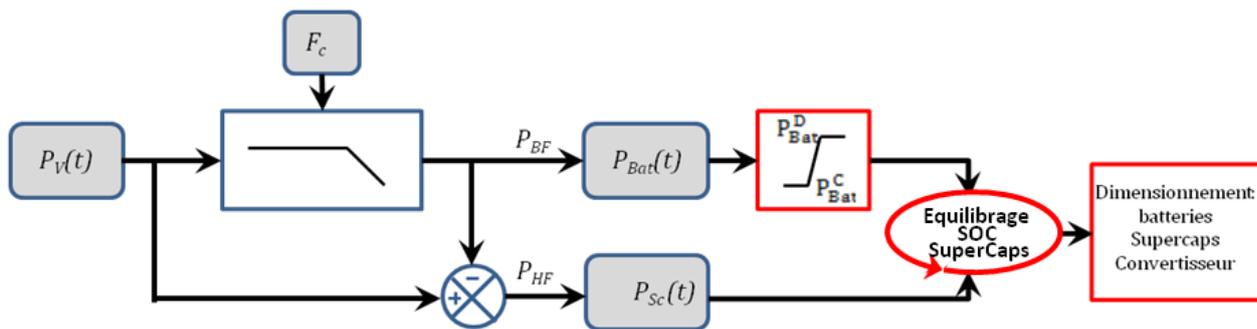


Figure.II. 43: intégration de la limitation de puissance et la gestion du SOC des SuperCaps dans la stratégie de gestion fréquentielle.

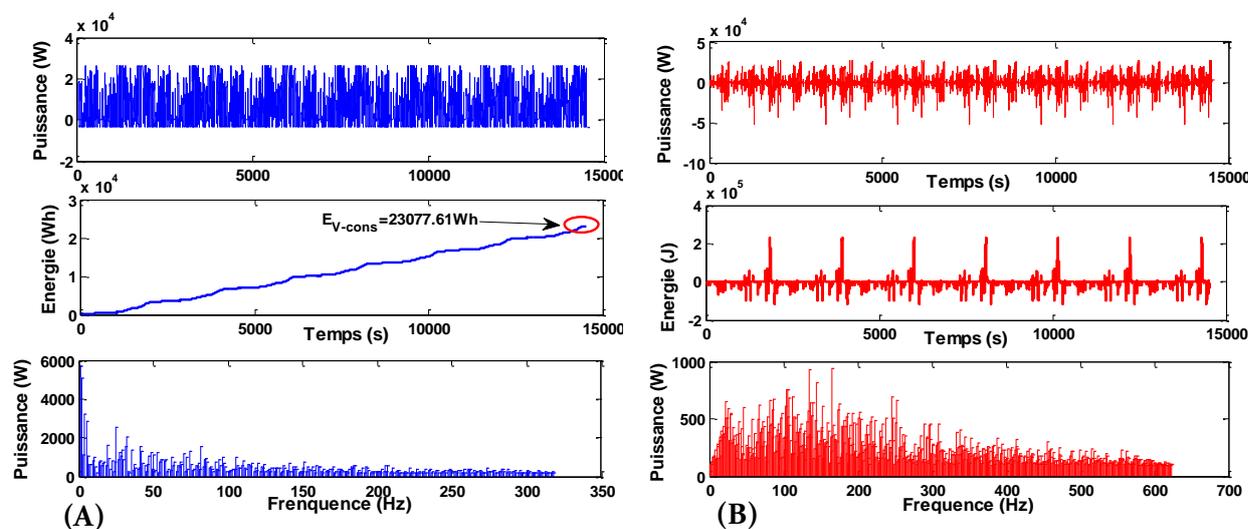


Figure.II. 44: profils de puissance et énergie après gestion du SOC des SuperCaps. (A) batteries, (B) SuperCaps.

Cet exemple de profils de puissance (Figure.II.44) dans le cas de dimensionnement de SEHs composées de batteries Sa45HE, montre bien que l’algorithme de gestion d’énergie limite la puissance du pack de batteries et permet d’échanger des flux énergétiques avec le pack de supercondensateurs. Sur la mission des batteries on retrouve la valeur de l’énergie $E_{V-cons} = 23077Wh$ (contre 23056Wh dans la Figure.II.42-A) nécessaire pour 150Km d’autonomie. La variation de l’énergie des supercondensateurs est passée, grâce à la gestion du SOC, de 610 à 221kJ, cela réduit considérablement la taille de la source secondaire. Avec les modifications apportées à la gestion fréquentielle, la puissance assurée par les batteries est plus importante et à des fréquences plus élevées, mais celles-ci restent inférieures aux fréquences de la puissance injectées aux supercondensateurs.

II.3.4.2 Comparaison des résultats de dimensionnement : stratégie de Filtrage vs Limitation de puissance

Globalement, la taille de la source primaire d’énergie (batteries HP et HE) reste la même dans les deux cas de stratégie de gestion d’énergie (cf. Figure.II.45). En effet, le dimensionnement de ces batteries dépend de l’énergie consommée par le VE. Puisque l’état de charge des supercondensateurs revient à l’équilibre dans les deux stratégies, l’énergie devant être fournie par le pack de batteries est identique. Par contre, la taille de la source de puissance varie en fonction de la stratégie de gestion d’énergie. On peut distinguer :

D'une part la variation des sources secondaires combinées avec des batteries HP. Avec la stratégie fréquentielle, les tailles des supercondensateurs et surtout du hacheur augmentent, car contrairement au cas de limitation de la puissance, le courant maximal de dimensionnement du convertisseur est très important. L'augmentation de la taille des supercondensateurs est plus faible, puisque la gestion de son état de charge, comme il a été souligné ci-dessus, réduit la variation de l'énergie (ΔE_{sc}).

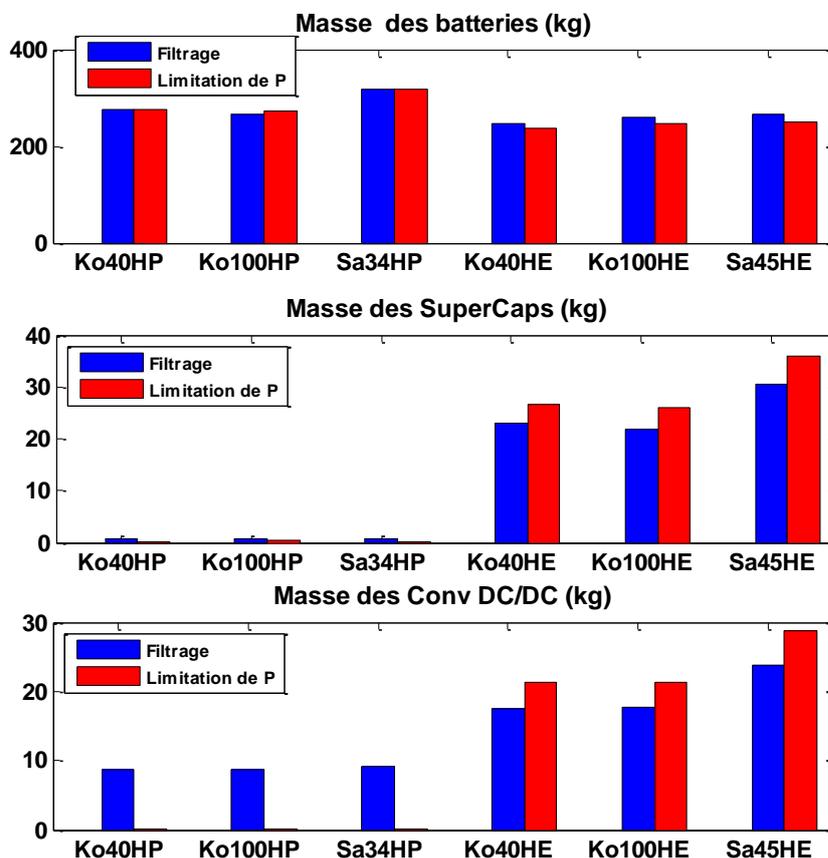


Figure.II. 45 : masses de batteries, supercondensateur et hacheur pour un dimensionnement avec les stratégies de gestion « fréquentielle » et « limitation de puissance ».

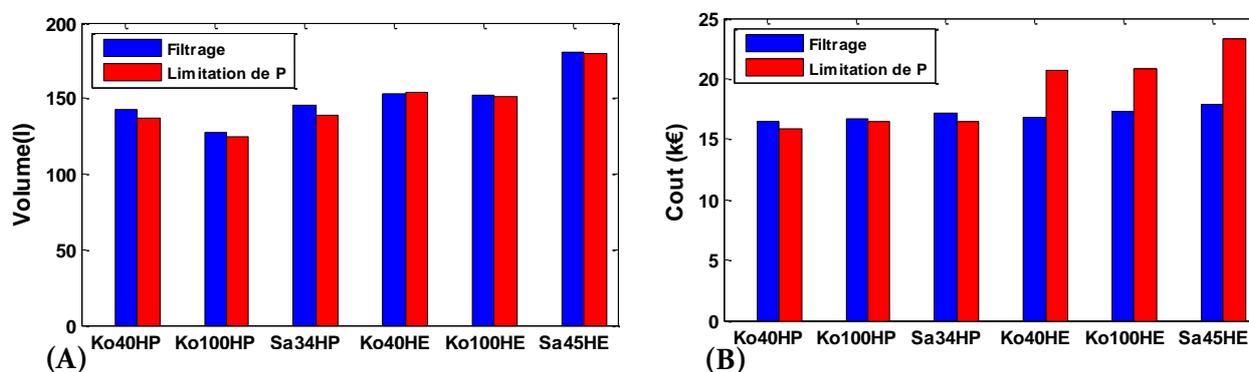


Figure.II. 46: (A) volume et (B) coût des SEHs selon les stratégies de gestion « fréquentielle » et « limitation de puissance ».

D'autre part, les tailles des sources secondaires combinées avec les batteries HE diminuent dans le cas de la gestion fréquentielle. Cela peut s'expliquer par le fait que ces batteries sont soumises à des fréquences plus importantes pour, notamment, recharger les supercondensateurs. Cette diminution a un impact remarquable sur les performances globales de volume et coût financier des SEHs.

De ce fait, la stratégie de gestion fréquentielle peut-être plus intéressante que la stratégie de « limitation de puissance », à condition que les batteries de la source primaire d'énergie soient de type « haute densité d'énergie ».

II.3.5 Récapitulatif des comparaisons

Cette partie a montré que les paramètres de la mission (type de cycle) peuvent influencer le dimensionnement. Néanmoins le degré d'influence varie d'un critère à l'autre, en fonction de la nature de la source primaire d'énergie. L'étude du cycle de conduite a révélé que si l'énergie consommée est identique, le profil de vitesse a peu d'influence sur le dimensionnement.

Par contre, la stratégie de gestion d'énergie et le remplacement des supercondensateurs par des batteries UHP, ont une influence bien plus conséquente.

L'influence de la tension du bus continu est de loin la plus perceptible. Les résultats obtenus en fonction de la tension U_{Bus} montrent l'importance du choix de cette dernière pour un dimensionnement optimal. Ce cas d'étude nous permet aussi de confirmer que le choix de fixer le nombre de branches à un et rechercher $N_{S,B}$ permet de réaliser un dimensionnement optimal.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse de dimensionnement des sources d'énergie électrique alimentant un VE. Dans un premier temps, nous avons dimensionné les batteries comme « seule » source d'énergie. Ceci nous a permis de déterminer les limites des batteries HE par rapport aux batteries HP, notamment pour les faibles autonomies. Nous avons ensuite proposé une stratégie de gestion d'énergie appelée « limitation de puissance » qui a été complétée par une gestion de l'état de charge du pack de supercondensateurs associé. La gestion du SOC et l'utilisation des batteries pour charger et décharger la source secondaire ont permis de réduire la variation de l'énergie et, donc, la taille des supercondensateurs.

Les résultats de dimensionnement des batteries « seules » et les SEHs, ont montré l'intérêt de l'hybridation pour l'optimisation des performances des SEHs. En effet, grâce à ce principe, les batteries HE deviennent intéressantes, y compris pour de faibles autonomies. Les masses et les volumes des SEHs composées de batteries HE ont été réduits de pratiquement 50% par rapport à leur utilisation « seules ». Un gain en coût financier d'environ 10k€ a également été mis en évidence. En effet, l'utilisation de supercondensateurs a permis de dépasser la contrainte de puissance liée aux batteries HE.

La dernière partie de ce chapitre a montré l'influence de certains paramètres du cahier de charges sur le dimensionnement. Un concept « pour le moins nouveau » de l'hybridation, à savoir la combinaison des batteries Li-ion avec des batteries Li-ion UHP, a été envisagée. Les résultats obtenus sont très encourageants. Le remplacement des supercondensateurs par des batteries UHP permet de réaliser des gains intéressants, surtout sur les coûts financiers (réduction d'environ 20%).

Ce chapitre, nous a également permis d'étudier l'influence du cycle de conduite sur le dimensionnement et de montrer l'importance du choix de la tension du bus continu pour l'optimisation de cette source d'énergie.

Néanmoins, toutes les comparaisons qui ont été faites sont basées sur l'étude de faisabilité selon les critères de poids, volumes, coûts financier. Or, un des problèmes majeurs des batteries est leur durée de vie. Celui-ci peut avoir un impact direct sur le coût annuel.

La comparaison des résultats de dimensionnement des SEHs a montré que les performances des batteries HP et HE sont très similaires sur la plage d'autonomie de 150 à 250Km environ. Cela est confirmé par la Figure.II.47 de synthèse des performances des batteries Ko40HP et Ko40HE. Le pack de batteries Ko40HP a un léger avantage de coût mais aussi de masse et de volume. Les contraintes physiques renvoyées sur les cellules Ko40HP et Ko40HE sont presque identiques, mais est ce que ces cellules ont également la même durée de vie ? Le chapitre suivant a pour objet d'aborder l'étude et la comparaison de vieillissement de ces deux types de cellules pour des profils de mission propres, issus des profils de dimensionnement du paragraphe II.3.3.

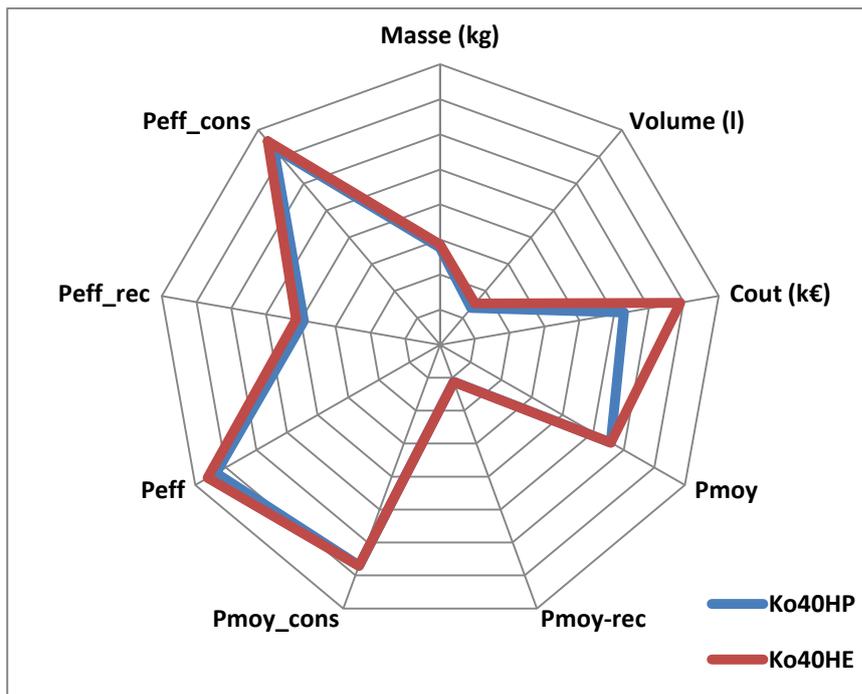


Figure.II. 47: synthèse des performances et des contraintes appliquées des batteries Ko40HP et KO40HE pour un dimensionnement de SEHs avec « limitation de puissance »

Chapitre III : Etude expérimentale du vieillissement des batteries Li-ion

- 1. Les cellules de batteries Li-ion testées**
- 2. Banc de tests**
- 3. Modélisation des batteries Li-ion**
- 4. Protocole de test de vieillissement en cyclage des batteries Li-ion**
- 5. Quantification du vieillissement des cellules de batteries Li-ion testées**

III.1. Introduction

Dans le deuxième chapitre, une synthèse sur l'apport de l'hybridation en terme de masse, volume et coût a été réalisée. Ce principe d'hybridation a été comparé à la solution classique pour les VE utilisant une batterie comme seule source d'énergie. Le cas d'une autonomie de 150km a été plus particulièrement étudié puisque, d'une part, c'est l'autonomie la mieux appropriée pour cette comparaison et, d'autre part, cette autonomie est comparable à celle de VE du marché. Ce chapitre vient ici compléter l'étude comparative entre les solutions à batteries HP seules et celles à batteries HE avec hybridation, par des résultats expérimentaux, ceci, afin d'évaluer le vieillissement respectif de ces batteries. Pour cette étude expérimentale, nous allons exploiter les contraintes en puissance et énergie obtenues lors du dimensionnement basé sur la méthode de limitation de puissance des sources hybrides et plus particulièrement pour une autonomie de 150km.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation du banc d'essais. Nous présentons tout d'abord le fonctionnement des différents éléments de ce banc et détaillons le principe de supervision de l'ensemble (convertisseur, gestion de l'énergie, systèmes d'acquisition de données, etc...). Ensuite, nous présentons le modèle générique de batteries utilisé. Ses paramètres seront identifiés par mesures expérimentales.

Dans la deuxième partie, le protocole d'essai et la méthode utilisée pour l'élaboration des profils de cyclage à partir des profils de courants réels est détaillée. Dans cette partie, on présente également les contraintes de recharge des batteries, les cycles de caractérisation ainsi que la démarche d'identification de la capacité et la résistance interne à partir des données de cyclage.

Enfin, à partir du traitement des résultats expérimentaux, nous évaluons le vieillissement des cellules de batteries lors du cyclage. Ces résultats sont analysés afin de montrer l'influence des contraintes appliquées sur la durée de vie. Ces mêmes résultats sont également associés à ceux du dimensionnement pour conclure sur les performances des batteries HP et HE ainsi que sur l'hybridation dans le cas de l'alimentation d'un VE.

III.2. Les cellules de batteries Li-ion testées

Dans cette étude expérimentale, nous voulons comparer le comportement d'une technologie de batterie de puissance seule (technologie puissance Ko40HP) à une technologie HE hybridée avec supercondensateurs (technologie énergétique Ko40HE). L'étude comparative faite au chapitre II a montré, d'après les résultats de la [Figure.II.32](#), que pour une autonomie de 150km le VE peut être alimenté avec des sources d'énergie de masses équivalentes, que ce soit avec ou sans hybridation.

L'étude expérimentale a donc pour objectif d'évaluer le vieillissement des cellules Ko40HE et Ko40HP en cyclage. Les contraintes de cyclage issues du dimensionnement du chapitre II sont montrées en [Figure.III.1](#). Cette figure montre les profils de puissance assurés par les packs de batteries. En absence d'hybridation ([Figure.III.1-A](#)), le pack de batteries Ko40HP assure l'intégralité de la puissance du VE. La puissance maximale est d'environ 48kW (bien inférieure à ce que peut fournir ce type de batterie). D'autre part, la puissance traversant le pack composé de batteries énergétiques (Ko40HE) est limitée à environ 25kW ([Figure.III.1-B](#)). Ainsi, ces éléments sont utilisés à 1C/1C en charge/décharge, car l'hybridation avec les supercondensateurs permet de renvoyer les pics de puissance sur ces derniers.

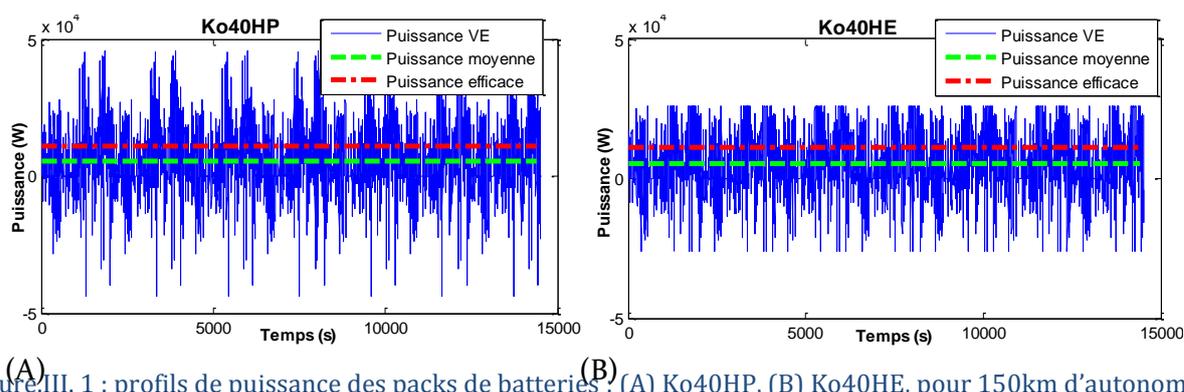


Figure.III. 1 : profils de puissance des packs de batteries : (A) Ko40HP, (B) Ko40HE, pour 150km d'autonomie

Le Tableau.III. 1 regroupe les valeurs des contraintes des puissances moyennes et efficaces des deux packs correspondant à la mission de 150km d'autonomie. Bien que les profils et les valeurs maximales de puissance en charge/décharge de ces packs soient différents, les contraintes en valeurs efficace et moyenne sont pratiquement identiques. Ceci s'explique par le fait que la gestion d'énergie des supercondensateurs réinjecte de la puissance dans le pack de batteries. Or, si l'on compare les contraintes de puissance de la batterie Ko40HE avec d'une part la gestion du SOC des supercondensateurs et de l'autre uniquement de la limitation de puissance (sans gestion d'énergie, cf. Tableau.III. 1) on constate que les contraintes sont plus faibles dans ce dernier cas. De ce fait, la méthode de gestion d'énergie des supercondensateurs doit être améliorée pour réduire les contraintes physiques sur les batteries. Cependant, lors des essais de vieillissement en cyclage, ce sont les contraintes avec la gestion d'énergie qui sont appliquées à la cellule Ko40HE.

Tableau.III. 1 : valeurs des contraintes des puissances moyennes et efficaces pour 150km d'autonomie

Contraintes physiques	Ko40HP	Ko40HE	
		Avec GE	Sans GE
Tension du Bus Ubus (V)	377.4	362.6	362.6
Nombre d'éléments série Ns	102	98	98
Nombre de branche Np	2	2	2
Puissance moyenne (W)	5579	5607	5393
Puissance moyenne récupérée (W)	1125	1134	1091
Puissance moyenne consommées (W)	6704	6742	6483
Puissance efficace (W)	10983	11117	10576
Puissance efficace récupérée (W)	3917	3982	3779
Puissance efficace consommée (W)	10261	10379	9878

Les tests de vieillissement sont réalisés à échelle réduite. Pour chaque technologie les tests sont réalisés sur une cellule. La Figure.III.2 est un exemple d'une cellule de batterie Ko40HP testée et montre les emplacements des capteurs (a, b et c) de température.

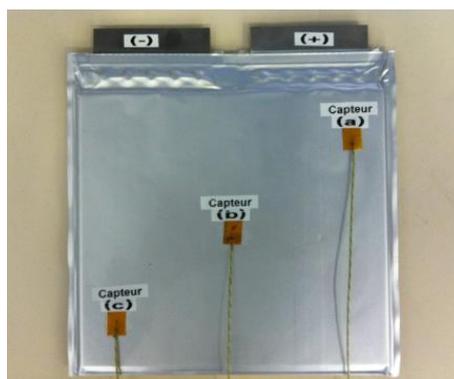


Figure.III. 2: exemple de cellule de batterie testée, positionnement des capteurs de températures

III.3. Banc de tests

Afin de pouvoir tester le comportement des systèmes de stockage dans des applications de transport, un banc de test a été développé au laboratoire mécatronique de l'ESTACA-Laval. Ce banc est capable de simuler des cycles de charge/décharge dans des conditions d'utilisation similaires à celles des applications réelles (traction électrique, stockage d'énergie, filtrage, UPS...etc.). Le banc de test développé permet de suivre le comportement d'un système soumis à des essais électriques 24h/24h.

