



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Faculté de génie
Département de génie électrique et de génie informatique

**BLOC BATTERIE LI-ION POUR
VÉHICULES ÉLECTRIQUES: MÉTHODE
DE CLASSEMENT NOVATRICE EN
TEMPS RÉEL DES PARAMÈTRES
ÉLECTRIQUES DES CELLULES**

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie électrique

Alexandre Oliver TESSIER

Jury : Maxime R. DUBOIS (directeur) (UdeS)
João Pedro FERNANDES TROVÃO (UdeS)
Loic BOULON (UQTR)

RÉSUMÉ

Avec l'arrivée en masse des véhicules à traction électrique, la puissance sollicitée à des blocs de cellules chimiques ne cesse d'augmenter. Les nouvelles technologies développées pour répondre à la demande exposent un nouveau problème jamais observé sur les assemblages multi-cellules : la disparité des paramètres internes. Une étude a démontré que ces faibles variations de capacité ou de résistance interne causeront une dégradation prématurée si elles ne sont pas prises en comptes [7]. La littérature sur le sujet comprend plusieurs travaux qui tentent de palier à ce problème [2, 6, 23, 24] cependant très peu d'information n'est disponible pour quantifier ces divergences de paramètres internes. Ceux qui proposent des solutions viables le font généralement dans un contexte non transférable aux véhicules électriques ou hybrides.

Ce document présente une étude complète de l'état de l'art sur l'utilisation et la gestion des batteries au lithium-ion ainsi que l'analyse d'un nouvel outil de mesure pour système de gestion de batteries permettant de mesurer et d'utiliser ces dispersions de paramètres internes des cellules. L'algorithme de mesure sera basé sur un système de classement des données recueillies novateur permettant de répertorié les données selon les conditions de conduites vécues lors de la mesure plutôt qu'en fonction du temps. La conception d'un système de gestion de batteries capable de mettre en œuvre cet outil de mesure dans un contexte de véhicule électrique ainsi que l'élaboration de partons de charge/décharge des cellules, afin de les plonger dans des conditions similaires à celles vécues par un bloc batterie de véhicule électrique, seront aussi exposées.

La distribution des résistances internes des 16 cellules étudiées et une discussion de ces résultats complètera ce document.

Mots-clés : Véhicule électrique, Bloc batterie, Cellule au lithium, Système de gestion de batteries, Débalancement, Mesure des données, Classement, Statistique

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier le professeur Maxime R. Dubois, directeur de mon projet de maîtrise, pour ses conseils, son encadrement, son expérience et surtout sa patience inébranlable.

J'aimerais aussi remercier M. Alain Desrochers, directeur des affaires universitaires, de m'avoir donné l'opportunité de faire ma maîtrise au centre de technologies avancées (CTA) BRP-UdeS. Par le fait même, j'aimerais remercier le programme APC, sans qui mon projet n'aurait pu avoir autant de ressources.

Mes remerciements vont aussi à Patrick Quirion, directeur du projet, Ghislain Robert, Jasmin Rouleau ainsi qu'à toute l'équipe du CTA avec qui j'ai eu la chance de travailler pendant ces dernières années.

Je remercie aussi Mélanie Gagnon et Pascal Lamontagne pour leurs conseils et suggestions au niveau de la chimie des cellules électrochimiques.

Finalement, je remercie ma famille et mes amis de m'avoir supporté pendant ces longues années de travail. Votre support et vos encouragements m'ont permis de garder le moral devant ces nombreuses pages blanches.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Contexte	1
1.1.1	Les batteries de véhicules électriques : le nerf de la guerre	1
1.1.2	Le problème du déséquilibre entre cellules	3
1.1.3	La gestion d'énergie et l'égalisation cellule par cellule	4
1.2	Problématique de mesure des caractéristiques des cellules	5
1.3	Pistes de solutions	7
1.4	Contributions	8
1.5	Plan du document	9
2	ÉTAT DE L'ART DES ACCUMULATEURS ÉLECTROCHIMIQUES	11
2.1	Fonctionnement chimique des cellules	11
2.1.1	L'histoire de la cellule électrochimique	11
2.1.2	Réactions chimiques principales d'une cellule Li-ion	13
2.1.3	Différentes chimies pour différentes applications	16
2.1.4	Réactions chimiques non désirées et les dégradations	17
2.1.5	Zone d'opération sans risques	19
2.1.6	Modèles électriques associés	20
2.2	Fonctionnement électrique des cellules	20
2.2.1	Recharge et décharge	20
2.2.2	Capacité et estimation de la capacité	21
2.2.3	Efficacité variable des cellules et profondeur de décharge	23
2.2.4	État de charge	24
2.2.5	Résistance interne, résistance ohmique et résistance de polarisation	27
2.2.6	État de santé	29
2.2.7	Résistance de fuite	31
2.2.8	Effet de la température	31
2.2.9	Les branchements inter-cellules	32
2.2.10	Les défauts aléatoires	34
2.3	Système de gestion de batteries	35
2.3.1	Fonctions de base	35
2.3.2	Topologies de branchement d'un S.G.B.	41
2.4	Conclusion de l'état de l'art	45
3	IMPLÉMENTATION D'UN ALGORITHME DE CLASSEMENT SÉLECTIF. THÉORIE ET MISE EN ŒUVRE EXPÉRIMENTALE	47
3.1	Problématique	47
3.2	Méthodologie et hypothèses proposées	49
3.2.1	Objectifs	49
3.2.2	Hypothèses	51

3.3	Algorithme de classement des mesures	51
3.3.1	Carte de distribution des mesures des paramètres	52
3.3.2	Estimation avancée des paramètres selon l'expérience passée	59
3.4	Conclusion de l'implémentation	64
4	DEVELOPPEMENT DU BANC DE TEST	65
4.1	Montage expérimental	65
4.1.1	Présentation de la cellule utilisée	66
4.1.2	Choix des composantes physiques	69
4.1.3	Conception logicielle	78
4.2	Préparation des essais expérimentaux	83
4.2.1	L'environnement contrôlé	83
4.2.2	Le cycle de conduite WMTC	85
4.3	Conclusion du développement	87
5	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	89
5.1	Rappel de la problématique justifiant les tests	89
5.2	Résultats des essais	90
5.2.1	Fonctionnalité générale du S.G.B.	90
5.2.2	Fonctionnalité du S.G.B. sous le cycle WMTC	98
5.3	Distribution statistique des paramètres	101
5.3.1	Dispersion de la R_{in} en fonction du courant	101
5.3.2	R_{in} en fonction de l'É.D.C. et du courant	104
5.4	Retour sur les configurations de bloc batterie et l'équilibrage	106
5.4.1	Ligne en série	106
5.4.2	Cellules en parallèle	107
5.5	Courant minimum d'égalisation	107
5.6	Retour sur les choix de conception	108
6	CONCLUSION	111
6.1	Sommaire	111
6.1.1	Rappel du modèle utilisé de cellule au Li-ion	111
6.1.2	Rappel de la problématique	113
6.1.3	Rappel des résultats	114
6.2	Contributions	115
6.3	Travaux futurs	116
A	TYPES D'ÉGALISATEUR DE CHARGES	119
A.1	Dissipateurs	119
A.2	Transporteurs	119
A.3	Convertisseurs	120
B	INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES SUR LE LOGICIEL DÉVELOPPÉ	125
B.1	Définition et rôle de chaque module développé	125

B.2	Description des structures de données utilisées	127
C	RÉSULTATS COMPLETS	131
C.1	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant	131
C.2	Tableaux de données de R_{in}	140
C.3	Visualisation de la R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C.	145
	LISTE DES RÉFÉRENCES	155

LISTE DES FIGURES

1.1	La Jamais Contente, une voiture électrique du 19 ^e siècle.	1
1.2	Évolution prix du baril de pétrole	2
1.3	Cellules en surcharges	4
1.4	Plage utilisable d'un bloc batterie débalancée	6
2.1	Exemple de la pile voltaïque d'Alessandro Volta	12
2.2	Oxydoréduction d'une cellule LiFePO ₄ à la décharge	14
2.3	Modélisation électrique	21
2.4	Courbe de décharge d'une cellule à différents courants à 25 °C	22
2.5	Recharge CC-CV d'une cellule F014 d'EIG	22
2.6	Calibration de l'É.D.C. à pleine charge	26
2.7	Calibration de l'É.D.C. à 50 %	26
2.8	Calibration de l'É.D.C. à pleine décharge	26
2.9	Variation de la R_{in} en décharge en fonction de la température et de l'É.D.C.	28
2.10	Mesure de la R_{Ω} et R_{pol} depuis une impulsion de courant	30
2.11	Effet de la température sur la capacité effective	32
2.12	Branchements inter-cellules	33
2.13	Schéma d'un système de gestion de batteries générique	36
2.14	Topologie de système de gestion de batteries centralisé	42
2.15	Topologie de système de gestion de batteries modulaire	43
2.16	Topologie de système de gestion de batteries maître-esclave	44
2.17	Topologie de système de gestion de batteries distribué	45
3.1	Emplacement logiciel de l'algorithme de classement	53
3.2	Comparaison entre la méthode chronologique et la méthode proposée	55
3.3	Segmentation des coordonnées de la matrice de mesure des paramètres	58
3.4	Délai imposé par le filtrage des mesures	60
3.5	Exemple de valeurs lues sur la clé USB	64
4.1	Cellule utilisée	66
4.2	Charge électronique 8526 de PK Precision	67
4.3	Schéma bloc du montage réalisé	70
4.4	Schéma fonctionnel simple du BQ76PL536	73
4.5	Module d'évaluation BQ76PL536-EVM-3	73
4.6	Schéma de branchement des thermistances	75
4.7	Ratio de la résistance de 1.82 k Ω en fonction de la température	75
4.8	Photo du bloc batterie	77
4.9	Schéma des interactions logicielles des modules du S.G.B.	79
4.10	Schéma des interactions logicielles des modules du Simulateur de conduite	80
4.11	Profil de courant pour la mesure de la R_{in} à la décharge	86
4.12	Profil de courant pour la mesure de la R_{in} à la charge	87
4.13	Représentation du cycle WMTC	88

4.14	Profil de courant selon le cycle WMTC pour un véhicule hybride branchable à trois roues	88
5.1	Mesure de la tension individuelle par le S.G.B.	90
5.2	Mesure de la tension individuelle par le S.G.B. agrandie	91
5.3	Mesure du courant de ligne par le S.G.B.	92
5.4	Mesure du courant de ligne par le S.G.B. agrandie	93
5.5	Mesure des R_{in} pendant la décharge	94
5.6	Mesure des R_{in} pendant la décharge agrandie	94
5.7	Visualisation des R_{in} en fonction du courant	95
5.8	É.D.C. des cellules en fonction du temps	95
5.9	É.D.C. des cellules agrandie sur le départ	96
5.10	É.D.C. des cellules agrandie sur la fin de décharge	96
5.11	É.D.C. des cellules agrandie sur la fin de charge	97
5.12	Mesure de la tension individuelle par le S.G.B. sous le cycle WMTC	98
5.13	Mesure du courant de ligne par le S.G.B. sous le cycle WMTC	99
5.14	Mesure des R_{in} sous le cycle WMTC	99
5.15	Visualisation des R_{in} en fonction du courant sous le cycle WMTC	100
5.16	É.D.C. des cellules en fonction du temps sous le cycle WMTC	101
5.17	Nombre d'occurrences des R_{in} en fonction du courant - cellule # 13	102
5.18	Nombre d'occurrences des R_{in} en fonction du courant - cellule # 11	103
5.19	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 9	105
5.20	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 4	105
6.1	Modèle électrique avec effet de relaxation [2]	112
6.2	Mesure de la R_{Ω} et R_{pol} depuis une impulsion de courant	112
A.1	Égalisation par dissipateur	120
A.2	Égalisation par transport d'énergie	121
A.3	Égalisation par conversion d'énergie	122
C.1	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 1	131
C.2	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 2	132
C.3	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 3	132
C.4	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 4	133
C.5	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 5	133
C.6	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 6	134
C.7	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 7	134
C.8	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 8	135
C.9	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 9	135
C.10	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 10	136
C.11	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 11	136
C.12	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 12	137
C.13	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 13	137
C.14	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 14	138
C.15	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 15	138

C.16	Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 16	139
C.17	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 1	145
C.18	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 2	146
C.19	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 3	146
C.20	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 4	147
C.21	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 5	147
C.22	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 6	148
C.23	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 7	148
C.24	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 8	149
C.25	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 9	149
C.26	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 10	150
C.27	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 11	150
C.28	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 12	151
C.29	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 13	151
C.30	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 14	152
C.31	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 15	152
C.32	R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 16	153

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Chimies disponibles pour les cathodes au lithium	16
2.2	Chimies disponibles pour les anodes au lithium	17
3.1	Segmentation des coordonnées de la matrice de mesure des paramètres	57
3.2	Poids associé aux régions de l'ensemble \mathbb{E}	63
4.1	Caractéristiques de la cellule ANR26650M1A de A123	67
4.2	Étalonnage des cellules ANR26650M1A de A123	69
4.3	Profil de courant pour la mesure de la R_{in} à la décharge	86
4.4	Profil de courant pour la mesure de la R_{in} à la charge	86
5.1	Varations de la R_{in} de la cellule # 4	103
5.2	Varations de la R_{in} de la cellule # 8	104
5.3	Moyennes des variations de la R_{in} des 16 cellules	104
6.1	Moyennes des variations de la R_{in} des 16 cellules	115
B.1	Description des modules logiciels du système de gestions de batterie implantés	125
B.3	Description des modules logiciels du simulateur de véhicule	126
C.1	Varations de la R_{in} de la cellule # 1	140
C.2	Varations de la R_{in} de la cellule # 2	140
C.3	Varations de la R_{in} de la cellule # 3	140
C.4	Varations de la R_{in} de la cellule # 4	141
C.5	Varations de la R_{in} de la cellule # 5	141
C.6	Varations de la R_{in} de la cellule # 6	141
C.7	Varations de la R_{in} de la cellule # 7	141
C.8	Varations de la R_{in} de la cellule # 8	142
C.9	Varations de la R_{in} de la cellule # 9	142
C.10	Varations de la R_{in} de la cellule # 10	142
C.11	Varations de la R_{in} de la cellule # 11	142
C.12	Varations de la R_{in} de la cellule # 12	143
C.13	Varations de la R_{in} de la cellule # 13	143
C.14	Varations de la R_{in} de la cellule # 14	143
C.15	Varations de la R_{in} de la cellule # 15	143
C.16	Varations de la R_{in} de la cellule # 16	144
C.17	Moyennes des variations de la R_{in} des 16 cellules	144

LEXIQUE

Terme technique	Équivalence anglaise	Définition
Ampère-heure	Ampere hour	Mesure d'une quantité d'électrons d'une cellule/batterie. Référence d'un ampère sur une durée d'une heure. 1 Ah = 3600 Coulombs.
Batterie	Battery	Assemblage de modules en séries et en parallèles pour former un banc de cellules.
Bloc batterie	Battery pack	Assemblage d'une batterie incluant les supports mécaniques, contacteurs, fusible, S.G.B., etc.
C	C	Unité en courant utilisé pour la décharge ou la recharge d'une cellule. 1 C équivaut à une fois la capacité de la cellule. L'unité C d'une cellule de 2.3 Ah sera 2.3 A.
Cellules	Cell	Unité chimique capable d'accumuler une énergie électrique par le biais d'une réaction d'oxydoréduction. Elle est composée d'une cathode, d'une anode et d'un électrolyte.
Cycle	Cycle	La combinaison d'une charge et d'une décharge complète d'une cellule
État de charge	State of charge	Représentation en % de la quantité d'énergie disponible dans une cellule
État de santé	State of health	Représentation en % de la combinaison de la capacité d'une cellule à donner et recevoir de l'énergie, de sa capacité et de son âge.
$LiFePO_4$	$LiFePO_4$	Type de cellule composé d'une cathode de $LiFePO_4$, d'une anode en graphite et d'un électrolyte de $LiPF_6$.
Ligne	Serie	Bloc de cellules ou de module en série atteignant la tension nominale d'un moteur à propulsion électrique. Une batterie peut être séparée en plusieurs lignes pour faciliter la gestion ou pour atteindre la capacité requise.
Module	Module	Assemblage de plusieurs cellules géré comme un bloc unitaire. Niveau d'assemblage intermédiaire entre une cellule et un bloc batterie.
Profondeur de décharge	Depth of discharge	Expression en ampère-heure de la quantité d'énergie extraite d'une cellule depuis sa dernière recharge complète.
Système de gestion de batteries	Battery management system	Unité électronique placée près d'une batterie dans le but d'effectuer une gestion de l'énergie et de la sécurité.
Tension en circuit ouvert	Open circuit voltage	Tension qu'affiche une cellule complètement au repos (aucune perte thermique ni d'effet de relaxation).

Terme technique	Équivalence anglaise	Définition
Watt-heure	Watt hour	Unité d'énergie en joules représentant un watt d'énergie sur une période d'une heure (3600 joules). La multiplication d'un volt par un ampère-heure donne un watt-heure.
Zone d'opération sans risque	Safe operating area	Conditions de tension, de courant et de température dans lesquels une cellule n'affiche pas de dégradation autre que son usure normale. L'utilisation d'une cellule en dehors de cette zone dégrade rapidement la cellule

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
A / Ah	Ampère et Ampère-heure
CAN	Standard de communication : <i>Controlled Area Network</i>
CTL	Contrôle
DEL	Diode électroluminescente
É.D.C.	État de charge
É.D.S.	État de santé
I2C	Standard de communication : <i>Inter Integrated Circuit</i>
LiFePO ₄	Lithium-Fer-Phosphate
MOSFET	Dérivé de l'anglais : <i>Metal-Oxide-Semiconductor-field-effect-transistor</i>
P.D.D.	Profondeur de décharge
R _{in}	Résistance interne
S.G.B.	Système de gestion de batteries
SPI	Standard de communication : <i>Serial Peripheral Interface</i>
T.C.O.	Tension en circuit ouvert
UART	Standard de communication : <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USB	Standard de communication : <i>Universal Serial Bus</i>
V	Volts
V.É.	Véhicule(s) électrique(s)
V.É.H.	Véhicule(s) électrique(s) hybride(s)
V.É.H.B.	Véhicule(s) électrique(s) hybride(s) branchable(s)
W / Wh	Watt et Watt-heure
Z.O.S.R.	Zone d'opération sans risques

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Contexte

1.1.1 Les batteries de véhicules électriques : le nerf de la guerre

Parmi les choix disponibles de systèmes de propulsion pour les voitures automobiles, il existe depuis longtemps une bonne rivalité entre les moteurs à combustion interne et les moteurs électriques. Au début du 20^e siècle, les moteurs électriques annonçaient une efficacité énergétique supérieure et affichaient un avenir très prometteur, avec l'exemple de la voiture électrique *La Jamais Contente* (figure 1.1 [57]) qui raflât le record de vitesse de l'époque et qui fût la première voiture à dépasser la barre des 100 km/h en 1899 [24]. Cependant, l'immense densité énergétique des hydrocarbures utilisés pour alimenter en énergie les moteurs à combustion, conférant aux véhicules une autonomie supérieure vis-à-vis ceux alimentés par des batteries électrochimiques et propulsés par des moteurs électriques, força les marchés automobiles à délaisser les technologies des véhicules électriques et se retrouvèrent rapidement dominés par les moteurs à combustion interne [60].

Rien n'affectera cette situation pour la première moitié du 20^e siècle, le baril de pétrole conservera un prix passablement stable et demeurera accessible. Par contre, comme le montre le rapport de BP sur l'utilisation de l'énergie (figure 1.2 [5]), le prix du baril a connu une forte hausse depuis les années 1970. Parallèlement, les nouvelles connaissances sur l'environnement ont dé-

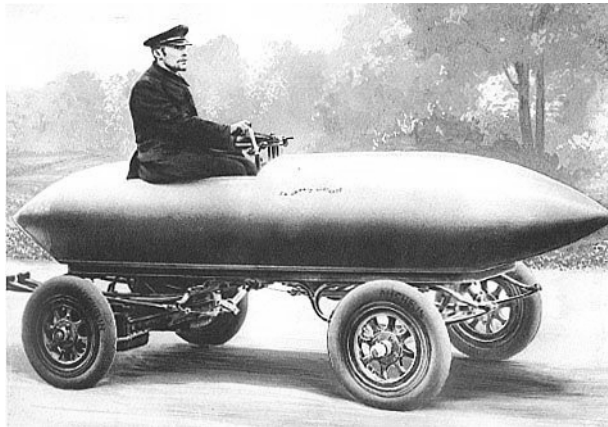


Figure 1.1 La Jamais Contente, une voiture électrique du 19^e siècle [57]).

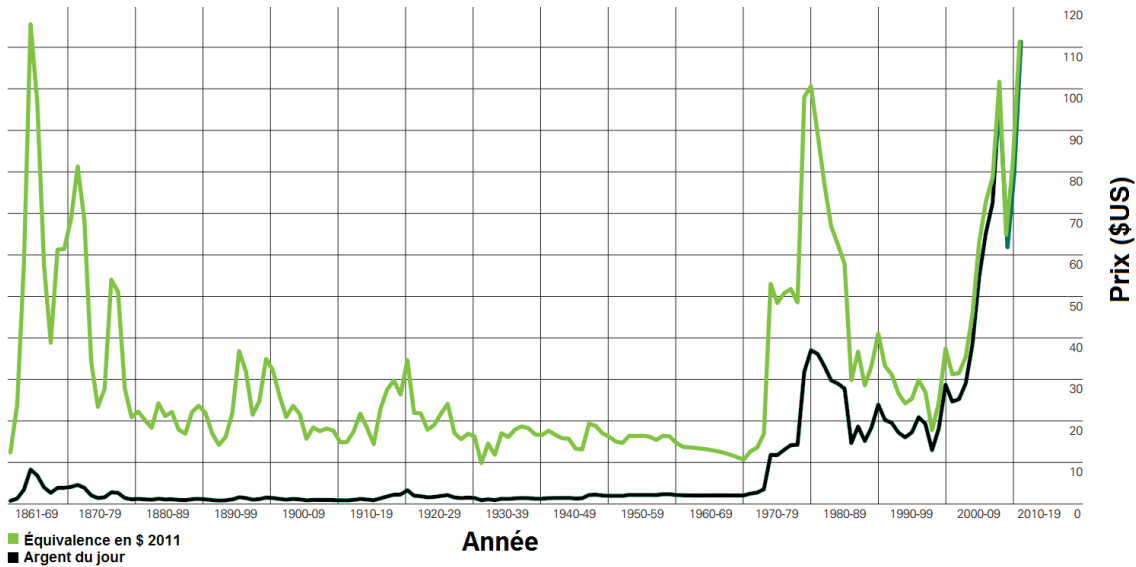


Figure 1.2 Évolution prix du baril de pétrole [5]

montré qu'une utilisation abusive des combustibles fossiles cause un grand tort à notre planète et à nos écosystèmes (gaz à effet de serre, pollution du sol, etc.). La combinaison de ces deux faits a amené la population vers un nouveau paradigme : un désir de retourner vers les véhicules électriques. Même si l'électricité utilisée dans ces véhicules électriques est produite par des centrales au charbon ou au pétrole, ces dernières sont souvent plus efficaces que les moteurs à combustion utilisés dans les automobiles, libérant ainsi une quantité de CO₂ moindre pour la même quantité d'énergie à la sortie [30, 35].

Malgré ce nouvel engouement pour les véhicules électriques, les consommateurs hésitent grandement au moment de magasiner une nouvelle voiture. Trois facteurs importants peuvent expliquer cette incertitude :

1. le prix élevé du véhicule, de 5 000\$ à 10 000\$ plus cher que son équivalent à essence ;
2. l'autonomie grandement inférieure des véhicules électriques par rapport aux capacités des véhicules à essence ;
3. le coût récurrent élevé de remplacement et la durée de vie assez faible des accumulateurs d'énergie.

Dans le cadre de ce mémoire, le troisième point sera traité. En particulier, il sera développé comment la supervision électronique est essentielle à l'optimisation de la durée de vie des accumulateurs électrochimiques. En effet, même si les fabricants d'accumulateurs chimiques estiment que leurs cellules supportent au-delà de 2000 cycles de charge/décharge sans perte significative de performances, il a été démontré qu'un banc de cellules utilisé sans surveillance électronique ne

peut pas survivre à plus de quelques centaines de cycles ; forçant un remplacement plus fréquent du bloc batterie [7].

L'amélioration de la surveillance électronique du bloc batterie ainsi qu'une compréhension plus exacte de l'interaction entre les nombreuses cellules d'un bloc batterie permettra non seulement une durée de vie plus grande, mais aussi d'une utilisation plus optimale de l'énergie disponible, augmentant du même coup l'autonomie du véhicule dans lequel ce bloc batterie est monté. Si la communauté désire affirmer une indépendance face au pétrole, elle devra se pencher sur ce problème de vieillissement prématuré, comprendre le débalancement entre les cellules pour ensuite le contrôler et l'amoinrir autant que possible.

1.1.2 Le problème du débalancement entre cellules

Le lithium étant beaucoup plus léger que le plomb, les chimies de cellules au lithium-ion permettent d'obtenir plus d'énergie pour une même masse. Comme la masse est un facteur important pour les performances d'un véhicule électrique, le lithium est rapidement devenu le choix de prédilection lors des choix de conception [24]. Toutefois, alors que l'utilisation et la gestion des cellules au plomb étaient passablement simples et intrinsèquement sécuritaires, la transition vers des blocs batteries au lithium a exposé de nouvelles problématiques. Dans les débuts des cellules au lithium, on a pu constater que des cellules au lithium prenaient feu, on a pu observer des dégradations sévères inexplicables ou même des explosions de cellules. Les concepteurs ont rapidement conclu que le lithium offrait plus de performances que les cellules acide-plomb mais avait aussi besoin d'une surveillance beaucoup plus étroite [2].

Dans l'utilisation des batteries au lithium dans de petits appareils électroniques fonctionnant à quelques volts, les problèmes liés à la gestion de l'énergie affectent peu notre utilisation de ces appareils. Toutefois, lorsque les chaînes de cellules de quelques volts sont devenues des chaînes de quelques centaines de volts, avec plusieurs dizaines de cellules connectées en série, pour ainsi suffire à la demande en tension des moteurs électriques, il a été observé un phénomène de débalancement entre les cellules. La combinaison d'une utilisation solidaire en courant d'une série de cellules avec les faibles variations de constructions de chacune d'elles, entraînant ainsi des faibles variations de résistance interne et de capacité d'une cellule à l'autre le long de la chaîne, causera au fil du temps une différence importante des *états de charge* (É.D.C.) entre cellules. Lors du vieillissement des cellules, la résistance interne et la capacité de chaque cellule varieront à des vitesses différentes et accentueront ces différences d'état de charge entre deux cellules. Si ces débalancements ne sont pas pris en compte et que les cellules sont supposées uniformes, certaines cellules du bloc batterie pourront se retrouver à l'extérieur de la limite prescrite par le fabricant, appelée la *zone d'opération sans risques* ou Z.O.S.R., et leur dégradation s'accé-

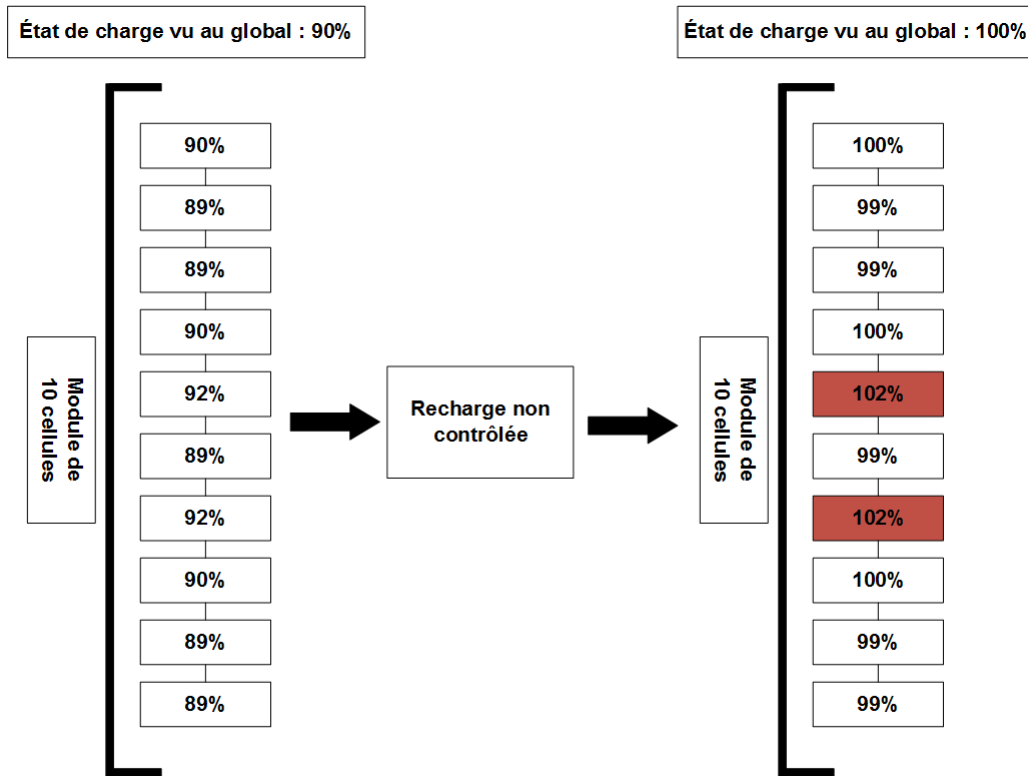


Figure 1.3 Cellules en surcharges

lèrera drastiquement [1, 2, 24]. La figure 1.3 donne un exemple d'une surcharge causée par les débalancements d'état de charge ; ces cellules pourraient devenir dangereuses, elles pourraient exploser, s'enflammer ou simplement se dégrader. Les détails de ces dangers seront approfondis à la section 2.1.4.

Les débalancements de l'É.D.C. n'étaient pas un problème anciennement avec les batteries de chimie acide-plomb car la surcharge de celles-ci actionnait de nouvelles réactions chimiques et permettait implicitement de les équilibrer [24]. Cette opération de surcharge ne peut plus être utilisée sur les cellules au lithium car les nouvelles réactions chimiques présentes lors d'une surcharge détruisent les cellules au lieu de les équilibrer. De plus, les cellules en dehors de la zone d'opération sans risques dégageront beaucoup plus de chaleur que les autres, amenant un autre lot de problèmes.

1.1.3 La gestion d'énergie et l'égalisation cellule par cellule

Afin de pallier à ces écarts d'état de charge et assurer la protection du bloc batterie, la grande majorité des équipements automobiles utilisent une intelligence électronique connectée à chacune des cellules du bloc batterie. On appelle ce dispositif un *système de gestion de batteries* ou

S.G.B. Les premières générations de S.G.B. ont été en mesure de lire la tension individuelle de chaque cellule et d'arrêter l'utilisation d'une chaîne si l'une de ses cellules sort de la Z.O.S.R. Cela signifie que la recharge est suspendue sur toute la chaîne lorsque la meilleure cellule (cellule 3 de la figure 1.4 [2]) se retrouve pleine. Dans la même optique, la décharge est bloquée sur toute la chaîne lorsque la pire cellule (cellule 1 de la figure 1.4 [2]) est vide. Sur cette base de décision, la différence d'É.D.C. entre les deux cellules extrêmes d'une chaîne représente une énergie impossible à utiliser sans endommager les cellules. Cette énergie stagnante vient du coup limiter énormément les performances du véhicule qu'elle alimente. La figure 1.4 [2] illustre cette relation entre l'É.D.C. de cellules débalancées et l'É.D.C. effectif de la batterie contenant ces cellules. Le bloc batterie ne peut jamais utiliser toute l'énergie accumulée sans pousser une de ses cellules en surcharge ou en décharge trop profonde, causant du même coup un vieillissement prématuré des cellules.

Suite à ces observations, une seconde stratégie de contrôle a émergé. Afin de réduire les écarts d'É.D.C. entre les cellules, les S.G.B. commencèrent à égaliser les cellules de manière passive. Cela signifie que le S.G.B. nivelle les É.D.C. de toutes les cellules au niveau le plus bas par une dissipation thermique de l'énergie superflue qui s'est accumulée sur les cellules les plus fortes. Cette méthode, très simple à implémenter, permet de réduire au minimum l'énergie stagnante et d'utiliser une plus grande plage d'un bloc batterie. La chaîne solidaire de cellules est cependant limitée par la cellule ayant le moins de capacité, étant la première à activer les seuils de sécurité de décharge du S.G.B. [2]. Cette mise à niveau par dissipation thermique porte le nom d'égalisation passive. À l'inverse, une troisième stratégie est de redistribuer l'énergie entre les cellules pour équilibrer les charges dans la chaîne. Ainsi, le S.G.B. peut compenser pour les cellules faibles, soit en leur injectant de l'énergie ou en leur demandant moins d'énergie que les autres. Un tel mouvement d'énergie est appelé une égalisation active. Comme aucun S.G.B. ne peut être parfait, un niveau d'efficacité représentera le rapport entre l'énergie redistribuée et l'énergie consommée.

1.2 Problématique de mesure des caractéristiques des cellules

Une fois les caractéristiques internes des cellules individuelles bien définies, il est possible de construire une table de décision en fonction des technologies d'équilibrage disponibles. Cependant, une difficulté réside aujourd'hui dans la mesure en temps réel de ces paramètres internes des cellules. La mesure des É.D.C. individuelles des cellules ne peut se faire directement : les S.G.B. doivent estimer ces valeurs depuis d'autres mesures, comme la tension aux bornes de la

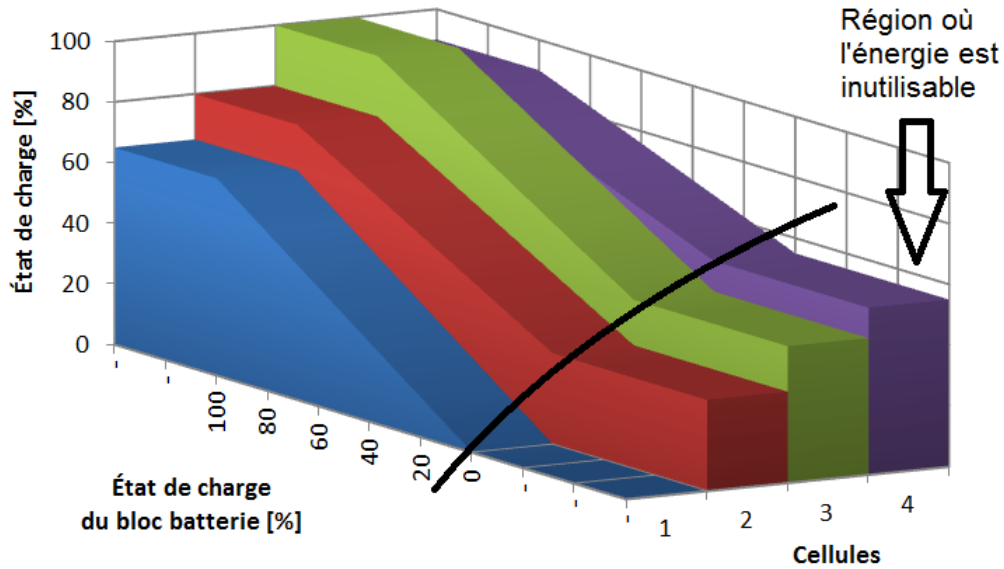


Figure 1.4 Plage utilisable d'un bloc batterie débalancée [2]

cellule et l'historique de la circulation du courant dans la chaîne. Comme les cellules sont le site de phénomènes chimiques parfois complexes, la relation entre ces deux mesures (tension et historique de courant) et l'état de charge de la cellule sera également complexe et difficile à définir. Par exemple, la présence du plateau de tension au centre de la courbe de décharge, l'existence d'une efficacité non constante pendant la décharge (donc une variation de la résistance interne en fonction du courant), l'ajout des effets de relaxation de la tension par l'effet capacitif et par la considération des autres phénomènes décrits dans l'état de l'art, il sera très difficile d'avoir une information claire et précise sur l'état de charge avec uniquement l'information du courant et de la tension à l'instant de la mesure. Pour être en mesure de bien modéliser le comportement de ses cellules, le S.G.B. devra combiner les mesures de tension et de courant décrites ci-haut avec d'autres mesures prises au préalable, comme la résistance interne ou la capacité, lui permettant ainsi d'augmenter la précision et la fiabilité de ses prédictions. Or, il sera expliqué dans l'état de l'art comment les paramètres utilisés dans les modèles actuels se modifient par rapport aux conditions d'utilisations ; par exemple, la résistance interne qui sera dépendante de l'amplitude du courant de décharge et de l'É.D.C. ponctuel [18], rendant le travail d'estimation du S.G.B. encore plus complexe.

Même si certains ont développé des filtres de Kalman ou des filtres d'ordre très élevé permettant de prendre en considération les variations des paramètres selon des conditions d'utilisation [12], la puissance de calcul nécessaire pour converger ces modèles complexes vers des valeurs précises ne conviennent pas bien aux requis de faible puissance des systèmes embarqués et aux requis de rafraîchissement des données des véhicules électriques ou hybrides.

À l'inverse, les modèles d'ordre plus modeste, convenables aux systèmes embarqués de faibles puissances, se basent plutôt sur du filtrage pour contrebalancer les phénomènes cités ci-haut. Dans un environnement où les conditions de décharge des cellules sont constantes (i.e. dans un laboratoire) et où les paramètres internes des cellules sont facilement prédictibles de par la constance des événements, une approche par filtrage rapporte généralement des bons résultats et fait converger les estimations vers des valeurs très près de la réalité. Cependant, lorsque ces méthodes sont appliquées à des conditions d'utilisations variables et passablement aléatoires, les temps de réaction des filtres nuisent à la précision des mesures et faussent le résultat final. Au final, la persistance des estimations et l'absence de point de mesures solides amènent la sommation des incertitudes de mesures à occuper le même ordre de grandeur que l'amplitude des différences d'É.D.C. que le S.G.B. tente de pallier.

Ainsi, l'objectif de ce mémoire est de proposer un algorithme de mesure simple capable de soutenir les conditions pseudo-aléatoires des cycles de conduites et suffisamment précise pour mesurer l'évolution et les écarts des paramètres en temps réel, le tout dans un système embarqué de faible puissance de calcul. Cette nouvelle approche de mesure sera ensuite validée par des mesures expérimentales en laboratoire. Une bonne précision permettra la quantification des différences des paramètres internes de chaque cellule et aidera la prédiction de leurs comportements ; permettant ensuite d'augmenter la durée de vie utile du bloc batterie et d'améliorer la sécurité générale de son utilisation.

1.3 Pistes de solutions

Le nouvel algorithme de mesure proposé dans ce mémoire exposera une nouvelle approche : un filtrage multidimensionnel permettant de considérer uniquement les données appartenant aux mêmes conditions d'utilisation. Cette technique devrait fournir sensiblement les mêmes performances que les filtres de haut niveau tout en demandant la puissance de calcul des filtres traditionnels. Les difficultés résideront dans la gestion de la priorité des tâches à exécuter par le microcontrôleur, dans la définition des limites des régions multidimensionnelles à utiliser selon la mémoire disponible et dans la manipulation de filtres numériques à fréquences d'échantillonnages aléatoires. La sortie de cet algorithme devrait permettre une lecture suffisamment précise, malgré l'environnement de mesure pseudo-aléatoire, pour faire ressortir une carte de distribution des paramètres internes.

L'étude de cette carte permettra de quantifier des données jamais quantifiées par le passé, par exemple les avantages d'une égalisation active versus une égalisation passive ou la prévision de la durée de vie utile des cellules en fonction des cycles de conduites. De plus, de nouvelles

philosophies d'équilibrage pourraient être explorées ; par exemple, s'il y avait des gains à faire une égalisation basée sur la puissance disponible (référéncée sur un cycle de conduite) plutôt que sur les É.D.C. des cellules.

Si cette solution porte des fruits satisfaisants, ce nouvel outil de mesure pourra être appliqué à n'importe quel S.G.B., indépendamment de la chimie de cellule, de la quantité, ou de la puissance du bloc batterie. Il pourra être utilisé pour les appareils de téléphonie mobile intelligente, pour les systèmes d'alimentation de satellites, ou même pour les systèmes d'alimentation auxiliaire anti-interruption d'usines.

1.4 Contributions

Certains des modèles permettent d'estimer l'état global des cellules, mais sont généralement d'ordre élevé pour fournir une précision accrue pour l'avancement de la compréhension du comportement des cellules au lithium, par contre, il est peu probable d'envisager de les implanter dans un véhicule électrique ou hybride, en raison du besoin en puissance de calcul. Ainsi, l'algorithme de mesure proposé dans ce mémoire permettra d'offrir aux fabricants une nouvelle alternative pour contrôler et surveiller les blocs batteries destinés aux véhicules électriques.

De plus, la possibilité de mesurer certains nouveaux éléments, comme la distribution statistique des paramètres, donnera aux analyses de nouvelles bases de comparaison pour discriminer ou privilégier différentes stratégies, non seulement pour l'élaboration des stratégies de contrôle pour la surveillance du bloc batterie, mais aussi pour toute autre stratégie au sein du véhicule. Par exemple, il n'est pas rare de voir le contrôleur central limiter la vitesse maximale d'un véhicule basé sur une baisse de l'adhérence des pneus (en cas de pluie) ; l'algorithme présenté étant capable de mesurer l'évolution de l'état de vie et de la résistance interne des cellules, le contrôleur central pourrait maintenant être programmé pour limiter la vitesse maximale du véhicule dans certaines conditions afin de maximiser la durée de vie des cellules.

Ce même algorithme pourrait aussi servir pour d'autres applications où l'utilisation de cellules au lithium se fait par bloc de quelques centaines. Par exemple, il permettrait potentiellement d'améliorer les systèmes d'alimentations de satellites de communication en orbite ; où la survie des cellules joue un rôle dominant dans la durée de vie générale du satellite. Les systèmes d'alimentations sans interruption (*uninterruptible power supply* ou *UPS* en anglais) utilisent, eux aussi, des blocs batteries de cellule au lithium et, tout comme les véhicules électriques, délivrent parfois une grande puissance. Les concepteurs de ceux-ci pourront, eux aussi, profiter des fruits de cette recherche.

1.5 Plan du document

Ce mémoire fera l'exposition complète de l'état de l'art actuel des cellules au lithium ainsi que des caractéristiques des S.G.B. qui les entourent. À la lueur de ces explications, la problématique citée ci-haut sera approfondie plus en détails. Un nouvel algorithme de classement permettant de contrer cette problématique sera présenté. Le plan du développement technique d'un S.G.B. permettant la mesure dynamique et précise des paramètres internes de chaque cellule dans un environnement aléatoire ainsi qu'une présentation des résultats obtenus seront exposés. Une discussion et une analyse de ces résultats décriront les gains effectués face à la problématique. Pour finir, une vision future sur les améliorations possibles pour cet algorithme sera présentée.

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART DES ACCUMULATEURS ÉLECTROCHIMIQUES

Comme les caractéristiques des cellules au lithium sont passablement complexes, les discussions autour des rôles des systèmes de gestion de batteries rattachés sont autant plus délicates. Pour bien saisir chacun des concepts en cause, cette section fera l'état de l'art complet sur les accumulateurs électrochimiques. Les réactions chimiques en causes seront abordées en premier lieu puis le pont entre ces réactions chimiques et les modélisations électriques sera expliqué. Pour finir, les caractéristiques et les rôles des systèmes de gestion de batteries seront approfondis.

2.1 Fonctionnement chimique des cellules

2.1.1 L'histoire de la cellule électrochimique

Malgré les découvertes en 1936 d'un vase qui aurait pu être utilisé comme pile électrochimique au 3^e siècle avant Jésus-Christ [56, 62], l'explication rationnelle du fonctionnement des cellules électrochimiques a été donnée en l'an 1800 par Alessandro Volta. La première forme de pile électrique moderne, la pile voltaïque (figure 2.1)[59]), était formée de plaques de zinc et de cuivre séparés par un carton humidifié avec un acide. Même si cette pile était fonctionnelle, elle n'était pas encore très conviviale : il fallait souvent humecter les lingettes d'acide et changer les plaques de zinc ou de cuivre lorsque la cellule était déchargée. Une percée importante arriva lorsque Gaston Planté, en 1859, proposa la première batterie rechargeable, composée d'électrodes à l'acide-plomb. La simplicité de fabrication et les capacités de décharges très élevées ont fait de cette batterie le choix de prédilection pour les sources d'énergie auxiliaires dans les domaines des transports et des industries pendant plus de 150 ans. Notamment, grâce à cette source d'énergie, les moteurs à combustion des véhicules conventionnels ont pu démarrer électriquement sans effort pour le conducteur.

La chimie acide-plomb a cependant quelques mauvais côtés : elle est volumineuse et lourde, la rendant peu pratique pour les petits appareils électriques comme les montres ou les télécommandes de télévisions. Ainsi, les avancées technologiques sur l'électrochimie ont permis éventuellement de fabriquer de nouveaux types de piles basées sur une chimie de nickel-cadmium (Ni-Cd). Cette nouvelle combinaison a permis d'avoir une meilleure densité énergétique et a



Figure 2.1 Exemple de la pile voltaïque d’Alessandro Volta [59]

donné naissance à une panoplie de nouveaux appareils à batterie, notamment l’arrivée sur le marché des outils de quincaillerie à batterie. Cette solution n’a pas pu durer très longtemps, car on s’est vite rendu compte que le cadmium utilisé dans ces cellules était très nocif pour l’environnement. De ce fait, il y a maintenant plusieurs législations à travers le monde qui limitent ou qui empêchent la production de cellule Ni-Cd.

Parallèlement, plusieurs chimistes ont vu jour pour répondre aux besoins que les grosses batteries au plomb ne pouvaient répondre, soit les petits appareils électriques. Cependant, les agencements proposés, comme le zinc-manganèse, le zinc-mercure, le nickel-carbone ou le zinc-argent, ne pourront jamais être utiles pour de fortes puissances à cause du prix des matériaux nécessaire pour la fabrication.

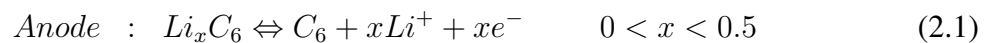
Vers les années 1990, il est arrivé sur le marché deux nouvelles chimies : le lithium et nickel-hydrure métallique (NiMH). Les piles NiMH, par rapport aux piles précédentes, n’étaient composées d’aucun matériel nocif pour l’environnement (plomb ou cadmium). Cette chimie a cependant comme désavantage important son effet mémoire : effet qui réduit la capacité totale de la cellule si elle n’est pas complètement déchargée avant la recharge, contrainte limitante dans de nombreuses applications. Le lithium, de son côté, permet une bonne densité énergétique et une bonne puissance instantanée. Il peut former des piles primaires (non rechargeables) s’il est utilisé sous sa forme métallique ou des piles secondaires (rechargeable) s’il est utilisé sous sa forme ionique ; respectivement appelés pile au **lithium** et pile au **lithium-ion**. En plus, le lithium est très abondant sur notre planète et n’est pas nocif pour l’environnement. C’est pourquoi au-

aujourd'hui le lithium est l'élément le plus valorisé pour les piles, autant pour les applications de faible puissance, comme les batteries de type AA, que pour les applications de grande puissance, comme les véhicules électriques.

2.1.2 Réactions chimiques principales d'une cellule Li-ion

L'oxydoréduction

Le principe fondamental sur lequel repose une cellule pour produire de l'électricité est une réaction d'*oxydoréduction* (aussi appelée rédox) [25, 26, 47, 55], composée de deux demi-réactions, l'une d'oxydation et l'autre de réduction. L'oxydation est la demi-réaction où il y a une perte d'électrons et la formation de cations libres (Li^+ dans le cas d'une cellule au lithium). L'électrode où se produira cette oxydation est appelée l'anode. La réduction est la demi-réaction où il y a un gain en électrons et où les cations sont transformés en produits. L'électrode où se produit la réduction est appelée la cathode. Même si la cathode et l'anode s'inversent lors de la recharge, la convention veut que le nom des électrodes soit déterminé depuis leur état lors de la décharge. Selon la chimie utilisée, il y a aussi parfois la formation d'anions libres pendant l'oxydoréduction. L'espèce qui agit comme donneur d'électron est appelée le réducteur et l'espèce qui capte cet électron est appelée l'oxydant. Une demi-réaction ne peut jamais agir seule ; ainsi, pour que l'oxydoréduction s'effectue, les électrodes doivent reposer dans une solution permettant les échanges d'ions, appelée électrolyte. La figure 2.2 [55] illustre une rédox pour une cellule ayant une cathode de lithium-fer-phosphate (LiFePO_4), une anode de carbone intercalé de lithium (LiC_6) et un électrolyte d'hexafluorophosphate de lithium (LiPF_6) [10, 14, 39, 64]. Les demi-réactions à la décharge sont donc :



Avec cette chimie, l'électrolyte LiPF_6 n'intervient pas dans la réaction, il ne sert que de jonction entre les électrodes. Lorsque la cellule est chargée, l'anode est remplie de molécules de lithium et la cathode a quelques molécules de lithium, mais sa composition a beaucoup d'imperfections et de trous. Lorsque l'on décharge la cellule, les Li^+ se détachent de l'anode, formant ainsi des trous dans la structure de LiC_6 , et se combinent à la cathode et remplissent graduellement les trous disponibles dans la structure de LiFePO_4 .