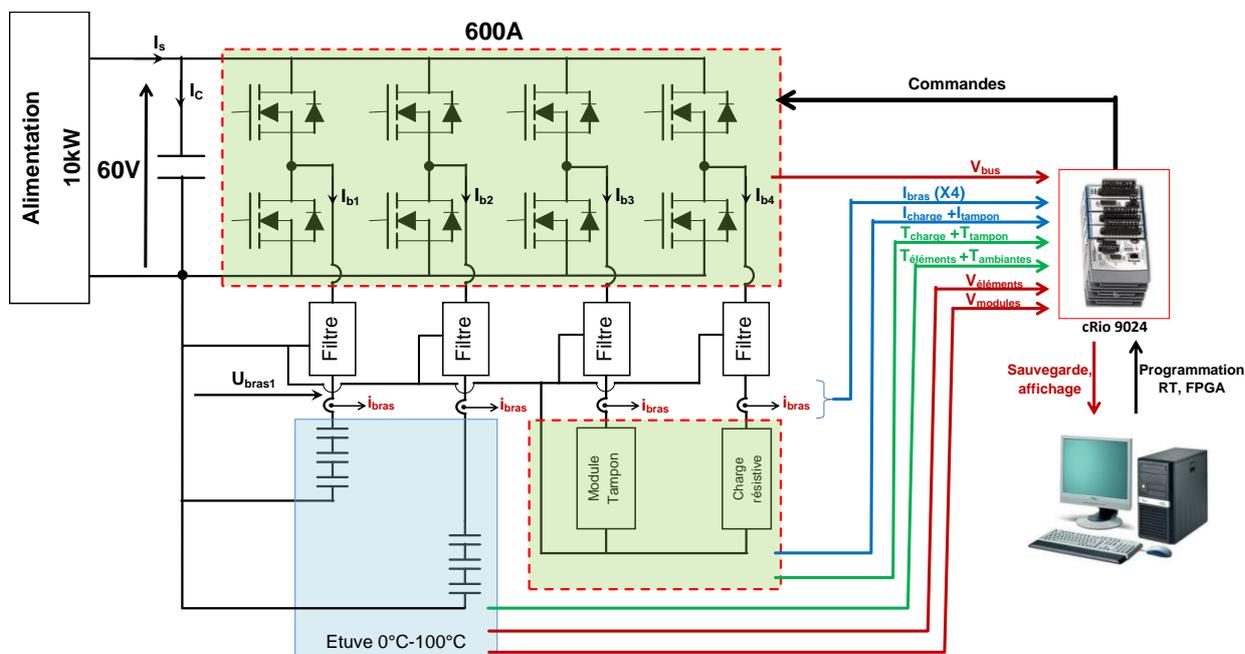


Figure.III. 3 : schéma synoptique du banc de test (600A, 60V, 40kHz)

La Figure.III.3 présente le synoptique du banc de test. Le cyclage est assuré par le contrôle du transit d'énergie entre les modules à tester et un module servant de tampon d'énergie. Ce dernier est dimensionné pour assurer l'appel énergétique des cellules testées lorsque cet appel est très important, par exemple lorsque à certains moments, les contraintes en puissance se cumulent. Pour cela, la capacité du module tampon est beaucoup plus importante que celle des cellules à tester. Dans notre cas, cette capacité est 7 fois supérieure à celle des cellules testées. Dans le cas d'un besoin de décharge des cellules testées dans le module tampon, et celui-ci est pleinement chargé, l'excès de puissance est alors dissipé dans la charge résistive de 9,6kW. Enfin, l'énergie dissipée durant le cyclage est compensée par une alimentation de 10kW. L'intervention de cette dernière est contrôlée en fonction du SOC du module tampon en fin de cycle.

La Figure.III.4 montre une photographie du banc avec la baie de puissance (à droite). Celle-ci est composée :

- du système d'acquisition, de contrôle et de supervision.
- des cartes d'interface et du convertisseur quatre bras 60V/ 600A)
- de l'alimentation 10kW.
- du module tampon.

Par ailleurs, les cellules testées sont placées dans une étuve qui permet de maîtriser la température de ces dernières. Ce conditionnement thermique cherche à régler leur température extérieure à 23°C afin d'assurer l'homogénéité thermique sur leurs surfaces.

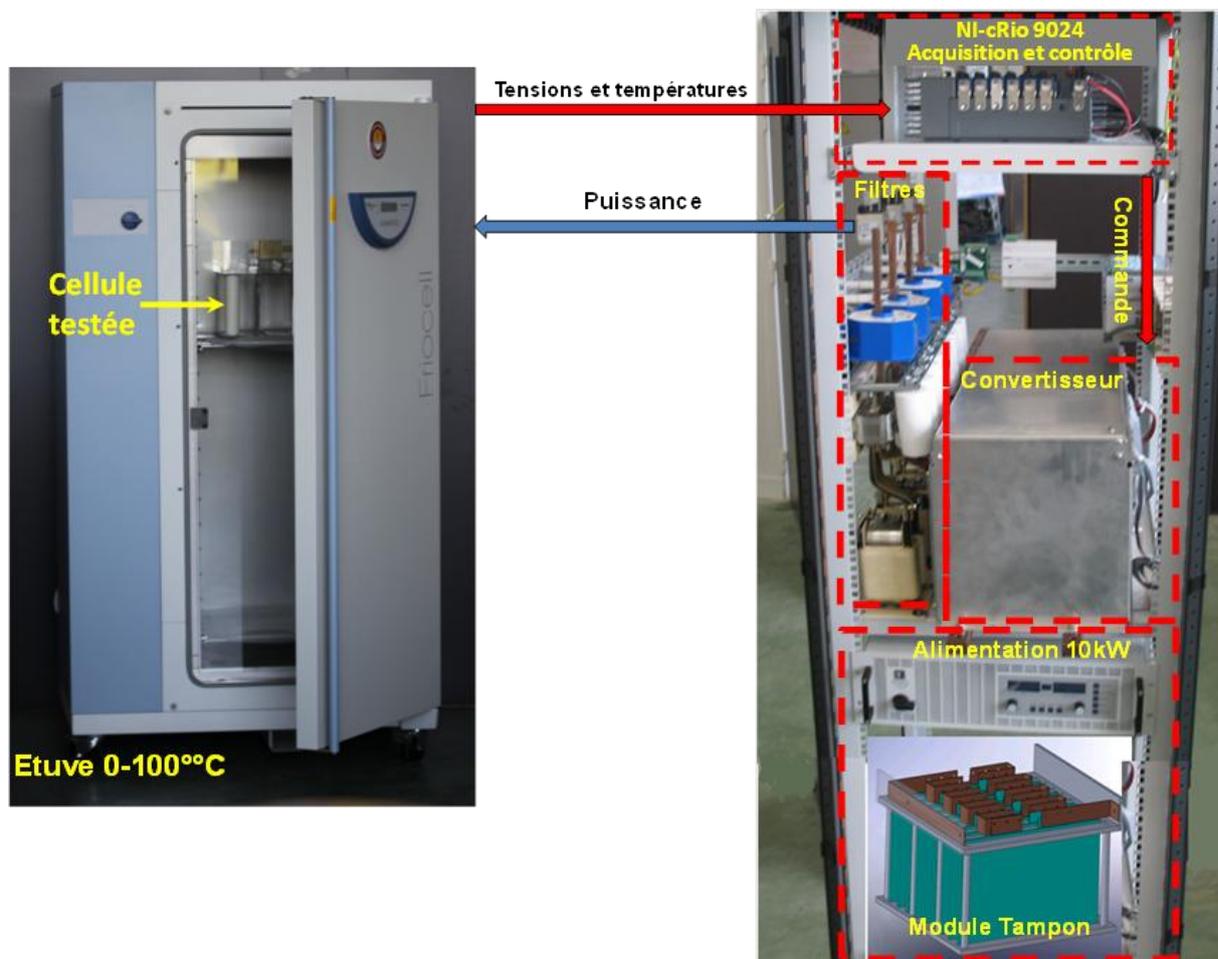


Figure.III. 4 : (A) étuve, (B) banc de test

Désormais, on s'intéresse aux systèmes d'acquisition de données, de contrôle et de supervision du banc de test. Les caractéristiques techniques du convertisseur et du module tampon sont détaillées dans l'annexe-C.1. Régulation de courant et tension

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. Ce module possède un FPGA programmable grâce à l'environnement LabVIEW. Pour un cyclage des batteries en toute sécurité, il est nécessaire d'assurer des phases de contrôle de courant (CC) mais également des phases à tension constante (CV). Il faut également veiller à ce que la transition entre les deux phases se passe sans perturbations. Pour cela, une stratégie basée sur l'utilisation de deux boucles imbriquées a été adoptée pour atteindre cet objectif.

Cette stratégie, comme présenté par la Figure.III.5, est composée d'une boucle externe utilisée pour le contrôle en tension et d'une autre interne pour le contrôle en courant. Les références données par la boucle externe sont limitées par les références en courant du cycle voulu. La référence de tension est imposée à 4,2V pour les phases de recharge (I_{ref} positif) et à 2,7V pour les phases de décharge (I_{ref} négatif). Les boucles de contrôle sont programmées sous LabVIEW-FPGA (détails présentés dans l'annexe-C.1) et fonctionnent à une fréquence d'échantillonnage de 10kHz.

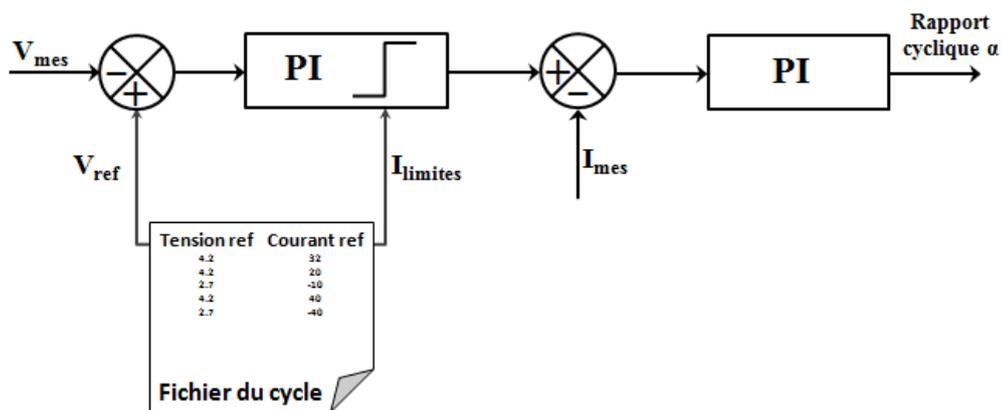


Figure.III. 5 : contrôle de cyclage des cellules de batteries

III.3.1.Acquisition des données

L'acquisition est également assurée par le module NicRio-9024. Des cartes NI-9239 /24bits/4Voies/±10V, sont utilisées pour l'acquisition des tensions élémentaires et des courants. Pour les tensions des bras (tension<60V), on utilise des cartes NI-9229/4voies/24bits/±60V. La fréquence d'acquisition de toutes les grandeurs électriques est fixée à **1kHz**. Pour l'acquisition des températures, les thermocouples sont reliés à des cartes NI9213/24bits qui ont une sensibilité inférieure à 0,02°C. La cadence d'acquisition des températures est fixée à 0,5Hz.

III.3.2.pilotage et surveillance du banc de test

L'interface IHM de la Figure.III.6 présente la face avant du RealTime (RT). Elle permet de saisir les paramètres liés à la commande et 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,...). Cette interface nous permet également de visualiser des informations sur l'état du banc (défauts, type de défaut, activation de sauvegarde, nombre de cycles effectué,...) et de visualiser l'évolution des grandeurs électriques et les températures des composants.

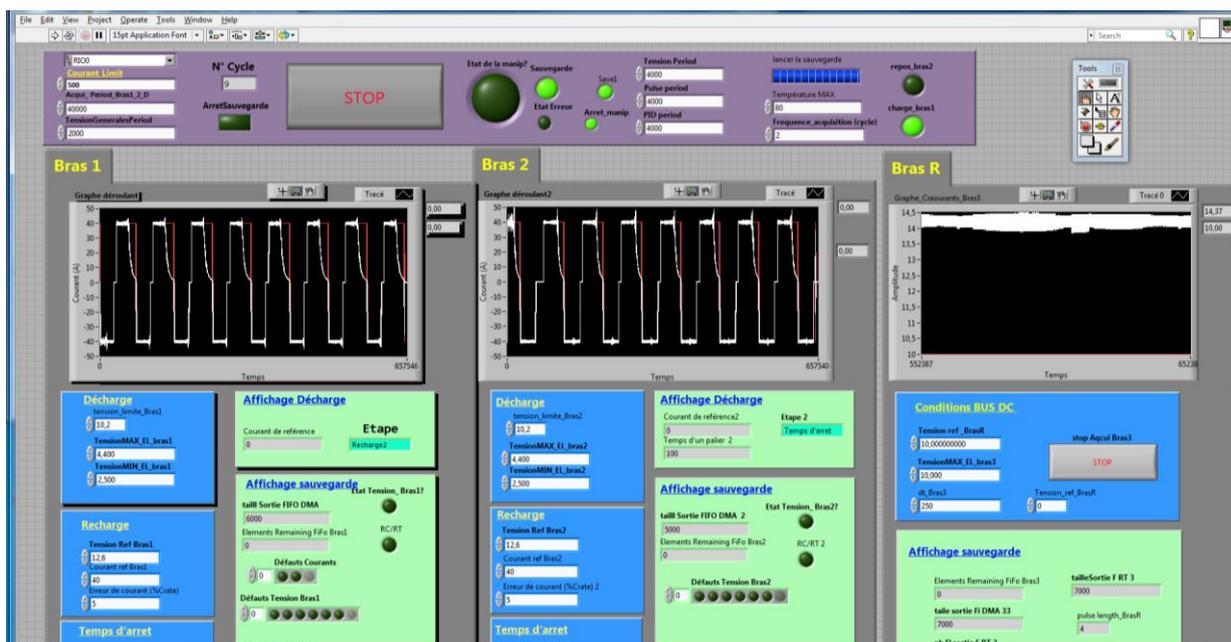


Figure.III. 6 : interface IHM pour pilotage et surveillance du banc de test.

III.4. Modélisation des batteries Li-ion

Certains modèles d'accumulateurs permettent de mettre sous forme analytique les phénomènes liés aux réactions électrochimiques qui surviennent pendant leur utilisation. L'intérêt est de pouvoir prévoir leur comportement dans différents domaines d'applications. La complexité de ces systèmes électrochimiques justifie la multiplicité des modèles et des méthodes d'identification des paramètres pour connaître, par exemple, l'état de charge ou l'état de santé de ceux-ci. Le but ici n'est pas de modéliser les batteries, mais d'utiliser des modèles simples pour vérifier que les profils de cyclage proposés pour les tests peuvent être appliqués par le banc de test.

III.4.1. Modèle de base

Ce modèle de base permet, lorsque le niveau de précision n'est pas essentiel, d'obtenir des résultats basiques, mais peu réalistes, par exemple pour le dimensionnement d'un système énergétique. Il a été repris par plusieurs auteurs [100] pour réaliser des simulations lorsque la précision n'est pas la priorité. Comme indiqué par la Figure.III.7, il est constitué d'une source de tension idéale, équivalente à la tension du circuit ouvert (E_0), et d'une résistance série équivalente (r_s). La tension de sortie est alors exprimée par la loi classique des générateurs de tension non idéaux :

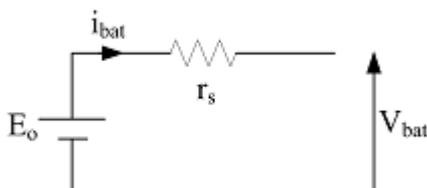


Figure.III. 7 : modèle de résistance interne

$$V_{\text{bat}} = E_0 - r_s \cdot I_{\text{bat}} \quad (\text{III. 3})$$

Ce modèle de base est particulièrement simple à mettre en application, mais il ne tient pas compte des variations d'impédance interne de la batterie en fonction de l'état de charge, de la concentration en électrolyte, de la température ou encore du nombre de cycles effectué. Ce modèle ne permet donc pas de connaître avec précision les phénomènes dynamiques et l'évolution de son comportement dans le temps, mais il peut être suffisant lors d'un premier dimensionnement d'équipement d'électronique de puissance.

III.4.2. Modèle de Thévenin

Ce modèle est également bien connu [101], il s'agit d'une amélioration du précédent modèle grâce à l'insertion d'un dipôle RC (cf. Figure.III.8).

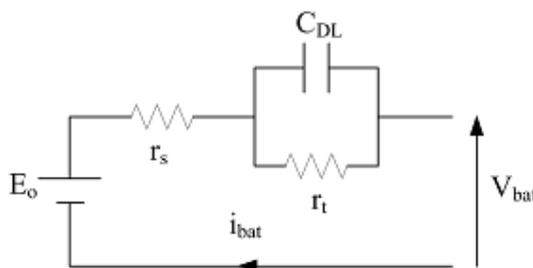


Figure.III. 8 : modèle de Thévenin

Le dipôle $r_T C_{DL}$ introduit une constante de temps dont l'existence est mise en évidence lors d'essais expérimentaux pour lesquels les phénomènes de couche double sont souvent marqués dans les temps très courts (quelques 100 millisecondes à quelques secondes).

III.4.3. Modèle à impédance de Warburg

Ce modèle utilise la méthode d'impédancemétrie pour identifier ces paramètres. Ces paramètres représentent le comportement des batteries. La méthode d'impédancemétrie est utilisée aussi pour la modélisation des supercondensateurs et des piles à combustible. Son principe est basé sur la mesure de la réponse du système à un signal sinusoïdal de faible amplitude autour d'un point de fonctionnement que l'on suppose quasi stationnaire pendant la durée des mesures. En faisant varier la fréquence de ce signal, on peut dissocier les dynamiques mises en jeu. Cette réponse fréquentielle est représentée par un diagramme de Nyquist et approchée par un réseau électrique dit « circuit de Randles », Figure.III.9. L'expression de l'impédance complexe de Randles d'une batterie est de la forme [102], [103]:

$$Z_W(\omega) = R_e + \frac{R_{tc}(j\omega)^{\frac{1}{2}} + \sigma\sqrt{2}}{C_{dc}R_{tc}(j\omega)^{\frac{3}{2}} + \sigma\sqrt{2}C_{dc}(j\omega) + (j\omega)^{\frac{1}{2}}} \quad (III.4)$$

Comprenant :

- Une résistance des connectiques externe à la batterie, R_e
- Une résistance de transfert de charges, R_{tc} .
- Une capacité C_{dc} des couches doubles aux interfaces des électrodes.
- Une impédance de Warburg Z_W , représentant la diffusion des espèces donnée par :

$$W(\omega) = \frac{\sigma\sqrt{2}}{\sqrt{j\omega}} \text{ où } \omega \text{ est la pulsation et } j^2 = -1.$$

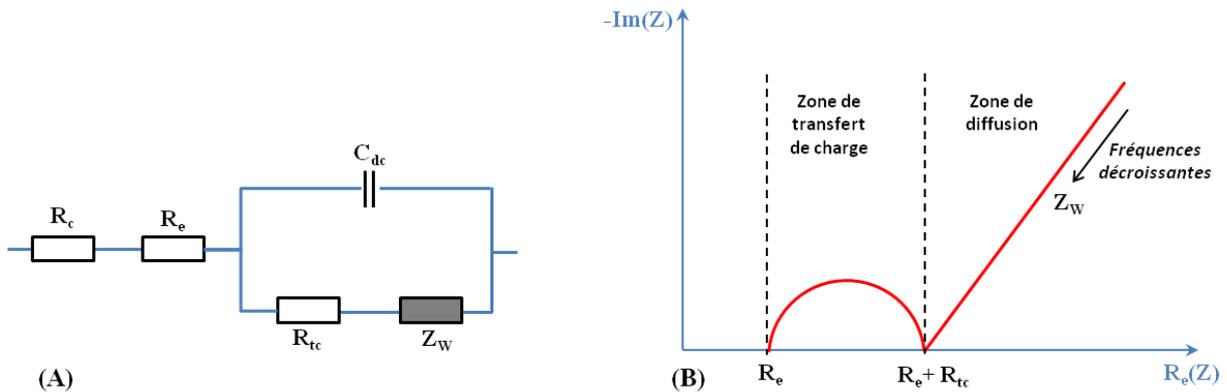


Figure.III. 9 modèle de Randles d'une batterie. (A) circuit équivalent, (B) diagramme de Nyquist, [103]

III.4.4. Modèle générique pour la simulation dynamique

Le modèle proposé par Tremblay et al [104] permet de simuler le comportement dynamique des batteries, en utilisant l'état de charge (SOC) comme seule variable d'état. Ce modèle est valable pour les différents types de batteries : Plomb-Acide, NiCd, NiMH et Li-ion. La batterie est modélisée par une source « contrôlée » de tension mise en série avec une résistance, (cf. Figure.III.10-A). L'équation non-linéaire III.5 décrit la variation de la tension (E) de la source « contrôlée » en fonction du courant traversant la batterie.

$$E = E_0 - K \frac{C}{C - \int_0^t i. dt} + A. e^{(-B. \int_0^t i. dt)} \quad (III.5)$$

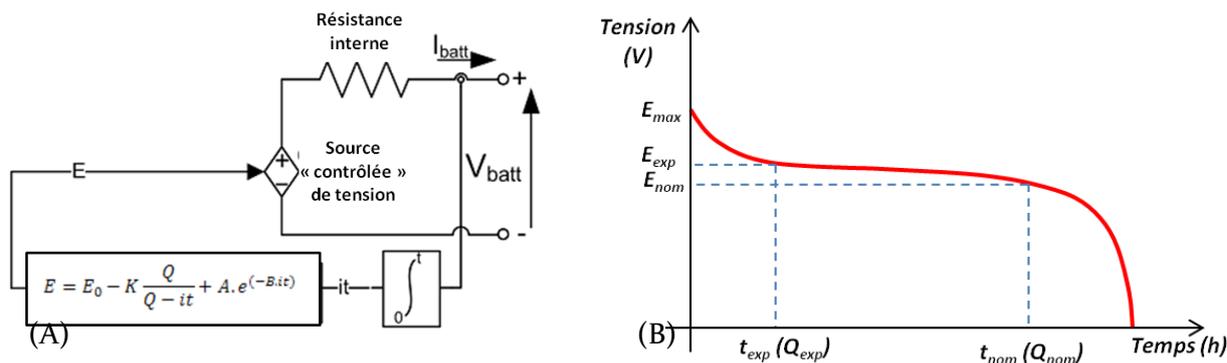


Figure.III. 10 : (A) modèle générique d'une batterie. (B) Courbe de décharge à courant constant, [104]

L'identification des paramètres de l'équation III.5, et donc du modèle générique, est basée sur l'exploitation de la courbe de chute de tension de la batterie (Figure.III.10-B) provoquée par une décharge à courant constant. Cette variation de tension est une caractéristique fournie par le fabricant pour des régimes de décharge et des conditions de température spécifiques. Sur cette caractéristique, les trois points nécessaires pour identifier les paramètres du modèle générique sont :

- $(E_{max}, 0)$: batterie complètement chargée,
- (E_{exp}, t_{exp}) ou (E_{exp}, Q_{exp}) : fin de la zone de variation exponentielle
- et (E_{nom}, t_{nom}) ou (E_{nom}, Q_{nom}) : fin de la zone où la tension varie quasi-linéairement.

Les deux premiers points permettent de modéliser la partie exponentielle du début de la caractéristique $(A \cdot e^{(-B \cdot \int_0^t i \cdot dt)})$ avec :

$$\begin{cases} A = E_{max} - E_{exp} \\ B = \frac{3}{C_{exp}} \end{cases} \quad (III. 6)$$

A et B représentant, respectivement, la chute de tension et la constante de temps inverse dans la zone exponentielle. C_{exp} correspond à la quantité de charges délivrée par la batterie à l'instant t_{exp} pour le courant de décharge $I_{déch}$. Elle est calculée par :

$$C_{exp}(Ah) = I_{déch} (A) \cdot t_{exp} (h) \quad (III. 7)$$

- À partir des valeurs de tension (E_{nom}) et de la quantité de charges (C_{nom}) on calcule le coefficient de polarisation de la tension (K) comme suit :

$$K = \frac{(E_{max} - E_{nom} + A \cdot (e^{-B \cdot C_{nom}} - 1)) \cdot (C_{bat} - C_{nom})}{C_{nom}} \quad (III. 8)$$

C_{bat} représente la capacité nominale fournie par le fabricant et C_{nom} la capacité nominale estimée à partir du point (E_{nom}, t_{nom}) de la courbe de tension (Figure.III.10-B). C_{nom} est donnée par :

$$C_{nom}(Ah) = I_{déch} (A) \cdot t_{nom} (h) \quad (III. 9)$$

- Le dernier paramètre à identifier est la constante de tension (E_0). Celle-ci est calculée à partir de la tension de la batterie complètement chargée (E_{max}) par l'équation III.10. Cette dernière tient compte de la variation de la tension due à la résistance interne et au courant de décharge ($I_{déch}$).

$$E_0 = E_{\max} + K + R_{\text{bat}} \cdot I_{\text{déch}} - A \quad (\text{III. 10})$$

Dans le cas où la valeur de la résistance interne (R_{bat}) n'est pas fournie par le fabricant, elle peut être aisément identifiée par une mesure.

Le [Tableau.III.2](#) regroupe les paramètres de la batterie Ko40HP testée, identifiés selon la démarche détaillée ci-dessus.

Tableau.III. 2 : paramètres du modèle générique d'une cellule de batterie

	Valeurs
E_0 (V)	3,4989
R_{bat} (m Ω)	0,9
K(V)	0,0049
A(V)	0,6458
B(Ah) ⁻¹	0,0889

La [Figure.III.11](#) permet de comparer les courbes de variation de la tension d'une cellule de batterie Ko40HP obtenues par simulation, d'une part, et expérimentalement, d'autre part. La variation de la tension correspond à une décharge complète de la cellule de batterie à 1C (40A). L'allure de la courbe de la simulation suit l'allure d'une courbe de décharge de batterie mais avec un écart relativement important par rapport aux résultats expérimentaux.

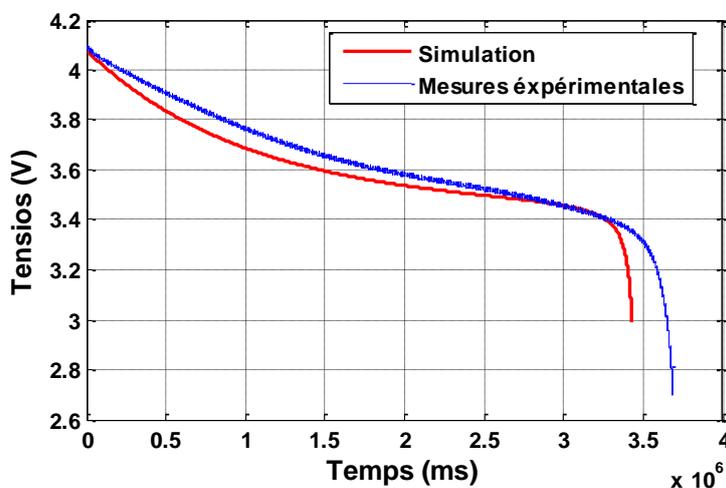


Figure.III. 11 : variation de la tension pour une décharge à 1C (40A), comparaison des résultats expérimentaux avec la simulation du modèle identifié.