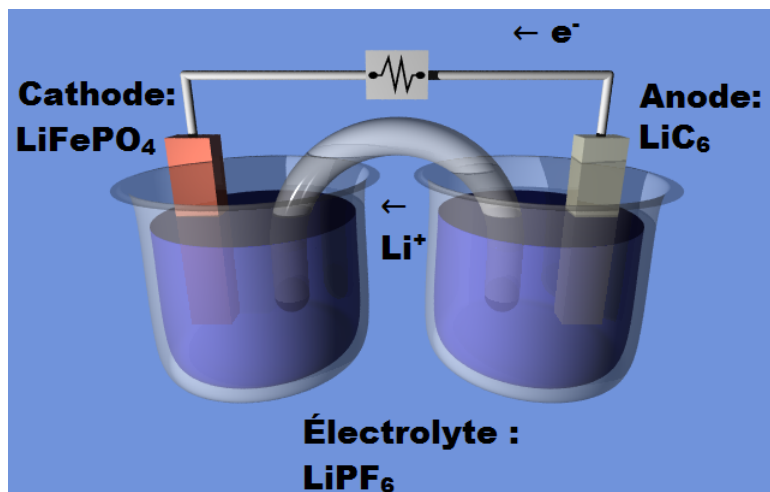


Figure 2.2 Oxydoréduction d'une cellule LiFePO₄ à la décharge [55]

Le passage d'un courant électrique

Le mouvement d'électrons causé par l'oxydoréduction est associé à un courant électrique. Si la cellule force un courant dans une charge électrique, elle est en décharge (appelé le mode galvanique) et si une source de tension continue force un courant dans celle-ci, elle est en recharge (appelé le mode électrolyse). Lorsque le passage forcé d'un courant de recharge permet de reproduire exactement l'inverse de la réaction rédox de décharge, la cellule est dite rechargeable et sera dans la famille des piles secondaires ; donc à utilisations multiples. À l'inverse, si la réaction causée par le courant de recharge ne permet pas de revenir aux mêmes réactifs de départ, donc si les réactions ne sont pas réversibles, la cellule est à usage unique, non rechargeable et classée comme une pile primaire.

Comme la production d'un courant de 10 A est plus demandant pour une petite cellule que pour une grosse, une nouvelle unité de décharge et de recharge, le *C-rate*, est apparue avec les accumulateurs électrochimiques. La notion de *C-rate* offre l'avantage d'intégrer implicitement la dimension de la cellule lors de l'expression d'un courant. Ainsi, une décharge de 1 C représente un courant, en Ampère, égale à une fois la capacité, en Ampère-heure, de la cellule.

Une cellule électrochimique a une zone de contact entre son électrolyte et ses électrodes qui permet une réaction très rapide et a donc le potentiel de fournir un courant instantané très grand. Toutefois, une fois les réactifs de surfaces épuisés, le délai de diffusion nécessaire pour que l'intérieur des électrodes puisse réagir avec les molécules de l'électrolyte plus loin dans la solution limitera la vitesse de la réaction chimique. Ainsi, le fabricant de la cellule indiquera généralement une limite en courant sur une courte période de temps et une limite différente, plus faible,

pour une utilisation continue de la cellule. C'est à ce même phénomène que pourra être attribuée l'augmentation de la résistance interne de la cellule lorsque le courant est demandé sur une longue période de temps, défini par la résistance de polarisation aux sections 2.1.6 et 2.2.5.

La tension électrique

Chaque réaction d'oxydoréduction s'effectue en générant une tension électrique qui est propre aux éléments chimiques en cause dans la réaction. Certaines combinaisons oxydant-réducteur ont la possibilité de produire une tension électrique élevée (e.g. LiC_6 et LiCoO_2), mais au détriment d'une réaction plus instable et potentiellement plus dangereuse. Plus de détails sur ces dangers sont donnés à la section 2.1.4.

La différence de potentiel de chaque demi-réaction pourra être obtenue par comparaison avec l'électrode standard à l'hydrogène [47], considéré comme la référence 0V à toute température. Cette référence peut servir de cathode ou d'anode selon la réaction avec laquelle elle est couplée et se définit comme :



La tension électrique aux bornes de la cellule sera la différence entre les deux potentiels des deux électrodes tel que :

$$E = E_{cathode} - E_{anode} \quad (2.4)$$

Ce potentiel électrique sera dépendant des concentrations ponctuelles de la cellule pendant la décharge et de la température. Ainsi, plus la réaction avance, plus la cellule se décharge, plus les concentrations de réactif diminueront à l'anode et augmenteront à la cathode ; donc plus la différence de potentiel à ses bornes diminuera. Dans un environnement contrôlé et connu, la tension exacte à tout moment de la réaction peut être déterminée par l'équation de Nernst [47] :

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a^{ox}}{a^{red}} \quad (2.5)$$

où

- E^0 est le potentiel standard du couple redox choisi
- R est la constante des gaz parfaits, égale à $8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- T est la température en Kelvin
- n est le nombre d'électrons transférés dans la demi-réaction
- F est la constante de Faraday, égale à $96\,485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$
- a est l'activité chimique de l'oxydant et du réducteur
- ox est la concentration de l'oxydant
- red est la concentration du réducteur

Comme cette équation fait intervenir les concentrations ponctuelles pendant la décharge et que ces données ne sont pas disponibles dans le contexte d'utilisation de ces cellules dans des véhicules électriques, l'équation de Nernst ne sera pas détaillée dans ce document. L'évolution de la perte de tension sera plutôt basée sur des données expérimentales du fabricant, tel que discuté à la section 2.2.1.

2.1.3 Différentes chimies pour différentes applications

Suite aux débuts de l'utilisation du lithium dans les composés d'électrodes des accumulateurs, la communauté scientifique a étudié les différentes combinaisons possibles de matériaux lithiés pour les cathodes et anodes. Les deux premiers objectifs étaient d'avoir le plus d'énergie par kilogramme d'électrode, donc la meilleure densité énergétique, et que ces électrodes soient capables de fournir la puissance électrique le plus rapidement possible, donc avec la meilleure densité de puissance. En se concentrant sur la cathode, les scientifiques ont trouvé plusieurs combinaisons fonctionnelles, présentées au tableau 2.1 [58]. Dans la même optique, les scientifiques se sont ensuite attaqués à l'anode. Le tableau 2.2 [58] présente les caractéristiques des différentes chimies possibles pour l'anode.

Au fil du temps, les concepteurs ont réalisé que les cellules ayant une très forte densité de puissance sont aussi plus dangereuses, leurs réactifs réagissant plus facilement et plus rapidement avec l'environnement amenant des risques d'un emballement incontrôlable de la réaction. Ainsi, on a observé que les risques de feu, d'explosion ou de dégagement de gaz toxique sont plus probables avec les chimies au cobalt ou au manganèse qu'avec une chimie de fer-phosphate. Dorénavant, le choix de la chimie passera par un compromis entre la densité énergétique minimale et la sécurité relative du produit. Par exemple, les concepteurs d'une voiture urbaine pourraient préférer la sécurité et utiliser la chimie LiFePO_4 , très stable et très sécuritaire mais moins dense

Tableau 2.1 Chimies disponibles pour les cathodes au lithium

Cathodes			
Composition de l'électrode	Différence de potentiel moyenne	Capacité Spécifique	Densité énergétique
LiCoO_2	3.7V	140 mA·h/g	0.518 kW·h/kg
LiMn_2O_4	4.0V	100 mA·h/g	0.400 kW·h/kg
LiNiO_2	3.5V	180 mA·h/g	0.630 kW·h/kg
LiFePO_4	3.3V	150 mA·h/g	0.495 kW·h/kg
$\text{Li}_2\text{FePO}_4\text{F}$	3.6V	115 mA·h/g	0.414 kW·h/kg
$\text{LiCo}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$	3.6V	160 mA·h/g	0.576 kW·h/kg
$\text{Li}(\text{Li}_a\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$	4.2V	220 mA·h/g	0.920 kW·h/kg

Tableau 2.2 Chimies disponibles pour les anodes au lithium

Anodes			
Composition de l'électrode	Différence de potentiel moyenne	Capacité Spécifique	Densité énergétique
Graphite(LiC ₆)	0.1-0.2V	372 mA·h/g	0.0372-0.0744 kW·h/kg
Titanate(Li ₄ Ti ₅ O ₁₂)	1-2V	160 mA·h/g	0.16-0.32 kW·h/kg
Si(Li _{4.4} Si)	0.5-1V	4212 mA·h/g	2.106-4.212 kW·h/kg
Ge(Li _{4.4} Ge)	0.7-1.2V	1624 mA·h/g	1.137-1.949 kW·h/kg

en énergie ; alors que le bloc batterie d'une formule de course électrique pourrait être orienté pour la performance et la possibilité de fortes accélérations avec une chimie LiCoO₂, au coût d'une sécurité plus précaire pour le pilote.

Au niveau de l'électrolyte, les premières générations de cellules au lithium-ion furent composées d'un électrolyte liquide. Ceci causa quelques problèmes de sécurité au niveau de la résistance aux chocs des cellules. Pour pallier ce problème, ces cellules sont généralement construites avec une enveloppe protectrice en métal ; alourdissant les cellules, augmentant les coûts de production et diminuant le rapport énergie / masse. D'autres générations de cellules virent le jour et remplacèrent l'électrolyte liquide par un électrolyte gélifié ou poreux ; amoindrissant les dégâts causés par un déversement d'électrolyte. Pour différencier ces deux technologies, les cellules ayant un électrolyte non liquide sont affichées comme des cellules de type **lithium polymère** (ou LiPo).

2.1.4 Réactions chimiques non désirées et les dégradations

La surcharge et la surdécharge

Lorsque la réaction de rédox présentée à la section 2.1.2 manque de réactifs, soit à la fin de la recharge ou à la fin de la décharge, de nouvelles réactions chimiques indésirables commencent à avoir lieu. Si l'anode ou la cathode manquent de Li⁺ ou de « trous » pour accepter ces ions, il y aura de nouvelles combinaisons entre les éléments et il y aura formation d'oxydes ou de cristaux. Ces réactions, généralement non réversibles, ont plusieurs conséquences. Premièrement, la perte des réactifs originaux amènera une perte de la capacité globale de la cellule. Deuxièmement, la formation de cristaux sur les électrodes réduira la surface de contact utile à la réaction normale et fera augmenter la résistance interne. Troisièmement, ces nouvelles réactions peuvent parfois libérer beaucoup d'énergie et faire chauffer la cellule, ce qui peut ensuite amener à un emballement thermique, un feu ou une fissuration de l'enveloppe [65]. Ces trois cas pourraient ensuite engendrer la libération d'un gaz toxique (fluorure d'hydrogène) par la réaction entre

l'électrolyte (LPF₆) et la vapeur d'eau dans l'air (H₂O) [9, 27, 64]. Finalement, les nouveaux produits issus de ces réactions peuvent avoir un volume plus grand que les produits issus de la réaction normale. La pression dans la cellule augmentera, ce qui pourra mener à une explosion. Le contrôle des réactions non désirées dans les cellules électrochimiques est non seulement un point important pour la durée de vie des cellules, mais constitue aussi un aspect primordial pour la sécurité des utilisateurs de ces cellules.

L'effet de la température

La température a aussi un effet sur les réactions non désirées. Dans un environnement à température élevée, la réactivité des réactions chimiques non désirées sera plus forte : accroître la température ambiante d'une cellule revient à augmenter l'énergie de base de chaque réaction, incluant celles néfastes pour la durée de vie de la cellule. Le seuil limite où les réactions indésirables peuvent se produire varie d'une chimie à l'autre et sera donné par le fabricant de la cellule. Cette valeur de température maximale ne doit jamais être dépassée, au risque de détériorer la cellule. Il est à noter que, similaire à la surcharge de la cellule, une température trop élevée pourra causer un emballement thermique, une surpression de la cellule, un feu, une explosion ou le dégagement de gaz toxiques.

Comme l'énergie de base de la réaction d'oxydoréduction normale augmente aussi avec la température, les performances de la cellule peuvent augmenter légèrement avec l'augmentation de température. Par exemple, pour une température limite de 60 °C et une température ambiante de 25 °C, un concepteur pourrait décider volontairement de laisser s'échauffer un bloc batterie par lui-même jusqu'à une température de 40 °C avant d'activer les systèmes de refroidissement, dans l'unique but d'augmenter les performances.

Si la cellule électrochimique est dans un environnement très froid, il n'y aura pas de nouvelles réactions présentes, par contre la réaction normale aura plus de difficulté à se produire. Le courant maximum disponible ou admissible (selon si la cellule est en décharge ou en recharge) sera diminué et la résistance interne de la cellule sera plus haute qu'à l'habitude. L'utilisation des cellules en basse température produira généralement beaucoup de chaleur (car la résistance interne est élevée), ramenant ainsi les cellules à une température de fonctionnement normale. Par contre, si les cellules sont utilisées pour de longues périodes dans un environnement froid et que la chaleur produite n'est pas suffisante pour faire augmenter la température dans la plage prescrite par le fabricant, il se peut que les vieillissements calendaires soient accélérés.

Le courant de fuite

Dans la réaction de rédox normale, les électrons passent par le fil conducteur et les ions traversent l'électrolyte. Si aucun fil conducteur n'est branché, donc si la cellule est en circuit ouvert, les

électrons traverseront très lentement l'électrolyte et la réaction continuera d'avoir lieu. Ceci est décrit comme un courant de fuite à l'interne de la cellule et explique pourquoi elle sera déchargée même si elle n'est pas utilisée pendant plusieurs mois.

Comme chaque cellule n'a pas exactement les mêmes concentrations de réactifs lors de la fabrication, l'amplitude des courants de fuites est légèrement différente d'une cellule à l'autre. Ces différences sont l'une des principales explications des divergences d'état de charge discuté à la section [2.2.4](#)

L'usure normale

Même si la cellule est toujours utilisée dans les limites prévues par le fabricant, les réactions qui dégradent la cellule mentionnées ci-haut auront lieu, mais à une vitesse infiniment petite. Après quelques années d'utilisation, il sera normal d'observer une perte des performances d'une cellule. Ceci est appelé la *vie calendaire* d'une cellule. Elle varie en général selon les fabricants entre 5 et 10 ans. Parallèlement, le cyclage d'une cellule dégrade aussi inévitablement les électrodes. Même dans les meilleures conditions, une cellule perdra un peu de sa capacité maximale après quelques milliers de cycles de charge-décharge. Cette dégradation normale peut varier grandement en fonction de la chimie, des méthodes de fabrication et de l'utilisation faites des cellules.

2.1.5 Zone d'opération sans risques

Suite à l'explication des dégradations possibles des cellules au lithium-ion, une notion de zone d'utilisation sécuritaire a été créée, plutôt que de faire uniquement référence aux limites en tension, en courant et en température. Les concepteurs ont créé le concept de la *zone d'opération sans risques* (Z.O.S.R.), qui résume ces limites en une seule idée [2]. Dans cette Z.O.S.R., les dégradations des cellules sont minimisées (réduit à l'usure normale des cellules) et la sécurité pour les utilisateurs est maximisée. À l'inverse, sortir de cette zone amènera potentiellement des dégradations sévères pour la cellule et menacera la sécurité des utilisateurs. Par exemple, basée sur la fiche technique de la cellule de F014 de *EIG Technologies* [39], cellule au LiFePO_4 de 14Ah, la zone d'opération sans risque sera définie par :

- un voltage en circuit ouvert situé entre 2.0 V et 3.65 V ;
 - une température comprise entre -30 °C et 55 °C ;
 - un courant de recharge inférieur à 14 A (1 C) ;
 - un courant de décharge continu inférieur à 70 A (5 C) ou de 140 A (10 C) si la décharge dure moins de 30 secondes consécutives.
-

2.1.6 Modèles électriques associés

Comme les données chimiques ne sont pas disponibles pendant l'utilisation des cellules, comme la concentration des réactifs ou la répartition des zones cristallisées, il a été créé des modèles électriques qui tentent le plus possible de faire le reflet des phénomènes chimiques expliqués jusqu'à présent, chacun ayant son niveau de complexité et d'exactitude. Le modèle le plus simple (figure 2.3a) [2] consiste à avoir une source de tension, où cette tension dépend de l'énergie résiduelle dans la cellule, avec une résistance série, qui modélise la résistance des éléments chimiques à réagir. Aussi, une grande résistance est mise en parallèle avec la source pour modéliser le courant de fuite. Ce modèle a réussi à bien résumer le comportement de la cellule lorsque le courant varie peu et est encore utilisé aujourd'hui pour les applications simples [2].

Dans un contexte où le courant varie beaucoup, le modèle présenté à la figure 2.3a engendre des différences dans la tension de la cellule par rapport aux mesures expérimentales. Pour respecter l'inertie de la réaction chimique, qui ne varie pas aussi vite que la prédiction d'un modèle purement résistif, de nouveaux modèles sont apparus ; mais cette fois avec une ou plusieurs sections actives (RC en parallèles), tel qu'illustré à la figure 2.3b [2]. Ceci a permis d'ajouter les effets de relaxations et d'impédance des cellules, effets qui traduisent le temps de diffusion des éléments chimiques des réactions. De plus, selon D. Andrea et M. Uno [2, 53], l'évolution des valeurs des résistances et de capacités du modèle reflète aussi une information sur l'état de santé (voir section 2.2.6) de la cellule. Comme il sera traité plus tard dans cette étude, la contrepartie de ces modèles plus avancés est qu'ils demandent plus de ressources d'un microprocesseur, surtout lorsqu'il est question d'évaluer le comportement de la cellule en temps réel. Il faudra alors comparer les gains de précisions versus le coût nécessaire pour implémenter un calculateur avec les performances nécessaires.

D'autres modèles plus complexes (modèles chimiques et modèles incluant l'inductance parasite des connecteurs [12, 53, 66]) existent, mais l'information supplémentaire donnée par ces modèles compense rarement l'augmentation de complexité de calcul imposé par ceux-ci. Ces modèles ne seront donc pas couverts dans cette étude.

2.2 Fonctionnement électrique des cellules

2.2.1 Recharge et décharge

Tel que mentionné à la section 2.1.2, une cellule pleinement chargée aura son anode gorgée de lithium, prêt à se transformer en ion, et sa cathode comportera plusieurs trous, prêts à recevoir les ions. Branchée à une charge électrique, cette cellule pourra débiter du courant tant qu'il

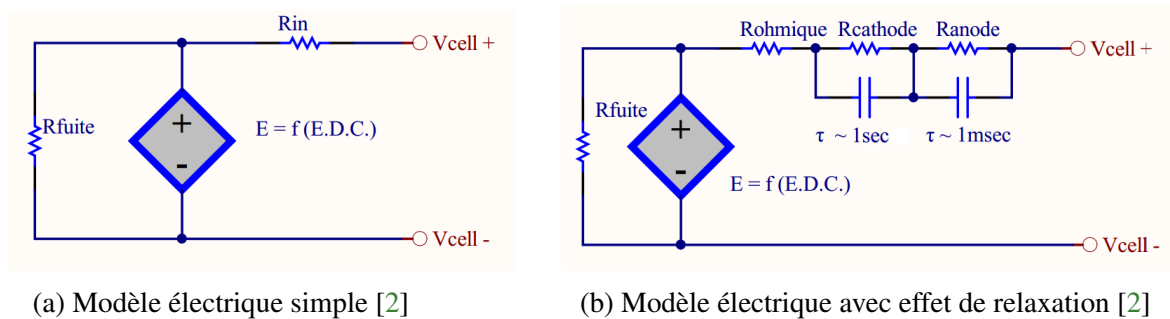


Figure 2.3 Modélisation électrique

y aura des ions de disponibles à l'anode et tant qu'il y aura des trous pour les accueillir à la cathode. Comme il est impossible de connaître l'état des réactifs une fois la cellule scellée dans un emballage, les fabricants donneront les courbes de décharges et les valeurs de tensions limites pour lesquels ils savent que les réactifs commencent à manquer. Par exemple, la figure 2.4 [36] donne les courbes de décharge pour différents courants d'une cellule ANR26650M1A de *A123*. La compagnie *A123* indique que la réaction d'oxydoréduction de cette cellule pourra se faire sans manque de réactifs jusqu'à ce que la cellule affiche 2.0 V à ses bornes. Le fabricant indiquera aussi la vitesse maximale à laquelle la réaction de décharge peut réagir, indiquant alors un courant maximal pouvant entrer ou sortir de la cellule.

Pour la recharge, le processus inverse se produira. Le fabricant indiquera dans la fiche technique de sa cellule la vitesse maximale à laquelle la réaction peut se produire, indiquant ainsi le courant maximum de recharge. La première phase de recharge, où le courant sera maximum, est appelée la zone CC ou *constant current*. La figure 2.5 montre un exemple d'une recharge d'une cellule F014 d'*EIG Technologies*.

Lorsque les ions de lithium à la cathode et les trous à l'anode se font plus rares, la réaction de recharge doit ralentir pour éviter une combinaison chimique irréversible, telle que décrite à la section 2.1.4. Ainsi, la fin de la recharge est marquée par une phase où le chargeur fixe la cellule à sa tension maximale et laisse le courant diminuer exponentiellement. Cette phase porte le nom de CV ou *constant voltage*. La cellule est considérée pleine lorsque le courant de recharge est inférieur à 0.05 fois sa capacité. Ceci indique que la majorité des trous à l'anode ont été comblés.

2.2.2 Capacité et estimation de la capacité

La capacité effective d'une cellule est définie par la quantité d'électrons que la réaction chimique peut produire à son anode, exprimée généralement en ampère-heure (1 Ah = 3600 Coulombs). Comme cette aptitude à emmagasiner et à redistribuer de l'énergie peut varier considérablement

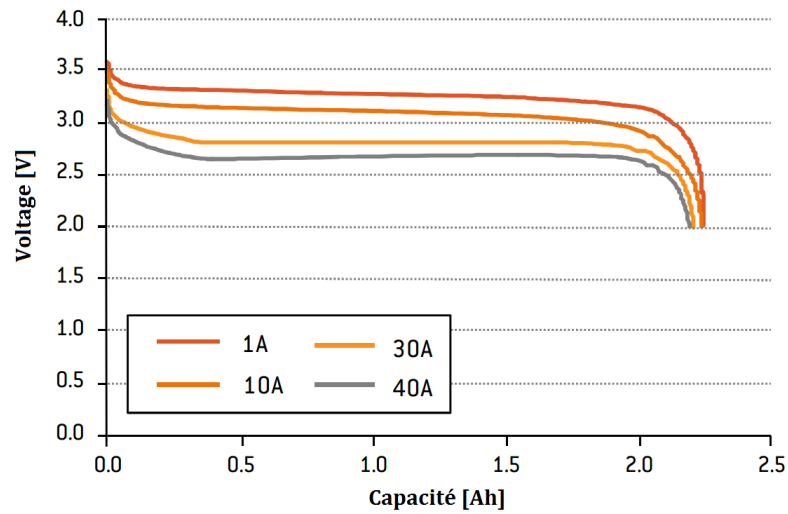


Figure 2.4 Courbe de décharge d'une cellule à différents courants à 25 °C [36]

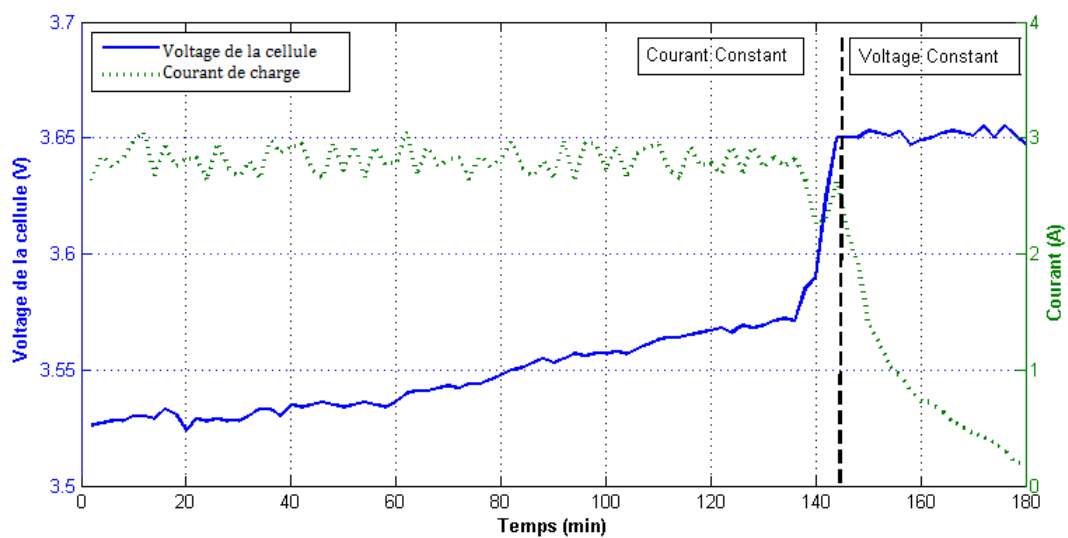


Figure 2.5 Recharge CC-CV d'une cellule F014 d'EIG

suivant les conditions de température, de vieillissement et de courant utilisé, la valeur ne peut pas se résumer à la lecture d'une valeur nominale sur une fiche technique. Dès la fabrication, les tolérances et imperfections des instruments qui déposent les éléments actifs sur les électrodes provoquent une dispersion de la capacité de l'ordre de quelques pour cent. Ensuite, la capacité aura tendance à diminuer avec les années d'utilisation par la corrosion et la cristallisation des électrodes. Comme les cellules ayant le moins de capacité forceront plus fort que les autres pour un même travail, elles auront tendance à s'user plus rapidement ; ce qui élargira, au fil du temps, l'écart avec les cellules ayant plus de capacité [7, 66].

Comme la perte de capacité représente l'un des facteurs déterminants dans le remplacement du bloc batterie, il est très important pour un S.G.B. de bien connaître la capacité de ses cellules et de réduire au maximum l'effort demandé par chacune d'entre elles pour limiter un écart trop important dans leurs dégradations relatives.