Ce modèle a cependant le mérite d'être simple à caractériser et donne des résultats suffisamment précis pour nos besoins. Ce modèle possède aussi quelques défauts décrits par les auteurs [104]:

- La résistance interne du modèle est une valeur constante et ne varie pas durant les cycles de charge/décharge en fonction de l'amplitude de courant.
- Le modèle ne prend pas en compte l'influence de la température sur les paramètres identifiés.
- Le phénomène de l'autodécharge n'est pas pris en compte.

III.5. Protocole de test de vieillissement en cyclage des batteries Li-ion

La procédure de test suivie pour l'estimation de l'impact des contraintes d'alimentation du VE sur les cellules de batteries est composée de deux phases principales : une phase de cyclage basée sur le profil de courant réel du VE et une phase de caractérisation pendant laquelle on mesure l'impact du cyclage sur la variation de la résistance interne et la capacité, (Figure.III.12).

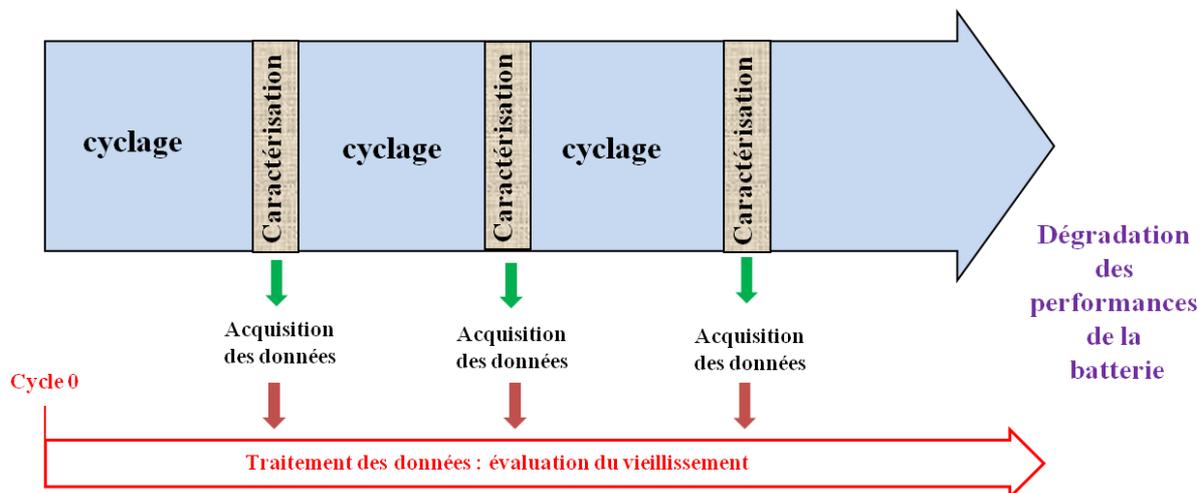


Figure.III. 12 schéma de déroulement des tests de vieillissement en cyclage

III.5.1. Norme de la Commission Internationale d'Electrotechnique (CEI)

Plusieurs procédures d'essais destinées à l'étude de vieillissement des batteries Li-ion sont aujourd'hui disponibles dans la littérature [105], [106], [107]. Afin de standardiser les tests, la *Commission d'Electrotechnique Internationale* (CEI) a proposé la norme CEI 62660-1/2 qui a pour but de spécifier les essais de performances des accumulateurs Li-ion utilisés pour la traction automobile, [108]. Celle-ci définit les procédures d'essai et les conditions normalisées qui permettent d'obtenir les caractéristiques essentielles des éléments de batteries Li-ion telles que : la capacité, les densités de puissance et d'énergie, la durée de vie calendaire et la durée de vie en cyclage.

Concernant la durée de vie en cyclage, la norme CEI 62660-1/2 distingue deux cas d'applications pour l'automobile :

- Le premier cas concerne les batteries alimentant les véhicules purement électriques. Les experts de la CEI ont élaboré un protocole d'essai composé de deux profils de cyclage. Comme montré par la Figure.III.13., la cellule de batterie est déchargée suivant le profil-A (cf. Figure.III.14-A) jusqu'à 50% de l'état de charge. Pour tenir compte des conditions de montée d'une côte par le VE, la cellule est ensuite déchargée par le profil-B (cf. Figure.III.14-B) répété une seule fois. Ensuite, le cyclage reprend selon le profil-A jusqu'à 20% d'état de charge (autrement dit, un DOD=80%). D'après la norme, le vieillissement est évalué par des mesures des performances (capacité, résistance interne...) tous les 28 jours et le processus de cyclage prend fin si la mesure de la capacité baisse de 20% ou la résistance interne augmente jusqu'à 200% par rapport à leur valeurs à l'état neuf de la batterie.

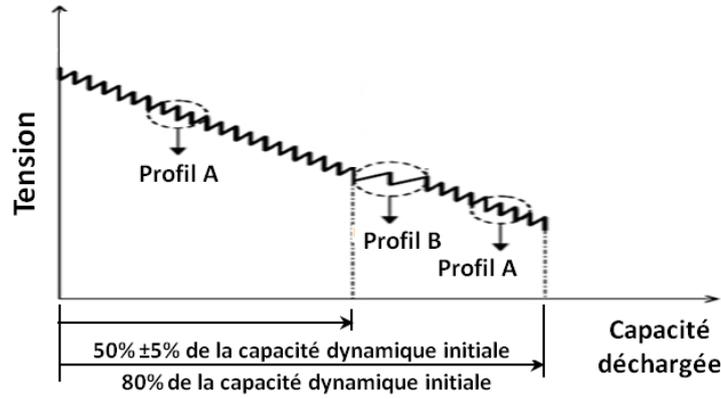


Figure.III. 13 : Protocole d'essai de durée de vie relatif à l'application VE, [108].

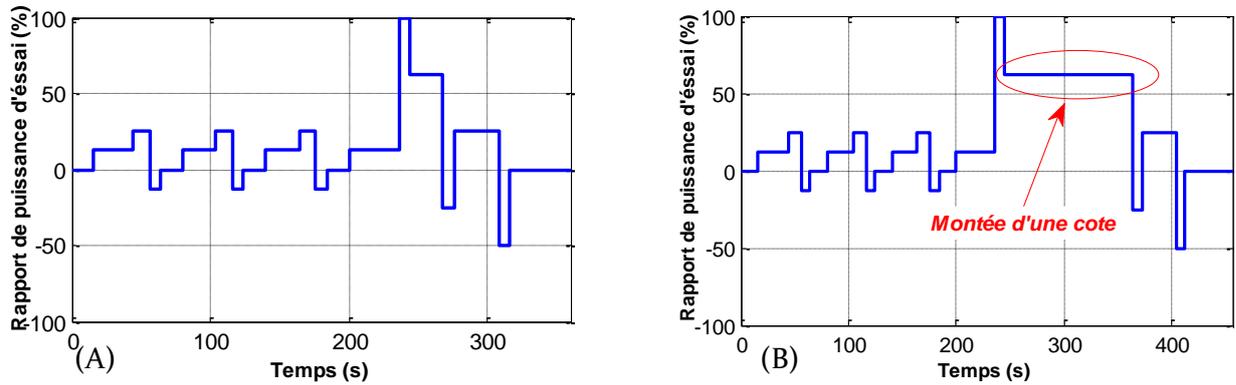


Figure.III. 14 : essais de durée de vie pour batterie VE (A) profil-A de décharge dynamique. (B) profil-B de décharge dynamique incluant une pente, [108].

- Le second cas traité par la norme CEI 62660-1/2 est le vieillissement des batteries Li-ion alimentant des véhicules électriques hybrides. Le protocole de test est, là aussi, composé de deux profils de cyclage : un profil « à décharge prédominante » (cf. Figure.III.15-A) qui est appliqué aux bornes de la cellule jusqu'à ce que son SOC passe de 80 à 30%. Ensuite, la cellule est rechargée par un profil « à charge prédominante » (cf. Figure.III.15-B) jusqu'à 80%. De ce fait, le vieillissement est caractérisé par rapport à une utilisation de la batterie sur une plage de variation du SOC de 80 à 30%, ce qui est le cas pour les applications VEHs. Comme pour le premier cas (VE), le processus de cyclage est interrompu si les performances, mesurées cette fois-ci tous les 14 jours, indique également une variation de 20% de leur valeur initiale.

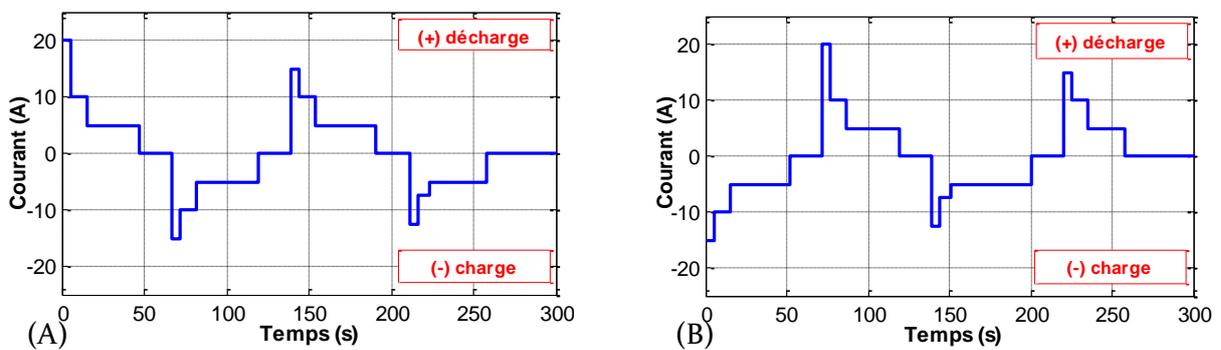


Figure.III. 15 : essais de durée de vie pour batterie VEH. (A) profil de décharge dynamique. (B) profil de charge dynamique, [108]

Certains spécialistes, [105], considèrent que ces protocoles d'essai spécifiés pour les applications de VEs et de VEHS sont destinés, respectivement, à l'étude du vieillissement des batteries Li-ion de type haute énergie et de type haute puissance. Bien que l'objectif de cette thèse soit la comparaison du vieillissement des batteries énergétiques (HE) et haute puissance (HP), nous ne pouvons pas exploiter ces protocoles. En effet, les cellules de batteries Ko40HP et Ko40HE testées alimentent toutes les deux un VE. De plus, l'utilisation de ces deux protocoles ne permet pas de prendre en considération l'aspect d'hybridation des sources de stockage d'énergie. Pour cela, nous avons décidé d'utiliser un protocole d'essai basé sur l'utilisation des profils de consommation issus du dimensionnement des sources hybrides présenté au chapitre II.

III.5.2. Profils de cyclage accéléré basé sur le cycle d'usage réel du VE

Comme il a été montré dans le chapitre II, l'association des supercondensateurs et des batteries modifie considérablement les profils de puissance de ces dernières. C'est sur la base des contraintes imposées par ces profils que nous allons quantifier le vieillissement des cellules de batteries HP et HE dimensionnées.

L'objectif est donc maintenant d'élaborer des profils de cyclage simplifiés applicables avec notre banc de test, tels ceux de la norme CEI 62660-1/2 présentés ci-dessus. Ces profils ont l'avantage d'être simples à générer, mais leur mise en place est plus complexe car il faut faire en sorte de respecter le plus possible les grandeurs caractéristiques des profils d'usage réel. Dans notre cas, ce sont les profils issus du dimensionnement et basés sur le cycle de conduite ARTEMIS.

III.5.2.1. Grandeurs caractéristiques

Les profils de puissance ou de courant, issus de mesures ou estimés par rapport aux cycles de conduite normalisés, sont relativement complexes. Pour pouvoir proposer des profils de cyclage simplifiés, on procède en général à une décomposition en un nombre limité d'impulsions de consigne constante. Ces impulsions sont caractérisées par des grandeurs telles que la durée, l'amplitude et l'aire (énergie ou quantité de charge). Mais le fait de procéder à ces simplifications peut dénaturer le profil. Par exemple, le fait de trop simplifier ces cycles peut avoir un impact important sur les courants maximum et efficace et donc sur la température interne des dispositifs testés, entraînant bien entendu des conséquences sur le vieillissement. On peut aussi éventuellement respecter les amplitudes de courant mais pas l'énergie ou la charge et dans ce cas, c'est le critère de profondeur de décharge qui peut être faussé. Notre objectif est donc d'être particulièrement vigilant sur ce point.

Il existe dans la littérature plusieurs approches de simplification d'un signal de contraintes qui s'appuient sur les méthodes de comptage et de classification employées en statistiques, [51], [20]. Dans le cas d'un signal de contraintes appliquées aux batteries pour l'étude du vieillissement, on peut citer les travaux de thèse de *Q. Badye* [109] dans lesquels il a exploité une méthode de découpage du profil de sollicitation d'un VE (Peugeot iOn) en roulage. Selon lui et comme présenté dans la [Figure.III.16](#), le profil de sollicitation est segmenté par des petits pas de temps de cinq secondes ; à chaque segment est associé un courant moyen, une température moyenne et un état de charge moyen. Bien que la quantité de charge échangée soit conservée, cette méthode peut, de notre point de vue, être soumise à certaines critiques. En effet, le courant, à intervalles de temps réguliers, est remplacé par sa valeur moyenne ; la contrainte de la valeur

maximale du courant d'origine, n'est pas respectée. Ceci est d'autant plus vrai que la dynamique du signal d'origine est importante.

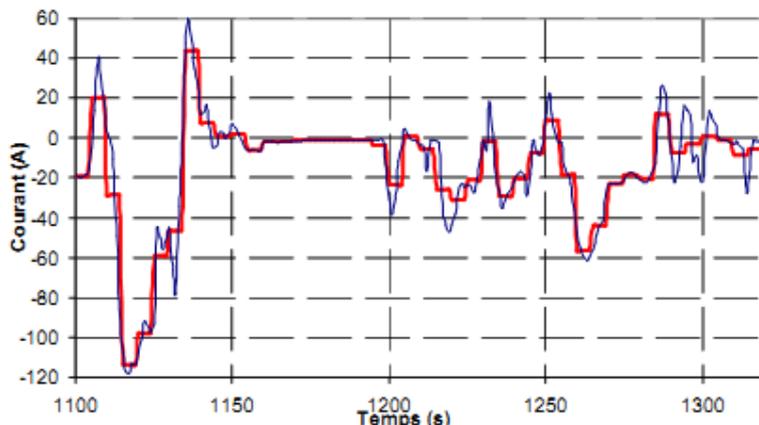


Figure.III. 16 : Exemple de sollicitations d'un VE (Peugeot iOn) en roulage et son découpage en segments de 5 secondes, [109].

III.5.2.2. Création des profils de cyclage

Pour cette étude, nous avons développé une méthode de classification des contraintes en niveaux d'intensité. Les grandeurs caractéristiques que nous conservons avec cette approche sont : l'intensité maximale de courant et la quantité de charge échangée. Cette méthode cherche également à diminuer la durée des cycles et ainsi la durée des essais de vieillissement.

Avant d'appliquer cette classification des contraintes, nous avons dissocié les étapes de cycles urbains et routiers et dans ces mêmes périodes nous décomposons les phases de décharge et de recharge de la batterie. Pour expliquer la méthode, nous utilisons le profil simplifié de la Figure.III.17-A. Les étapes de simplification sont les suivantes :

- Dans un premier temps, le profil de courant est divisé en (N) niveaux. La valeur de courant de chaque niveau (I_n) est donnée par :

$$I_n = \frac{I_{max} \cdot n}{N} \tag{III. 11}$$

Avec :

n l'indice du niveau, $n = \{1, \dots, N\}$, dans cet exemple $N=3$.

I_{max} la valeur maximale de courant de charge ou de décharge.

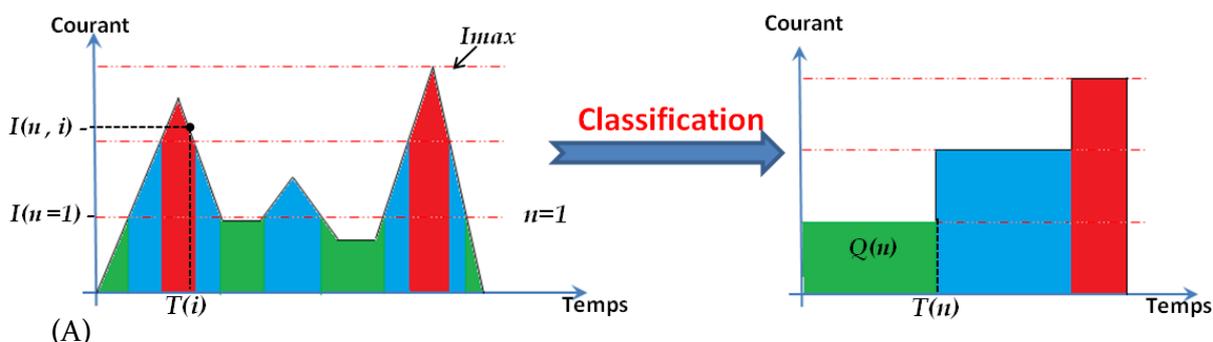


Figure.III. 17 : exemple simplifié de contraintes (puissance, énergie) appliquée à une cellule de batterie. (A) profil réel. (B) profil de cyclage après classification et simplification.

- Ensuite, l'ensemble des valeurs de courant sont regroupées dans N classes et chaque classe contient P_n individus (les individus sont les valeurs instantanées de courant).

$$\begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \dots & I_{1P_1} \\ I_{21} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & I_{ni} & I_{nP_n} \\ I_{N1} & I_{N2} & \dots & I_{NP_N} \end{bmatrix}$$

Pour qu'un individu i appartienne à la classe n , il faut que l'intensité de courant $I(n, i)$ vérifie la condition suivante :

$$I_{n-1} < I(n, i) \leq I_n \tag{III. 12}$$

- Enfin, l'ensemble des contraintes générées par les valeurs de courants $I(n, P_n)$ du niveau n sont représentées par la valeur maximale de courant I_n pendant la durée de temps $T(n)$, (cf. Figure.III.17-B). Cette dernière est calculée de manière à conserver la quantité de charge échangée $Q(n)$, avec :

$$Q(n) = \sum_{i=0}^{P_n} I(n, i) \cdot \Delta T \tag{III. 13}$$

avec : ΔT la durée de temps qui sépare deux valeurs successives de courant. On calcule donc le temps $T(n)$ d'un niveau de courant comme suit :

$$T(n) = \sum_{i=0}^{P_n} I(n, i) \cdot \frac{\Delta T}{I_n} \tag{III. 14}$$

La classification adoptée dans cette étude 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 définie. Par ailleurs et en plus de la séparation des phases de charge et de décharge, nous avons classé indépendamment (cf. Figure.III.18-B) les contraintes propres aux parties urbaine et routière (présentes dans le cycle de conduite).

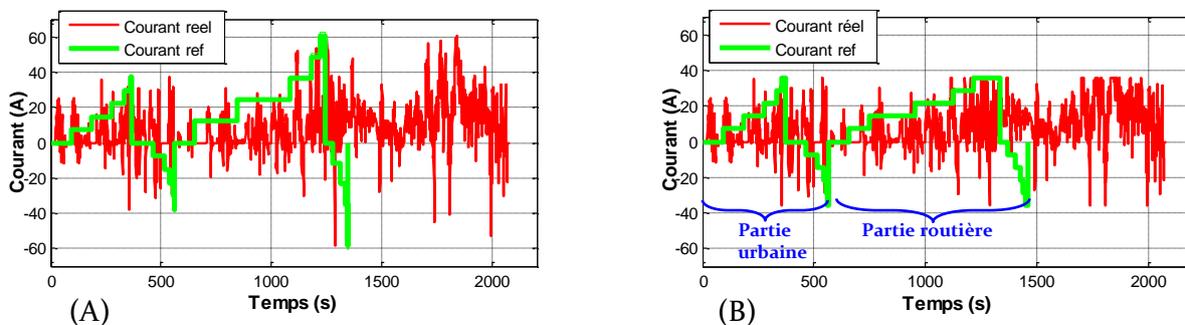


Figure.III. 18 : profil de courant de cyclage superposé avec le profil de courant réel (issu du dimensionnement). (A) courants de cyclage d'une cellule HP. (B) courants de cyclage d'une cellule HE.

Les profils de courant utilisés pour le cyclage des batteries Ko40HP et Ko40HE permettent une réduction du temps de cyclage respectivement de 35% et 34% par rapport aux temps des profils de courant réel. Le gain de temps de cyclage peut être réduit davantage en diminuant le nombre de niveau (n), mais la dynamique le profil de cyclage sera plus faible. Dans notre cas, le nombre de niveau choisi est égal à 5, soit chaque niveau représente 20% de la puissance maximale. Ce choix est un compromis entre le gain de temps de cyclage et la dynamique du cycle original que nous avons souhaité garder.

De point de vue des contraintes physiques, cette classification permet de conserver les valeurs maximales de courant consommé et récupéré (cf. Figure.III.18). Le Tableau.III.3 compare les valeurs moyennes et efficaces du courant réel et du courant de cyclage traversant une seule cellule du pack de batteries dimensionné. De ce tableau, on constate que la classification et le

passage du courant réel au courant de cyclage conserve également les valeurs moyennes (l'erreur est de l'ordre de 1%). En revanche, les valeurs efficaces du courant de cyclage sont supérieures à celles du courant réel d'environ 10%.

Les valeurs moyennes et efficaces du courant de cyclage sont les contraintes physiques appliquées aux cellules Ko40HP et Ko40HE pendant les tests de vieillissement. Du [Tableau.III.3](#) On remarque aussi que les valeurs moyennes du courant traversant la cellule énergétique sont légèrement inférieures à celles de la cellule HP. Par contre, ces valeurs efficaces sont plus élevées.

Tableau.III. 3 : comparaison des courants réel et de cyclage des cellules de batteries Ko40HP et KO40HE.

Contraintes physiques	Ko40HP		Ko40HE	
	réel	cyclage	réel	cyclage
Courant moyen (A)	7,69	7,73	7,31	7,32
Courant moyen récupéré (A)	1,28	1,29	1,19	1,24
Courant moyen consommé (A)	8.79	9,03	8,51	8,57
Courant efficace (A)	14,90	16,87	13,56	17,77
Courant efficace récupéré (A)	4,69	5,33	4,23	5,81
Courant efficace consommé (A)	14,14	16,00	12,88	16,79

Les batteries que nous souhaitons étudier ont été dimensionnées pour une autonomie de 150km. Les profils de cyclage de la [Figure.III.19](#) obtenus par la classification des contraintes sont répétés sept fois pour correspondre à la distance de 150km et pour obtenir une profondeur de décharge de 80%.

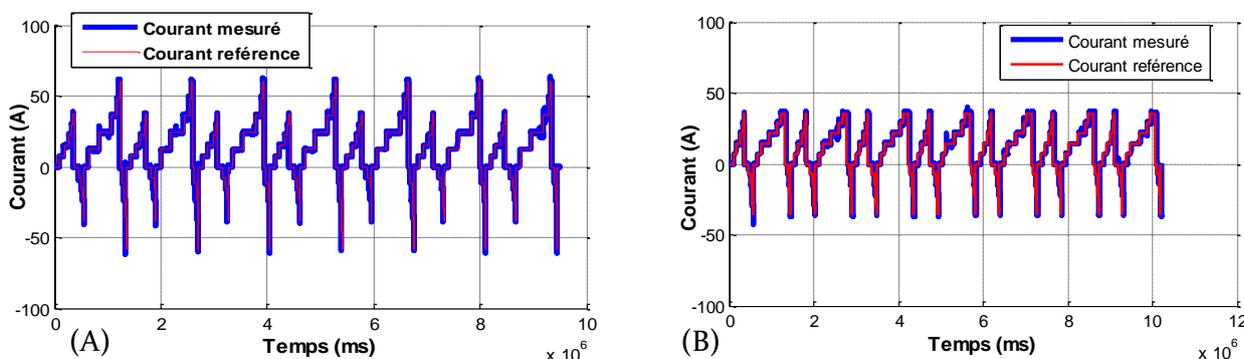


Figure.III. 19 : courant de cyclage de référence et mesuré des batteries HP (A) et HE (B)

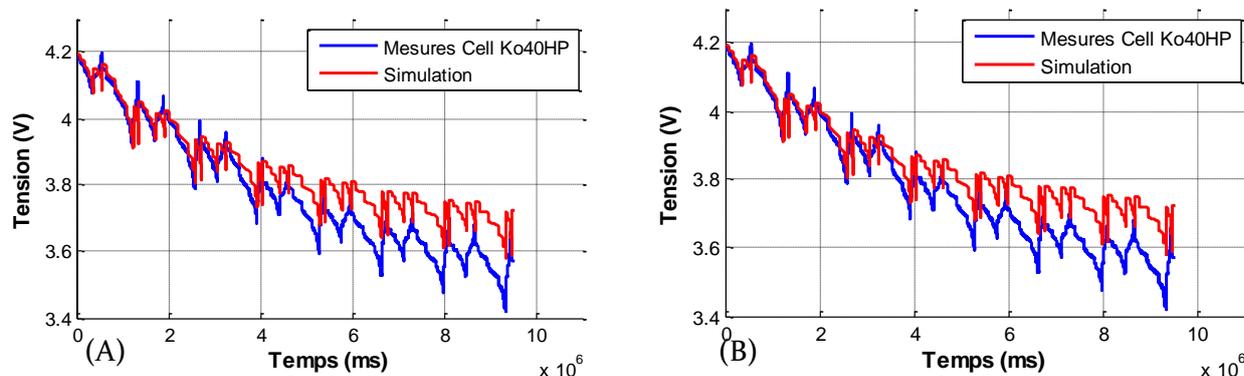


Figure.III. 20 : variation de la tension pendant le cyclage des cellules de batteries HP (A) et HE (B).
Comparaison des résultats expérimentaux avec la simulation.

Afin de valider les profils de courant de cyclage, nous exploitons le modèle générique présenté dans le paragraphe III.4.4. Comme montré par la Figure.III.20, les résultats en tension obtenus en simulation diverge par rapport à la tension mesurée. Mais ce modèle nous permet de comparer la variation du SOC dans le cas des profils de courant réel et de cyclage. A partir de la Figure.III.21 on constate que l'état de charge est identique à la fin de la mission de 150km pour les deux profils de courant. Ceci signifie que la quantité d'énergie consommée est la même pour les deux profils de courant. On vérifie bien que la méthode de classification suivie pour la création des profils de cyclage conserve la valeur de la quantité de charge échangée.

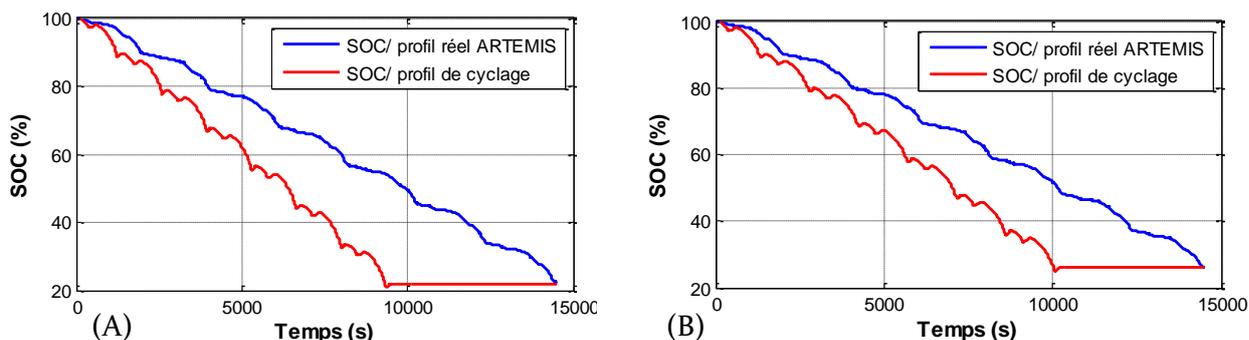


Figure.III.21 : évolution du SOC d'une cellule de batteries HP (A) et HE (B). SOC en fonction du profil réel et le profil de cyclage.

III.5.3. Profil de recharge des batteries

La phase de recharge intervient à la fin de l'étape de cyclage pour ramener l'état de charge (SOC) des batteries à 100%. Pour cette phase de recharge, nous avons repris les conditions de recharge spécifiées par le constructeur. Ce dernier indique une recharge à CC/CV (*Constant current/ Constant Voltage*) précédée d'une phase de repos. Une étape de recharge (Figure.III.22) est composée de :

- Une phase de repos de 10 minutes (imposée par le constructeur).
- Une phase de charge à courant constant (CC) avec un régime 1C (40A) jusqu'à la tension maximale d'un élément de batteries de 4.2V.
- Une phase de charge à tension constante (CV) jusqu'à une valeur de courant de 2A (correspondant à 0.05C).

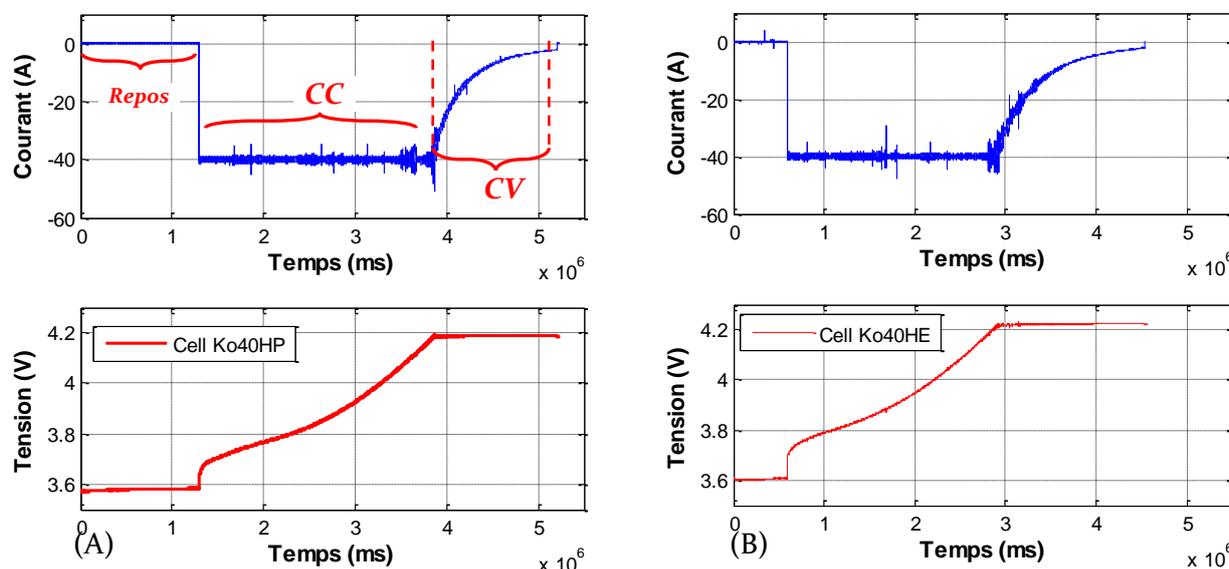


Figure.III. 22 : courant et tension des cellules de batteries HP (A) et HE (B) pendant la recharge à CC/CV.

III.5.4. Cycle de caractérisation

L'étape de caractérisation permet de connaître les performances des éléments de batteries à un moment particulier de leur vie grâce aux mesures de la résistance interne et de la capacité. Tel qu'il est spécifié par la norme CEI-62660-1/2, ces mesures exigent une recharge complète de l'élément de batterie suivie d'une décharge à courant constant jusqu'à la tension finale donnée par le fabricant. En se basant sur cette spécification, nous caractérisons les éléments de batteries HP et HE en utilisant le même profil de courant (cf. Figure.III.23-A et B). Ce profil est décomposé en :

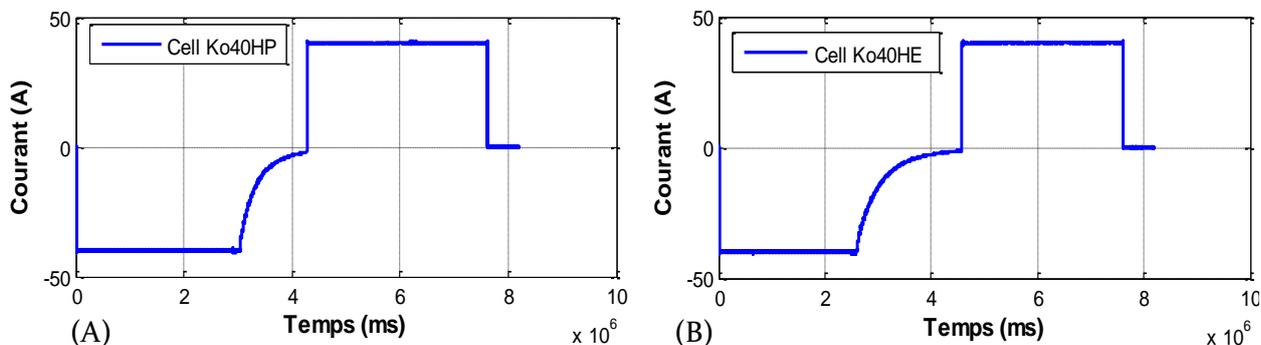


Figure.III. 23 : profils de courant de caractérisation des cellules de batterie HP (A) et HE (B)

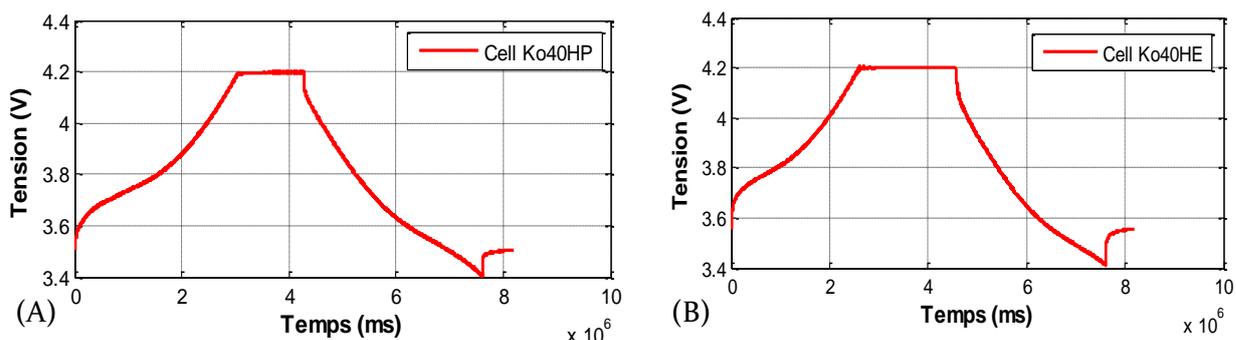


Figure.III. 24 : variation des tensions des cellules de batteries HP (A) et HE (B) pendant la caractérisation.

- Une phase de charge complète à CC/CV (détaillée dans le paragraphe III.4.3 ci-dessous) jusqu'à la tension maximale de charge de 4.2V indiquée par les datasheets du fabricant.
- 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 le contrôle du banc de test. Ce dysfonctionnement peut être provoqué par les bruits de mesure qui entraînent une chute brusque de la tension au-delà de la tension minimale de sécurité de 2.7V.

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. Pour des raisons de stabilité électrochimique, énergétique et thermique des cellules testées, le profil de caractérisation est répété **sept fois** (12 heures environ) et les mesures de la résistance interne et de la capacité sont réalisées au niveau du **cinquième** cycle de caractérisation.

III.5.4.1. Mesure de la capacité

La mesure de la capacité revient à mesurer l'énergie que l'élément de batterie peut stocker pendant une phase de recharge ou bien l'énergie qu'il peut fournir pendant une phase de

décharge. Nous avons choisi d'estimer cette dernière pour un courant de décharge de 40A. L'énergie (E_{dech}^i) restituée par l'élément de batterie à l'instant (i) de cyclage est donnée par :

$$E_{dech}^i = \int_0^{t_D} V.I. dt \quad (III. 15)$$

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 (cf. Figure.III.25). Au fur et à mesure du cyclage et donc du vieillissement, ce temps aura tendance à diminuer.

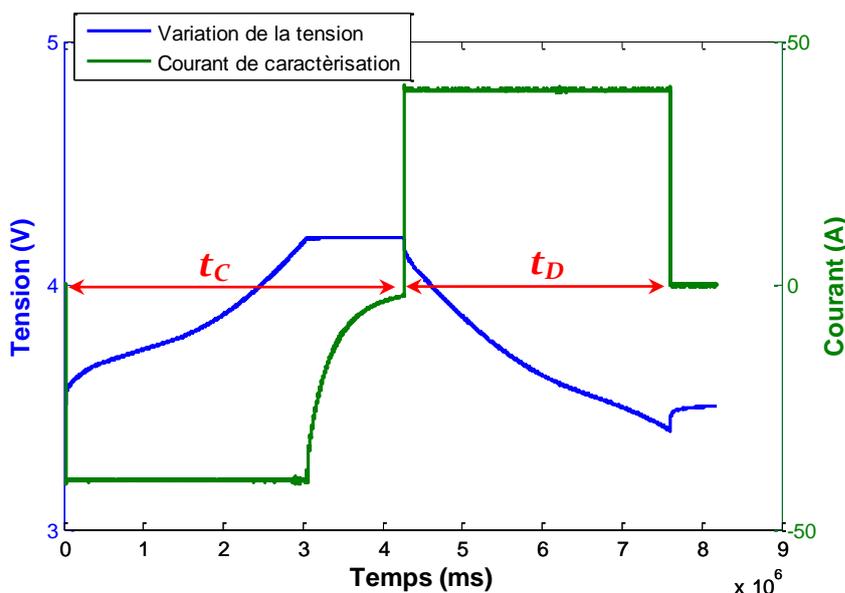


Figure.III. 25 : profil de courant et de tension d'une cellule de batterie durant le cycle charge/décharge de caractérisation. UE décharge à 1c (40A) et une recharge à CC/CV (Constant Current/ Constant Voltage) ont été utilisées.

Les pertes de capacité liées au cyclage et au vieillissement de l'élément sont estimées par rapport à l'énergie (E_{dech}^0), au démarrage de ces essais de cyclage et obtenues dans les mêmes conditions. La variation de la capacité (ΔC^i) à l'instant (i) de cyclage par rapport à l'état de la batterie au début du cyclage s'exprime par :

$$\Delta C^i(\%) = \left(1 - \frac{E_{dech}^i}{E_{dech}^0}\right).100 \quad (III. 16)$$

III.5.4.2. Mesures de la résistance interne

Pour l'estimation de la résistance interne, nous exploitons les phases de recharge et décharge du cycle de caractérisation. A l'instant de cyclage (i), l'énergie emmagasinée dans la batterie à la fin de la recharge est notée E_{bat}^i . Si on fait l'hypothèse que la totalité des pertes lors de la charge et la décharge est liée à la résistance interne et que cette résistance possède la même valeur pour la charge et la décharge, on peut écrire que l'énergie E_{bat}^i est donnée par l'expression ci-dessous :

$$\begin{cases} E_{bat}^i = E_{dech}^i + R^i \int_0^{t_D} I^2. dt \\ E_{bat}^i = E_{cha}^i - R^i \int_0^{t_c} I^2. dt \end{cases} \quad (III. 17)$$

Où, E_{cha}^i est l'énergie stockée pendant la phase de charge sur la durée de temps de t_c (cf. Figure.III.25). Elle s'exprime par :

$$E_{cha}^i = \int_0^{t_c} V \cdot I \cdot dt \quad (III. 18)$$

La résistance interne (R^i) d'un élément de batterie à l'instant (i) de cyclage est calculée par :

$$R^i = \frac{E_{cha}^i - E_{dech}^i}{\int_0^{t_D} I^2 \cdot dt + \int_0^{t_c} I^2 \cdot dt} \quad (III. 19)$$

De la même manière que la capacité, la variation de la résistance interne (ΔR^i) est donnée, en fonction de la résistance interne du début de cyclage (R^0), par :

$$\Delta R^i(\%) = \left(1 - \frac{R^i}{R^0}\right) \cdot 100 \quad (III. 20)$$

III.5.5. Récapitulatif du protocole de test

Nous avons détaillé jusqu'ici les phases d'essais pour l'estimation de la durée de vie en cyclage des batteries. Les séquences d'essais sont illustrées par l'organigramme de la [Figure.III.26](#) et elles sont organisées comme suit :

- Décharge des cellules selon le profil de cyclage dynamique jusqu'à 20% de SOC, suivie par une recharge complète en CC/CV. Ces deux séquences de charge/décharge sont répétées 50 fois.
- Charge/décharge selon le profil de caractérisation et mesure de la capacité et de la résistance interne.
- Vérification de l'évolution des performances des cellules de batteries. Si l'évolution de la capacité mesurée ne dépasse pas les 20% des mesures initiales ou la résistance interne n'atteint pas 200% de sa valeur initiale.

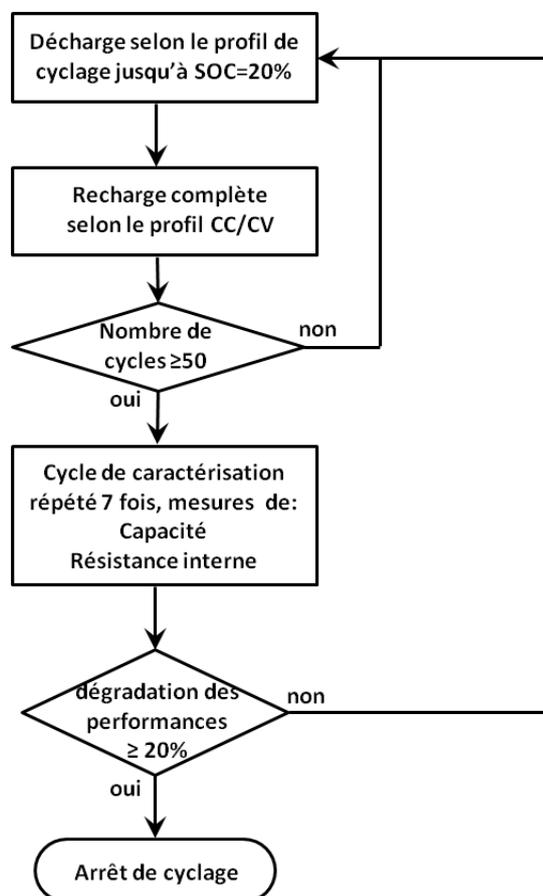


Figure.III. 26 : organigramme des séquences d'essais de vieillissement en cyclage.

III.6. Quantification du vieillissement des cellules de batteries Li-ion testées

Cette section est dédiée à la présentation et la comparaison des résultats expérimentaux de vieillissement des cellules Ko40HP et Ko40HE testées. Les résultats indiquant l'évolution du vieillissement de ces cellules et qui permettent de comparer leurs durées de vie sont représentés par les variations de la capacité et la résistance interne. Avant d'aborder ces résultats, on s'intéresse aux informations données par le fabricant et au comportement thermique de ces cellules pendant le cyclage.

III.6.1. Spécifications fournies par le fabricant

III.6.1.1. Pertes de capacité en cyclage

Le fabricant *Kokam* des cellules Ko40HE et Ko40HP testées donne un vieillissement en cyclage identique pour les deux technologies [85]. Il indique que les mesures de la capacité sont données sous les mêmes conditions de cyclage : température ambiante autour de 23°C, charge CC-CV à 1C jusqu'à 4,2V et décharge à 1C jusqu'à 3V. Selon les mesures obtenues et présentées dans la Figure.III.27, les cellules atteignent une perte de 20% de leur capacité au bout de 1600 cycles. Au début du cyclage, la perte de capacité est relativement faible, elle est de l'ordre de 5% pour les premiers 800 cycles. Par la suite, la dégradation s'accélère et on observe une diminution pratiquement linéaire de la capacité en fonction du nombre de cycles effectués.

Le vieillissement similaire des deux cellules de batteries HP et HE peut être associé au fait que la composition chimique de ces deux technologies est la même. La différence perceptible entre les deux technologies (HE et HP) réside dans le renforcement des collecteurs de la technologie HP afin qu'elle supporte de fortes puissances. Ce renforcement représente une masse supplémentaire de la cellule Haute puissance et dégrade ainsi légèrement l'énergie spécifique de cette technologie.

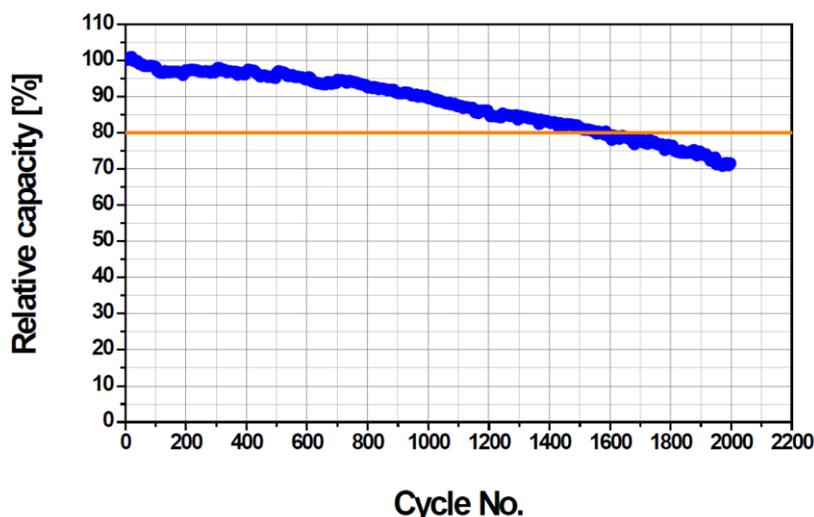


Figure.III. 27 : variation de la capacité en fonction du nombre de cycles d'une cellule de batterie Li-ion Kokam, [85]

III.6.1.2. Caractéristiques thermiques

La Figure.III.28 présente le comportement thermique des trois technologies *Kokam* (Haute Energie, Haute Puissance et Ultra Haute Puissance). Cette figure montre que pour des courants inférieurs à 1C, la différence d'échauffement entre les trois technologies est très faible. Cette

différence thermique entre les technologies a tendance à s'accroître en fonction du régime de courant appliqué. On remarque aussi que la pente qui lie l'évolution de la température de la technologie haute énergie au régime appliqué est très importante par rapport aux deux autres technologies (haute puissance et très haute puissance).

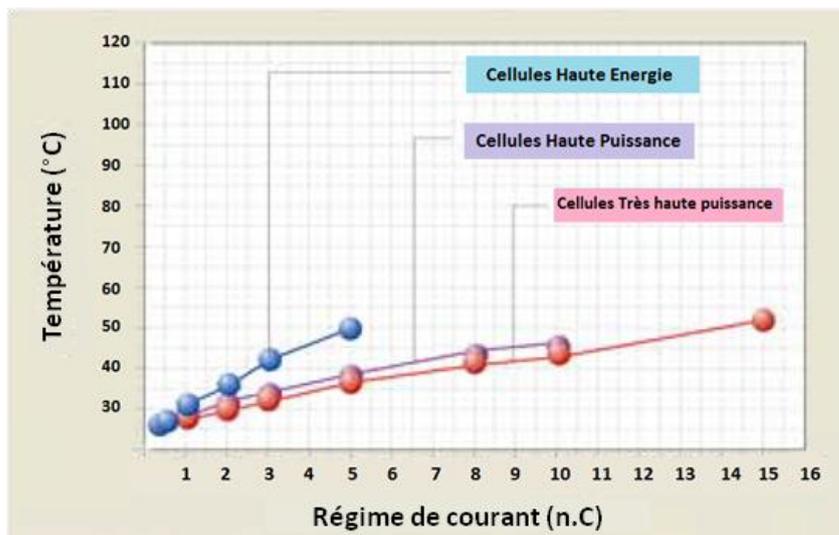


Figure.III. 28 : température des technologies de batteries en fonction des régimes de courants, [85]

La température de la technologie haute puissance pour un régime de 5C est plus importante que la température de la technologie haute énergie à 1C. En revanche à régime de courant équivalent (5C par exemple), l'échauffement de la technologie énergétique est plus important par rapport aux technologies de type puissance. Ceci signifie que du point de vue fabrication des batteries, des efforts sont faits pour limiter les pertes quand celles-ci sont destinées aux applications à forte demande de puissance.

III.6.2. Résultats expérimentaux des cellules de batteries Li-ion testées

III.6.2.1. Comportement thermique en cyclage

Dans cette partie, on présente la réponse thermique des deux cellules Ko40HP et Ko40HE durant le cyclage. Les cellules ont été placées dans une enceinte climatique à 23°C pour respecter les conditions de température spécifiées par le constructeur. Les mesures de températures sont données par trois capteurs placés sur la surface de la cellule (cf. Figure.III.2). Rappelons ici que pendant la phase de cyclage le courant maximal de la cellule énergétique est de 38A en charge et en décharge, il est légèrement inférieur au régime 1C. Pour la cellule HP, le courant maximal en phases de charge et décharge est égal à 62 et 63.8A, respectivement. Ce qui représente un régime de courant d'environ 1,5C.

A partir des mesures de température on peut distinguer les phases de recharge et de cyclage (cf. Figure.III.29). Les données de température des deux cellules ont été mesurées au même instant. On constate ainsi que, quand l'une (Ko40HP) est dans la phase de recharge l'autre (Ko40HE) est dans la phase de cyclage. Ceci est valable pour tous les résultats de température que nous présentons après et il est dû au fait que nous avons choisi de décaler les phases de fonctionnement des deux cellules pour réduire les pertes au niveau du banc de test.

La température de la cellule Ko40HP est plus élevée dans la phase de recharge. Dans cette phase, et plus spécifiquement pendant la recharge à courant constant (CC), la température

augmente de 23.5°C à 26.1°C. Pendant la phase de cyclage la température est plus faible et évolue entre 23.7°C et 24.6°C. Concernant l'écart de mesure, on constate que les valeurs données par les trois capteurs sont pratiquement égales.

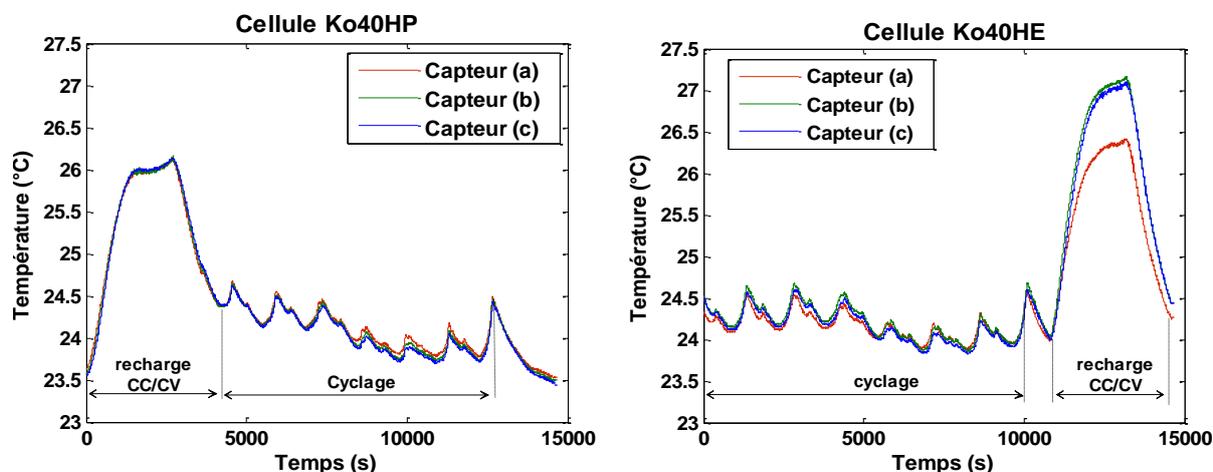


Figure.III. 29 : température des cellules Ko40HP et Ko40HE mesurées par les capteurs a, b et c pendant le cyclage

La température de la cellule Ko40HE évolue de la même manière que la cellule Ko40HP et on peut également identifier les deux phases de cyclage et de recharge (Figure.III.29). La température de la cellule Ko40HE est aussi plus faible dans la phase de cyclage (entre 24°C et 24.7°C) comparée à la phase de recharge. A la fin de la phase de recharge à courant constant (CC), le capteur (c) placé sur la face inférieure de la cellule énergétique, enregistre une température maximale de 27.1°C. En effet, contrairement à la cellule HP, l'écart de mesure des trois capteurs est plus important. Les températures enregistrées par les capteurs (b et c) sont plus élevées que celles données par le capteur (a) placé sur la face supérieure de la cellule (cf. Figure.III.2) et plus proche de la borne de connexion de l'électrode positive.