Pour mesurer la capacité d'une cellule, l'une des seules manières connues est de mesurer la quantité de coulombs ; i.e. *la profondeur de décharge* (P.D.D.) ; qui en sort lors d'une décharge complète de celle-ci depuis un état complètement chargé. Ce processus, généralement effectué à faible courant pour être en mesure de négliger les pertes, peut prendre plusieurs heures et est mal adapté à une chaîne de cellules partageant le même courant (empêchant la décharge complète de chaque cellule individuellement) et n'est donc pas très pratique pour les véhicules électriques et hybrides [2]. Il existe d'autres manières d'obtenir la capacité des cellules sans passer par la décharge complète, comme l'analyse des électrodes par le biais de caméras spécialisées ou l'estimation de la quantité des réactifs par la mesure de la masse des cellules avec des balances très précises, mais ces méthodes ne peuvent s'appliquer à un bloc batterie en fonction dans un véhicule.

2.2.3 Efficacité variable des cellules et profondeur de décharge

Plus la demande en courant de décharge sur la cellule sera grande, plus la réaction chimique aura de la difficulté à suivre la cadence. Non seulement la résistance interne augmentera, mais le nombre total de coulombs disponibles diminuera. Cela signifie que pour produire une quantité x d'Ah, la cellule consommera $k \cdot x$ Ah dans ses réserves, où $k > 1$. Il a été observé aussi qu'un très faible courant permettait d'obtenir une profondeur de décharge supérieure à la capacité nominale de la cellule, cela indique que le coefficient k peut être inférieur à 1 si le courant est très faible. Ce phénomène représente la dispersion ou la diffusion du joint entre l'électrolyte et les électrodes lorsque la demande en courant est grande. Peukert [28, 34, 63] a été le premier à

communiquer ce phénomène et l'a expliqué selon la relation suivante :

$$C_{Peukert} = I^k \cdot t \quad (2.6)$$

où le coefficient de Peukert k est de l'ordre de 1.05 pour les cellules LiFePO4 [2]. Cependant, Dubarry [13] a mesuré des coefficients variant de 1.005 à 1.027. Ce coefficient change avec la température [63] et augmentera avec l'âge [17]. Il est pertinent de souligner que dans cette équation, la capacité $C_{Peukert}$ ne représente pas la capacité nominale de la cellule. Il s'agit plutôt d'une capacité de référence observée lorsque la cellule est déchargée constamment à 1A. Il est possible alors d'utiliser cette relation pour exprimer la différence de profondeur de décharge par un ratio de courant :

$$\Delta P.D.D._{(Ah)} = \left(\frac{I_{(A)}}{I_{nom(A)}} \right)^k \cdot 1A \cdot \Delta t_{(h)} \quad (2.7)$$

La notation en petits intervalles Δt permet d'avoir une version discrète adaptée aux courants très variables des V.E./V.E.H. L'intervalle de temps doit être suffisamment petit pour considérer le courant constant pendant cette période (typiquement de 0.01 à 0.1 secondes).

Comme une exponentielle est une opération complexe à effectuer pour un microprocesseur, les S.G.B. modélisent généralement ce phénomène par une table d'efficacité et un facteur multiplicatif dépendant de l'amplitude du courant et de la température [16, 18, 52] :

$$\Delta P.D.D._{(Ah)} = \int_0^t k1[i(t)] \cdot k2[T(t)] \cdot I(t)_{(A)} \cdot dt \quad (2.8)$$

où $k1$ représente le coefficient de correction en fonction de l'amplitude du courant i et $k2$ représente le coefficient de correction en fonction de la température T . Ces facteurs sont basés sur des valeurs expérimentales.

2.2.4 État de charge

L'état de charge (É.D.C.) d'une cellule, exprimé en pourcentage, représente le rapport entre la quantité d'énergie disponible pour la décharge et l'énergie totale que la cellule peut emmagasiner (la capacité). L'É.D.C. d'une cellule pourra s'obtenir en divisant la P.D.D., obtenue en effectuant l'intégrale du courant circulant dans une chaîne de cellules depuis la dernière recharge complète, par la capacité de chacune des cellules (mesurée au préalable) :

$$\acute{E}.D.C.(\%) = \frac{Capacit\acute{e}_{(Ah)} - P.D.D._{(Ah)}}{Capacit\acute{e}_{(Ah)}} \cdot 100\% \quad (2.9)$$

Comme les mesures produites par les capteurs de courants ont une marge d'erreur, la P.D.D. ne peut jamais être exacte ; ajoutant ainsi une incertitude sur l'É.D.C. Si la capacité a été mesurée avec ce même capteur de courant pendant un cycle complet, alors l'estimation de l'É.D.C. aura encore plus d'incertitudes. Étant donné que l'É.D.C. est un calcul provenant de la différence entre deux mesures entachées d'une incertitude ΔAh , la marge d'erreur sur l'É.D.C. pourra être très importante.

Une mauvaise estimation de l'É.D.C. pourrait donner une fausse impression sur l'état actuel des cellules, ce qui aura pour effet de rendre incertaine la suite des estimations, comme l'estimation de la distance résiduelle possible ou l'estimation de la résistance interne. Basé aussi sur ces fausses mesures, un S.G.B. pourrait prendre de mauvaises décisions et égaliser des cellules qui n'en ont pas besoin. Pour corriger le tir, le S.G.B. rebalancera ces cellules lors de la prochaine recharge, ce qui dans certains cas augmentera considérablement le temps nécessaire pour faire la recharge du véhicule.

Pour limiter ces mauvaises décisions, l'É.D.C. est généralement contrevérifié en mesurant la tension aux bornes des cellules [2] lorsque le véhicule est à l'arrêt où lorsque le courant sortant du bloc batterie est négligeable. Ainsi, avec la tension de circuit ouvert, il sera possible de valider ou de corriger les estimations précédemment faites à l'aide des courbes présentées à la section 2.2.1.

Comme la mesure de la profondeur de décharge est basée sur une intégrale, le S.G.B. aura besoin d'une valeur initiale. D. Andrea [2] propose trois références possibles : à pleine charge (figure 2.6), à un É.D.C. de 50 % (figure 2.7) et à pleine décharge (figure 2.8). Pour déterminer la meilleure option, il faut considérer l'énergie fournie entre deux niveaux de charge Q_{max} et Q_{min} :

$$\Delta E_{(Wh)} = V_{max(V)} \cdot Q_{max(Ah)} - V_{min(V)} \cdot Q_{min(Ah)} \quad (2.10)$$

S'il est pris l'exemple d'un bloc batterie composé de deux cellules en série, l'une de 7 Ah et l'autre de 10 Ah. Ce bloc batterie ne pourra pas opérer sur un ΔQ supérieur à 7 Ah sans pousser la petite cellule en surcharge ou en surdécharge. Cette plage de 7 Ah représente une différence d'É.D.C. de 70 % pour la cellule de 10 Ah. Pour cette cellule, la tension moyenne sera plus haute si la plage de décharge est choisie entre 100 % et 30 % d'É.D.C. plutôt qu'entre 70 % et 0 %. Par cet exemple, interprété dans l'équation 2.10, il est possible de voir qu'un bloc batterie composé de plusieurs cellules de différentes capacités offrira toujours plus d'énergie lorsque ses cellules sont calibrées à pleine charge [2].

Pour appuyer d'avantage cette option, une calibration à pleine charge s'exécute après à une recharge complète du bloc batterie alors qu'une calibration à pleine décharge s'effectue avant la

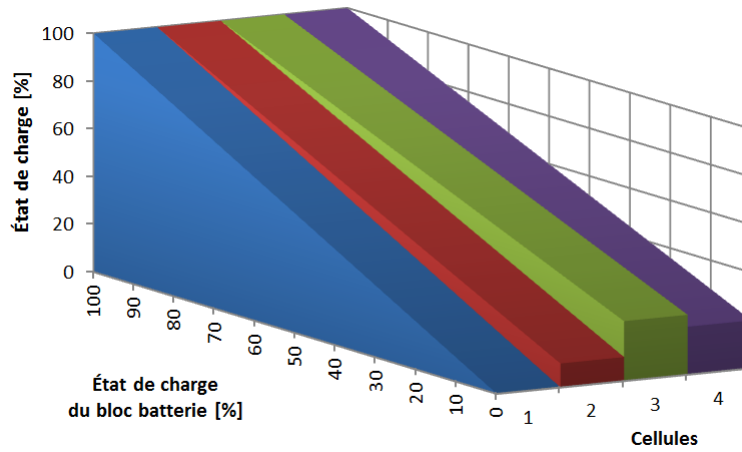


Figure 2.6 Calibration de l'É.D.C. à pleine charge [2]

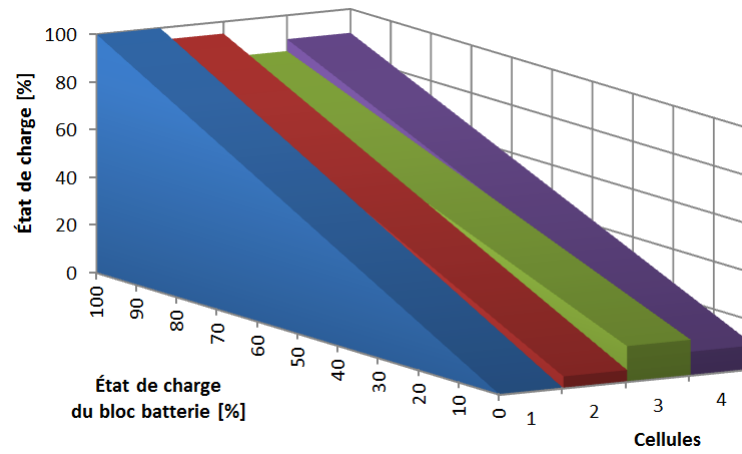


Figure 2.7 Calibration de l'É.D.C. à 50 % [2]

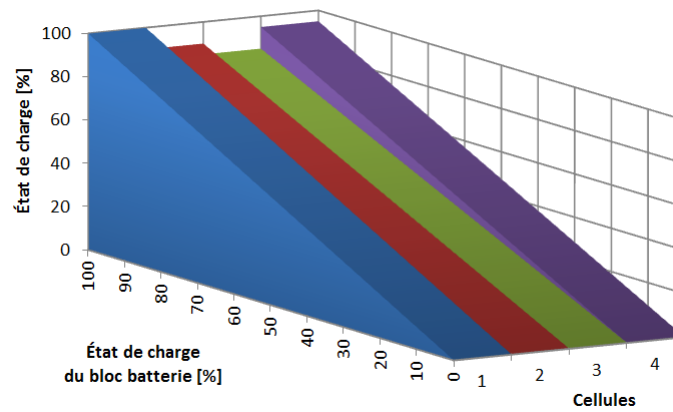


Figure 2.8 Calibration de l'É.D.C. à pleine décharge [2]

recharge du bloc, lorsque les cellules sont vides. Comme ces calibrations peuvent s'avérer très longues, si une urgence oblige l'arrêt d'une recharge pendant une calibration, une calibration à pleine charge permettra au V.É. de rouler normalement (avec un É.D.C. moyen près de 100 %), alors qu'une calibration à pleine décharge laissera l'utilisateur au dépourvu (car la calibration nécessite que les cellules aient un É.D.C. près de 0 %). Ainsi, l'option la mieux adaptée pour les blocs batterie de V.É. est la référence à 100 % d'É.D.C.

La seule situation où il est nécessaire de référencer les cellules au centre de leur charge est lorsque les batteries ne sont jamais complètement chargées ni complètement déchargées, comme dans un véhicule électrique hybride non branchable.

2.2.5 Résistance interne, résistance ohmique et résistance de polarisation

Définition

La *résistance interne* (R_{in}) présentée dans les modèles à la section 2.1.6 n'est pas une simple résistance mesurable à l'ohmmètre. La résistance interne est séparée en deux composantes : la *résistance ohmique* (R_{Ω}) et la *résistance de polarisation* (R_{pol}).

La résistance ohmique représente la combinaison de la résistance de la cellule à produire la réaction chimique (variant principalement selon la température, l'amplitude de courant et l'É.D.C.), de la résistance créée par la corrosion et la cristallisation des électrodes avec l'âge et de la résistance des contacts électriques de la cellule.

Associé aussi à la R_{in} , l'autre entité s'opposant au passage des électrons est appelée la résistance de polarisation. Lors de courtes décharges, les ions libres dans l'électrolyte près des électrodes suffisent à la demande. À l'opposition, lors de fortes décharges, où lors de décharges prolongées, les ions de lithium doivent traverser une certaine distance dans l'électrolyte avant de pouvoir se combiner sur les électrodes. Ce délai de diffusion créera une résistance au passage du courant et fera chuter la tension aux bornes de la cellule. Ce phénomène, semblable à une exponentielle, rappelle le comportement électrique d'une capacité qui se charge. Ainsi, pour bien suivre ce comportement dans le modèle électrique, la résistance de polarisation est combinée avec une capacité de polarisation C_{pol} qui se charge ou décharge en fonction du courant demandé [2, 52, 53]. Comme il y a deux électrodes, il y aura deux R_{pol} et deux C_{pol} .

Les constantes de temps τ associées aux chargements des capacités parasites de l'anode et de la cathode sont variables en fonction de la capacité de la cellule et de la chimie utilisée. En général, le réseau RC de l'anode réagit plus rapidement que le réseau RC de la cathode [2].

Comme de l'extérieur il est très difficile de différencier les deux R_{pol} et les deux C_{pol} , ces composants présentés dans le modèle de la section 2.1.6 seront combinés et considérés comme un seul élément RC .

L'ensemble de ces résistances, de nature variable, génèrera des pertes joules ($I^2 \cdot R_{in}$) avec l'utilisation de la cellule. Il est montré, en figure 2.9 [20], un exemple de l'évolution de la R_{in} en décharge en fonction de la température et de l'É.D.C. pour une cellule typique au lithium-ion. Il est à noter que la R_{in} est plus haute à la recharge qu'à la décharge, dû à la réaction chimique qui favorise la décharge au détriment de la recharge.

Lors d'une déformation mécanique de la cellule, il arrive souvent que le contact entre les électrodes et l'électrolyte ou le contact entre les électrodes et les contacts extérieurs de la cellule se modifie et la R_{in} peut soudainement augmenter drastiquement ; les S.G.B. devraient donc être à l'affût de telles augmentations soudaines et indiquer à l'utilisation un avertissement de problèmes potentiels consécutifs à de telles déformations mécaniques.

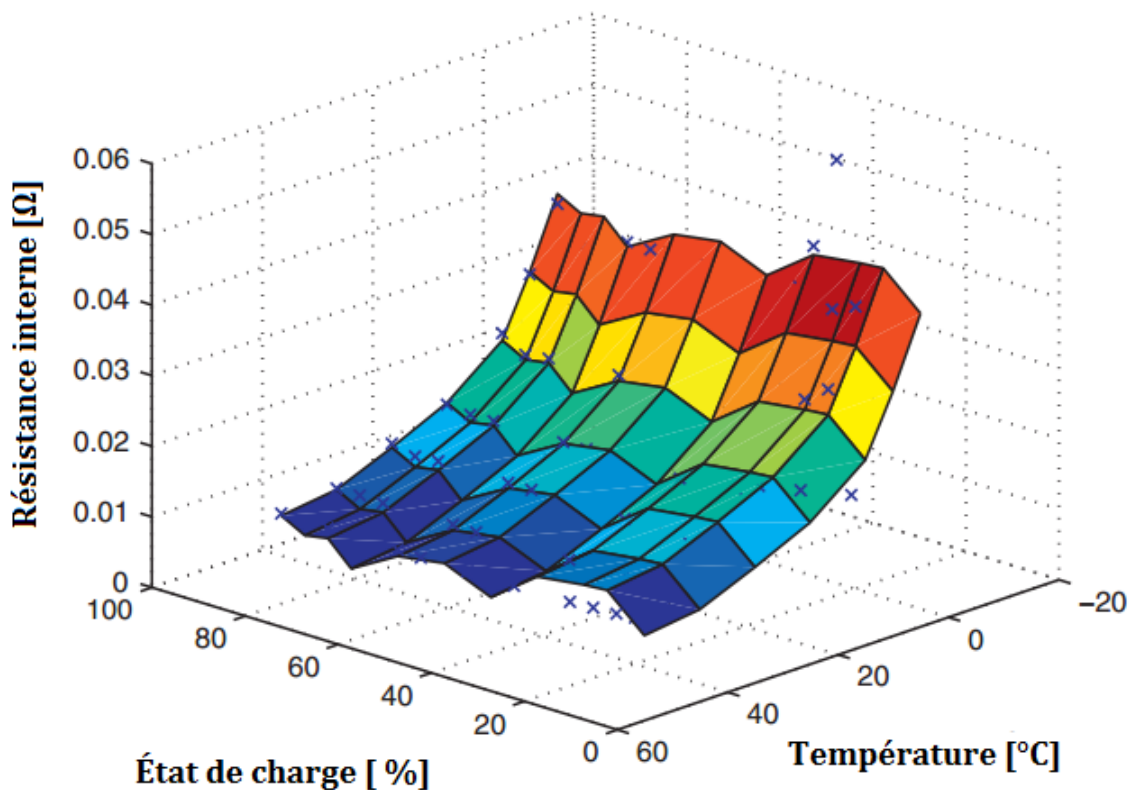


Figure 2.9 Variation de la R_{in} en décharge en fonction de la température et de l'É.D.C. [20]

Mesure par un S.G.B.

La manière la plus simple pour évaluer la R_{in} est de mesurer la chute de tension lors d'une forte variation de la demande en courant :

$$R_{in(\Omega)} \approx \frac{\Delta V_{(V)}}{\Delta I_{(A)}} \quad (2.11)$$

Ceci permet de déterminer la R_{in} autant à la charge qu'à la décharge. Pour mesurer la résistance de polarisation, il est nécessaire d'avoir un courant constant pendant quelques dizaines de secondes (variable selon la capacité de la cellule et de la chimie utilisée) et mesurer à quelle tension la cellule se stabilise. En fonction de cette résistance de polarisation et en fonction du temps requis pour obtenir la stabilisation, il est possible d'estimer la capacité de polarisation depuis la constante de temps $\tau = R \cdot C$. La figure 2.10 [54] illustre un exemple où la résistance ohmique et la résistance de polarisation peuvent être obtenues en mesurant la perte de tensions aux bornes d'une cellule.

Il existe d'autres méthodes plus évoluées pour mesurer la R_{Ω} , la R_{pol} et la C_{pol} , comme la mesure du dégagement de chaleur ou l'analyse de l'impédance sur une plage de fréquence, mais ces méthodes ne sont pas envisageables pour les systèmes embarqués des V.É., faute de ressources [28].

2.2.6 État de santé

L'*état de santé* (É.D.S.) d'une cellule ou d'une batterie est une mesure arbitraire pour représenter le ratio entre les performances actuelles vis-à-vis les performances d'une cellule ou d'une batterie neuve. Un É.D.S. de 100 % représente une cellule ayant les mêmes performances qu'une cellule neuve alors qu'un É.D.S. de 0 % représente une cellule jugée incapable de faire le travail demandé ; une cellule avec un É.D.S. de 0 % doit être remplacée.

Les deux principaux facteurs limitatifs de la performance d'une cellule sont la résistance interne et la capacité effective. Ainsi, il est possible de découvrir l'É.D.S. depuis ces valeurs. En se basant uniquement sur la R_{in} , la représentation de l'É.D.S. d'une cellule peut s'exprimer [29] :

$$\acute{E}.D.S.(\%) = \left(1 - \frac{R_{t(\Omega)} - R_{0(\Omega)}}{R_{max(\Omega)} - R_{0(\Omega)}} \right) \cdot 100 \% \quad (2.12)$$

où R_0 représente la R_{in} d'une cellule neuve et R_t la R_{in} d'une cellule à un instant t . L'augmentation graduelle de R_{in} provoquera de plus en plus de pertes joules $I^2 \cdot R$. Lors du design d'un système, un seuil R_{max} sera fixé en fonction des pertes tolérables en puissance ou des limites en

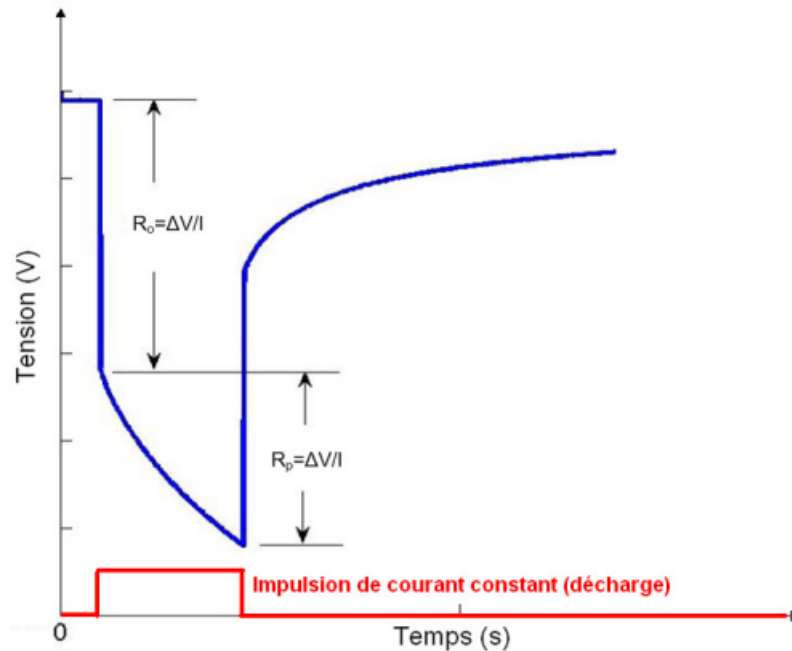


Figure 2.10 Mesure de la R_{Ω} et R_{pol} depuis une impulsion de courant [54]

température. Le seuil typique démontrant la fin de la vie utile de la cellule est $R_{max} = 2 \cdot R_0$. Tel que développé à la section 2.2.5, la R_{in} variera grandement selon les conditions de température, de courant, d'É.D.C., ainsi la valeur R_t utilisée pour déterminer l'É.D.S. devrait provenir d'une moyenne sur plusieurs heures, voire plusieurs jours afin d'exprimer une mesure plus globale et moins ponctuelle.

Dans le même ordre d'idée, l'É.D.S. pourrait s'obtenir depuis l'état de la capacité de la cellule versus la capacité d'une cellule neuve :

$$\text{É.D.S.}(\%) = \left(1 - \frac{C_{0(Ah)} - C_{t(Ah)}}{C_{0(Ah)} - C_{min(Ah)}} \right) \cdot 100 \% \quad (2.13)$$

où C_0 représente la capacité nominale, C_t la capacité au temps t et C_{min} le seuil de capacité acceptable. Le seuil typiquement utilisé pour les V.É. et V.É.H. est 80 % de la capacité nominale.

Il n'y a pas de règle absolue concernant l'É.D.S. d'une cellule. Sa représentation reste à la discrétion des concepteurs. Plusieurs facteurs peuvent être évalués en même temps, chacun avec une cote d'importance, et l'É.D.S. peut représenter le facteur ayant le pourcentage le plus faible ; donc la représentation du paramètre le plus limitatif des performances.

2.2.7 Résistance de fuite

L'électrolyte liant les électrodes ensemble est un composé poreux qui laisse passer les cations et les anions, mais qui empêche tous électrons de passer (pour empêcher la cellule de se décharger dans elle-même). Cependant, cette isolation n'est pas parfaite, une faible quantité d'électrons traverse en permanence la cellule et la décharge peu à peu. Ce courant I_{fuite} est différent pour chaque cellule et est de l'ordre des μA . De plus, ce courant aura tendance à augmenter avec les années. La variation de ce courant de fuite est la principale raison pour laquelle il faut constamment rééquilibrer les cellules dans une même série [2]. Comme ce courant varie en fonction de la tension de la cellule, il est souvent modélisé à l'aide d'une résistance R_{fuite} placée en parallèle avec la source de tension idéale du modèle présenté à la section 2.2.1.

Entre les calibrations d'É.D.C. expliquées à la section 2.2.4, les différences des courants I_{fuite} de chaque cellule causeront une divergence entre la mesure de l'É.D.C. et sa valeur réelle. Ces divergences n'auront pas un effet notable si les cellules sont rechargées et calibrées souvent. Cependant, si les recharges sont éloignées dans le temps (de quelques jours), la sommation de ces courants de fuites peut induire une erreur non négligeable dans l'évaluation des paramètres de la cellule. Ainsi, cette résistance de fuite devrait être évaluée et prise en compte dans le calcul de l'É.D.C.

Comme les S.G.B. drainent aussi un courant constant au bloc batterie pour leurs opérations, il arrive aussi que le S.G.B. inclue sa propre consommation énergétique à titre de courant de fuite. Cette stratégie permet d'améliorer encore plus la précision de l'É.D.C.