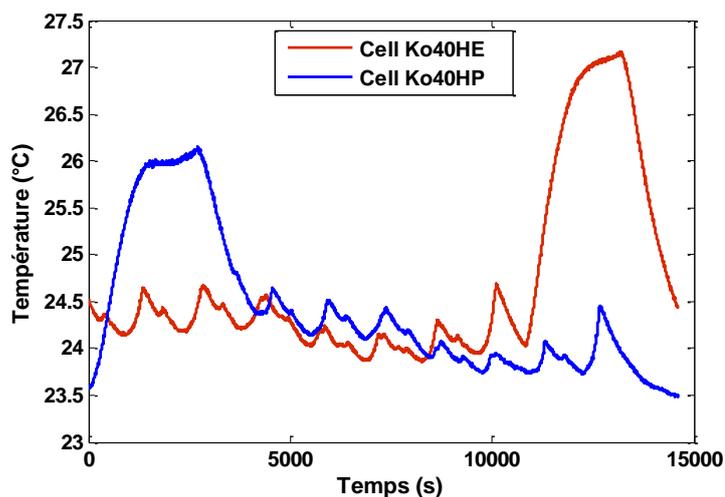


Figure.III. 30 : comparaison de l'évolution de la température des cellules Ko40HP et Ko40HE pendant le cyclage.

La Figure.III.30 compare les températures des deux cellules Ko40HP et Ko40HE. On peut constater que pour les deux types de batteries, l'échauffement est plus important dans la phase de recharge comparé à la phase de cyclage. Cependant, même si le courant efficace des deux cellules en recharge à 1C est presque identique, l'échauffement généré par ce courant est plus important dans le cas de la cellule Ko40HE (27.1°C contre 26.1°C pour la cellule Ko40HP). De plus, la

température moyenne de cellule énergétique (25.9°C), sur les deux phases cumulées (cyclage et recharge), est supérieur à la moyenne de température la cellule HP (25.3°C). Ceci est en adéquation avec la différence d'échauffement des deux technologies, pour le même courant 1C, spécifiée par le constructeur dans la Figure.III.28.

III.6.2.2. Comportement thermique pendant la caractérisation

Pendant la caractérisation, les deux cellules sous test sont soumises à des conditions de courant et de température identiques. Elles sont déchargées et rechargées par un courant maximal de 40A (1C) et la température extérieure est maintenue à 23°C.

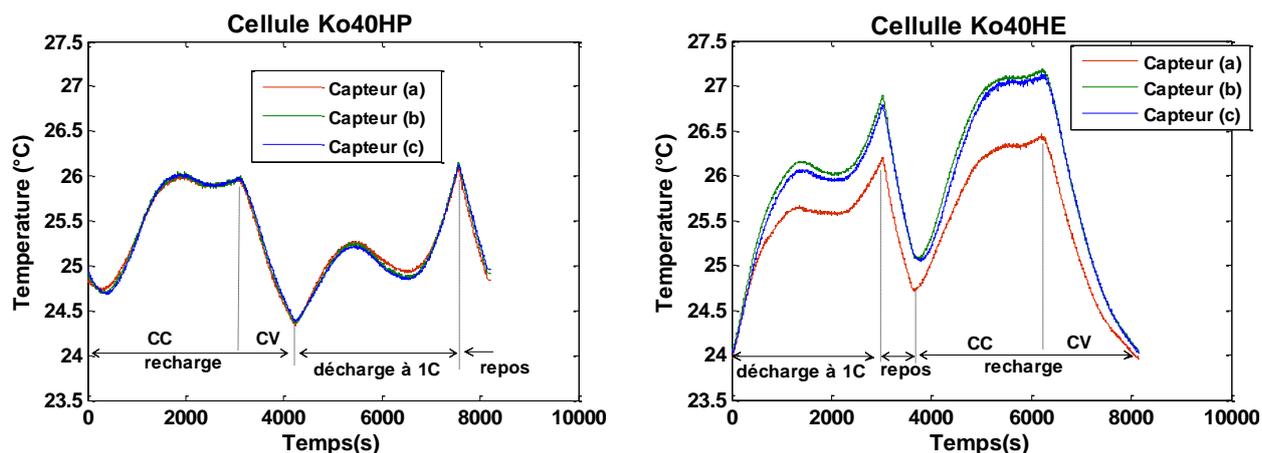


Figure.III. 31 : température des cellules Ko40HP et Ko40HE mesurées par les capteurs a, b et c pendant la caractérisation

L'échauffement généré par le courant de recharge est identique à celui de la recharge pendant le cyclage évoqué précédemment. En revanche, pendant la décharge à courant constant (40A) les deux cellules dégagent davantage de chaleur comparativement au cyclage (cf. Figure.III.31). La température de la cellule HE pendant la décharge varie entre 24°C et 26.9°C et celle la cellule HP est plus faible et atteint 26.1°C a la fin de la décharge.

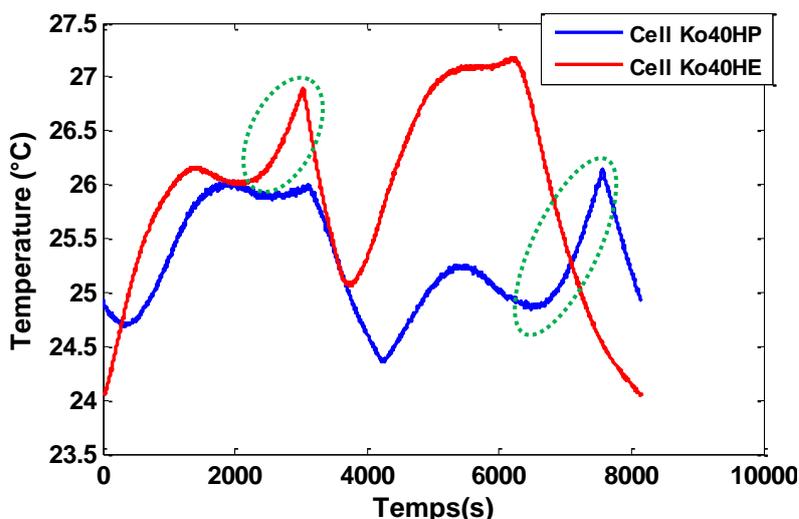


Figure.III. 32 : comparaison de l'évolution de la température des cellules Ko40HP et Ko40HE pendant la caractérisation.

Les résultats de la Figure.III.31 mettent en évidence, dans le cas de la cellule énergétique, la différence de température liée à l'emplacement des capteurs. Par contre, l'emplacement des

capteurs sur la surface de la cellule Ko40HP est de moindre importance car les valeurs indiquées par les trois capteurs sont identiques.

Pendant la caractérisation, la température de la cellule Ko40HE est souvent supérieure à la température des cellules ko40HE (cf. [Figure.III.32](#)). Sous l'effet de courant, la cellule énergétique dégage plus de chaleur mais son refroidissement est plus rapide. Ceci représente une large plage de variation de la température entre les phases d'utilisation (charge/décharge) et les phases de repos où la température diminue jusqu'à 24°C.

Par ailleurs, on peut souligner l'effet négatif de la décharge à courant constant de 40A sur les deux technologies de batteries. En effet, à la fin de la phase de décharge et se rapprochant des faibles tensions (zones encadrées dans la [Figure.III.32](#)) la température des cellules augmente brusquement. Ceci peut accélérer la dégradation des performances de la cellule et représente des risques du point de vue sécurité d'utilisation.

III.6.2.3. Estimation de vieillissement

Comme il a été précisé dans le paragraphe [III.5.4](#), pour l'estimation du vieillissement nous avons évalué au cours du cyclage la variation de la capacité et de la résistance interne des cellules de batteries testées. Rappelons que le but de cette étude est de comparer l'évolution vieillissement de deux technologies de batteries. **Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus au cours de 800 cycles de charge/décharge et ils ne représentent qu'une dégradation partielle des performances des cellules de batteries testées.**

a. Evolution de la capacité

L'effet de cyclage sur la durée de vie d'une batterie se traduit par la perte de capacité de stockage d'énergie. La [Figure.III.33](#) représente le rapport (en %) entre la capacité disponible à l'instant de mesure et la capacité initiale des cellules Ko40HP et Ko40HE. Ces résultats sont obtenus par la démarche présentée dans la section [III.5.4.1](#).

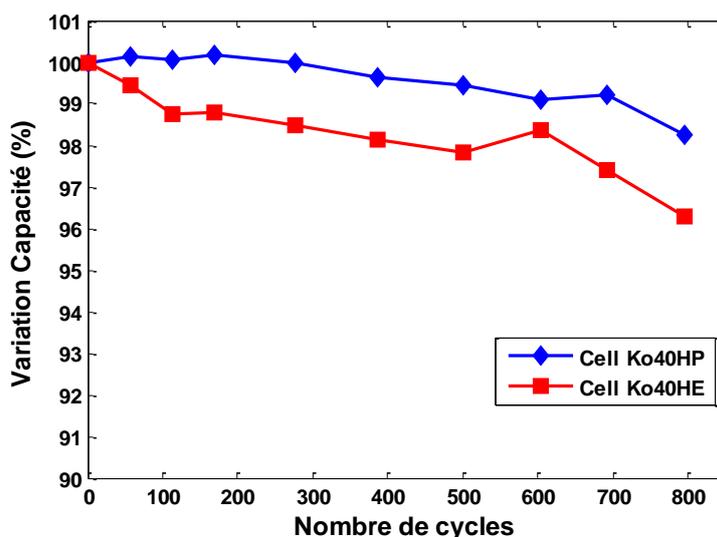


Figure.III. 33 : variation de la capacité en fonction du nombre de cycles

Après 800 cycles de charge/décharge, la capacité des cellules s'est dégradée. Cette dégradation est très faible et on observe que la capacité de la cellule HP est en augmentation dans les 200 cycles du début cyclage et diminue presque linéairement jusqu'à 1,7% de pertes au bout des 800 cycles. Cependant, la capacité cellule HE enregistre une perte brusque d'environ 1,8%

après seulement 100 cycles. Au delà de 100cycles, la perte de capacité de la cellule HE suit la même pente de dégradation que la cellule HP et atteint une dégradation d'environ 3.7% au bout des 800 cycles.

Globalement, ces mesures de capacité montrent que les pertes sont plus importantes dans le cas de la cellule Ko40HE (3.7% contre 1.7% pour la cellule Ko40HP). Mais, l'évolution de dégradation des deux technologies est pratiquement identique puisque la courbe de perte de capacité diminue de la même pente.

b. Evolution de la résistance interne

La résistance interne est un autre paramètre qui évolue au cours de l'utilisation de la batterie. La Figure.III.34 représente les mesures obtenues selon la démarche détaillée précédemment (paragraphe III.5.4.2). En premier lieu, on constate que la résistance interne de la cellule HE est plus importante. Après une phase transitoire de (200 cycles) la résistance des deux cellules se stabilise et la variation de la résistance est très faible.

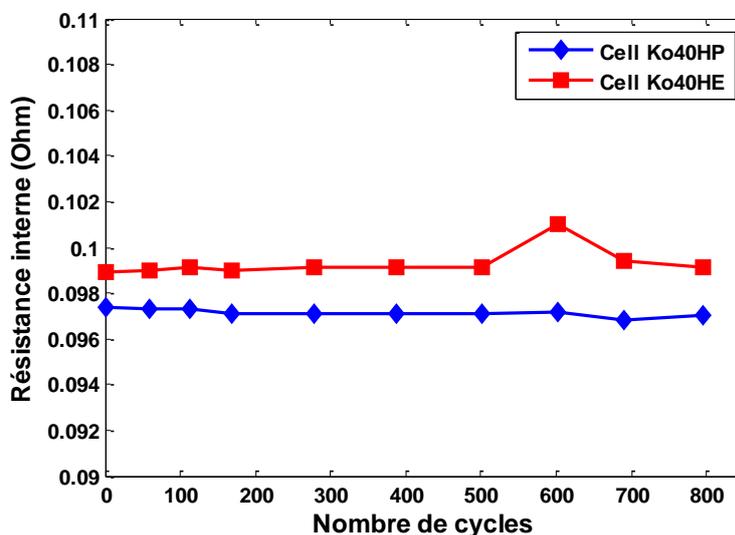


Figure.III. 34 : évolution de la résistance interne en fonction de du nombre de cycles

Les mesures de la résistance interne après 800 cycles ne permettent pas de se prononcer à propos du vieillissement d'une cellule par rapport à l'autre. Par ailleurs, les résultats de pertes de la capacité peuvent signifier que le vieillissement de la cellule HE est en phases plus avancée comparée à la cellule HP. Mais ceci n'est qu'un résultat initial et ne permet pas de confirmer l'usure d'une technologie par rapport à l'autre.

III.7. Conclusion

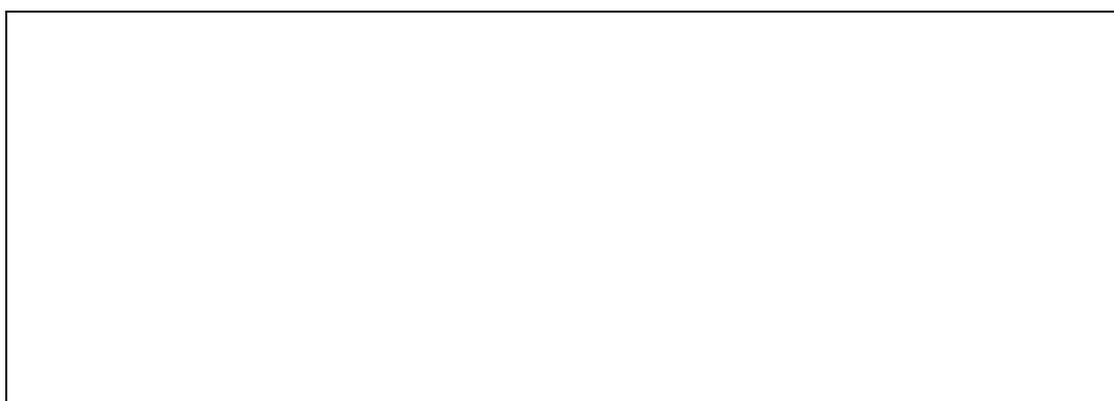
Le banc de test développé permet de reproduire des conditions d'utilisation des batteries proche du domaine de la traction électrique. Avec une puissance d'alimentation de 10kW on a pu reconstituer, à échelle réduite l'alimentation, par des batteries, d'un véhicule électrique urbain. L'utilisation des modules NI-cRio9024 nous a permis de contrôler ce banc avec une fréquence de 10kHz. Ce contrôle développé sous LabVIEW assure la gestion des transferts énergétique, entre cellules de batteries testées et la baie de puissance, et surveille l'échauffement et les tensions des cellules. Grâce à ce contrôle le banc est capable de réaliser un cyclage en continu.

La modélisation des batteries Li-ion a été succinctement abordée dans ce chapitre. Nous avons présenté des exemples de modèles disponibles dans la littérature, et on a identifié les paramètres du modèle générique d'une cellule de batterie de type haute densité de puissance.

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à l'aspect normatif des tests de vieillissement de batteries Li-ion. Nous avons présenté le protocole de test ainsi que les profils de courant de cyclage de la norme CEI. Par la suite, nous avons développé une méthode création de profil de cyclage basé sur la classification des contraintes. Les profils de cyclage obtenus permettent un gain de temps de cyclage d'environ 35%.

La dernière partie de ce chapitre à été consacrée à la présentation des résultats expérimentaux. Ces résultats concernent d'une part le comportement thermique des cellules testées durant le cyclage. La comparaison a montré que l'échauffement provoqué par les courants de charge et de décharge est plus élevée dans le cas de la cellule énergétique (HE). D'autre part, il s'agit de l'impact du cyclage sur vieillissement des cellules de batteries. L'évaluation de cet impact est donnée par l'estimation de perte de capacité et la variation de la résistance interne des cellules. Après 800 cycles de charge/décharge, nous avons obtenu une perte de capacité de 1.7% pour la cellule HP et une perte de 3.7% pour la cellule batterie HE.

Conclusion générale et perspectives



Le travail effectué dans cette thèse concerne l'association de sources d'énergie électrique de natures différentes pour l'alimentation de véhicules électriques. Ce principe, que nous nommons hybridation des sources d'énergie, a été l'objet d'une étude de dimensionnement poursuivie par des essais expérimentaux, dont la structure globale est donnée par la Figure.C.G. La présentation du contexte et des problématiques liées à l'électrification des chaînes de traction nous a permis de redéfinir le cahier des charges et les objectifs ciblés par la combinaison des batteries Li-ion et des supercondensateurs.

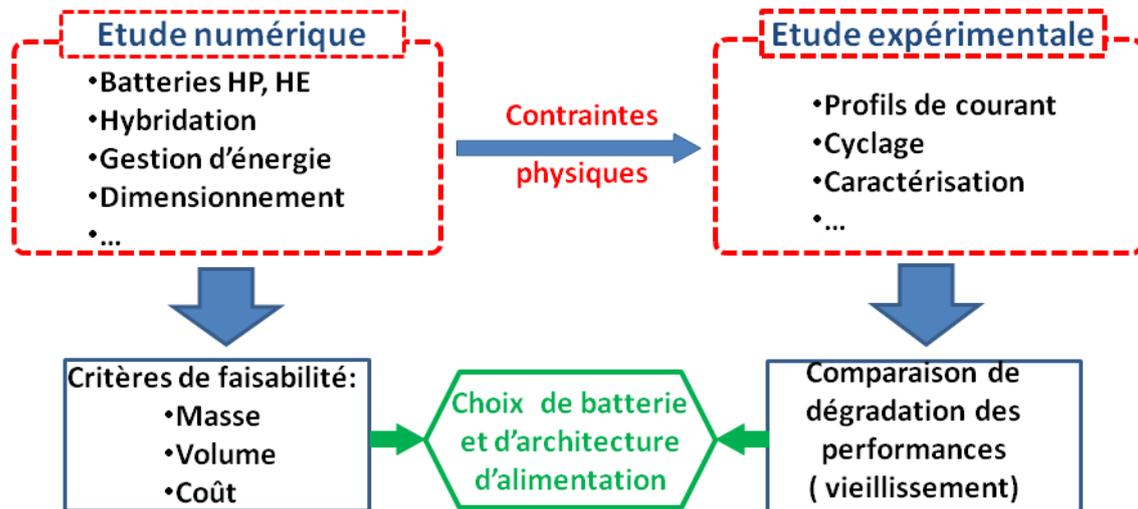


Figure.C.G : structure globale du travail réalisé pour l'étude de l'intérêt de l'hybridation dans le cas d'un véhicule électrique urbain.

L'approche de dimensionnement proposée est basée principalement sur l'exploitation des données fournies par les constructeurs. En effet, les expressions élaborées pour le calcul des éléments d'un pack de batteries dépendent de la densité d'énergie, des régimes de charge/décharge, de la tension et de la résistance interne d'une cellule de batterie.

Nous avons entre autres démontré, par les résultats de dimensionnement obtenus dans le cas d'une source unique, que les batteries de type haute densité d'énergie ne sont pas utilisables pour ce type d'application ; ceci est d'autant plus marqué lorsque l'autonomie demandée est faible. Seules les batteries dites haute puissance sont utilisables dans ce cas. . Ces résultats peuvent servir comme base de choix ou de comparaison de technologie de batteries pour répondre à un cahier de charges donné.

Dans le cas des Sources d'Énergie Hybrides (SEHs), la méthode de gestion d'énergie dite « limitation de puissance » que nous avons utilisé, a permis d'optimiser le dimensionnement de celles-ci. Grâce à la gestion en temps réel de l'état de charge des supercondensateurs, le volume de ces derniers a pu être réduit. De manière générale et pour des autonomies inférieures à 300km, l'hybridation batteries/supercondensateurs permet d'améliorer les caractéristiques en masse, volume et coût des systèmes de stockage d'énergie. Cet intérêt est nettement démontré dans le cas des batteries HE, où les masses, volumes et coûts peuvent être réduits jusqu'à 50% par rapport à la configuration des batteries seules.

Cette étude a aussi révélé que certains paramètres du cahier des charges peuvent influencer le dimensionnement des SEHs. En effet, nous avons constaté que le bon choix de la tension d'alimentation optimise leurs performances. Par ailleurs, l'utilisation de batteries Li-ion Ultra Haute Puissance pour l'hybridation des batteries Li-ion est probablement un aspect nouveau, et il nous a offert des résultats encourageants. Par rapport aux supercondensateurs, la combinaison

batterie HE/ batterie UHP peut réduire jusqu'à 20% la masse, le volume et le coût de la SEH. Hormis le fait que des informations sur la durée de vie de ces batteries Ultra Haute Puissance (UHP) sont peu évoquées dans la littérature, les performances en termes de masse, volume et coût sont nettement supérieures aux performances des supercondensateurs. Cette solution est une voie à explorer à l'avenir.

Pour les essais expérimentaux, un banc de test a été mis au point au laboratoire ESTACA-Mécatronique. Ce banc fonctionne de manière continue, car il a été équipé d'un système qui assure le contrôle des flux énergétiques et qui permet également la surveillance de l'échauffement et de la surtension des composants. Ces essais avaient pour objectif d'étudier et de comparer la dégradation en cyclage des performances des batteries dans deux configurations distinctes : l'une est une cellule de batterie de type haute puissance alimentant « seule » le VE et l'autre, une cellule de type énergétique associée (hybridation) avec des supercondensateurs pour l'alimentation du VE. Cependant, nous n'avons constaté que les standards de test de vieillissement des batteries disponibles dans la littérature, à l'image de la norme CEI-62660 présentée dans ce manuscrit, n'offrent pas la possibilité d'étudier ces deux configurations. De ce fait, on a utilisé un protocole de tests propre à cette étude dans lequel nous avons exploité une méthode de classification des contraintes pour créer les profils de cyclage. Cette méthode permet le passage des profils de courants réels complexes à des profils plus simples à contrôler et réduit le temps de cyclage.

Les résultats des essais ont permis de mettre en évidence la différence de comportement thermique entre les batteries de type haute puissance et de type énergétique. En moyenne, la température, pendant le cyclage et la caractérisation, de la cellule énergétique testée est plus élevée d'environ 1°C. Par ailleurs, après 800 cycles de charge/décharge effectués par les deux cellules HP et HE, les mesures de la capacité et de la résistance interne ont montré une très faible dégradation de leurs performances. A 800 cycles équivalents à 120.000km parcourus par le véhicule électrique, les pertes de capacité mesurées ne dépassent pas 2% pour la cellule de type haute puissance et 4% pour la cellule énergétique.

En conclusion, si l'impact du cyclage sur le vieillissement des deux technologies de batteries reste similaire jusqu'à la fin de leurs durées de vie respectives, l'intérêt de l'hybridation des batteries avec les supercondensateurs est perceptible au niveau des critères de faisabilité. En effet, l'étude de dimensionnement a montré qu'on peut réduire la taille globale (masse, volume) de la source d'énergie. En revanche, la méthode de gestion d'énergie ne réduit pas les contraintes appliquées aux batteries et donc leur impact sur le vieillissement. Cela étant, nous avons choisi la distance 150km pour être plus objectif dans la comparaison des batteries HP et HE. En effet, au point de 150km, les masses, volumes et coûts des sources d'énergie alimentant le VE sont quasi-identiques pour les deux technologies de batteries. De plus, les contraintes physiques appliquées aux deux cellules de batteries sont presque égales quelle qu'elle soit l'architecture d'alimentation (hybride ou mono-source). En revanche, l'intérêt des batteries de type haute densité d'énergie et surtout l'intérêt de l'aspect hybridation de ces dernières avec une source secondaire de puissance est plus important à partir de 300km d'autonomie.

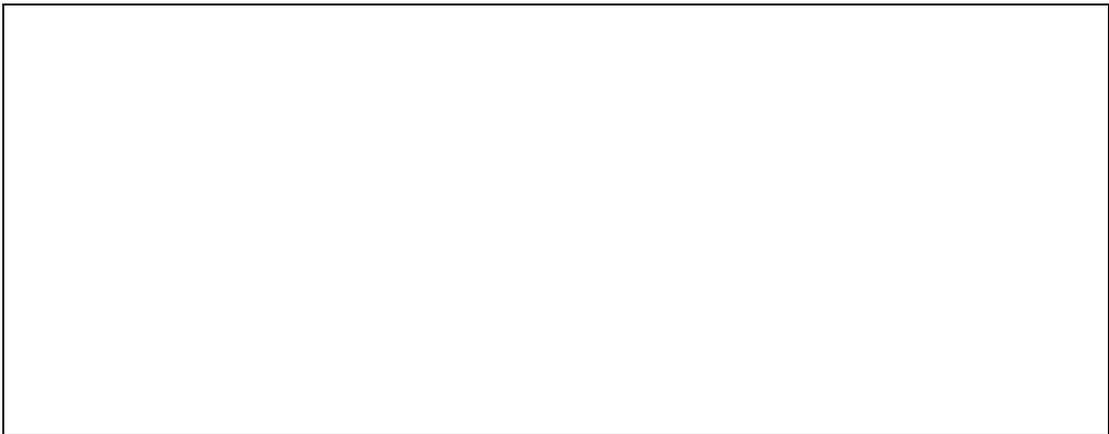
A l'issue de ce travail, de nombreuses perspectives sont envisageables et peuvent s'orienter selon deux axes principaux. Le premier concerne l'aspect expérimental avec tout d'abord l'amélioration de la méthode de création des profils de cyclage, notamment en intégrant les notions d'accélération, décélération du VE et les associer aux phases de charge décharge de la batterie. Il y a également l'élargissement du protocole de test à d'autres paramètres tels que la

température pour connaître aux mieux les interactions entre ces paramètres et le vieillissement des batteries.

Le second axe concerne le dimensionnement et les méthodes de gestion d'énergie qui peuvent être liées à une meilleure connaissance des performances des batteries. Il dépend donc fortement du premier axe décrit ci-dessus. En effet, la prise en compte des critères de durée de vie dans la gestion de la distribution de puissance entre les sources d'énergie principale et secondaire peut améliorer la durée de vie et la fiabilité des SEHs.

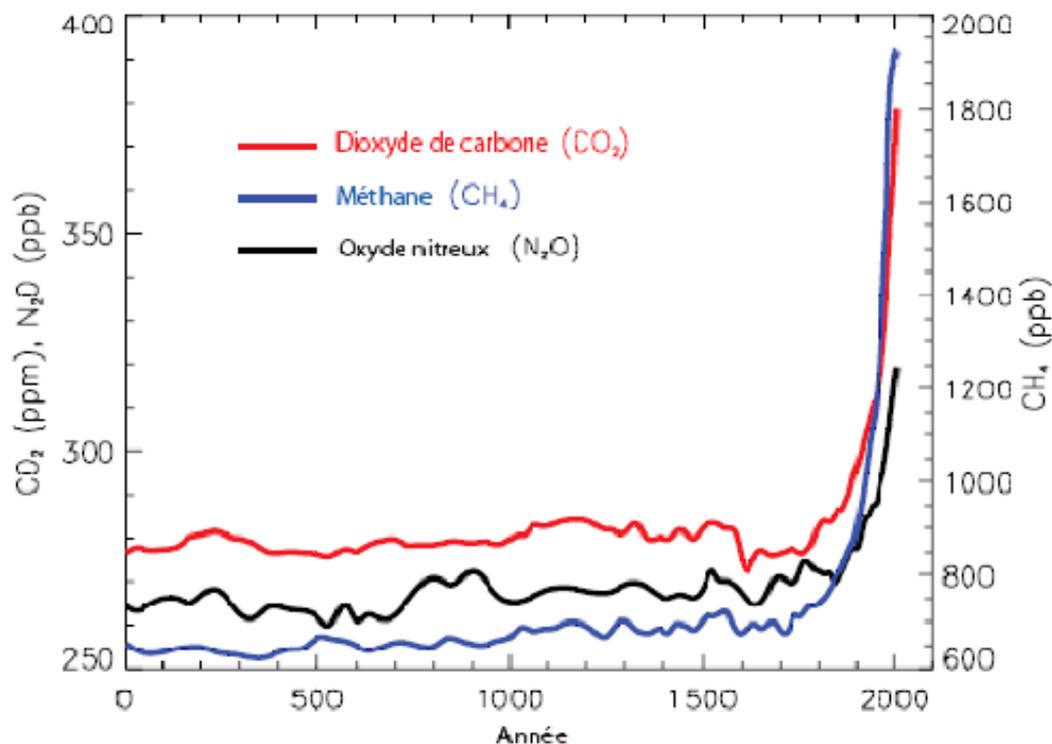
Enfin, il a été décidé au début de ce travail de limiter le périmètre de l'étude à un nombre limité de types de batteries ainsi qu'à un cahier des charges bien défini pour simplifier cette étude. Maintenant que ce travail a permis de dégrossir l'étude, nous pouvons envisager d'autres cas. C'est d'ailleurs ce qui a commencé à être fait en étudiant l'apport des batteries UHP comme sources de puissance. Mais cela peut être aussi envisagé pour les batteries du futur pour lesquels le critère de progression principal est l'amélioration de la densité d'énergie, éventuellement au détriment de la densité de puissance.

Annexes



Annexe.A.1 : données spécifiques aux GAS

Source GIEC, rapport 2007.



Les principaux gaz à effet de serre

Gaz	Formule	Durée de vie	Formation du GES	PRG à 100 ans
Dioxyde de carbone	CO ₂	50 - 200 ans	-Combustion -Décarbonatation -Fermentation	1
Méthane	CH ₄	12 ans	(déchets, entérique) -Fuites (gaz, charbon)	23
Protoxyde d'azote	N ₂ O	114 ans	-Sols agricoles -Réactions chimiques	296
Gaz fluorés	HFC	HFC-23 : 260 ans	-Climatisation -Solvants	Moyenne 1 930
	PFC	CF ₄ : 50 000 ans	-Procédés industriels (en part. métallurgie)	Moyenne 7 200
	SF ₆	3 200 ans	-Procédés particuliers -Équipements électriques	22 200

Effet de serre additionnel

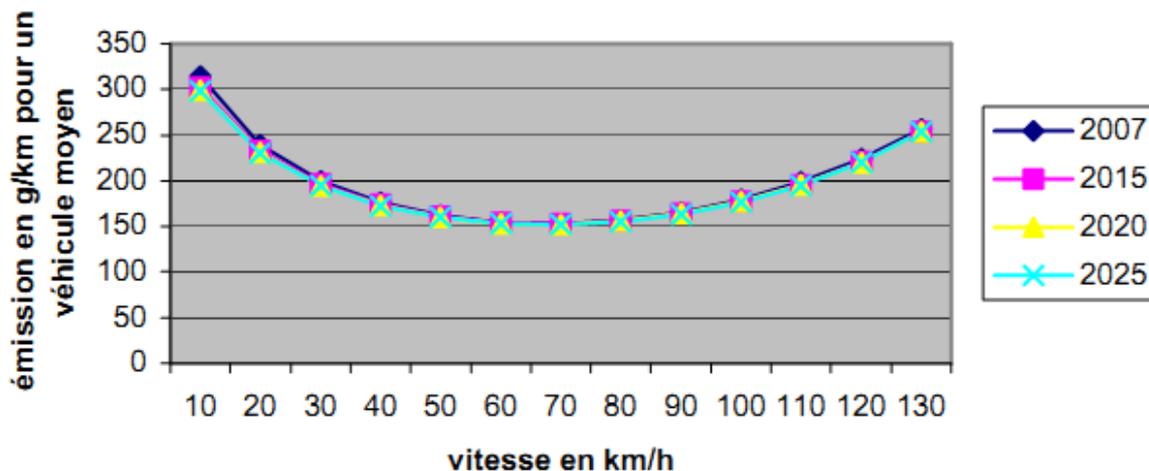
Gaz	Pourcentage
CO ₂	55%
CH ₄	18%
Ozone	8%
Gaz halogénés	13%
N ₂ O	6%

-Quatre gaz à effet de serre indirect :
SO₂, NO_x, COVNM, CO, +CFC (protocole de Montréal)

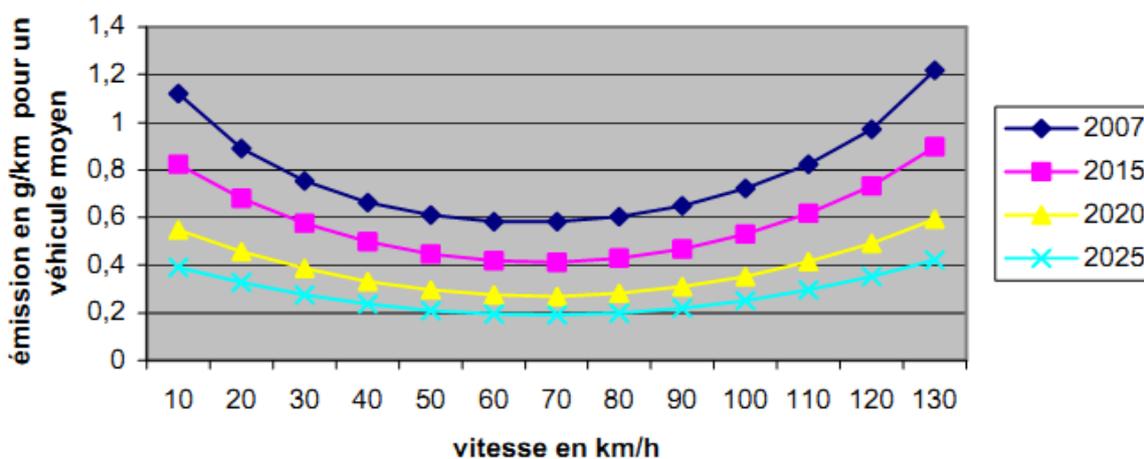
Source : Damien Cocard/document ADEME

Annexe.A.2. : Estimations des émissions des véhicules thermiques, [21]

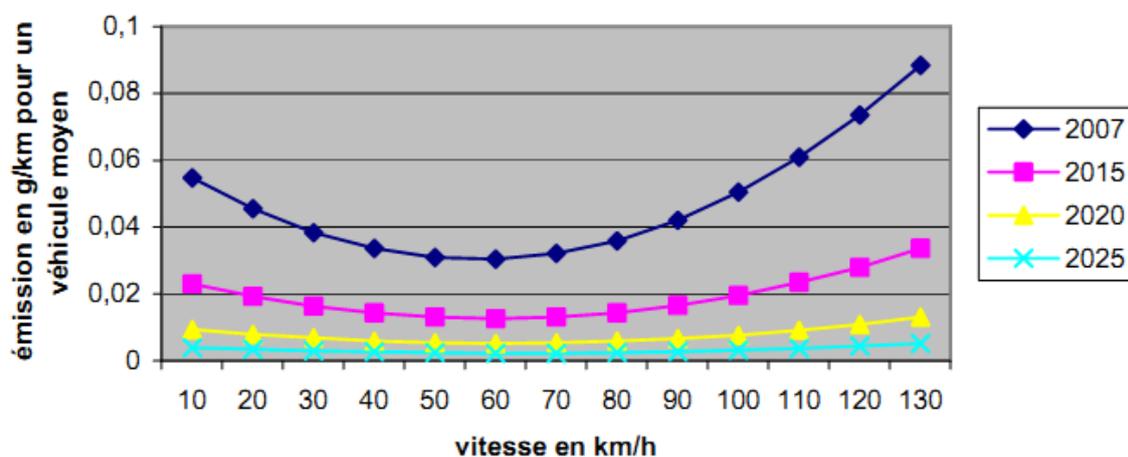
Emissions en fonction de la vitesse _ CO2 _ VL



Emissions en fonction de la vitesse _ NOx _ VL



Emissions en fonction de la vitesse _ PM _ VL

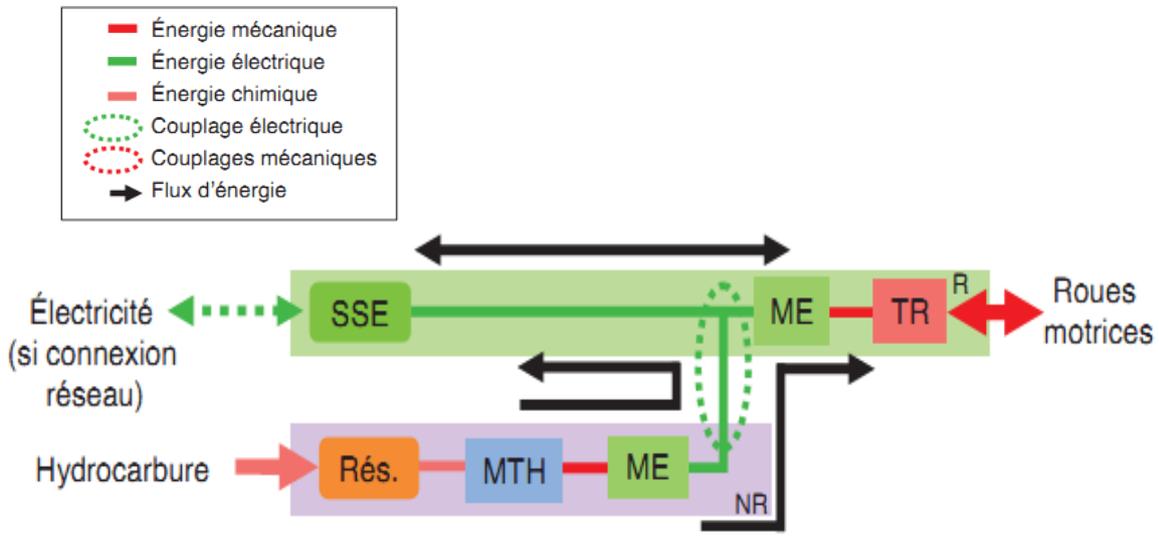


Annexe.A.3 : normes EURO contre les pollutions véhiculaires

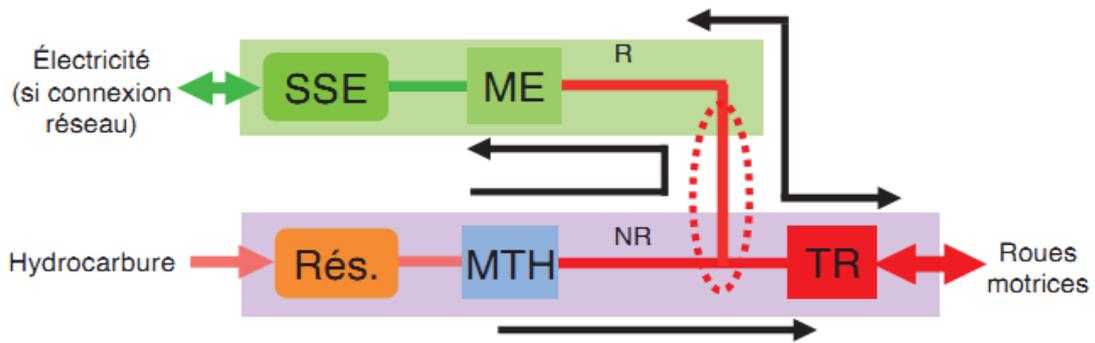
Tableau-1 : Evolution de la norme Euro pour l'homologation des émissions des véhicules particuliers de l'Union Européenne de 1992 à 2014.

Classe	Normes	Année d'entrée en vigueur		Limites d'émissions UE pour les véhicules de particuliers (en g/km)					
		Nouveaux modèles seulement	Tous les véhicules neufs	CO	HC	HCNM	HC + NOx	NOx	Particules
Diesel	Euro 1	1992		2.720	-	-	0.970		0.140
	Euro 2 Injection indirecte	1996		1.000	-	-	0.700		0.080
	Euro 2 Injection directe	1999		1.000	-	-	0.900		0.100
	Euro 3	2000	2001	0.640	-	-	0.560	0.500	0.050
	Euro 4	2005	2006	0.500	-	-	0.300	0.250	0.025
	Euro 5	2009	2011	0.500	-	-	0.230	0.180	0.005
	Euro 6	2014	2015	0.500	-	-	0.170	0.080	0.005
Essence	Euro 1	1992		2.720			0.97		
	Euro 2	1996		2.200			0.5		
	Euro 3	2000	2001	2.300	0.200			0.150	
	Euro 4	2005	2006	1.000	0.100			0.080	
	Euro 5	2009	2011	1.000	0.100	0.068		0.060	
	Euro 6	2014	2015	1.000	0.100	0.068		0.060	

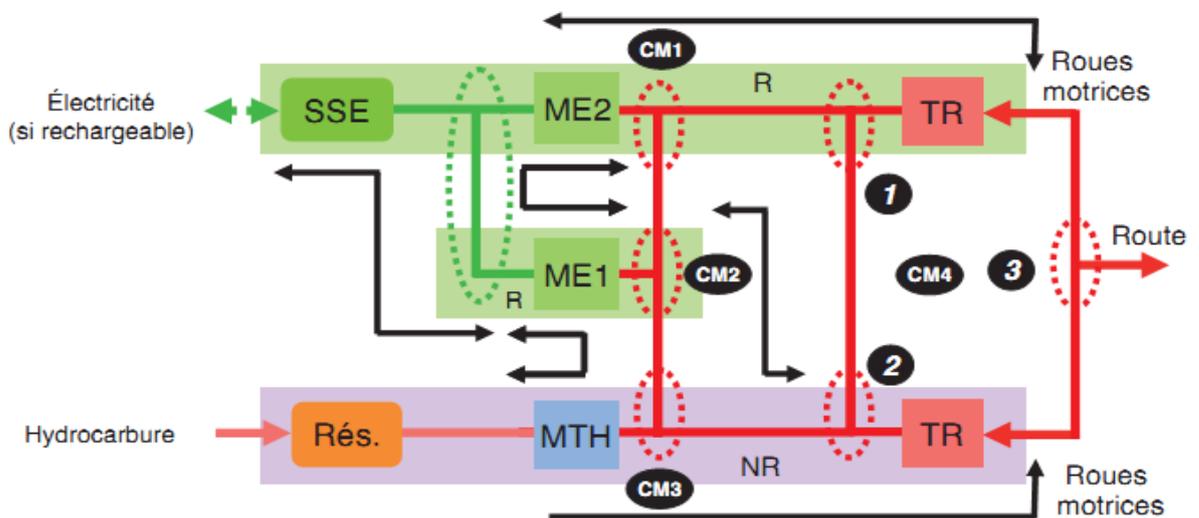
Annexe.A.4 : Architectures de véhicules hybrides, [37]



Architecture : Hybride serie



Architecture :Hybride parallèle



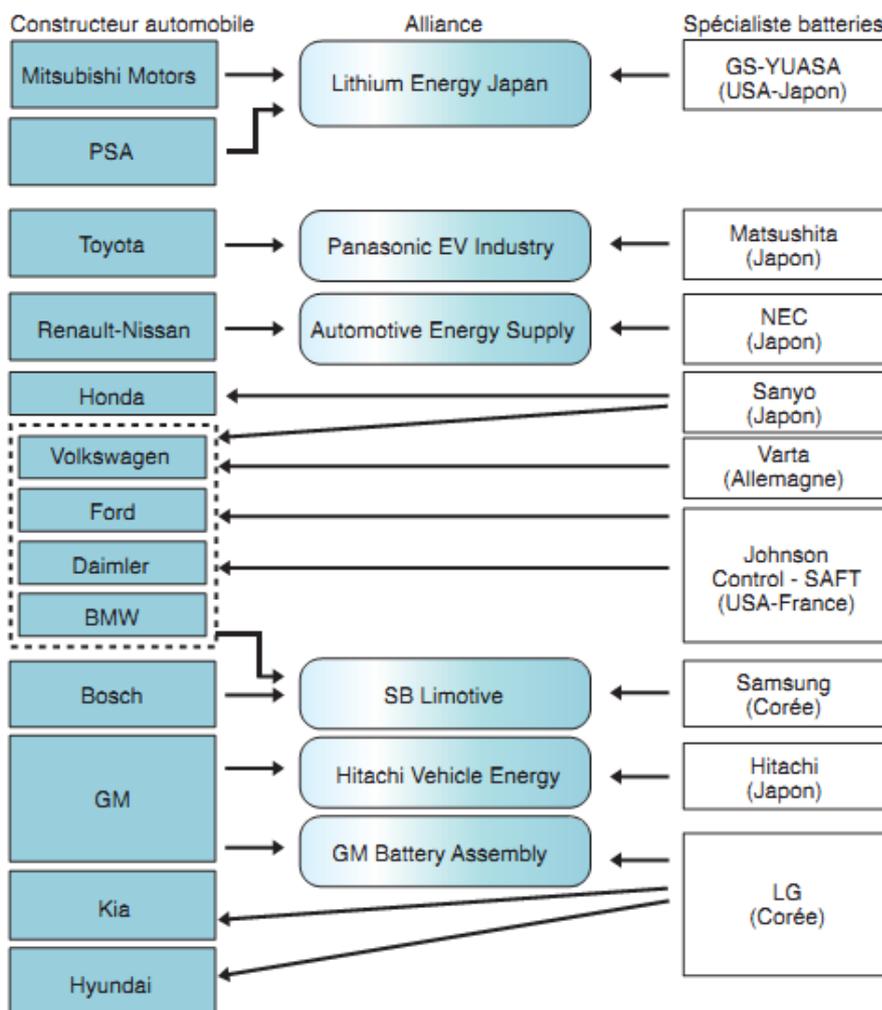
Architecture : Hybride serie/parallèle

Annexe.A.5 : Exemples de réalisations actuelles de véhicules électriques

Tableau-2 : exemples de véhicules électriques disponibles, [46].

Véhicule Electrique				
	Renault- Fluence ZE	Bolloré-BlueCar	Mercedes -Smart	Toyota FT-EV
Puissance Moteur (kW)	70	50	30	45
Batterie	Li-ion (20kWh)	LMP (30kWh)-300kg	Li-ion (14kWh)-140kg	Li-ion
Recharge	8h (220V) 20min (bornes)	6h (220V)	8h (220V)	2h30 (220V)
Poids	1600	1120	890	-
Autonomie	160	150	115	90
Prix d'achat (€) (Batterie)	20900 (82€/mo{s)	330€/mois	23680 (4770)	-

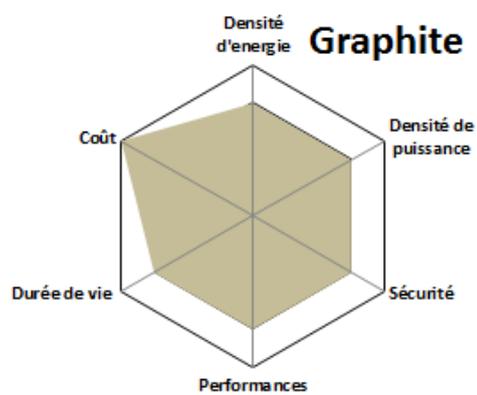
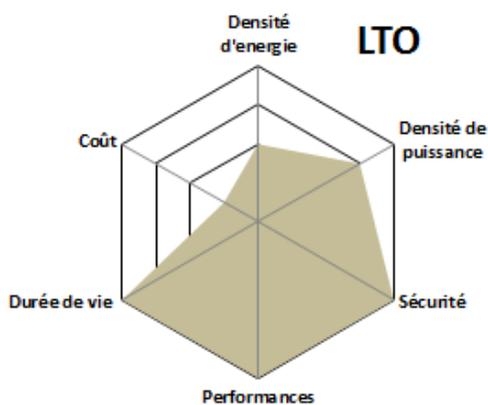
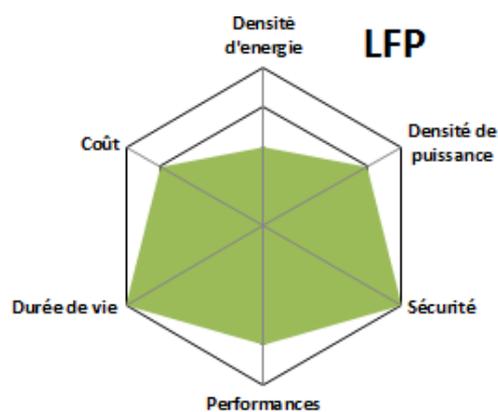
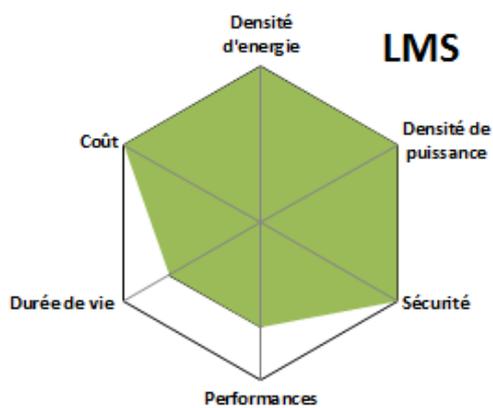
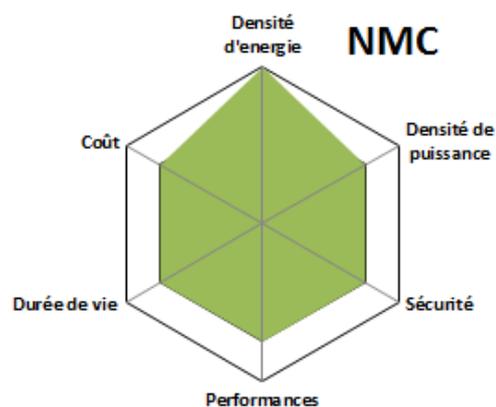
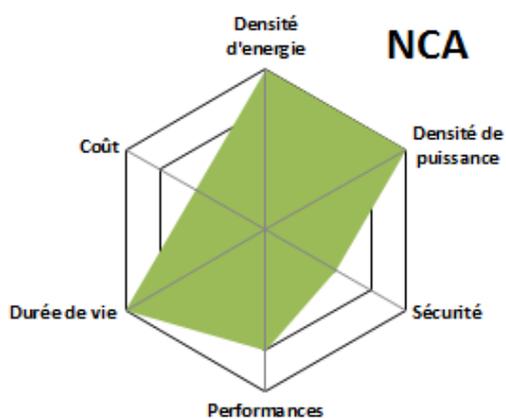
Tableau-3 : alliances et politiques de coopérations entre les fabricants de batteries et les constructeurs automobiles



Source : IFP Energies nouvelles

Annexe.A.6 : Caractéristiques relatives des matériaux d'électrodes de batteries Li-ion, [55].

- Matériaux de l'électrode positive (cathode)
- Matériaux de l'électrode négative (anode)



Annexe B.1 : calculs détaillés des éléments d'un pack de batteries

Dans cette annexe on détaillera les formules de dimensionnement des batteries selon les trois contraintes de : la puissance récupérée, la puissance consommée et l'énergie consommée. Dans le manuscrit nous avons considéré que la puissance récupérée est de signe négatif. Cependant, dans cette étape de calcul des éléments du pack de batteries tous les paramètres sont pris en valeur absolue, autrement dit, de signe positif y compris pour la valeur de la puissance récupérée (P_{V_rec}) et les limites de puissance en charge d'une cellule de batterie ($P_{el_B}^C$).