2.2.8 Effet de la température

Tel que mentionné à la section 2.1.4 la température aura un rôle déterminant dans les réactions chimiques produisant un courant électrique dans la cellule, il est normal que la température ait un effet considérable sur les paramètres du modèle électrique associé. Comme il a été question à la section 2.2.5, la résistance interne de la cellule croîtra à mesure que la température diminuera, conséquence de la difficulté grandissante à produire la réaction chimique à l'intérieur de la cellule afin de produire un courant. Cette augmentation de R_{in} entraînera une forte chute de tensions aux bornes de la cellule qui pourrait afficher un voltage à ses bornes inférieur aux seuils limites de voltages, activant les sécurités du S.G.B. Ces arrêts prématurés pourraient créer l'image d'une capacité utilisable beaucoup plus basse qu'elle ne l'est en réalité. Par exemple, la figure 2.11 [19] montre la relation entre la température et la capacité efficace d'une cellule si aucune compensation n'est effectuée.

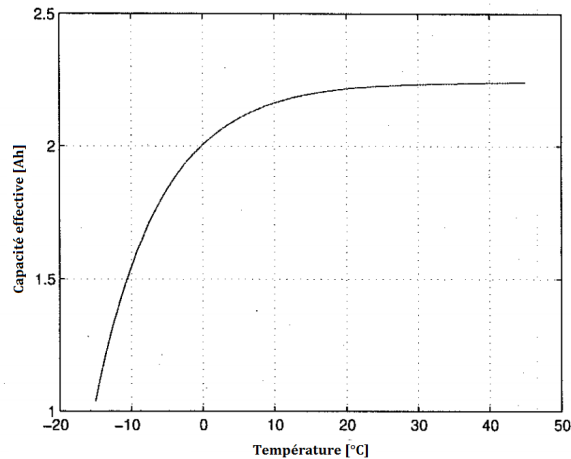


Figure 2.11 Effet de la température sur la capacité effective [19]

Deuxièmement, comme le montre l'équation de Nernst à la section 2.1.2, une augmentation de température fera aussi augmenter de quelques millivolts la *tension en circuit ouvert* (T.C.O.), tension affichée par une cellule complètement au repos. Ceci pourrait fausser les estimations d'É.D.C. dans le cas où un S.G.B. utilise la T.C.O. pour déterminer ou confirmer l'É.D.C.

Finalement, tel que mentionné précédemment, la température accélèrera les réactions parasites au sein de la cellule et accélèra le courant de fuite [2].

La mesure de la température par un S.G.B. est donc essentielle à la bonne prédiction des paramètres, surtout de la R_{in} , et constitue un élément de sécurité important.

2.2.9 Les branchements inter-cellules

À ce jour, il n'existe aucune chimie capable de fournir la puissance nécessaire pour la propulsion d'un V.É. avec une seule cellule. Pour augmenter la tension d'une batterie, il faut ajouter des cellules en série ou installer un convertisseur survolteur. Comme ce convertisseur ajoute des pertes d'efficacité, cette option est rarement privilégiée. L'avantage d'avoir une tension plus élevée est de diminuer le courant requis pour obtenir une puissance de sortie donnée. Cette diminution de courant réduit alors les pertes dans la résistance interne, augmentant ainsi l'énergie utilisable. Pour atteindre la quantité d'énergie suffisante pour une autonomie décente, l'ajout de cellules en parallèle est nécessaire [50, 66]. En général, un bloc batterie sera composé de cellules en série et en parallèle. Les deux configurations possibles sont la mise en parallèle de lignes de cellules en série ou la mise en série de cellules en parallèle. Un exemple de ces deux configurations est donné aux figures 2.12a et 2.12b. Avec les connaissances actuelles, il est parfois difficile de faire des choix de conception éclairés et optimaux. Les impacts des configurations séries-parallèles

des blocs batterie, ne sont pas encore bien définis. Par conséquent, il est difficile de peser les pour et les contre dans le choix d'une configuration de bloc batterie [50, 66]. Néanmoins, les sections suivantes présentent les grandes lignes présentement connues sur ces configurations.

Lignes de cellules en série placées en parallèle

Comme les cellules en série sont solidaires, elles n'ont besoin que d'une seule protection contre un courant trop élevé. Cependant, si l'une d'entre elles tombe en défaut, elle paralysera la série en entier. Les cellules en série partageront le même courant d'alimentation, mais comme les capacités et courants de fuites varieront, elles n'auront pas les mêmes É.D.C. Par conséquent, les séries de cellules auront besoin d'une surveillance et d'une égalisation individuelle de la part du S.G.B.

Cellules en parallèle placées en série

Les cellules en parallèle partagent la même tension de nœud. Il est souvent supposé que les faibles variations de tension d'une cellule provoqueront la décharge de la cellule la plus forte dans la cellule la plus faible, que les cellules seront toujours égales et que des cellules en parallèle n'auraient pas besoin d'équilibrage. Cependant, si une cellule a une R_{in} plus haute que sa

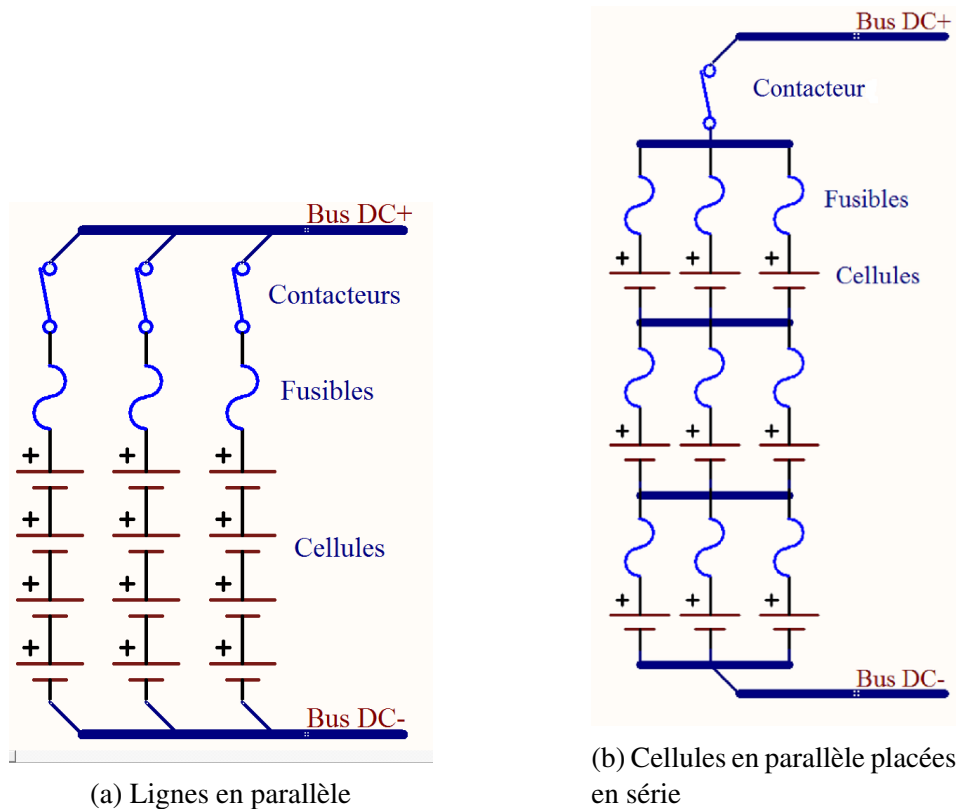


Figure 2.12 Branchements inter-cellules

voisine, elle débitera moins de courant lors des fortes demandes ; et, par conséquent, les autres cellules travailleront plus fort pour compenser. Lorsque la demande en courant diminuera, cette cellule aura débité moins d'énergie et aura donc une T.C.O. plus haute. Son surplus d'énergie sera alors transféré aux cellules ayant donné plus d'énergie au préalable. Ceci créera beaucoup de mouvement d'énergie entre les cellules et pourra potentiellement faire augmenter la température très rapidement. Si les cellules ayant une R_{in} plus faible deviennent plus chaudes que l'autre cellule, alors cette augmentation de température va faire diminuer encore plus la R_{in} et aggraver le problème. Ainsi, il est dorénavant envisagé d'équilibrer aussi les cellules en parallèle.

Dynamique

Les configurations sont en générales fixes, mais T. Kim et H. Kim [21, 22] proposent des configurations dynamiques avec des interrupteurs pour modifier les connexions entre les cellules pendant leur utilisation. Bien que sur papier et à petite échelle de laboratoire, ils ont réussi à obtenir de bons résultats, leurs travaux ne prennent pas en compte l'espace physique et les coûts. L'ajout de ces interrupteurs (jusqu'à six par cellule pour H. Kim [21]) sera difficilement viable pour un banc de batteries de plusieurs centaines de cellules. De plus, ces interrupteurs sont rarement capables de supporter les courants nécessaires à la propulsion d'un V.E./V.E.H. ou, s'ils sont aptes à le faire, engendrent des pertes importantes dans le système.

2.2.10 Les défauts aléatoires

Lorsque plusieurs cellules travaillent dans un même bloc, un changement de comportement brusque de l'une d'elles causera aussi une modification dans le comportement des cellules autour de la cellule en défaut. Dans les deux extrêmes possibles, une cellule peut soudainement agir comme un circuit ouvert ou un court-circuit.

Circuit ouvert

Une vibration trop grande ou un choc peut venir altérer les attaches mécaniques à l'interne de la cellule et empêcher une connexion électrique entre la cathode, l'anode, l'électrolyte et le monde extérieur (par les pôles de la cellule). Si le bris mécanique est total, la cellule présentera une résistance interne infinie (un circuit ouvert) à ces pôles et empêchera tout courant électrique de circuler dans la branche ou ligne à laquelle elle appartient. Si la cellule est placée dans un réseau parallèle, elle obligera les autres cellules de son nœud à travailler plus fort, augmentant ainsi leur dégradation.

Court-circuit

Une déformation mécanique suivant un choc ou une libération de chaleur importante peut venir modifier l'espace entre l'électrolyte et les électrodes. Si ceux-ci entrent en contact, la résistance de fuite présentée à la section 2.2.7 chutera drastiquement et un fort courant commencera à circuler dans la cellule. Se déchargeant dans elle-même, la cellule verra sa température augmenter rapidement jusqu'à ce qu'elle ait épuisé complètement son énergie. Cette augmentation de température peut mener à des fissurations de l'enveloppe, des feux et des explosions [27]. Si une cellule en court-circuit est placée dans une série de cellules, elle activera le système de sécurité du S.G.B. et paralysera la série. Si elle est placée dans une configuration parallèle, sa faible résistance fera décharger les autres cellules du nœud et causera une importante augmentation de température. Les cellules en parallèle doivent donc automatiquement avoir une protection individuelle contre les surintensités de courant, comme l'a illustré la figure 2.12b.

2.3 Système de gestion de batteries

2.3.1 Fonctions de base

Comme mentionné dans les sections précédentes, les cellules au lithium-ion qui sont utilisées en dehors de la Z.O.S.R. se dégraderont très rapidement. Un S.G.B. devra donc mesurer et contrôler la température, le courant et le voltage d'opération pour éviter au maximum ces conditions d'utilisation risquées. Pour simplifier le design des S.G.B., ceux-ci sont souvent divisés en modules, tel que montré à la figure 2.13. Le premier module, le moniteur, servira à mesurer les paramètres des cellules et à prédire le comportement des cellules. Le deuxième module, l'unité décisionnelle ou le contrôleur, sera utilisé pour prendre des décisions et faire des actions sur la batterie. Ces deux derniers modules sont essentiels au fonctionnement d'un S.G.B. Il sera décrit ci-dessous d'autres modules possibles, mais non essentiels, comme l'unité de communication ou d'archivage.

Mesures, traitement de signal, bruits et filtrage

Avec l'arrivée de l'ère de la télécommunication, l'ensemble des communications sans fil et des tours émettrices créent un bruit blanc omniprésent dans l'environnement ambiant des V.É. De plus, le moteur électrique utilisé pour mouvoir le véhicule crée des champs électromagnétiques, qui, eux aussi, génèrent un bruit à proximité des lignes de mesure. S'ajoutant à cela, plusieurs composants électroniques du V.É. génèrent du bruit électrique lors de leur utilisation, comme la commutation d'un transistor. Le bruit se définit comme étant un signal indésirable d'amplitude et de fréquence aléatoire faussant la lecture du signal utile [4, 15, 33]. Chaque fil utilisé pour

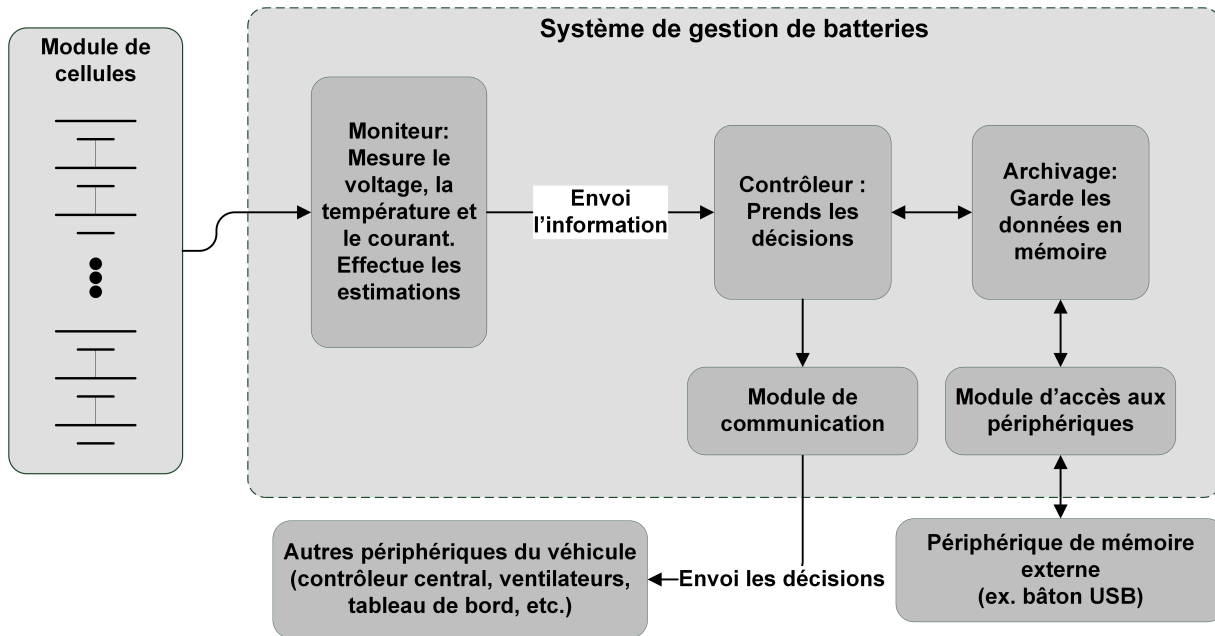


Figure 2.13 Schéma d'un système de gestion de batteries générique

effectuer une mesure sur chaque cellule du bloc batterie se comporte comme une antenne qui capte ce bruit environnant, avec plus ou moins d'efficacité. Dans le cas d'un S.G.B., le bruit est de l'ordre de quelques millivolts.

FILTRAGE ET MOYENNE DES MESURES

La présence inévitable de bruit sur les lignes de mesure force l'utilisation de filtres afin de retrouver le signal original avec la plus grande fidélité possible [4, 15, 32]. Ces filtres peuvent être analogiques, composée physiquement de résistances, condensateurs et inductances, ou numériques, où une opération mathématique est effectuée sur le vecteur d'entrée afin d'éliminer les signaux indésirables. Afin de sauver l'espace précieux sur les plaques de circuits imprimés et pour la facilité de modifications, il est souvent plus convivial et plus efficace d'utiliser le filtrage numérique. Ceci est d'autant plus important considérant que le nombre de filtres requis est très élevé, vu que le grand nombre de cellules habituellement requis dans un V.É. Comme les mesures de tension et de courant impliquées dans l'application des V.É. ont un contenu spectral de basses fréquences, même jusqu'à une composante DC pour une cellule au repos, les filtres utilisés sont de type passe-bas.

Une des méthodes numérique parmi les plus simples pour effectuer un filtre passe-bas est le filtre de type moyenne mobile :

$$y_t = b_0 \cdot x_t + b_1 \cdot x_{t-1} + b_2 \cdot x_{t-2} \dots b_n \cdot x_{t-n} \quad (2.14)$$

où tous les coefficients b_0 à b_n ont la valeur de $1/n$. Pour la conception de filtres avancés, il suffit de remplacer les coefficients a et b dans l'équation générique suivante selon les spécifications voulues :

$$y_t = \sum_{k=0}^N b_k \cdot x_{t-k} - \sum_{k=1}^M a_k \cdot y_{t-k} \quad (2.15)$$

Dans cette représentation générique, N et M représentent respectivement l'ordre du filtre au numérateur et au dénominateur, b et a représentent respectivement les coefficients du numérateur et du dénominateur du filtre, x exprime le vecteur d'entrée et y constitue le vecteur filtré. Chaque combinaison possible influencera la fréquence de coupure du filtre, son déphasage par rapport au vecteur d'entrée, son gain, ainsi que son temps de réponse. Comme la conception de filtres avancés dépasse le cadre de ce projet de recherche, seuls des filtres à moyenne mobile d'une profondeur de dix échantillons seront utilisés.

DÉLAI DES FILTRES NUMÉRIQUES

Comme le montre l'équation 2.15, l'utilisation d'un filtre numérique crée un délai sur le vecteur de mesure. Dans le contexte d'un filtre passe-bas, un changement brusque sur une ligne ne sera perçu sur le vecteur filtré que $M + N$ échantillons plus tard. Ainsi, il faut être prudent pour ne pas utiliser des filtres d'ordre trop élevé afin de pouvoir suivre les changements dans la conduite du véhicule.

OPÉRATIONS À PRIVILÉGIER

Outre le filtrage, le moniteur aura aussi quelques opérations à effectuer en vue d'estimer les autres paramètres décrits dans ce chapitre. Plus les opérations demandées seront lourdes et exigeantes, plus le processeur prendra de temps pour les exécuter. Pour une application temps réel d'un S.G.B. d'un V.É., le nombre de fois que le processeur pourra effectuer ses calculs en une seconde est directement relié au nombre de cellule qu'il peut surveiller. Ainsi, optimiser la charge de calcul permettra d'avoir moins de processeurs requis dans l'ensemble du bloc batterie, réduisant les coûts.

Il faut se rappeler qu'un microprocesseur n'est pas forcément l'outil optimal pour toutes les opérations mathématiques [8]. En effet, il est plus rapide de faire des additions, soustractions, divisions et multiplications plutôt que des opérations trigonométriques, exponentielles et logarithmiques. De plus, on verra à réduire le nombre d'opérations à effectuer. Par exemple, pour le filtrage, plutôt que d'effectuer dix multiplications dans le calcul de la moyenne mobile de l'équation 2.14, le filtre pourrait être codé ainsi :

$$y_t = 0.1 \cdot x_t + 0.9 \cdot y_{t-1} \quad (2.16)$$

où seulement deux multiplications et une addition sont requises.

Dans un même ordre d'idée, un processeur travaille toujours plus rapidement avec des variables de type entier (*integer* en anglais) plutôt que des nombres à virgule flottante (*float* en anglais) [8]. Les concepteurs de S.G.B. devraient réduire au maximum l'utilisation de flottant pour assurer la rapidité d'exécution du programme. Lorsque qu'une variable doit obligatoirement contenir une information inférieure à un entier, il est souvent plus rapide de multiplier l'expression par 10 ou 100 et exprimer sous forme de multiple de 1/10 ou de 1/100 de l'unité voulue et de garder l'expression sous forme d'un entier. Par exemple, le code utilisé dans ce projet de recherche enregistre les R_{in} en utilisant l'unité de base $10^{-4}\Omega$. Ainsi, une valeur de $10\text{ m}\Omega$ est enregistrée en mémoire comme le nombre 100. Ceci permet d'obtenir une précision de $\pm 100\ \mu\Omega$ mais de conserver les avantages de travailler avec des entiers.

Contrôles

REFROIDISSEMENT ET RÉCHAUFFEMENT DES CELLULES

Une cellule utilisée dans un V.É. et V.É.H. sera soumise à des écarts de température entre $-35\text{ }^\circ\text{C}$ et $50\text{ }^\circ\text{C}$ en fonction des saisons. Les fabricants comme A123 et EIG [36, 39] mentionnent que leurs cellules peuvent fonctionner entre $-30\text{ }^\circ\text{C}$ et $50\text{ }^\circ\text{C}$, cependant, leur utilisation à une température inférieure à $0\text{ }^\circ\text{C}$ provoquera de fortes pertes, car la résistance interne sera plus élevée. Pour garder la température au-dessus de ce seuil, l'utilisation de coussins chauffants est conseillée. Ces coussins s'alimentent directement depuis l'énergie des modules et comme ils demandent un faible courant (comparativement à la demande d'un moteur électrique), ils n'engendrent pas de pertes excessives. De plus, si le bloc batterie est branché à un chargeur, il peut alors chauffer ses cellules sans utiliser son énergie embarquée pour s'assurer de la plus grande autonomie possible une fois le chargeur débranché.

Lorsque les batteries sont fortement sollicitées, lors d'une forte accélération d'un V.É., les pertes internes $I^2 \cdot R_{in}$ se traduisent par une augmentation rapide de la température des cellules. Les S.G.B. doivent être à l'affût de ces augmentations et prendre action pour ramener les cellules au centre de la Z.O.S.R. En général, lors de la détection d'une température trop haute, le S.G.B. enverra une commande au contrôleur central du véhicule pour activer le système de refroidissement. Dans un V.É., le système de climatisation est souvent utilisé pour refroidir les batteries. Pour les autres types de transport électrique (véhicule récréatif, motos, etc.) où la climatisation n'est pas disponible, d'autres stratégies sont disponibles pour garder la température basse. Premièrement, des ventilateurs peuvent faire circuler un flux d'air important pour dissiper l'énergie thermique, c'est le cas notamment dans la Toyota Prius. Deuxièmement, à l'image d'un moteur à combustion, une pompe peut faire circuler un liquide refroidisseur et évacuer le surplus

de chaleur par un radiateur. Cette option est plus efficace que la première, mais est aussi plus coûteuse.

Si ces moyens ne sont pas suffisants pour garder les cellules au frais. Le S.G.B. doit avoir l'autorité pour arrêter complètement l'utilisation d'une série. L'ouverture d'un contacteur est la méthode la plus simple et la plus efficace pour arrêter rapidement et de manière sécuritaire une ligne de cellules.

VOLTAGE DE CELLULE

Tel que mentionné aux sections 2.1.4 et 2.1.5, un S.G.B. aura pour tâche de maintenir la tension électrique des cellules au-dessus d'un seuil de fin de décharge et en dessous d'un seuil de fin de charge. Ces valeurs proposées par les fabricants représentent des tensions au repos de la cellule, donc réfèrent à la tension en circuit ouvert (T.C.O.). Une attention particulière devrait être ajoutée dans le contrôleur du S.G.B. pour éviter de déclencher prématurément les contacteurs des blocs batterie lors de fortes décharges. En effet, il peut arriver que les pertes $I \cdot R_{in}$ provoquent une chute de tension à l'interne de la cellule de telle sorte que la tension aux bornes d'une cellule devienne inférieure au seuil d'une fin de décharge (exemple, 2.0 V pour une cellule typique de 3.3 V au lithium); mais que la cellule ait encore suffisamment d'énergie pour fonctionner (donc que son É.D.C. soit supérieur à 0 %) [2]. Le calcul de la chute ohmique $I \cdot R_{in}$, selon les mesures de R_{in} connues, doit être ajoutée afin de permettre d'utiliser au maximum l'énergie disponible. Tel que mentionné plus haut, la valeur de R_{in} variera avec la température où notamment, en condition de froid intense, celle-ci sera augmentée significativement. Le S.G.B. devra prendre en considération la variation de R_{in} et de la chute de tension qui lui est associée.

Peu importe l'estimation de la T.C.O., s'il arrivait que la demande en courant soit tellement forte que la tension aux bornes d'une cellule devienne négative, le S.G.B. devra impérativement arrêter ou ralentir la décharge, car cette cellule sera endommagée très rapidement par une utilisation en polarité inverse [2].

PUISSANCE MAXIMALE

Avec l'âge, une cellule aura une résistance interne de plus en plus grande, typiquement jusqu'à deux fois plus grande pour une cellule en fin de vie utile [31]. La cellule aura donc de plus en plus de pertes joules à l'interne et une tension à ses bornes de plus en plus faible, pour un courant donné. En plus de faire chauffer la cellule, cette chute de tension forcera l'onduleur du moteur à tirer un courant supérieur pour obtenir la même puissance à la sortie, aggravant davantage le problème d'échauffement. Ainsi, la conception d'un bloc batterie devrait baser ses calculs sur le pire cas envisageable, soit à la fin de la vie utile des cellules. Si le S.G.B. mesure que l'augmentation de température prédite est supérieure à la capacité d'évacuation du bloc batterie,

il devra communiquer avec le contrôleur central du véhicule pour diminuer la demande, et ainsi assurer la survie du bloc batterie.

Égalisation des charges

Tel que mentionné dans les sections précédentes, trois phénomènes pourront causer, au fil du temps, une variation de l'É.D.C. entre les cellules :

1. la variation des courants de fuites à l'interne des cellules ;
2. les différences de capacité et de R_{in} entre les cellules ;
3. les différences de capacité et de R_{in} causées par le gradient de température dans le bloc batterie, s'il y a lieu.