1. Les batteries récupèrent toute la puissance au freinage ($N_{S_B} = f(P_{V_rec})$) :

Pour que le pack de batteries récupère toute la puissance au freinage, il faut que vérifier la condition :

$$P_{V_rec} \geq N_{S_B} \cdot N_{P_B} \cdot P_{el_B}^C - N_{S_B} \cdot N_{P_B} \cdot \eta_{PW}^{rec} \cdot 1,4 \cdot W_{el_B} - Pertes_{Bat} \quad (B.1)$$

Avec $Pertes_{Bat}$ représente les pertes par effet joules due à la résistance interne du pack de batteries au point le plus contraignant de la puissance récupérée. Elles s'expriment en fonction du maximum courant récupéré (I_{rec}) comme suit :

$$Pertes_{Bat} = \frac{N_{S_B}}{N_{P_B}} R_{0_elB} \cdot (I_{rec})^2 \quad (B.2)$$

Le courant (I_{rec}) est égal à :

$$\begin{cases} I_{rec} = \frac{P_{V_rec}}{U_{bus}} \\ \text{avec } U_{bus} = N_{S_B} \cdot U_{el_B} \end{cases} \quad (B.3)$$

En exploitant l'équation (B.2) et (B.3) et en remplaçant $Pertes_{Bat}$ dans l'équation (B.1), on obtient :

$$P_{V_rec} = N_{S_B} \cdot N_{P_B} \cdot P_{el_B}^C - N_{S_B} \cdot N_{P_B} \cdot \eta_{PW}^{rec} \cdot 1,4 \cdot W_{el_B} - \frac{N_{S_B}}{N_{P_B}} \cdot R_{0_elB} \cdot \frac{P_{V_rec}^2}{(N_{S_B} U_{elB})^2} \quad (B.4)$$

Le nombre de branches parallèle est égal à 1 ($N_{P_B}=1$), après simplification de l'équation (B.4), on abouti à :

$$N_{S_B}^2 \cdot (P_{el_B}^C - \eta_{PW}^{rec} \cdot 1,4 \cdot W_{elB}) - N_{S_B} \cdot P_{V_rec} - \frac{R_{elB}}{U_{elB}^2} \cdot P_{V_rec}^2 = 0 \quad (B.5)$$

L'équation(B.5) est une équation du second degré ; le dimensionnement par rapport à la puissance récupérée revient à calculer N_{S_B} par la résolution de cette équation. La solution de cette dernière et donc le nombre d'éléments en série est exprimé par :

$$N_{S_B} = \frac{P_{V_rec} \left(1 + \sqrt{1 + 4 \cdot (P_{elB}^C - \eta_{PW}^{rec} \cdot 1,4 \cdot W_{elB}) \cdot \frac{R_{0_elB}}{U_{elB}^2}} \right)}{2 \cdot (P_{elB}^C - \eta_{PW}^{rec} \cdot 1,4 \cdot W_{elB})} \quad (B.6)$$

2. Les batteries assurent la puissance consommée ($N_{S_B} = f(P_{V_cons})$) :

La démarche de calcul du nombre d'éléments en série est identique à celle détaillé ci-dessus. La différence est au niveau du calcul des pertes due à la résistance interne qui s'exprime cette fois ci en fonction du courant maximal consommée (I_{cons}).

$$\text{Pertes}_{\text{Bat}} = \frac{N_{\text{S}_B}}{N_{\text{P}_B}} R_{0_{\text{elB}}} \cdot (I_{\text{cons}})^2 \quad (\text{B.7})$$

Avec

$$\begin{cases} I_{\text{cons}} = \frac{P_{V_{\text{cons}}}}{U_{\text{bus}}} \\ \text{et } U_{\text{bus}} = N_{\text{S}_B} \cdot U_{\text{el}_B} \end{cases} \quad (\text{B.8})$$

Pour que le pack de batteries assure le maximum de la puissance consommée nécessaire pour la propulsion du VE, il faudra que N_{S_B} recherché (puisque $N_{\text{P}_B}=1$) vérifié la condition suivante :

$$P_{V_{\text{cons}}} \geq N_{\text{S}_B} \cdot N_{\text{P}_B} \cdot P_{\text{el}_B}^D - N_{\text{S}_B} \cdot N_{\text{P}_B} \cdot \eta_{\text{P}_W}^{\text{cons}} \cdot 1,4 \cdot W_{\text{el}_B} - \text{Pertes}_{\text{Bat}} \quad (\text{B.9})$$

On développant l'équation (B.7) et on l'intégrant dans l'équation (B.9), on obtient l'équation de second degré (B.10).

$$N_{\text{S}_B}^2 \cdot (P_{\text{el}_B}^D - \eta_{\text{P}_W}^{\text{cons}} \cdot 1,4 \cdot W_{\text{el}_B}) - N_{\text{S}_B} \cdot P_{V_{\text{cons}}} - \frac{R_{0_{\text{elB}}}}{U_{\text{el}_B}^2} P_{V_{\text{cons}}}^2 = 0 \quad (\text{B.10})$$

La solution de cette équation, exprimée par la formule (B.11), représente le nombre d'éléments de batteries constituant le pack qui capable d'assurer le maximum de puissance consommée ($P_{V_{\text{cons}}}$).

$$N_{\text{S}_B} = \frac{P_{V_{\text{cons}}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 4 \cdot (P_{\text{el}_B}^D - \eta_{\text{P}_W}^{\text{cons}} \cdot 1,4 \cdot W_{\text{el}_B}) \cdot \frac{R_{0_{\text{elB}}}}{U_{\text{el}_B}^2}}\right)}{2 \cdot (P_{\text{el}_B}^D - \eta_{\text{P}_W}^{\text{cons}} \cdot 1,4 \cdot W_{\text{el}_B})} \quad (\text{B.11})$$

3. Les batteries assurent l'énergie consommée ($N_{\text{S}_B} = f(E_{V_{\text{cons}}})$) :

Dans cette troisième configuration, le pack de batteries est dimensionné de manière à exploiter uniquement le critère énergétique de la cellule. En effet, le pack est la source principale d'énergie pour le VE, donc il n'y pas nécessairement besoin d'assurer les maximums des puissances, mais uniquement l'énergie requise pour l'autonomie. De ce fait, la condition à satisfaire est :

$$E_{V_{\text{cons}}} \geq N_{\text{S}_B} \cdot N_{\text{P}_B} \cdot E_{\text{el}_B} - N_{\text{S}_B} \cdot N_{\text{P}_B} \cdot 1,4 \cdot \eta_{E_W} \cdot W_{\text{el}_B} - \text{Perstes}_{\text{Bat}} \quad (\text{B.12})$$

Les pertes due à la resitance interne du pack de batteries doit être exprimé en énergie et sur la durée totale (t_{cy}) de la mission (i.e. le temps correspondant à l'autonomie désirée). Elles sont données en fonction du courant du cycle (I_{cy}) :

$$\text{Pertes}_{\text{Bat}} = \frac{N_{\text{S}_B}}{N_{\text{P}_B}} \cdot R_{0_{\text{elB}}} \cdot \int_0^{t_{\text{cy}}} I_{\text{cy}}^2 \cdot dt \quad (\text{B.13})$$

Le courant du cycle peut être exprimé par la puissance du VE (P_V) par :

$$\begin{cases} I_{\text{cy}} = \frac{P_{\text{cy}}}{U_{\text{bus}}} \\ \text{avec : } U_{\text{bus}} = N_{\text{S}_B} \cdot U_{\text{el}_B} \end{cases} \quad (\text{B.14})$$

De (B.13) et (B.14), on écrit alors les pertes en Wh comme suit :

$$\text{Pertes}_{\text{Bat}} = \frac{R_{0_{\text{elB}}}}{N_{\text{S}_B} \cdot N_{\text{P}_B} \cdot U_{\text{el}_B}^2} \cdot (E_{V_{\text{cons}}})^2 \quad (\text{B.15})$$

Le dimensionnement optimal consiste à rechercher N_{S_B} minimal qui vérifié la condition (B.12). On exploitant l'expression (B.15) et avec $N_{P_B}=1$, le calcul de N_{S_B} découle de l'équation de second degré suivante :

$$N_{S_B}^2 \cdot (E_{el_B} - \eta_{E_W} \cdot 1,4 \cdot W_{el_B}) - N_{S_B} \cdot E_{V_cons} - \frac{R_{0_elB}}{U_{el_B}^2} E_{V_cons}^2 = 0 \quad (B.16)$$

La solution de cette équation (B.16) et donc le dimensionnement optimal par rapport à l'énergie est :

$$N_{S_B} = \frac{E_{V_cons} \cdot (1 + \sqrt{1 + 4(E_{el_B} - \eta_{E_W} \cdot 1,4 \cdot W_{el_B}) \cdot \frac{R_{0_elB}}{U_{el_B}^2}})}{2 \cdot (E_{el_B} - \eta_{E_W} \cdot 1,4 \cdot W_{el_B})} \quad (B.17)$$

4. Dimensionnement des batteries par rapport à U_{Bus} :

Dans ce cas, d'éléments de batteries en série (N_{S_B}) est fixé par la tension du bus continu (équation B.18). Le dimensionnement du pack est donc réaliser par le calcul du nombre de branche parallèles (N_{P_B}). Le nombre de branches calculé doit satisfaire la condition exprimée par la relation (B.12).

$$N_{S_B} = \frac{U_{Bus}}{U_{elB}} \quad (B.18)$$

Or, du fait que le nombre d'éléments en série est fixé auparavant par rapport à U_{Bus} , l'expression des pertes, dues aux résistances internes des cellules de batteries, s'écrit comme suit :

$$Pertes_{Bat} = \frac{R_{0_elB}}{N_{P_B} \cdot N_{S_B} \cdot U_{el_B} \cdot U_{Bus}} (E_{V_cons})^2 \quad (B.19)$$

D'où, le nombre de branche parallèle découle de la solution de l'équation du second degré (B.20) :

$$N_{P_B}^2 \cdot (E_{el_B} - \eta_{E_W} \cdot 1,4 \cdot W_{el_B}) - N_{P_B} \cdot \frac{E_{V_cons}}{N_{S_B}} - \frac{R_{0_elB}}{U_{el_B} \cdot U_{Bus}} \cdot E_{V_cons}^2 = 0 \quad (B.21)$$

La solution cette équation et le nombre de branches parallèles est égal à :

$$N_{P_B} = \frac{E_{V_cons} \cdot (\frac{1}{N_{S_B}} + \sqrt{\frac{1}{N_{S_B}^2} + 4 \cdot (E_{el_B} - \eta_{E_W} \cdot 1,4 \cdot W_{el_B}) \cdot \frac{R_{0_elB}}{U_{el_B} \cdot U_{Bus}}}}}{2(E_{el_B} - \eta_{E_W} \cdot 1,4 \cdot W_{el_B})} \quad (B.22)$$

Annexe B.2 : caractéristiques du dissipateur thermique ARP201

DISSIPATEURS
CLAMPS
ISOLATEURS
AUTRES PRODUITS

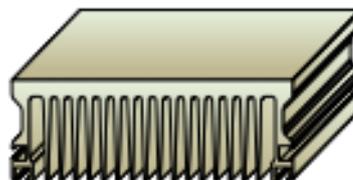
CARTES ELECTRONIQUES
SEMICONDUCTEURS
PONTS DE PUISSANCE

ARCEL
ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

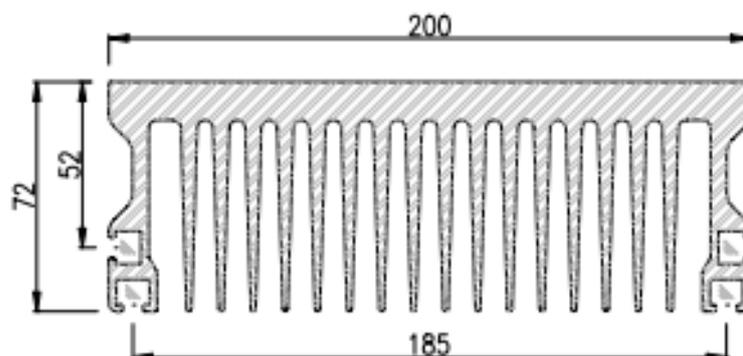
Doc. ARP201_fr - Ver 1.0

ARP201

- ✓ Dissipateur pour module isolé
- ✓ Poids : 17,5 Kg/m
- ✓ Application : ventilation forcée
- ✓ Traitement : nous consulter
- ✓ Longueur disponible sur stock : 1800 mm
- ✓ Usinage et montage sur demande



Dimensions

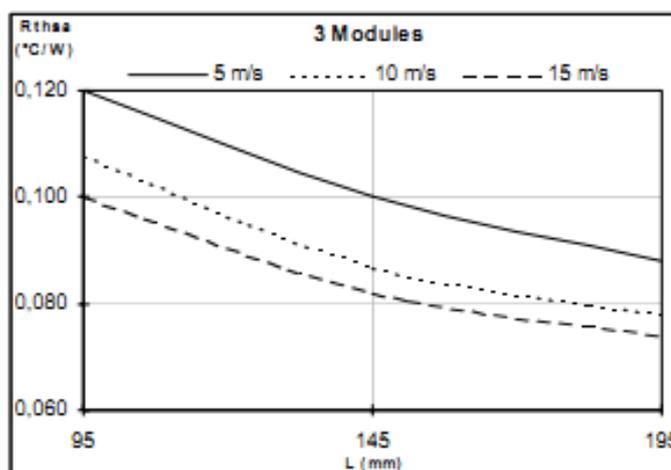


Glissière pour vis M6

Echelle : 2/3

Résistance Thermique

Ventilation Forcée



Annexe B.3 : résultats de dimensionnement complémentaires

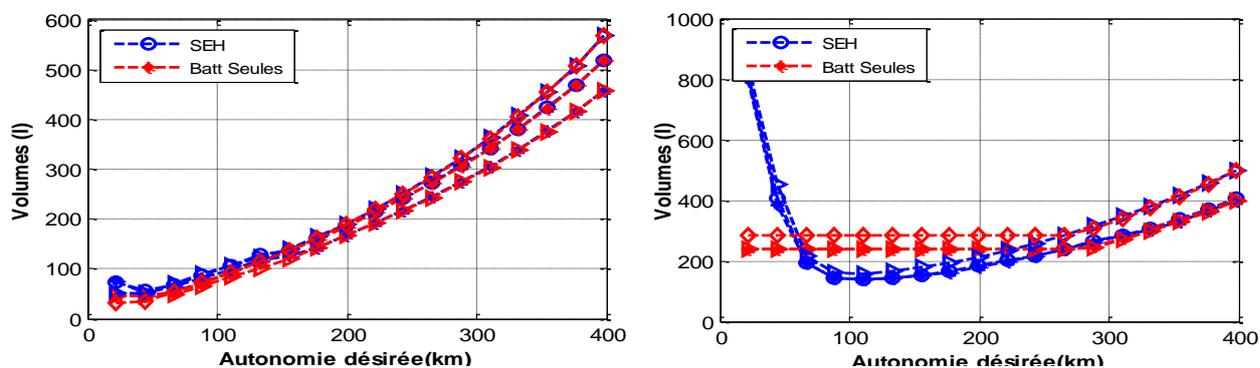


Figure 1 : comparaisons des résultats en volumes des dimensionnements batteries « seules » et SEHs. (A) batteries HP. (B) batteries HE

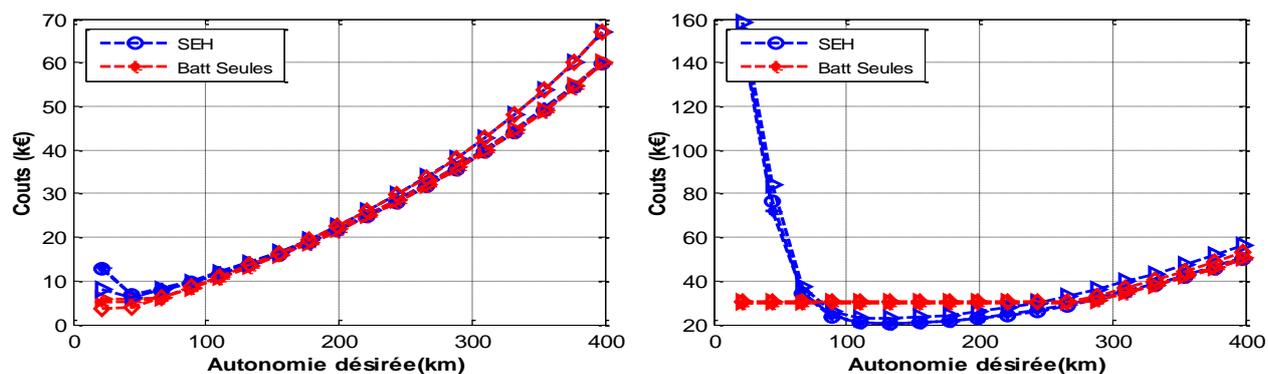


Figure 2 : comparaisons des résultats en coût financier des dimensionnements batteries « seules » et SEHs. (A) batteries HP. (B) batteries HE

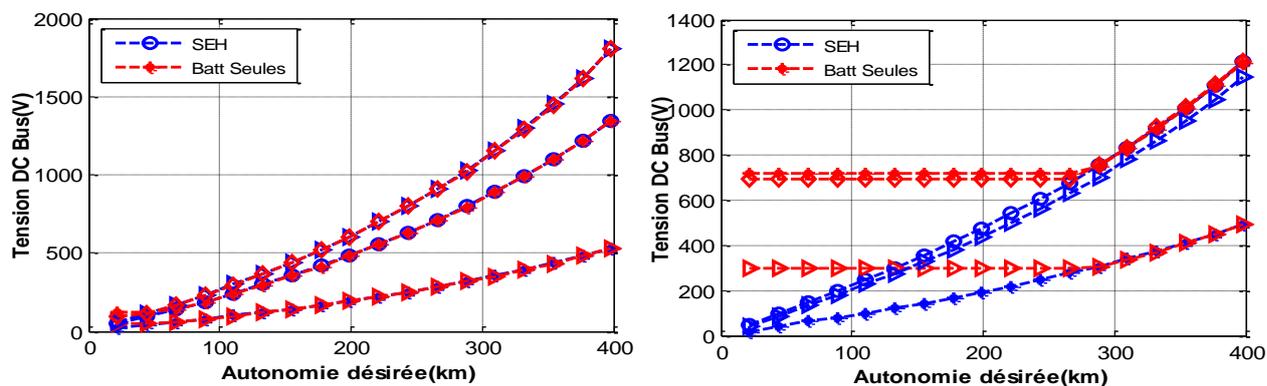


Figure 3: comparaisons des résultats en tensions du bus continu des dimensionnements batteries « seules » et SEHs. (A) batteries HP. (B) batteries HE

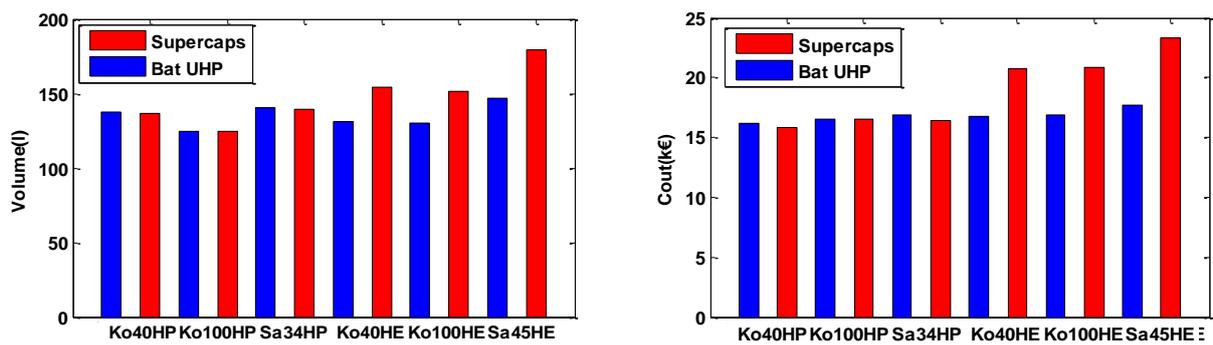


Figure 4 : (A) volume et (B) coût des SEHs dans le cas de remplacement des supercondensateurs par des batteries UHP

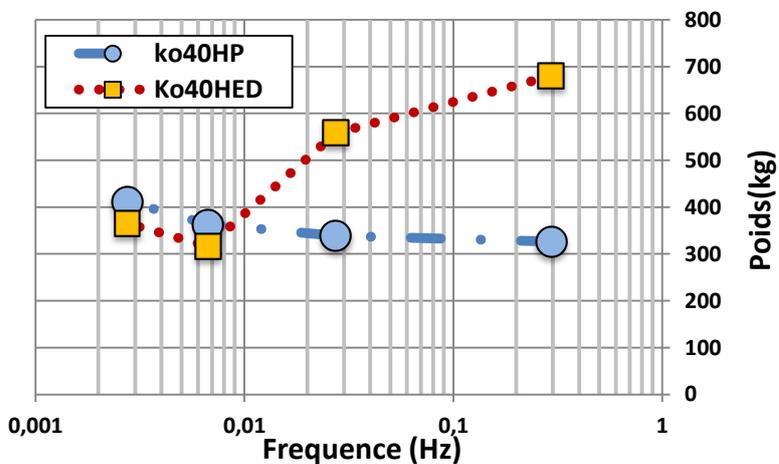


Figure 5 : influence de la fréquence de coupure F_c sur la masse des SEHs pour le dimensionnement basé sur la stratégie de gestion énergétique fréquentielle

Annexe C.1 : caractéristiques techniques des éléments du banc de test

1- Le convertisseur

Afin de limiter l'ondulation de courant dans les batteries tout en maintenant une taille des filtres réduite, un filtre en « T » est utilisé en sortie des bras du convertisseur. Ceux-ci, associés à une fréquence de découpage de 40kHz et des boucles de régulation adaptées, permettent d'obtenir des ondulations de courant inférieures à 1,2A.

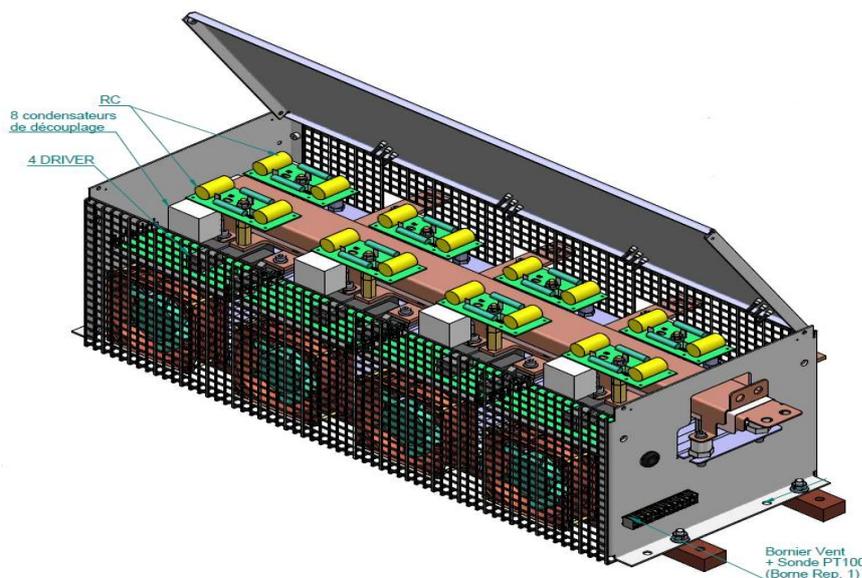


Figure 6: convertisseur 4 bras (600A, 60V, 40kHz),

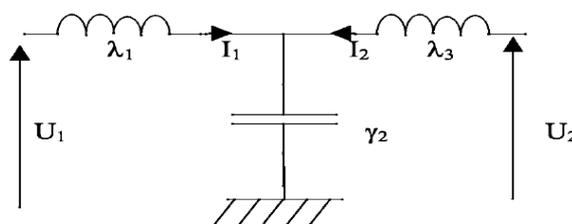


Figure 7: filtre deuxième ordre en T.

Ce filtre peut être représenté par les équations suivantes :

$$\begin{cases} U_1 = L_1 \frac{dI_1}{dt} + \frac{1}{C} \int I_C dt \\ U_1 = L_1 \frac{dI_1}{dt} - L_2 \frac{dI_2}{dt} + U_2 \\ \text{avec} \\ I_C = I_1 + I_2 \end{cases} \quad (\text{III. 1})$$

La fonction de transfert de ce filtre est la suivante :

$$H(s) = \frac{1}{L_1 \cdot L_2 \cdot C \cdot s^3 + L_1 \cdot C \cdot s^2 + (L_1 + L_2)s + 1} \quad (\text{III. 2})$$

Afin de valider l'intérêt de ce type de filtres, une simulation du circuit sous PSIM a été réalisée (cf. Figure.9).

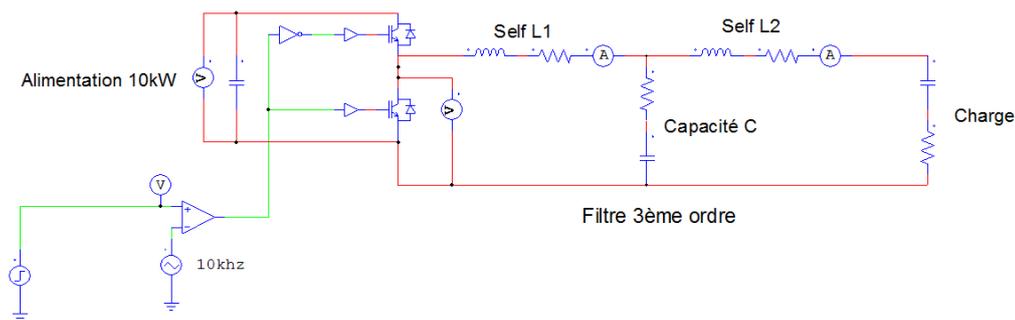


Figure 8 : circuit sous PSim du filtre deuxième ordre en T

Les résultats de cette simulation montrent que l'ondulation de courant ne dépasse pas les 1,2A (cf. Figure.10). La simulation montre que le courant est filtré par la première self une première fois et après par la deuxième self.

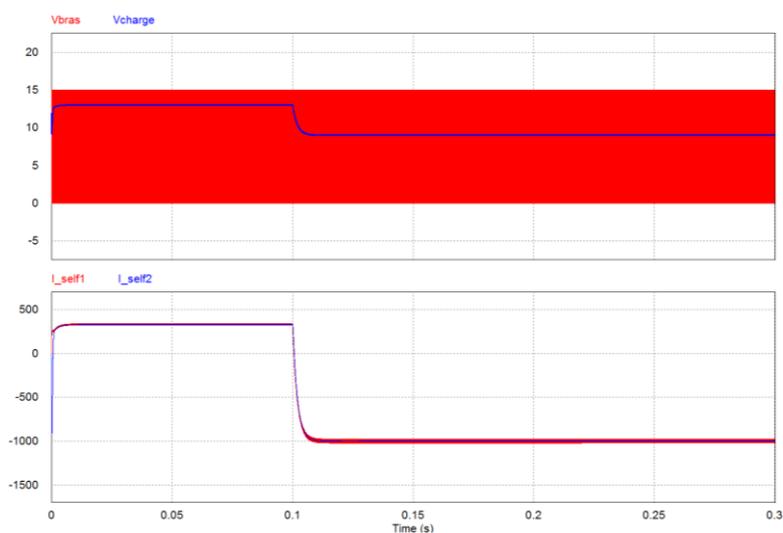


Figure 9 : résultats de simulation du filtre en (T)

2- Le module tampon

Le module tampon (cf. Figure.11) doit assurer des contraintes en puissance et en énergie supérieures à celles de des cellules testées en parallèle. Le module tampon est constitué de 9 éléments de 100Ah en série (tension du module 34V), ce qui nous donne une puissance de décharge de l'ordre de 16,6kW et une puissance de charge de pratiquement 7kW.

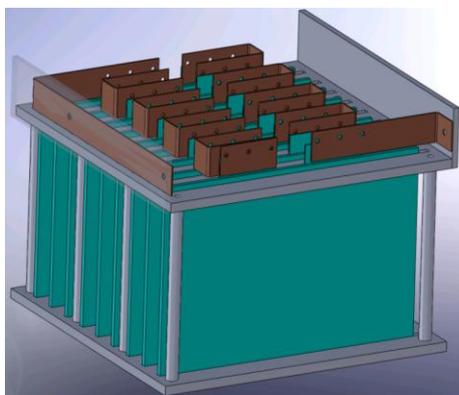


Figure 10 : module tampon (100AH, 34V, 500A/200A)

3- Code sous LabVIEW FPGA des boucles de contrôle en courant et en tension du banc de test

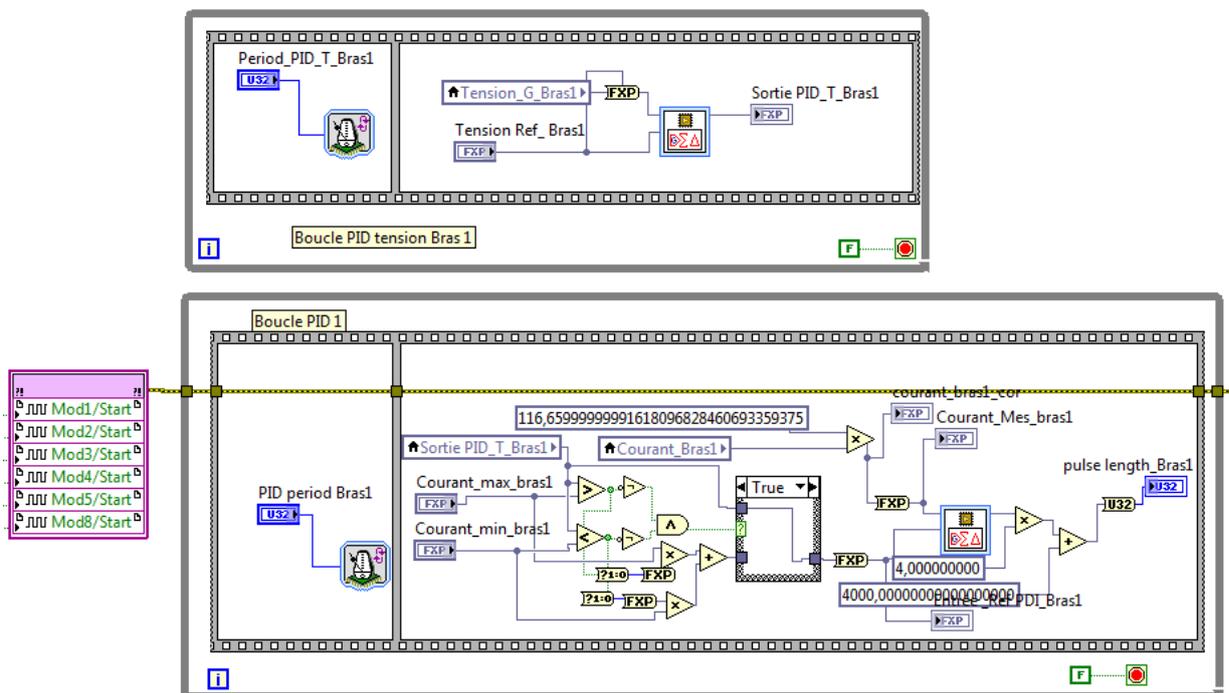


Figure 11 : programme sous LabVIEW du contrôle en courant et en tension du banc de test

Références

- [1] J-M. Tarascon, "L'énergie: stockage électrochimique et développement durable", Environnement, Energie et Société, Leçon inaugurale, décembre 2010.
- [2] F. Cuenot, L. Fulton, J. Staub, The prospect for modal shifts in passenger transport worldwide and impacts on energy use and CO₂, Journal Energy Policy, 41-PP: 98-106, 2012.
- [3] J.C. Guibet, Carburants Et Moteurs, technologies- Energie-Environnement, Ouvrage de L'IFP, Editions TECHNIP, 1997.
- [4] La production automobile mondiale en hausse de plus de 8% en 2012. Consulté le 09-12-2012 <http://www.actu-environnement.com/ae/news/etude-pwc-marche-automobile-reglementation-co2-constructeurs-13756.php4>
- [5] Source documentaire INSEE, Equipement des ménages, www.insee.fr , TEF, édition 2010.
- [6] J. Wullt, P.Wolff," Les conditions de vie dans l'UE27", Communiqué de presse d'Eurostat, 77/2009, 28 mai 2009.
- [7] T.Le Jeannic, T. Razafindranovona, Près d'une heure quotidienne de transport : les disparités se réduisent mais demeurent, INSEE, édition 2009.
- [8] World Energy Outlook Special Report on Unconventional Gas, Golden Rules for a Golden Age of Gas, IEA, 2012.
- [9] Y. Mathieu, Un point sur les ressources en hydrocarbures, IFP Energies Nouvelles, Panorama 2010.
- [10] Source documentaires Exxon Mobil, 2012 The Outlook for Energy: A View to 2040, 2012.
- [11] L. Maugeri, Oil: The Next Revolution, Harvard Kennedy School, June 2012.
- [12] I. Caplain, Mesure des émissions polluantes automobiles – Application à la modélisation eulérienne 3D de la formation des oxydants photochimiques dans la troposphère, thèse de doctorat, Université de Lille, 2005.
- [13] Source documentaire AIRPARIF.ASSO, Les émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre par les transports franciliens, Bilan Mai 2005.
- [14] Source documentaire UE, Agir sur les causes et conséquences du changement climatique, 2008.
- [15] Source documentaire PNUE, L'avenir de l'environnement mondial, GEO5, 2005.
- [16] R.K. Pachauri, A.Reisinger et al, Bilan 2007 des changements climatiques, Rapport de synthèse PNUE, 2007.
- [17] A. Jaecker-Voirol, Emissions polluantes des moteurs thermiques – Valeurs limites, Dossier Techniques de l'ingénieur, ref. BM 2 507, 2010.
- [18] Source documentaire IEA, CO₂ emissions from fuel combustion, edition 2011.
- [19] Source documentaire PNUE, Bridging the emissions Gap, Rapport de synthèse, Novembre 2011.
- [20] Montaru, contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages. Thèse de doctorat IPG Grenoble, 2009
- [21] Source documentaire CITEPA, Les polluants atmosphériques -HCF, Consulté le : 09-12-2012 <http://www.citepa.org/fr/pollution-et-climat/polluants /effet-de-serre/hydrofluorocarbures>
- [22] Source documentaires Sétra, Cete de Lyon, Cete Normandie- Centre, Emissions routières de polluants atmosphériques, Courbes et facteurs d'influence, Note d'information, Novembre 2009.
- [23] M. Cottignies, Transport et développement durable, Dossier technique de l'ingénieur, ref. AG 8 230.
- [24] Sétra, Cete de Lyon, Cete Normandie- Centre, Emissions routières de polluants atmosphériques, Courbes et facteurs d'influence, Note d'information, Novembre 2009.
- [25] A. Sassi, E. Rohart, G. Belot, Post traitement des émissions polluantes des moteurs thermiques à combustion interne – Moteurs à allumage commandé, Dossier techniques de l'ingénieur, ref. BM 2 508.
- [26] L. Fulton, G. Eads, IEA/SMP Model Documentation and reference Case Projection, Juillet 2004.

-
- [27] Source documentaire CITEPA, Les polluants atmosphériques - Pb, Consulté le : 09-12-2012. <http://www.citepa.org/fr/pollution-et-climat/polluants/metaux-lourds/plomb>
- [28] J. Lambert, La gêne due au bruit des transports terrestres, Acoustique et Techniques n°28, Paris, 2002.
- [29] J. Lambert, B. Vincent, M. Vallet, Bruit des transports, effets sur l'homme, indices et réglementations, Dossier techniques de l'ingénieur, ref. BR2005, 2007.
- [30] M. Wolfram, Sustainable Urban Transport Plans (SUTP) and urban environment: Policies, effects, and simulations, Review of European references regarding noise, air quality and CO2 emissions, October 2005.
- [31] Source documentaire, Mobilité et transport en Île-de-France – État des lieux, Le bruit des transports en Ile de France
- [32] G. Rousseau, Véhicule hybride et commande optimale, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2008.
- [33] V. Mester, Conception optimale systémique des composants des chaînes de traction électrique, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2007.
- [34] I. Husain, Eclectic and Hybrid vehicles: Design fundamental, CRC press LCC ISBN 0-8493-1466-6, 2003.
- [35] Delprat, Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles, thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2002.
- [36] W. Lhomme, Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la présentation énergétique macroscopique, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2007.
- [37] J. Scordia, Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2004.
- [38] S. Vinot, Le développement des véhicules hybrides et électriques, IFP Energies Nouvelles, Panorama 2012.
- [39] PSA Stop and Start, site: <http://www.psa-peugeot-citroen.com/modules/stop-and-start/francais/parent.html>
- [40] Valeo, direction de la communication, Des solutions hybrides pour tous grâce aux systèmes Valeo, Communiqué de presse, septembre 2009.
- [41] F.Badin, L'électrification du transport routier, Manuscrit IFPen, janvier 2009.
- [42] K. Aoki, S. Kuroda, S. Kajiwara, H. Sato and Y. Yamamoto, Development of Integrated Motor Assist Hybrid System: Development of the 'Insight', SAE Technical paper series/ Industry Meeting Washington, D.C. Jun 2000.
- [43] Wikipedia, Automobile hybride, site http://fr.wikipedia.org/wiki/Automobile_hybride
- [44] B. Jeanneret, R. Trigui, F.Badin, F. Harel, New hybrid concept simulation tools, evaluation on the Toyota Prius car, The 16th International electric vehicle symposium, China , 1999.
- [45] Sadiq, E. Pritchard, K. Dulaney and A. Emadi, Plug-In Hybrid Market Transformation by Leveraging a Niche Market: School Buses, IEEE page: 483-492, 2007.
- [46] R. Schmitz, La voiture électrique, comme alternative réaliste à la voiture à essence, Juin 2007.
- [47] G. Robert, bilan et comparatif des voitures hybrides et électriques, rapport véhicule propre au salon de Genève 2010. Avril 2010
- [48] <http://www.bluecar.fr> , consulté le : 09-12-2012
- [49] P.M Assimon, S. Depoorter, O. Teissier, Une évaluation prospective des véhicules électriques, CGDD, Mai 2011.
- [50] Source documentaire L'Observatoire Cetelem 2012, La voiture électrique et les européens, 2012.
- [51] J.Labbé, l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés, Thèse de doctorat, École des Mines de Paris, 2006.
- [52] M.Urbain, modélisation électrique et énergétique des accumulateurs Lithium-ion en ligne du SOC et de SOH, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [53] <http://www.nexeon.co.uk/technology/about-li-ion-batteries/>, consulté le : 09-12-2012

-
- [54] J. Robert, J. Alzieu, les accumulateurs au lithium, Techniques de l'ingénieur, D3354, 2005.
- [55] J. Pluchet, Etat de la R&D dans le domaine des batteries pour véhicules électriques au Japon, Rapport d'étude, Ambassade de France au Japon SST, Octobre 2010.
- [56] A. Dinger, R. Martin et al, Batteries for Electric Cars – Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020, The Boston Consulting Group, 2010.
- [57] L. Gaines, R. Cuenca, Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles, Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Mai 2000.
- [58] M. Lowe, S. Tokuoka, T. Trigg, G. Gereffi, Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: the U.S. Value Chain, October 2010.
- [59] M. Coleman, W.G. Hurley An improved battery characterization method using a Two- Pulse Load Test, IEEE transaction on energy conversion, Vol 23, N°2, June 2008.
- [60] http://www.phostechlithium.com/documents/T8-FixedLiFePO4_Navy_July_2009.pdf
- [61] M. Ecker, J.B. Gerschler, J. Vogel, S. Käbitz, F. Hust, P. Dechent, D.U. Sauer, « Development of a lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data », Journal of Power Source n° 215, pp 248-257, 2012.
- [62] H. Maker, Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride: association Pile à combustibles supercondensateur, Thèse de doctorat, Université de Belfort Montbéliard. 2008.
- [63] A. Marquet, C. Levillain, A. Davriu, Stockage d'électricité dans les systèmes électriques. Revue technique de l'ingénieur d 4030.
- [64] N. Rizoug, Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation: application au cyclage d'un module de supercondensateur basse tension en grande puissance, Thèse de doctorat, École Centrale de Lille, 2006
- [65] M.B. Camara, Supercondensateurs pour échange dynamique d'énergie à bord du véhicule électrique hybride, Thèse de doctorat, UFR- Université de Franche-Comté, 2007.
- [66] B. Destraz, Assistance énergétique à base de supercondensateurs pour véhicule à propulsion électrique et hybride. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008.
- [67] N. Rizoug, G. Feld, B. Barbedette, R. Sadoun, "Association of batteries and supercapacitors to supply a micro-hybrid vehicle", IEEE, VPPC'11, Chicago, 2011.
- [68] J. W. Dixon, M. E. Ortúzar, Ultracapacitors + DC-DC Converters in Regenerative Braking System, Catholic University of Chile, Aout 2002.
- [69] D. Wu, S.S. Williamson, Status review of power control strategies for Fuel Cell Based hybrid Electric Vehicles, IEEE Electric Power Conference, Canada, 2007.
- [70] S.G. Wirasingha, A. Emadi, Classification and review of control strategies for Plug In Hybrid Vehicles, IEEE Transaction on vehicular Technology, Vol60 N° 1, 2011.
- [71] F.R. Salamsi, Control strategies for hybrid electric vehicles: evolution, classification, comparison and future trends, IEEE Transaction on vehicular technology, Vol56, N°5, 2007.
- [72] C. Desai, S.S. Williamson, Comparative Study of Hybrid Electric Vehicle Control Strategies for Improved Drivetrain Efficiency Analysis, IEEE, 2009.
- [73] 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.
- [74] C. Musardo, B. Staccia, S. Bittanti, Y. Guezennec, L. Guzzella, G. Rizzoni, An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicles Energy Management, FWAC, 2004.
- [75] P. Pisu, G. Rizzoni, A comparative study of supervisory control strategies for Hybrid Electric Vehicles, IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol15, N° 3, 2007.
- [76] C. Romas, K. Gathmann, J. Bocker, Optimal energy management for hybrid energy storage system for electric vehicles based on stochastic programming, 2010.
- [77] A. Gruson, Etude de la détectabilité du véhicule électrique en milieu urbain, PFE- IRCAM, 2012.

-
- [78] M.F. Torchio, M.G. Santarelli, Energy, environmental and economic comparison of different powertrains/fuel options using well-to-wheels assessment, energy and external costs-European market analysis, *Journal of Energy*, N° 35-pp. 4155-4171, 2010.
- [79] M. André, Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions- Part A: The ARTEMIS European driving cycles, Report INRETS-LTE 0411, June 2004.
- [80] X. Yan, R.J. Crookes, Energy demand and emissions from road transportation vehicles in China, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, 2010, pp.651–676.
- [81] C. Silva, M. Ross, T. Farias, Evaluation of energy consumption, emission and cost of plug-in hybrid vehicles, *Energy conversion and management*, vol. 50, 2009, pp. 1635-1643.
- [82] L. Graham, M. Christenson, D. Karman, Light duty hybrid vehicles- influence of driving cycle and operating temperature on fuel economy and GHG emissions, *IEEE*, 2006.
- [83] Membre de l'OCDE, Réduire les émissions de NOX de a circulation routière, CEMT, 2006
- [84] R. Joumard, R. Vidon, P. Tassel, Emissions unitaires de polluants des véhicules utilitaires légers, INRETS-LTE, Rapport n° 0101, 2001
- [85] <http://www.dowkokam.com/>
- [86] <http://www.saftbatteries.com/>
- [87] <http://www.maxwell.com/>
- [88] R. Carter, A. Cruden, Strategies for control of battery/Supercapacitor system in electric vehicle. *IEEE-SPEEDAM*, 2008.
- [89] A.L Allègre, méthodologies de modélisation et de gestion de l'énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicule électriques et hybrides, Thèse de doctorat, Université Lille 1,2010
- [90] L. Fleischli, S. Lemouet and A. Rufer, "Multichannel DC/DC converter's efficiency optimization by variable number of active channels", *IEEE_IECON*, pp. 2581–2586, 2006.
- [91] Marvier, Convertisseurs génériques à tolérance de panne, Thèse de doctorat N°2461, polytechnique de TOULOUSE, 2007.
- [92] <http://delphi.com/manufacturers/auto/hevevproducts/converter/dc-to-dc-converter/>
- [93] O. Langlois, "Conception d'un réseau de secours électrique pour l'aéronautique", Thèse de doctorat N°2349, polytechnique de TOULOUSE, 2006.
- [94] <http://www.arcel.fr/-Heatsinks-.html>
- [95] <http://www.altestore.com>
- [96] R.Sadoun, N.Rizoug, P.Bartholomeüs, B.Barbedette, Ph. LeMoigne, Influence des cycles de conduite sur le dimensionnement du système de stockage hybride batterie-Supercondensateur alimentant un véhicule électrique, EF'11, Belfort, Décembre 2011
- [97] R.Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeus, B. Barbedette and Ph. LeMoigne, Influence of the drive cycles on the sizing of hybrid storage system Battery-Supercapacitor supplying an electric vehicle, *IECON11*, Melbourne, 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 4106-4112, 2011.
- [98] C.R. Akli, Conception systémique d'une locomotive hybride autonome, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [99] R.Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeus, B. Barbedette and Ph. LeMoigne, Sizing of Hybrid Supply (Battery-Supercapacitor) For Electric Vehicle Taking into Account the Weight of the Additional Buck-Boost Chopper, *IEEE-conference REVET12*, Hammamet, February 2012.
- [100] H. L. Chan, A new battery model for use with battery energy storage systems and electric vehicles power systems, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Conference*, vol. 1, pp. 470-475, Singapore, January 2000.
- [101] Yoon-Ho Kim; Hoi-Doo Ha, Design of interface circuits with electrical battery models, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, n° 1, pp.81-86, February 1997.
- [102] E. Khun, Contribution à la conception d'une motorisation hybride parallèle. Choix d'un modèle d'accumulateur, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2004

- [103] E.Meissner, g. Richter, Battery monitoring and electrical energy management prediction for future vehicle electric power systems. Journal of Power sources, 116 page 79-98, 2003
- [104] O.Tremblay, L-A.Dessaint and A-I.Dekkich, A generic battery model of the dynamic simulation of Hybrid Electric Vehicles, IEEE, 2007.
- [105] N.Omar, M.Daowd, O.Hegazy, G.Mulder,J.Timmermans T.Coosemans, P.V.Bossche and J.V. Mierlo,Standardization work for BEV and HEV applications:critical appraisal of recent traction battery documents, Energies 5, January 2012.
- [106] W.Liu, C.Delacourt, C. Forgez and S.Pelessier, Study of graphite/NCA Li-ion cell degradation during accelerated aging tests- data analysis of the SimStock project, IEEE-VPPC, Chicago, 2011.
- [107] H. Cost et al, "Electric vehicle battery test procedures manual", USABC, Revision 2, January 1996.
- [108] Norme internationale CEI 62660-1, Eléments d'accumulateurs lithium-ion pour la propulsion des véhicules routiers électriques, Edition 1.0, Decembre 2010
- [109] Q.Badey, Etude des mécanismes et modélisation du vieillissement des batteries lithium-ion dans le cadre d'un usage automobile, Thèse de doctorat, Université PARIS SUD, Mars 2012.

Titre de thèse : INTERET D'UNE SOURCE D'ENERGIE ELECTRIQUE HYBRIDE POUR VEHICULE ELECTRIQUE URBAIN – DIMENSIONNEMENT ET TESTS DE CYCLAGE

Résumé : actuellement, la principale source d'énergie embarquée dans les véhicules électriques est composée de batteries Li-ion. Bien que les données fournies par les constructeurs de batteries sur les caractéristiques électriques (puissance, énergie et capacité nominale) de leur produit, soient fiables et exploitables, il n'est pas de même pour le vieillissement. En effet, la durée de vie fournie par les constructeurs est estimée sur la base des essais de charge/décharge à courant constant, alors que le vieillissement est un critère qui dépend vigoureusement des conditions réelles d'utilisation. Cette thèse fait partie des thématiques communes de travail que mène L'ESTACA en collaboration avec le L2EP pour réaliser des projets R&D sur la chaîne de traction des véhicules électriques. **L'objectif ce projet est d'étudier l'apport d'une source hybride composée de batteries Li-ion et des supercondensateurs, sur les performances d'un véhicule électrique urbain et d'évaluer l'impact de l'hybridation sur la durée de vie des batteries Li-ion.**

Dans un premier temps, une stratégie de gestion des flux énergétiques entre la batterie et le supercondensateur basée sur l'approche des règles déterministes a été appliquée pour montrer l'intérêt de l'association des différentes technologies de batterie Li-ion (haute puissance, haute énergie) avec le supercondensateur en fonction de l'autonomie. Cette méthode nous a permis de montrer l'avantage de l'hybridation pour certaines technologies et la non-nécessité d'une hybridation pour d'autres. A travers cette étude, on a pu proposer une solution optimale (masses, volumes, coûts, autonomie,...) composée d'une batterie énergétique et un supercondensateur.

La deuxième partie de cette thèse est consacrée à l'évaluation de l'apport de l'hybridation en termes de durée de vie. Dans ce cas, on a suivie l'évolution du vieillissement des deux batteries de type haute puissance et hautes énergie dans, respectivement, les configurations mono-source et hybride. Pour réaliser cette étude, un banc de tests, destiné au cyclage et la caractérisation des systèmes de stockage, a été utilisé. Les résultats obtenus, offriront la possibilité de se prononcer sur le type de batteries Li-ion qui pourrait être le plus intéressant pour l'alimentation des véhicules électriques.

Mots-clés : véhicule électrique, véhicule hybride, batteries Li-ion, supercondensateur, hybridation, gestion d'énergie, dimensionnement, vieillissement.

Thesis title: INTEREST OF A HYBRID ELECTRIC ENERGY STORAGE FOR AN URBAN ELECTRIC VEHICLE – SIZING AND LIFETIME TESTS

Abstract: Currently, the main embedded storage system supplying the electric vehicles is composed of Li-ion batteries. The electrical characteristics information's provided by the battery manufacturers (power, energy and capacity) are reliable; it is not the same for aging. Indeed, the lifetime gave by manufacturers is estimated on the basis of charge / discharge tests at constant current, while aging is a criterion which depends strongly on the real use conditions. This thesis is one of the common themes of work that ESTACA leads in collaboration with L2EP about the electric vehicles research projects. **The objective of this work is to study the interest of a hybrid source composed of Li-ion batteries and supercapacitors to supply an urban electric vehicle and evaluate the impact of hybridization on the Li-ion batteries lifetime.**

Firstly, an energy management strategy based on deterministic rules is developed to control the power between the battery and supercapacitor. To demonstrate the combination utility, different Li-ion battery technologies (Li-ion high power, high-Li-ion energy) are used on the sizing step. Through this study, we could propose an optimal solution (masses, volumes, costs, autonomy...) consisting of an energetic battery and supercapacitor. This study also shows that the batteries power type don't need hybridization, when the high energy batteries can't supply the vehicle without hybridization with the supercapacitors.

The second part of this thesis evaluates the hybridization contributions in terms of aging. In this case, we have followed the evolution of capacity and the internal resistance losses of high power and high energy batteries type in, respectively, single-source and hybrid configurations. For this study, a test bench, developed for cycling and characterization of storage systems, was used. The results obtained provide the opportunity to choose Li-ion battery technology that could be the most interesting for the supply of electric vehicles.

Keywords: electric vehicle, hybrid vehicle, Li-ion battery, supercapacitor, hybridization, energy management, sizing, aging