Les mesures effectuées dans le cadre de la partie expérimentale de ce mémoire, présentées au chapitre 5, démontrent des écarts dans les valeurs de R_{in} entre deux cellules d'un groupe de seize allant jusqu'à 100 % de la valeur nominale de R_{in} de la cellule

Pour les raisons mentionnées au cours de ce chapitre, si l'on veut maximiser l'utilisation de la plus grande plage possible d'un bloc batterie, le S.G.B. doit donc intégrer une fonction d'égalisation des cellules.

Il existe deux grandes familles d'égalisation : les systèmes passifs et les systèmes actifs. Les systèmes passifs sont des dispositifs contrôlés par le S.G.B. qui soustrait de l'énergie à une cellule et la dissipe en chaleur dans une résistance ou une charge dédiée à cet effet. Le S.G.B. égalisera alors toutes cellules ayant un É.D.C. supérieur à la cellule la plus faible. Les avantages de ces systèmes sont la simplicité d'implémentation et le faible coût. Le principal désavantage est que la plage utile du bloc batterie est limitée par la cellule ayant le moins de capacité, étant la première cellule à faire déclencher les seuils de sécurité.

Une égalisation est dite active lorsque la topologie de branchement permet une redistribution de l'énergie au sein des cellules. L'énergie n'est pas perdue, elle est transférée d'une cellule à l'autre. À l'inverse des égalisations passives, ces systèmes permettent d'utiliser une plus grande plage du bloc batterie, mais ont la contrepartie d'être plus complexes et plus coûteux à implémenter.

Comme l'étude approfondie des égalisateurs dépasse le cadre de ce document, les exemples pour chaque famille d'égalisateur ainsi qu'une discussion plus poussée sur les avantages de chacun sont donnés à l'annexe A.

Archivage de données

Le premier module qui aidera la qualité des estimations d'un S.G.B est l'archivage des données. Un S.G.B. ne pourra pas faire une étude sur les tendances de conduites ou les dérivations du comportement de ses cellules s'il ne peut pas garder en mémoire une grande quantité de données. Comme la mémoire embarquée d'un microcontrôleur est relativement faible, l'ajout d'un module de mémoire externe permet de garder en mémoire un nombre élevé de données mesurées lors des derniers cycles afin d'établir une tendance et prévoir les états futurs. Les meilleures prédictions des états issues de cette collecte de données peuvent réduire les temps d'égalisation d'un facteur entre 2 et 5 [2].

Il est à noter que les périphériques externes, comme des mémoires de type FLASH, fonctionnent à des vitesses moindre que les processeurs de calculs. Le nombre de lectures et d'écriture est limitée et une latence entre le moment de l'envoi de la commande et la réception des données est à prévoir. Pour les mémoires, chaque distributeur note généralement les capacités de son produit en Mo/secondes et le délai en μ secondes. Cette latence inévitable aura des conséquences lors de l'élaboration des algorithmes de contrôle et de mesure.

Communication

Le S.G.B. a aussi pour fonction de communiquer avec le système de gestion générale du véhicule pour lui transmettre l'état global du banc de batterie, l'É.D.C. général et les erreurs ou avertissements conséquents. Le protocole le plus utilisé dans le domaine des véhicules électriques est le CAN (*controller area network*) [61]; il est possible cependant d'opter pour un autre protocole (Ethernet, USB, etc.) si certaines fonctionnalités le nécessitent [2].

Si ce module de communication du S.G.B. permet aussi recevoir d'autres données externes au bloc batterie, comme la vitesse du véhicule ou des données GPS (*global positioning system*), les estimations des paramètres des cellules basées sur des tendances de conduite pourront être beaucoup plus précises.

2.3.2 Topologies de branchement d'un S.G.B.

Centralisée

Dans une topologie centralisée (figure 2.14), l'ensemble des fonctions d'un S.G.B. sont réunies à un seul endroit. Cette topologie est la plus simple à concevoir et à implémenter. Comme tout est centralisé, il est facile de remplacer le S.G.B. s'il est défectueux.

En contrepartie, l'accès à chaque cellule exige de très longs conducteurs et offre donc peu d'immunité au bruit. De plus, comme le S.G.B. centralisé doit gérer toutes les cellules, la lecture et les calculs demandent beaucoup de temps à l'organe de traitement de l'information du S.G.B. (microprocesseur).

Cette topologie n'est avantageuse que pour les petites séries de cellules, dont le nombre est inférieur à quelques dizaines de cellules.

Modulaire

La deuxième topologie proposée est l'approche par module (figure 2.15). Cette forme sépare les fonctions d'un SGB en modules exactement identiques. Par la présence de plusieurs microprocesseurs, cette forme offre l'avantage, comparativement à la topologie centralisée, de pouvoir effectuer un traitement en parallèle. Comme chaque module peut être inséré près des cellules, les fils requis pour la lecture et l'égalisation sont beaucoup plus courts, augmentant ainsi la qualité de lecture.

Les désavantages de cette configuration proviennent des fonctionnalités de l'unité décisionnelle (le contrôleur), qui sont dupliquées sur chaque plaquette, et des contraintes augmentées pour le bus de communication, qui sera lourdement chargé par l'échange d'information entre les modules, nécessaire pour les contrôleurs afin de prendre leur décision. Ceci engendre plus de coûts et plus de difficulté pour l'encapsulation du bloc batterie. Aussi, le nombre de cellules d'une série doit être un multiple du nombre d'entrées par module, sans quoi il y aura des entrées non utilisées, utilisant un espace précieux.

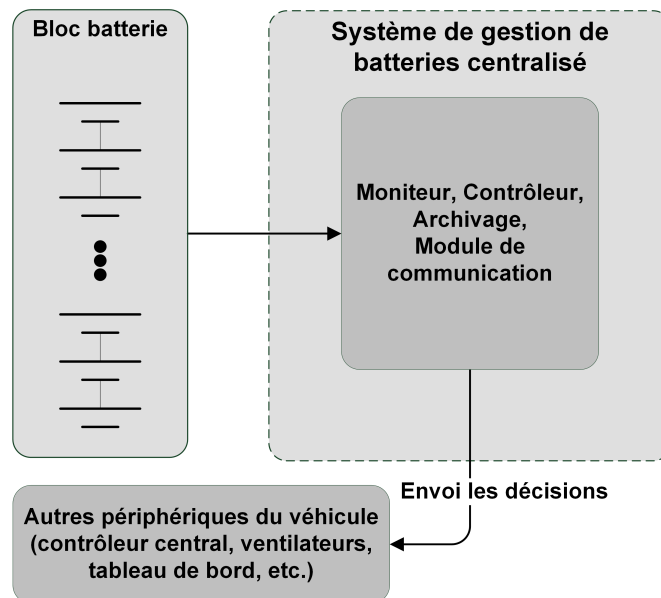


Figure 2.14 Topologie de système de gestion de batteries centralisé

Maître - Esclave

Pour contrer les désavantages d'une topologie modulaire, les fonctionnalités de lecture et de calcul ont été séparées des fonctionnalités décisionnelles. Ainsi, la topologie maître-esclave (figure 2.16) offre de nombreux avantages sur la configuration précédente. Un maître, dédié aux décisions est séparé de ses esclaves, qui ont des tâches plus simples à réaliser. Comme tous les esclaves sont identiques et plus petits que leurs équivalents dans une approche modulaire, leurs coûts de production et d'implémentation sont plus faibles qu'une approche modulaire. Cette configuration permet d'utiliser un maître pour plusieurs modules en parallèle, souvent sur un bus de communication dédié, réduisant les efforts d'encapsulation. Comme chaque esclave est dédié à un module, le remplacement ou l'ajout de nouveaux modules se fait facilement et à faibles coûts. Cette configuration est la plus utilisée pour les bancs de batteries de grande envergure (plusieurs centaines de cellules).

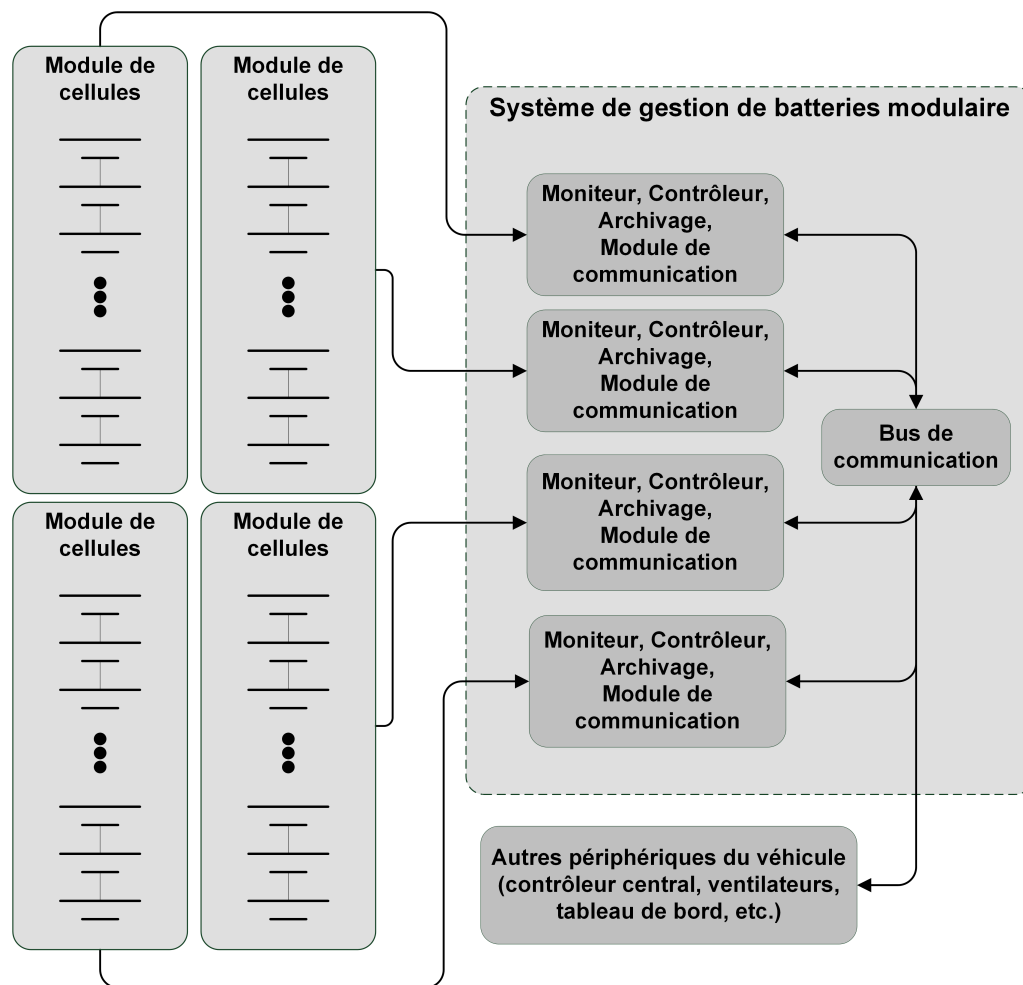


Figure 2.15 Topologie de système de gestion de batteries modulaire

Les désavantages de cette configuration sont dans la complexité de communication. Le maître doit communiquer avec ses esclaves et transmettre ses décisions assez rapidement pour assurer la sécurité des cellules.

Distribué

La dernière configuration possible pour un S.G.B. est la distribution des fonctionnalités sur chaque cellule (figure 2.17). Comme le S.G.B. est directement rattaché sur la cellule, la qualité de lecture ainsi que la rapidité d'exécution sont optimales. En opposition, l'encapsulation devient beaucoup plus complexe et coûteux. Tout comme dans la topologie modulaire, les contreparties de cette stratégie se situent surtout au niveau de la communication entre les modules. À noter que dans cette option, il est beaucoup plus facile d'inclure une égalisation passive qu'active. Cette topologie est généralement privilégiée si l'espace n'est pas une contrainte de design.

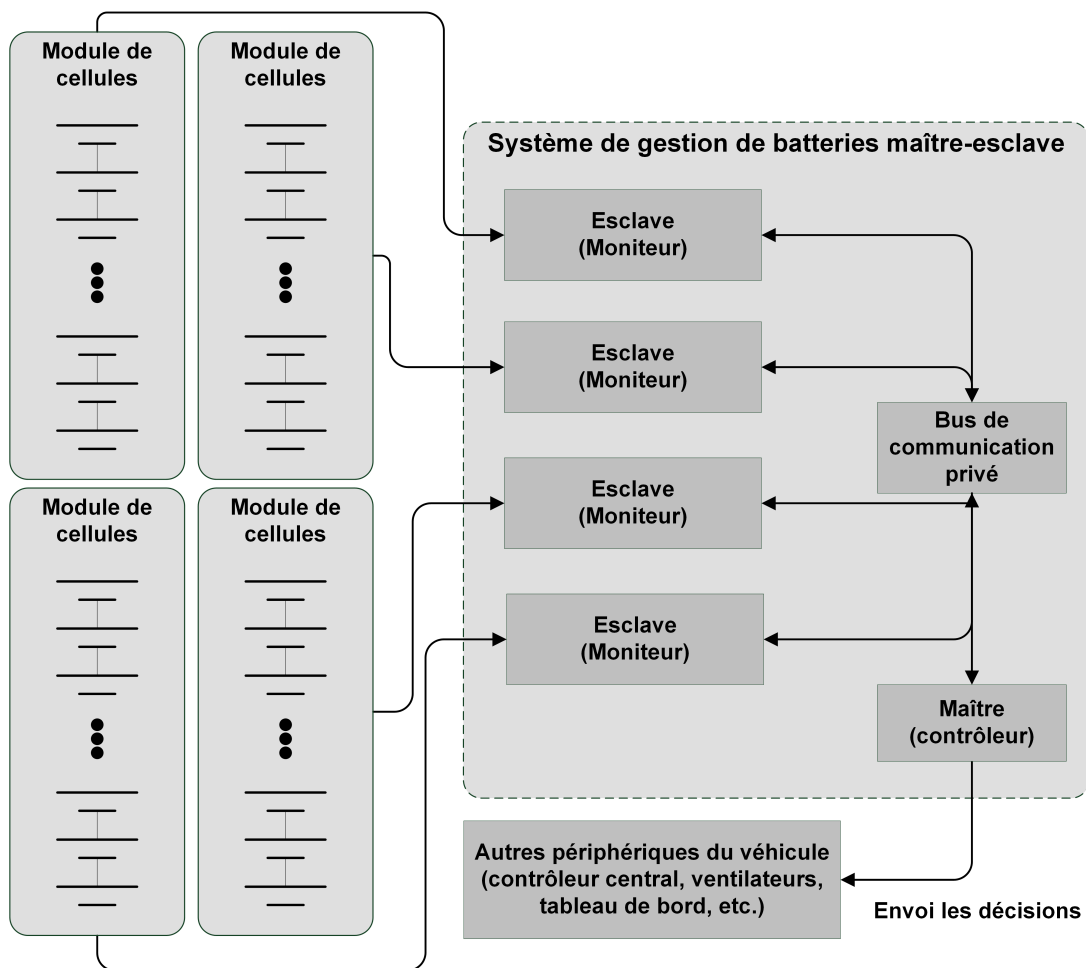


Figure 2.16 Topologie de système de gestion de batteries maître-esclave

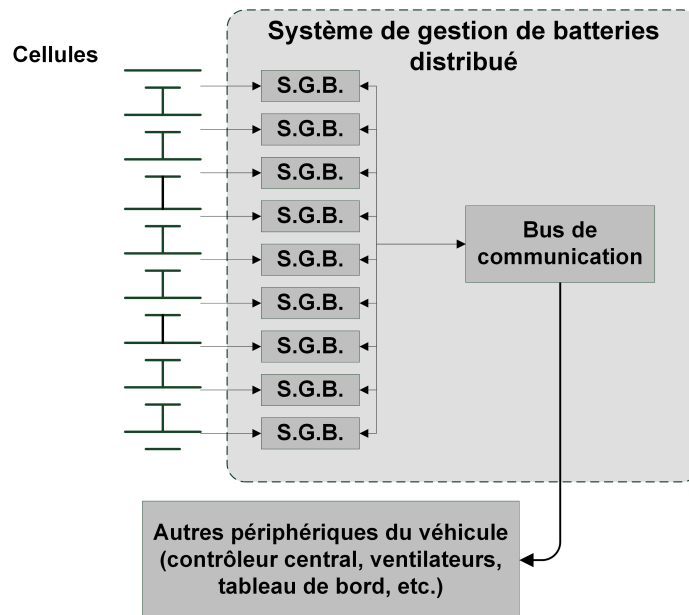


Figure 2.17 Topologie de système de gestion de batteries distribué

2.4 Conclusion de l'état de l'art

Dans ce chapitre, il a été question de la chimie des accumulateurs électrochimiques, des modèles électriques modélisant ces réactions chimiques, de la variabilité de chaque paramètre selon les conditions des cellules et des concepts généraux des systèmes de gestion de batteries.

Premièrement, il a été vu comment l'énergie électrique accumulée ou libérée par une cellule provient d'une réaction d'oxydoréduction et par quels facteurs est-ce que cette réaction peut être modifiée. Il a aussi été expliqué quelles réactions parasites peuvent réagir dans certaines conditions et quels sont leurs effets sur la dégradation ou les dangers relatifs aux cellules Li-ion. Puis, les réactions chimiques ont été modélisées par des composantes électriques et deux modèles électriques ont été proposés.

Deuxièmement, chaque élément des modèles présentés a été exploré. Leurs comportements et interactions avec les autres éléments ont été expliqués en détail. Il a été question, entre autres, de la capacité, de l'état de charge, de la résistance interne, de l'état de santé et de la résistance de fuite.

Finalement, les fonctions des systèmes de gestion de batterie (S.G.B.) ont été approfondies. Les fonctions de base des S.G.B., telles que la mesure des paramètres, le contrôle de l'état des cellules ainsi que l'égalisation des charges ont été étudiés. Pour terminer, différentes topologies de branchement des S.G.B. ont été proposées. Les avantages et inconvénients ont été énoncés pour les topologies centralisé, modulaire, maître-esclave et distribué.

CHAPITRE 3

IMPLÉMENTATION D'UN ALGORITHME DE CLASSEMENT SÉLECTIF. THÉORIE ET MISE EN ŒUVRE EXPÉRIMENTALE

Cette section fait le détail de la problématique énoncée au chapitre 1. Il est traité comment la traduction des équations mathématiques du chapitre 2 dans un système réel comporte des limites, notamment au niveau de l'accès aux périphériques. Ceci pourra se traduire par une perte d'information où une impossibilité de fonctionner en temps réel. Ces limites sont détaillées et une solution basée sur une nouvelle méthode de classement est présentée. Des hypothèses permettant à cette solution d'être implémentable sont énoncées. L'implémentation complète de cet algorithme novateur de classement sélectif, permettant de résoudre cette problématique, est ensuite abordée. Il sera question de la segmentation de la mémoire pour former une carte de distribution des mesures et l'utilisation de cette carte à l'aide d'un filtre à moyenne mobile multidimensionnel. Pour finir, une analyse des besoins computationnels sera explorée.

3.1 Problématique

À la lueur de la présentation de l'état de l'art, exposé au chapitre 2, il s'avère que quelques problèmes persistent quant à la conception de S.G.B. pour des blocs batteries destinés aux V.É. ou V.É.H.

Premièrement, les S.G.B. devraient tenir compte des variations des paramètres d'une cellule à une autre. Si les S.G.B. ne prennent pas en compte les divergences des paramètres des cellules d'une batterie, la mesure de ces paramètres et la prévision du comportement et des déséquilibres de celles-ci sont alors teintées d'une erreur qui croît avec le temps [13, 66]. Cette erreur peut mener à une fausse représentation de l'état global du bloc batterie et permettre aux cellules de sortir de leur Z.O.S.R. et ainsi accélérer leur vieillissement.

Deuxièmement, outre les variations entre les cellules, chaque cellule verra ses paramètres internes changer en fonction de diverses conditions d'utilisation (i.e. le style de conduite appliqué, la route empruntée, la température extérieure, l'accès à des chargeurs sur la route, etc.). Comme les situations propices pour effectuer une mesure pour chaque paramètre se répètent à des fré-

quences aléatoires, le design des filtres numériques pertinents, la création de modèles représentatifs sont difficiles à faire. Conséquemment, l'ensemble des mesures passées accumulées dans le S.G.B., qui devrait aider à mieux prédire le comportement futur, est difficile à interpréter.

En conséquence du dernier point, il faut accumuler un très grand nombre de données pour s'assurer d'avoir un historique du comportement des cellules dans toutes les conditions d'utilisation possibles. Les données recueillies à l'état brut peuvent rapidement remplir l'espace mémoire disponible en périphérie immédiate du microprocesseur embarqué. La compression des données ou l'emmagasinage des données sur un support externe (carte SD ou bâton USB) requiert alors une charge de travail et un délai supplémentaire pour le processeur. Le délai s'explique en grande partie parce que ces périphériques fonctionnent à des vitesses inférieures à celle du processeur. Lorsque le S.G.B. désire procéder à l'estimation d'un paramètre, le temps nécessaire pour parcourir les tableaux de données sur le support de mémoire externe pour y retrouver les données pertinentes (i.e. données mesurées dans des conditions de conduite similaire) peut rapidement occuper une portion importante du temps de calcul disponible pour l'accès à ces données, voire même l'excéder à moins d'utiliser un organe de calcul très puissant, ce qui se révèle peu économique en présence de quelques milliers de cellules. Il est donc pertinent de sélectionner des méthodes numériques permettant de synthétiser l'information de l'état global des cellules par une modélisation compacte, utilisant un nombre minimal de variables et présentant une complexité limitée.

Il existe des modèles numériques de cellules capables de prendre tous les facteurs d'influence en considération pour la prédiction du comportement des cellules, mais ceux-ci font appel à des calculs très complexes [48, 49, 51]. Chaque prédiction de ces modèles demande la résolution d'équations intégrées-différentielles d'ordre élevé, pouvant se situer entre 7 et 16 pour certains. Il est souvent impossible de traiter en temps réel l'ensemble des paramètres pour la totalité des cellules qu'à condition d'être exécutés sur des processeurs de haut calibre, augmentant le coût du S.G.B. Certains systèmes font aussi appel à des appareils de mesure spécialisés (mesure par impédance de Warburg, spectroscopie, poids des électrodes, etc.). Ces solutions s'adaptent mal aux systèmes embarqués pour véhicule électrique pour des raisons de coût et de volume.

Le problème qui fera l'objet de ce chapitre concerne donc l'amélioration des dispositifs permettant de mesurer efficacement l'état du bloc batterie, cellule par cellule, et la dispersion des paramètres internes des cellules et en particulier leur implantation dans un véhicule électrique par des moyens adaptés et réalistes. Ainsi, pour améliorer les prédictions du comportement d'une batterie au lithium, serait-il possible d'offrir une telle méthode de mesure pour les moniteurs de S.G.B. qui permettrait d'extraire les divergences statistiques des paramètres des cellules à partir uniquement de données facilement mesurables sur un processeur de calcul modeste ?

3.2 Méthodologie et hypothèses proposées

3.2.1 Objectifs

Tel qu'exposé à la section 1.2, l'objectif de ce mémoire est de proposer et de valider un algorithme embarqué permettant la mesure en ligne des paramètres internes de cellules à partir uniquement de la tension, du courant, de la température ainsi que du temps, lequel serait monté sur un processeur de puissance de calcul modeste. Le paramètre principal évalué sera la résistance interne, mais l'algorithme devra être facilement adaptable pour être réutilisé pour évaluer d'autre paramètre comme la capacité, l'état de vie, l'état de charge, la profondeur de décharge, la résistance de fuite ainsi que la tension en circuit ouvert. La précision des mesures devra être suffisamment grande pour permettre l'extraction des courbes de dispersion de ces paramètres. Pour finir, une validation des mesures de l'algorithme sera faite avec les méthodes traditionnelles.

L'algorithme de mesure est basé sur une nouvelle méthode de classification des données, permettant de réduire considérablement le nombre de lectures et d'écriture en mémoire (interne ou externe) ; laissant plus de temps à un processeur modeste le temps de faire ses calculs d'estimation. Cette méthode de classification sera présentée à la section 3.3. Le fondement de la méthode développée dans ce chapitre est qu'au lieu de classer les lectures selon une base de temps (donc en ordre chronologique), les lectures et les estimations seront sauvegardées en fonction des conditions de conduites présentes lors de la mesure. Ainsi, lorsque le S.G.B. désire faire une estimation des paramètres basée sur ses expériences passées, plutôt que de parcourir l'ensemble des données classées chronologiquement à la recherche de données pertinentes, pouvant demander un grand nombre de lectures en mémoire ; les zones à accéder en mémoire sont calculées en fonction des conditions de conduites actuelles, régions en mémoire où les expériences passées pertinentes ont été entreposées, et l'information est ainsi accédée plus rapidement avec un nombre limité de lectures.

Cette méthode permettra de prendre en considération plusieurs facteurs, utilisés comme coordonnées dans un nuage de mesures, pour le calcul d'un paramètre sans pour autant demander la résolution d'équations intégro-différentielles d'ordre élevée, où chaque facteur complexifie l'équation à résoudre. Elle permettra aussi d'accélérer l'accès à l'information emmagasinée sur la mémoire externe.

Le cheminement de cet objectif de haut niveau sera divisé en une série d'objectifs plus ciblés. Pour bien apprécier la problématique mentionnée ci-haut, la recherche sera distribuée de la manière suivante :

1. Fixer les éléments essentiels à mesurer ou à connaître pour estimer la valeur précise d'un paramètre d'une cellule au lithium-ion. Basé sur la précision de la mesure de chacun de ces éléments, déterminer la confiance attribuée à chaque estimation. Évaluer aussi la fréquence de rafraîchissement des éléments mesurés et estimations effectuées requises afin d'obtenir une information suffisamment précise et ainsi de faire ressortir les distributions statistiques de chacun des paramètres internes des cellules.
2. Établir dans quelles conditions de conduite d'un V.E./V.E.H. ces éléments peuvent-ils être mesurés adéquatement. Évaluer statistiquement si les probabilités d'occurrence de ces conditions sont supérieures au rafraîchissement requis au point précédent.
3. Trouver la séparation adéquate des conditions de conduite, utilisées dans le classement des données, qui permettra de respecter les limites de lecture et d'écriture disponibles dans un processeur embarqué réaliste pour un S.G.B. d'un véhicule électrique sans toutefois perdre trop de précision sur la qualité des estimations futures.
4. Monter un algorithme sur un moniteur expérimental de S.G.B. capable de mesurer et de classer de manière autonome les paramètres internes de seize cellules dans des conditions de conduite simulée. Évaluer avec les méthodes conventionnelles si les données recueillies concordent.
5. Tout au long de la réalisation, axer les choix de conception pour un développement compatible avec un véhicule électrique ou hybride, donc en prenant en considération les coûts, les disponibilités et la taille des composantes. Les solutions retenues devraient être réalistes pour une production à grande échelle.
6. Extraire la forme et l'amplitude des distributions statistiques des paramètres de cellules au début et à la fin de leur vie utile.
7. Utiliser les distributions obtenues pour mieux prédire le comportement des cellules.
8. Discuter des effets de différents types d'égalisateur et des stratégies d'équilibrage sur le comportement des cellules en fonction des distributions statistiques obtenues.

L'accomplissement de cet ensemble d'objectifs marquera la complétude de l'algorithme proposé et confirmera que les dispersions statistiques des cellules peuvent être mesurées adéquatement avec un dispositif adapté à une mise en œuvre commerciale.

3.2.2 Hypothèses

Chaque paramètre interne des cellules à mesurer a été défini dans l'état de l'art au chapitre 2. Les formules mathématiques simples, mais grossières, provenant de la littérature exposent souvent l'effet d'un ou de paramètres sur un autre, considérant les autres constants ou indépendants. Les formules mathématiques, ou modèles, plus complexes sont plus représentatifs de la réalité, mais sont beaucoup plus lourdes pour le processeur de calculs. L'hypothèse est faite ici que les effets des interdépendances des paramètres sont suffisamment négligeables pour permettre l'utilisation des formules simples. Il est supposé que l'erreur induite est suffisamment faible pour donner une information appréciable de l'état du bloc batterie. Ceci permettra de réduire considérablement la charge de calcul et permettra l'utilisation de processeurs plus petits et moins chers ; deux facteurs qui les rendront plus adéquats pour une utilisation à grande échelle dans un V.É. ou V.É.H.

Pour illustrer cette hypothèse, l'équation de Nernst 2.5 donnée au chapitre 2 indique qu'il existe un lien entre la tension aux bornes de chaque cellule et la concentration des réactifs chimiques de part et d'autre des électrodes. Les deux extrêmes de ces concentrations de réactifs devraient pouvoir faire ressortir la capacité des cellules. Or, pour le suivi exact de cette équation, il faut prendre en compte l'évolution de la température et du courant en plus de résoudre une équation logarithmique. Sans dire que cela est impossible, envisager ces avenues réduira considérablement les chances que le processeur de calcul puisse suivre l'état des cellules en temps réel. L'hypothèse est donc posée que l'intégration numérique du courant suffit pour donner une information pertinente sur la capacité des cellules. Ainsi, autant pour le S.G.B. qui effectuera les mesures conventionnelles que pour l'algorithme de classement, seules les formules simples seront utilisées.

La seconde hypothèse est d'affirmer qu'il est possible de rencontrer une condition de conduites dans les cycles de conduites typiques de V.É. et V.É.H. assez fréquemment pour assurer une bonne précision des mesures des facteurs d'influences d'un paramètre donné.

3.3 Algorithme de classement des mesures

Ce projet de recherche propose deux innovations par rapport à la littérature. Premièrement, un système de classement novateur permettra d'insérer les données en mémoire selon les conditions de conduites de manière à ce qu'elles soient rapidement accessibles pour les estimations futures. Deuxièmement de ce projet utilisera un système de filtrage des données à moyenne mobile où les données ainsi classées ne sont pas chronologiques et donc pas échantillonnées à une fréquence

fixe. Ces deux fonctions permettront de pallier aux problèmes énoncés ci-dessus et augmenteront la précision des S.G.B. utilisés dans des V.É. ou V.É.H.

Cet algorithme de classement ce veut un ajout à un S.G.B. conventionnel, qui conserve et exécute toutes les fonctionnalités normales d'un S.G.B. Dans un contexte logiciel, ce système de classement s'insère entre le processeur de calcul et l'accès à la mémoire externe. En référence au schéma générique présenté à la figure 2.13, la figure 3.1 indique en rouge l'emplacement de cet algorithme de classement. Dans le cadre de ce projet de recherche, uniquement la résistance interne R_{in} a été classée par cet algorithme, les autres paramètres estimés des cellules sont laissés selon la méthode traditionnelle.

La conception technique du reste du S.G.B., implémentant les méthodes de mesures conventionnelles, sera détaillée à la section 4.1. Ce S.G.B. sera responsable de fournir les informations requises par cet algorithme de classement, soit l'état du bloc batterie et les mesures de résistances internes des cellules. Les méthodes de mesures des autres paramètres utiles d'un S.G.B., mais non essentiels à l'algorithme, comme la mesure de la capacité ou de l'état de vie des cellules, seront aussi présentées.

3.3.1 Carte de distribution des mesures des paramètres

Théorie

Tel qu'expliqué à la section 2.3.1, il a été vu comment un S.G.B. accumule des données en vue d'effectuer des opérations mathématiques afin d'améliorer la qualité de ses estimations (par le filtrage, notamment). Cependant, lorsque les données acquises commencent à s'accumuler, il peut devenir fastidieux pour un processeur de les classer et de s'y retrouver lorsqu'un paramètre doit être réévalué. Ainsi, l'une des pièces majeures dans ce projet de recherche est la proposition d'un système de classification des données sous forme de carte de distribution. Plutôt que de classer les données en ordre chronologique, où les conditions de conduite lors de la mesure sont aléatoires et imprévisibles, les données sont plutôt classées par conditions de conduite et par paramètres mesurés ; ayant alors des points temporels d'entrée aléatoires. Pour y parvenir, les données mesurées seront classées en fonction de leur appartenance à un segment (ou groupe) d'état de charge, de température, de courant et de résistance interne formant un point sur une carte de possibilités. Le détail de la description de chacun des groupes sera décrit par le tableau 3.1. Pour chaque point sur cette carte est associé un compteur, représentant le nombre de fois que ce paramètre a été mesuré dans les conditions de conduites représentées par les coordonnées de cette carte. Lorsque le système procède à une mesure dans des situations de conduites qui appartient à ce point, le compteur de ce point est incrémenté de 1.

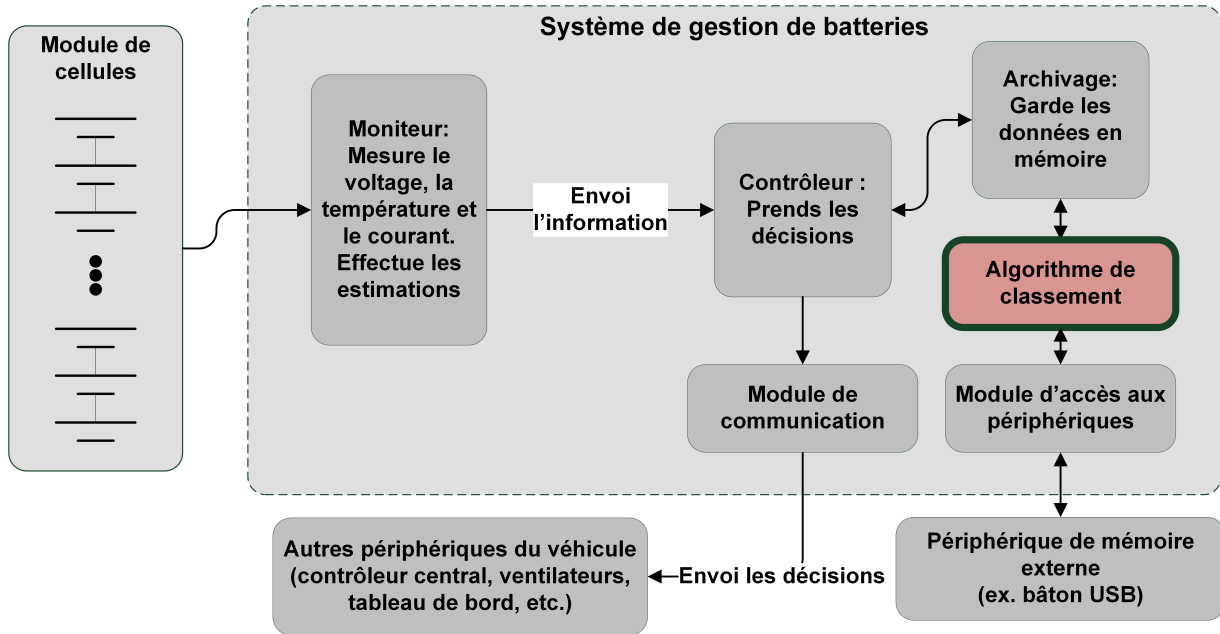


Figure 3.1 Emplacement logiciel de l'algorithme de classement

Dans un S.G.B. typique, lorsque celui-ci veut faire une estimation d'un paramètre, il doit parcourir les données entreposées en mémoire en ordre chronologique (car elles ont été classées ainsi). Ainsi, le S.G.B. n'a aucune idée à quels moments il trouvera des données pertinentes pour remplir les tampons de ses filtres. Il doit regarder et analyser toutes les données mémorisées. En contrepartie, dans le système de classification proposé, les données pertinentes (représentant les mesures effectuées dans des conditions de conduites similaires) peuvent être calculées et la région autour de ce point de la carte de distribution peut être accédée rapidement. Il est clair que les points localisés en mémoire à plus grande distance du point représentant les conditions actuelles du bloc batterie seront moins pertinents que les points les plus proches. Ainsi, le S.G.B. pourra affecter un poids à chaque compteur recueilli, représentant la pertinence des données. Cette technique de classification permet rapidement de discriminer les données non pertinentes sans passer au travers des milliers de lectures chronologiques, qui demanderait un très grand délai causé par l'accès limité de la mémoire embarquée.

Dans le cadre de ce projet de recherche, cette technique sera appliquée pour la classification et l'estimation avancée de la résistance interne R_{in} des cellules. Il a été discuté à la section 2.2.5 comment la valeur de la R_{in} d'une cellule peut varier en fonction de la température, de l'état de charge et du courant d'alimentation. La matrice de distribution pour la résistance interne aura cinq dimensions : une pour séparer chaque cellule et avoir une information individuelle, trois dimensions pour exprimer la situation du bloc batterie et une autre dimension représentant les valeurs possibles de R_{in} dans ces situations. Chaque combinaison possible de ces cinq dimen-

sions représentera un ensemble de coordonnées dans un nuage de points enregistré en mémoire. Tel que discuté, pour chaque espace mémoire, un compteur viendra mémoriser le nombre de fois que chaque valeur de R_{in} a été mesurée dans ces conditions.

Pour des questions de déplacement en mémoire plus rapide, les dimensions seront disposées du plus lent (i.e. le numéro de cellule, qui ne variera jamais) au plus rapide, soit la demande en courant. De cette idée, chaque position dimensionnelle dans la matrice est représentée par un ensemble de coordonnées $\{\# \text{ de cellule}, \text{Température}, \text{É.D.C.}, \text{Courant}, R_{in}\}$. Par exemple, si à un temps t , le bloc batterie a un É.D.C. moyen de 83 %, une température de 25 °C et qu'une accélération demandant 18 A provoque une chute de tension amenant la mesure d'une R_{in} sur la cellule #12 de 20 $m\Omega$; le compteur associé aux coordonnées $\{12, 25, 83, 18, 20\}$ serait incrémenté de 1. Au niveau du logiciel, cette coordonnée se reflète par une adresse mémoire, à laquelle est associée une case mémoire, généralement de 8 bits, représentant le compteur.

L'avantage de ce système ne se situe pas au niveau de l'insertion des données, mais plutôt au niveau de la récupération des données. Lorsque le S.G.B. veut relire les dernières données pour effectuer une analyse ou une estimation de la R_{in} , la méthode de classement chronologique oblige la relecture d'un grand nombre de données précédentes afin de retrouver les données pertinentes (il est aussi difficile de savoir quand arrêter de chercher des données). Le système de classement proposé, en revanche, permet d'y accéder directement et le nombre d'adresses mémoires à lire est fixe. Une illustration de cette comparaison est donnée à la figure 3.2. Le nombre d'accès au périphérique de mémoire externe (souvent le facteur limitatif dans la vitesse d'exécution) est réduit au minimum.

L'approche traditionnelle chronologique est très difficile à quantifier, car l'emplacement des données pertinentes en mémoire est aléatoire, car les conditions de conduite sont indépendantes du temps, alors que ce dernier sert de référence pour le classement. Si le S.G.B. est chanceux, il pourra récupérer des données pertinentes rapidement, par exemple, dans les 5000 dernières lectures; mais il pourrait tout aussi bien ne rien trouver de pertinent dans les 10 000 dernières lectures, et s'en rendre compte seulement après les avoir toutes lues.

En d'autres mots, s'il est considéré un taux de confiance comme étant la comparaison de la lecture en cours versus d'autres lectures faites dans le passé dans les mêmes situations de conduites, l'algorithme de classement permet, pour chaque accès à la mémoire externe, d'obtenir une donnée utile à la comparaison. Le taux de confiance pourra croître à chaque donnée récupérée sur la mémoire externe. Au contraire, le taux de confiance lié à la méthode traditionnelle augmentera aléatoirement, car chaque donnée recueillie n'est pas nécessairement utile à la comparaison.

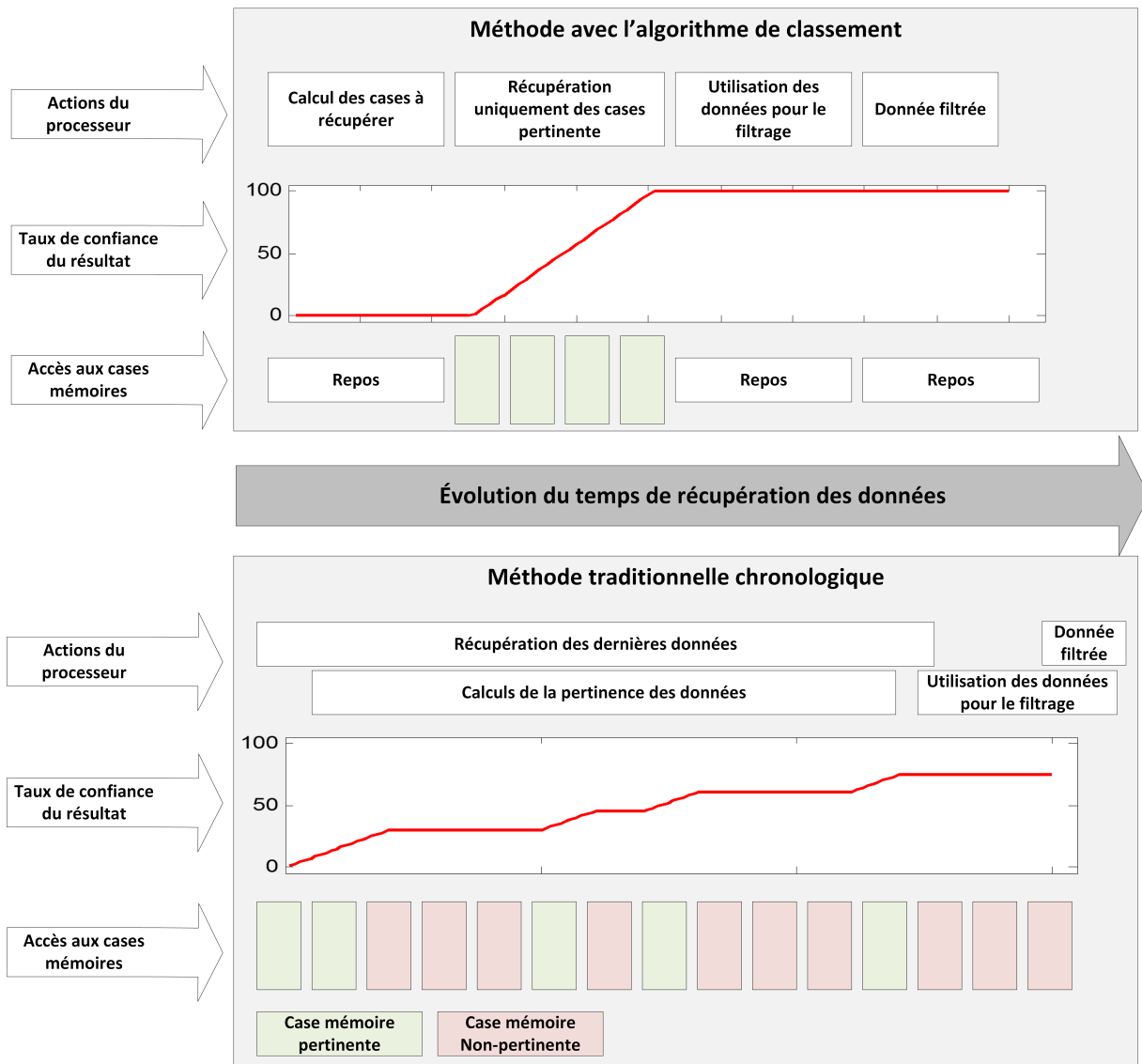


Figure 3.2 Comparaison entre la méthode chronologique et la méthode proposée

Implémentation physique

LA SEGMENTATION DES RÉGIONS DU NUAGE

Pour définir l'état du bloc batterie, l'approche proposée implique nécessairement une résolution plus faible que pour les calculs en temps réel, qui seront abordés dans la section expérimentale (section 4.1.3). En effet, une granularité très fine du nombre d'états demanderait un nombre de compteurs exorbitant et la mémoire disponible sur la clé USB serait insuffisante. Pour illustrer cela, l'exemple suivant illustre la mémoire requise pour une granularité fine avec un compteur de profondeur de 8 bits :

$$\begin{aligned}
 \text{Espace requis} &= \text{nombre de cellules (16)} \cdot \\
 &\quad \text{nombre de possibilités de température } (-50\text{ }^\circ\text{C à } 127\text{ }^\circ\text{C}, \pm 1\text{ }^\circ\text{C}) \cdot \\
 &\quad \text{nombre de possibilités d'É.D.C. (0 \% à 100 \%, } \pm 0.1\text{ \%)} \cdot \\
 &\quad \text{nombre de possibilités de courant } (-20\text{ A à } 20\text{ A}, \pm 1\text{ mA}) \cdot \\
 &\quad \text{nombre de possibilités de résistance interne (4 m}\Omega\text{ à } 200\text{ m}\Omega, \pm 1\text{ m}\Omega) \cdot \\
 &\quad 8\text{ bits/possibilités} \\
 &= 16 \cdot 177 \cdot 1000 \cdot 40000 \cdot 196 \cdot 8 \\
 &= 177\,623\,040\,000\,000\text{ bits} = 20.7\text{ Teraoctets}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Cette solution ne serait pas viable non plus au niveau du délai requis pour obtenir une estimation de paramètres, évaluer $\pm 5\%$ de la situation présente demanderait la vérification de milliers, voire plusieurs dizaines de milliers, de compteurs. Compte tenu de ces deux points, il est impératif de rassembler les possibilités en régions pour réduire la taille de la matrice. Il est question maintenant de déterminer granularité adéquate de ces régions. Des régions trop petites demanderont trop de temps pour recueillir l'information alors que des régions trop grandes réduiront la précision des mesures et diminueront la pertinence du système de classement.

L'idée générale n'est pas d'avoir l'information exacte, mais bien d'avoir une idée de l'état du bloc batterie lorsque la mesure a été prise. Le bloc était-il plein, presque plein, moyennement plein, presque vide ou vide ? Le bloc était-il très froid, froid, moyen, chaud ou très chaud ? Et ainsi de suite. C'est ici l'un des fondements de la méthode proposée, où une granularité plus grossière permettra un classement efficace, rapide et de mémoire réduite. Pour déterminer la taille des régions, il ne peut y avoir de réponse exacte, il faut faire un compromis entre le temps de calcul et la pertinence des régions. La segmentation retenue est illustrée au tableau 3.1 et par la figure 3.3. Il est à noter qu'il a été plus facile d'attribuer à chaque cellule un fichier distinct, plutôt qu'un seul immense fichier pour l'ensemble de toutes les cellules. Ainsi, dans

l'implémentation effectuée, chaque fichier représente alors la première dimension du système de classement proposé ci-dessus et l'adresse mémoire représente les quatre autres dimensions.

Avec la segmentation telle que proposée au tableau 3.1, le nombre de possibilités est déterminé par 22 bits sur 32. Ainsi, le nombre de possibilités devient $2^{22} = 4\,194\,304$. Pour chaque possibilité, il est associé un espace mémoire (un compteur) de 8 bits. Ainsi, l'espace requis sur la clé USB est donc 4,00 Mégaoctets/cellule. Il n'est pas nécessairement souhaitable d'utiliser tous les bits disponibles, si les 10 bits restants avaient été utilisés, l'espace requis aurait été de 4 Gigaoctets/cellule. Cette option n'a pas été retenue, car l'espace disponible sur la clé ne permettait pas d'enregistrer toutes les possibilités des 16 cellules. L'utilisation de 22 bits a été jugée comme un bon compromis entre la perte de précision, le nombre de lectures requis et la pertinence de l'information encodée.

Il est à rappeler que dans le cas d'une mémoire formatée en FAT32, le formatage principalement utilisé par les bâtons de mémoire USB, une case mémoire a toujours une adresse mémoire de 32 bits. Comme la segmentation proposée ci-dessus n'utilise que 22 bits, le reste de l'adresse mémoire doit être rempli avec des zéros. Pour une convivialité de programmation, il a été plus simple de rassembler la température et l'É.D.C. sur le même octet, d'où la séparation des bits de remplissage.

Dans la segmentation proposée dans la suite du mémoire, tous les ensembles de coordonnées sont d'égale granularité (i.e. 1 cellule, 15 °C, 6.25 % d'É.D.C., 1 A et 1 $m\Omega$). Dans une recherche ultérieure, il serait possible de répartir certains groupes sur une base logarithmique, donc en augmentant la granularité près de zéro et augmenter les plages dans les extrêmes. Cette proposition serait notamment très pertinente pour le courant et pour la R_{in} , où les valeurs proches de zéro contiennent plus d'information que les valeurs éloignées.

LA DÉCROISSANCE DES COMPTEURS

Il est connu que les paramètres internes des cellules évolueront au fil du temps. Dans la forme matricielle proposée, si un paramètre se modifie (par exemple, il est attendu que la R_{in} des cellules augmente après quelques centaines de cycles de charge-décharge), il ne sera pas notable

Tableau 3.1 Segmentation des coordonnées de la matrice de mesure des paramètres

Élément	Plage	Précision choisie	Nombre de possibilité	Nombre de bits requis
Température	-50 °C à 127 °C	± 15 °C	12	4
État de charge	0 % à 100 %	± 6.25 %	16	4
Courant	-20 A à 20 A	± 1 A	40	6
Résistance interne	4 $m\Omega$ à 200 $m\Omega$	± 1 $m\Omega$	196	8

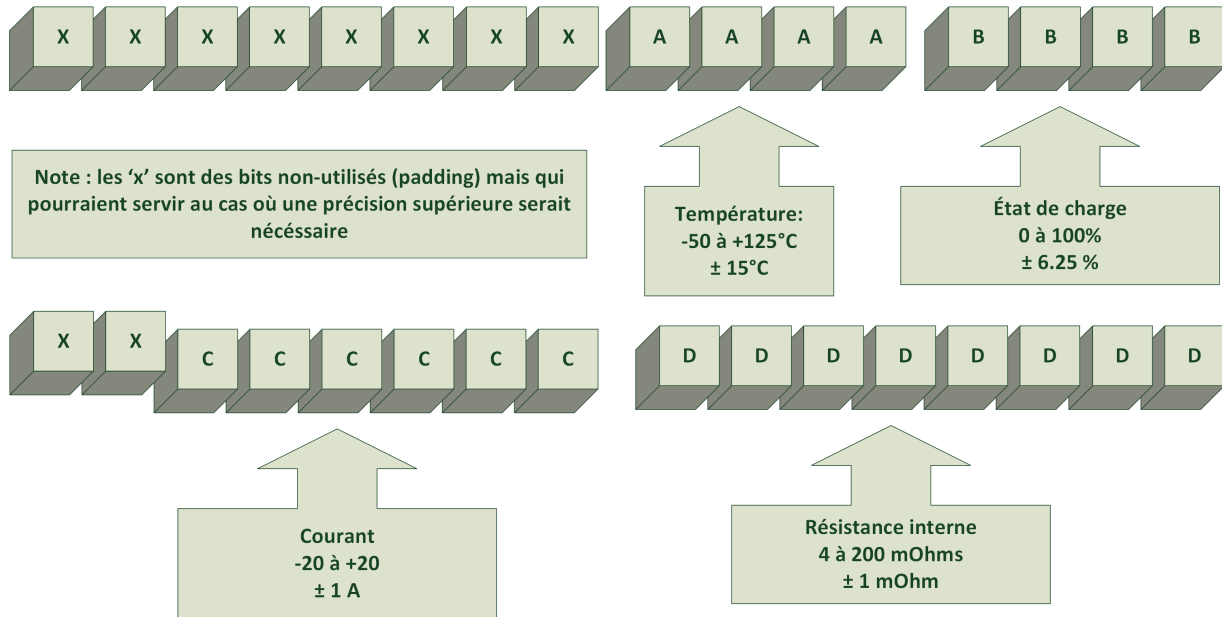


Figure 3.3 Segmentation des coordonnées de la matrice de mesure des paramètres pour une cellule

tant que le compteur associé à la nouvelle valeur ne sera pas supérieur au compteur de la valeur précédemment lue. Une solution possible pour pallier à ce problème aurait pu être de rajouter une dimension au nuage de point liée à l'état de santé de chaque cellule. Cependant, cette solution n'a pas été retenue, car la majeure partie de la mémoire ainsi réservée ne sera pas utilisée pendant plusieurs semaines, voire plusieurs années. Plutôt, la stratégie a été de faire décroître les compteurs de l'ensemble de la mémoire à intervalles réguliers. Lorsque la R_{in} d'une cellule évoluera dans le temps, les compteurs des nouvelles régions augmenteront progressivement et les anciens compteurs (reflétant l'ancienne valeur) seront peu à peu ramenés vers 0. Cette stratégie offre aussi l'avantage d'enlever les valeurs irrégulières mesurées dans le nuage au fil du temps et de favoriser les valeurs plus fréquentes, contribuant alors à mieux représenter l'allure de la R_{in} en fonction des autres paramètres.

L'expérimentation, n'a pas duré assez longtemps pour permettre aux cellules du bloc batterie expérimental de vieillir suffisamment pour mesurer une différence dans la R_{in} . Conséquemment, il a été difficile de quantifier la décroissance à implémenter. Pour les biens de l'expérimentation, la vitesse a été arbitrairement fixée à 1 par heure d'utilisation (donc ne performera aucune soustraction lorsque le véhicule est à l'arrêt). L'expérimentation a aussi démontré que cette décroissance est difficilement applicable pendant l'utilisation du bloc batterie, car la manipulation de l'ensemble des compteurs ($16 \cdot 4\,194\,304 = 67\,108\,864$ compteurs) demanderait la manipulation de 18 641 compteurs par secondes. Plutôt, le S.G.B. calcule le temps écoulé depuis la dernière décroissance et soustrait d'un coup les heures accumulées. Ceci est effectué unique-

ment pendant que le bloc batterie est au repos ou sous recharge constante, moment où la plupart des estimations de paramètres ne peuvent pas avoir lieu et où le port de communication de la clé USB est peu utilisé. Cette détérioration sommaire vise à assurer le reflet de l'évolution des paramètres, cependant aucune analyse n'a été effectuée pour connaître la fréquence et l'amplitude optimales de cette décroissance. Ceci pourrait aussi faire l'objet de recherches ultérieures.

Dans l'objectif de recherche proposé, un compteur de 255 est suffisant. Cependant, pour une application plus permissive et plus réaliste pour un V.É. ou V.É.H., il serait judicieux d'allouer un 23^e bit pour différencier un compteur "haut" d'un compteur "bas" et créer, pour un même ensemble de coordonnées, un compteur de 16 bits capable d'enregistrer 65 535 valeurs.

3.3.2 Estimation avancée des paramètres selon l'expérience passée

Théorie

Les mesures issues de la section 4.1.3 sont viables et restent représentatives tant et aussi longtemps que les conditions de conduite restent passablement constantes. Cependant, lorsque les conditions vécues par le bloc batterie changent drastiquement, par exemple lorsque le courant connaît une soudaine hausse pendant une accélération et que la R_{in} aura tendance à augmenter drastiquement, les systèmes de filtrage typique ayant pour but d'éliminer le bruit sur la mesure ne pourront refléter ces changements. La figure 3.4, où la R_{in} filtrée est basée sur une moyenne mobile, illustre cette imperfection. Toutes les mesures issues de la mesure de la R_{in} , décrite dans le chapitre 2, seront alors entachées d'une erreur. Comme la fréquence à laquelle ces changements drastiques de R_{in} est inconnue (les accélérations d'un véhicule sont aléatoires), il est pratiquement impossible d'envisager un filtre capable d'accepter les variations de R_{in} sans laisser traverser du même coup le bruit de la ligne.

Le deuxième élément de l'algorithme proposé consiste à déterminer la valeur la plus probable de R_{in} par un filtrage normal de moyenne (donc laissant traverser les basses fréquences pertinentes), mais de l'appliquer seulement sur une série de données prises dans des conditions de conduite similaires. Si les données sont enregistrées chronologiquement, alors il est très fastidieux de retrouver ces données pertinentes, il faudrait parcourir l'ensemble des données passées (qui peuvent atteindre plusieurs milliers de lectures) pour rapatrier en mémoire seulement celles prises dans les mêmes conditions. Aussi, comme le nombre d'échantillons à récupérer est inconnu, il n'y a aucune garantie que ces données ne satureront pas la mémoire vive disponible lors de l'exécution du programme, causant l'arrêt immédiat du S.G.B. Avec le système de classement proposé ici, en revanche, le nombre d'emplacements mémoires à recueillir est connu.

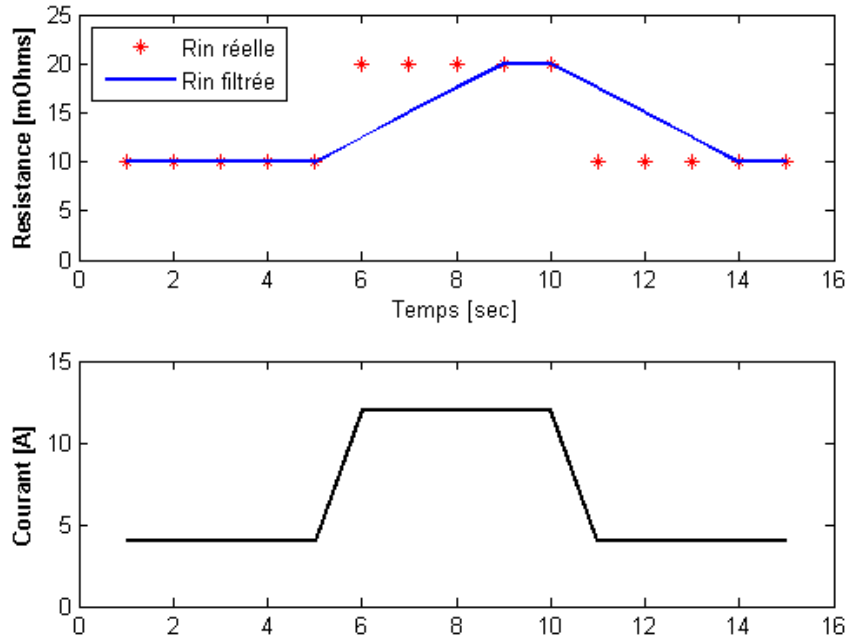


Figure 3.4 Délai imposé par le filtrage des mesures

D'ailleurs, comme l'état de chaque cellule dans chaque condition de conduite peut être obtenu directement, les résultats intermédiaires du filtrage peuvent être calculés directement ; les données retenues en mémoire peuvent être aussitôt détruites et l'espace mémoire peut être libéré.

Récupération des données

Pour effectuer cette moyenne, le S.G.B. récupérera les mesures antérieures dans le nuage de points proche de la région représentant l'état actuel du bloc batterie. Pendant la conception de cet algorithme, il fallut se poser la question "qu'est-ce qu'une donnée pertinente ?" (i.e. jusqu'à quelle distance est-il acceptable d'aller dans chaque direction dans le nuage de points) afin de déterminer le nombre de régions en mémoire à récupérer. Un nombre trop élevé nécessitera la lecture d'un trop grand nombre de cases mémoire et demandera un grand nombre de multiplications et de divisions lors du filtrage, cela ralentira considérablement l'exécution du programme et perdra le gain acquis comparativement à la méthode traditionnelle. Un nombre trop peu élevé amènera le résultat du filtrage à perdre son côté représentatif. Comme pour la segmentation, un compromis a dû être établi entre la qualité du filtrage et la charge de calcul du processeur. Il est clair qu'une certaine divergence de la résistance interne doit être observée afin de détecter une erreur de mesure. Ainsi, une distance de $\pm 5 \text{ m}\Omega$ dans le nuage de point a semblé un bon point de départ. Comme le courant aussi est un facteur important dans la variation de la résistance interne, quelques points de mesures pour la comparaison sont souhaitables. Une distance de $\pm 2 \text{ A}$ a été jugée comme suffisante.

Pour l'É.D.C. et la température, une stratégie différente a été appliquée. Comme ils ont un effet moins drastique sur la R_{in} que le courant, leur fenêtre de segmentation a été élargie, tel que vue à la table 3.1. Au départ, il a été essayé d'inclure la fenêtre actuelle et les deux fenêtres voisines, plus haute et plus basse. Cette solution s'est avérée inefficace, car le nombre de cases mémoire à lire et le nombre de calculs à faire pour la moyenne mobile sont devenus trop grands ($11 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 3 = 495$). La stratégie appliquée a alors été de prendre une seule des deux fenêtres voisines, et ce, seulement si les conditions de conduites lues par le S.G.B. se retrouvent proches de l'intersection entre deux fenêtres. Les fenêtres d'observation de l'É.D.C. et de la température seront vérifiées selon la règle suivante :

- Si la mesure actuelle est dans le premier tiers de la fenêtre actuelle : regarder le segment actuel et le précédent
- Si la mesure actuelle est dans le deuxième tiers de la fenêtre actuelle : ne regarder que le segment actuel
- Si la mesure actuelle est dans le troisième tiers de la fenêtre actuelle : regarder le segment actuel et le suivant

L'ensemble de toutes les combinaisons possibles est appelé l'ensemble \mathbb{E} . Dans le pire cas, cette méthode impose la lecture de 220 compteurs. Outre les calculs d'adressage et les délais d'ouverture/fermeture de fichiers, cette lecture sur le port USB devrait, selon l'équation 4.9, décrite dans la section expérimentale, prendre environ $174 \mu s$. Ce délai ne sera probablement pas respecté à cause des changements fréquents de position en mémoire, mais il représente quand même un ordre de grandeur acceptable comparativement à la méthode traditionnelle, qui sera décrite dans la section 4.1.2.

Même si la récupération des données dans la mémoire permet une certaine incertitude sur la mesure présentement lue par le S.G.B., les données récupérées plus près du point actuel d'opération du bloc batterie devraient être plus crédible que celles plus loin. Calculer la distance dans le nuage de point en fonction de la distance dans toutes les directions serait un fastidieux calcul trigonométrique. Pour pallier à ce problème, un système de poids a été établi de manière à facilement faire état de la distance de la mémoire, sans pour autant faire le calcul de la longueur d'une droite en quatre dimensions. Un poids de départ de 100 est instauré. Ce poids diminuera en fonction de la distance de la case mémoire recueillie dans chaque direction. La table 3.2 montre la répartition du poids associé à chaque région k de l'ensemble \mathbb{E} . La valeur maximum est donc de 100, pour une case directement sur le point d'opération, et la valeur minimum est de 20 pour les cases les plus éloignées du point d'opération.

Filtrage

Une fois l'ensemble \mathbb{E} déterminé, les données recueillies et le poids associés à chaque case mémoire calculée, le S.G.B. peut alors procéder au filtrage de la résistance interne par moyenne mobile pondérée. Le calcul sera effectué selon l'équation 3.2.

$$R_{infiltrée} = \frac{\sum_{\forall k \in \mathbb{E}} (R_{in(k)} \cdot Compteur_{(k)} \cdot Poids_{(k)})}{\sum_{\forall k \in \mathbb{E}} (Compteur_{(k)} \cdot Poids_{(k)})} \quad (3.2)$$

Cette méthode de filtrage permet de retirer la majeure partie du bruit des estimations tout en conservant assez fidèlement la relation entre la R_{in} et les autres paramètres des cellules. De plus, un changement drastique de l'un des paramètres (courant, É.D.C. ou température) ne sera pas accompagné d'un délai tel que présenté à la figure 3.4. Comme les seules opérations demandées sont des fonctions de base (+, -, *, /) et qu'aucune fonction exponentielle ou logarithmique n'est impliquée de plus qu'aucune fonction trigonométrique, il est raisonnable de croire une exécution rapide sur un microcontrôleur modeste, destiné à un S.G.B. de V.É.

Exemple

Si à un moment t , la cellule #7 est sous une décharge de 12.1 A, a une résistance interne mesurée de 18 $m\Omega$, une température de 32 °C et un É.D.C. de 78 %, les 32 bits des coordonnées obtenues selon la segmentation du tableau 3.1 et de la figure 3.3 sont :

$$\begin{aligned} Remplissage &= 0 = 0 \Rightarrow 0000\ 0000 \\ Température &= 32/15 = 2.13 \Rightarrow 0010 \\ É.D.C. &= 78/6.25 = 12.48 \Rightarrow 1100 \\ Remplissage &= 0 = 0 \Rightarrow 00 \\ Courant &= 12.1/1 = 12.1 \Rightarrow 00\ 1100 \\ R_{in} &= 18/1 = 18 \Rightarrow 0001\ 0010 \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$Total = 0000\ 0000\ 0010\ 1100\ 0000\ 1100\ 0001\ 0010 \Rightarrow 0x002C\ 0C12$$

Le S.G.B. utilisera cette mesure et celles contenues dans sa banque de données dans le fichier "CELL07.PIN" afin de contribuer à la détermination de R_{in} à l'aide de la moyenne mobile. Si, par exemple, le compteur de 8 bits enregistré à l'adresse 0x002C0C12 indique la valeur 9. Cela indique qu'une résistance interne de 18 $m\Omega$ a été mesurée 9 fois dans ces mêmes conditions de conduite. Pour définir l'ensemble \mathbb{E} , il faut regarder si la température et l'É.D.C. se retrouvent dans le premier ou le troisième tiers de leur segment. La température se retrouve dans le premier

Tableau 3.2 Poids associé aux régions de l'ensemble \mathbb{E}

Poids de départ : 100		
Élément	Déviaton	Poids
R_{in}	$\pm 0 \text{ à } 2 \text{ m}\Omega$	0
R_{in}	$\pm 3 \text{ à } 5 \text{ m}\Omega$	-10
Courant	$\pm 1 \text{ A}$	-10
Courant	$\pm 2 \text{ A}$	-20
É.D.C	$\pm 6.25 \%$	-20
Température	$\pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$	-30

tiers alors que l'É.D.C se retrouve dans le deuxième. L'ensemble \mathbb{E} sera alors constitué de 110 combinaisons possibles, défini comme suit :

- 11 valeurs de R_{in} : de 13 $m\Omega$ à 23 $m\Omega$;
- 5 valeurs de Courant : de 10 A à 14 A ;
- 1 valeur en É.D.C. : segment de 75 % à 81 % ;
- 2 valeurs en Température : segments de 15 $^\circ\text{C}$ à 30 $^\circ\text{C}$ et de 30 $^\circ\text{C}$ à 15 $^\circ\text{C}$

Si, pour le bien de la simplicité de cet exemple, il n'est pas considéré la variation de température et de courant, l'ensemble \mathbb{E} se résumerait alors à 11 valeurs, les 11 valeurs de variations de R_{in} , représentées par la figure 3.5. Cette figure montre que les mesures passées pour le même courant, le même É.D.C et la même température affichaient une R_{in} plus basse que celle mesurée actuellement. La valeur estimée par le S.G.B. selon la moyenne mobile de l'équation 3.2 devient alors :

$$\begin{aligned}
 R_{in\text{filtre}} &= (13 \text{ m}\Omega \cdot 12 \cdot 90 + 14 \text{ m}\Omega \cdot 14 \cdot 90 + 15 \text{ m}\Omega \cdot 15 \cdot 90 + \\
 &\quad 16 \text{ m}\Omega \cdot 11 \cdot 100 + 17 \text{ m}\Omega \cdot 5 \cdot 100 + 18 \text{ m}\Omega \cdot 9 \cdot 100 + \\
 &\quad 19 \text{ m}\Omega \cdot 7 \cdot 100 + 20 \text{ m}\Omega \cdot 4 \cdot 100 + 21 \text{ m}\Omega \cdot 1 \cdot 90 \\
 &\quad 22 \text{ m}\Omega \cdot 0 \cdot 90 + 23 \text{ m}\Omega \cdot 0 \cdot 90) \\
 &\quad \text{-----} \\
 &\quad (90 \cdot (12 + 14 + 15 + 1 + 0 + 0) + \\
 &\quad 100 \cdot (11 + 5 + 9 + 7)) \\
 &= 15.4 \text{ m}\Omega
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

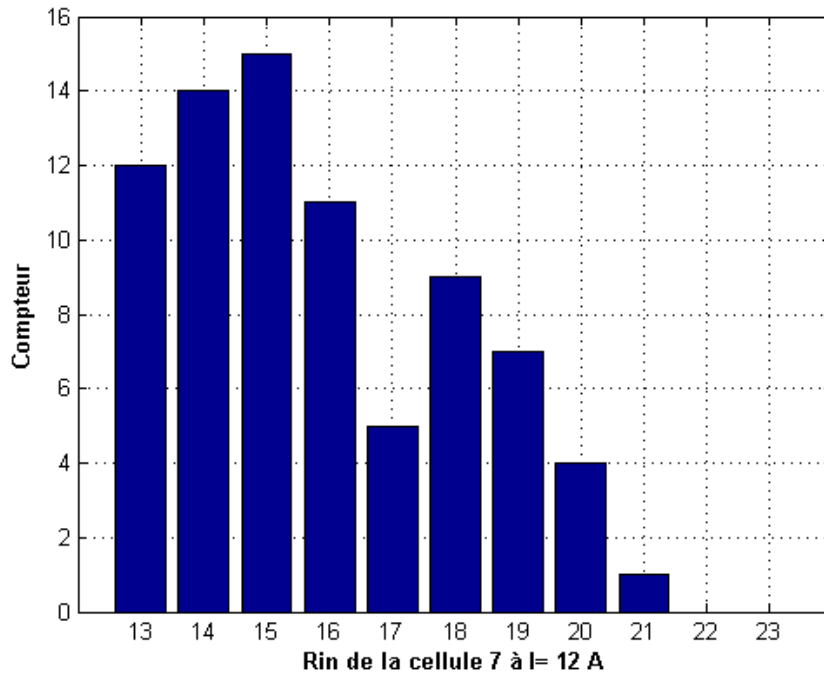


Figure 3.5 Exemple de valeurs lues sur la clé USB

3.4 Conclusion de l'implémentation

Dans ce chapitre, il a été question du problème récurrent rencontré dans les montages actuels de systèmes de gestion de batteries pour véhicules électriques ou hybrides. Il a été mentionné que l'accès aux périphériques, notamment la mémoire externe pour conserver les données, est à ce jour un élément très limitant dans la traduction des modèles électriques évolués en systèmes embarqués fonctionnels.

Il a été proposé en solution un algorithme de classement novateur, élément principal du projet de recherche. Le système de classification de données via une carte de distribution sur une clé USB a été proposé comme alternative au classement chronologique conventionnel. Cette classification utilise les conditions d'utilisation comme coordonnées et utilise ensuite les régions environnantes pour effectuer une moyenne des mesures précédentes. Avec cette méthode, le nombre d'accès à la mémoire est constant et connu. Cela permet de garantir un système stable tout au long de la durée de vie du S.G.B utilisé dans un V.É ou V.É.H. Un autre avantage de cette méthode est d'avoir accès à des données pertinentes aux calculs directement sans avoir besoin de chercher dans l'ensemble des données précédentes classées de manière chronologique.

CHAPITRE 4

DEVELOPPEMENT DU BANC DE TEST

Cette section fera l'état du développement du banc d'essais réalisé pour tester l'algorithme proposé au chapitre 3 et pour valider les hypothèses mentionnées. Les données recueillies par ce banc de tests seront alors examinées et discutées dans le chapitre 5.

Premièrement, les caractéristiques des cellules li-ion utilisées et un étalonnage de départ sont présentés. Deuxièmement, la conception et la fabrication d'un S.G.B. capable de mettre en œuvre cet algorithme sont proposées. Il sera question, entre autres, des modules de lecture de la tension, du courant et de la température ainsi que des détails sur l'unité de calcul. Troisièmement, la méthodologie de test est montrée et est accompagnée des méthodes d'estimation de paramètres. Il est question notamment du développement d'un logiciel capable de comparer les méthodes traditionnels de mesures avec les mesures issues de l'algorithme de classement. Finalement, cette section explique le développement d'un simulateur de cycles de conduite capable de générer des cycles de décharges/recharges pour les cellules comparables à ceux vécus par des blocs batteries de véhicules électriques ou hybrides.

4.1 Montage expérimental

Afin de tester l'algorithme de classement et de mesure proposé, un S.G.B. a été conçu et assemblé sur un montage expérimental. Suite à l'état de l'art présenté au chapitre 2, les caractéristiques essentielles à connaître sur les cellules constituant le bloc batterie d'un V.É., afin de pouvoir bien modéliser leurs comportements électriques, sont la tension, le courant, la température, ainsi qu'une référence de temps écoulé. Ces mesures, lorsqu'effectuées en temps réel, permettront de déduire la résistance interne, la capacité, l'état de charge et l'état de santé. Ainsi, cette section est dédiée à la présentation des cellules utilisées et à expliquer le choix des composantes électroniques permettant de former un système de gestion de batteries capable d'acquérir l'information simultanée pour toutes ces cellules et de les rendre disponibles pour l'algorithme de classement et de filtrage des résultats présenté à la section 3.3.

En plus du S.G.B., il a fallu trouver une méthode pour charger et décharger les cellules selon des spécifications précises pour créer un environnement contrôlé. Un simulateur de conduite, créant des patrons de charge et décharge des cellules propres aux véhicules électriques, a aussi été réalisé. Cette section fera l'état des composantes électroniques retenues pour ce système.

4.1.1 Présentation de la cellule utilisée

Caractéristiques du fabricant

La cellule choisie pour réaliser le montage expérimental est le modèle ANR26650M1A de la compagnie *A123 Systems* [36]. Cette cellule est composée d'une cathode de $LiFePO_4$, d'une anode de LiC_6 et d'un électrolyte de $LiPF_6$. La cellule est de forme cylindrique standard, de 26 mm de diamètre et de 65 mm de hauteur. Elle est illustrée à la figure 4.1 [36]. Les caractéristiques électriques importantes de cette cellule sont détaillées au tableau 4.1, ces informations proviennent de la fiche technique du fabricant [36].

Étalonnage initial des cellules A123

Afin d'avoir une base solide pour la calibration du S.G.B. développé dans le cadre de ce projet de recherche, il est important d'avoir un étalonnage de référence effectué à l'aide d'appareils de confiance. Les données recueillies serviront de références pour valider le fonctionnement du S.G.B. conçu pendant ce projet de recherche. L'étalonnage est composé d'une mesure de la capacité initiale, de la résistance ohmique et de la résistance de polarisation de chaque cellule. L'étalonnage a été effectué avec 16 cellules neuves, sortant de la boîte de livraison du fabricant. La date d'achat des cellules est inconnue, mais le temps passé sur l'étagère est estimé à moins d'un an.

L'étalonnage s'effectuera sur 16 cellules ANR26650M1A de *A123 Systems*. Il est impératif de faire l'étalonnage sur plusieurs cellules afin d'avoir une idée de l'étendue des variations des caractéristiques de ces cellules par rapport aux valeurs prévues du manufacturier.

CAPACITÉ INITIALE

Premièrement, pour mesurer la capacité initiale des cellules, une charge programmable de marque *BK Precision* (modèle #8526), illustrée à la figure 4.2 [37], a été utilisée. Cette charge électronique a un mode spécialement fait pour mesurer la capacité d'une cellule. En indiquant la tension



Figure 4.1 Cellule utilisée [36]

Tableau 4.1 Caractéristiques de la cellule ANR26650M1A de A123 telles que spécifiées par le manufacturier [36]

Caractéristiques	Valeur
Capacité nominale	2.3 Ah
Tension nominale	3.3 V
Tension à É.D.C. = 100 %	3.6 V
Tension à É.D.C. = 0 %	2.0 V
Résistance ohmique nominale (1 kHz AC)	8 mΩ
Résistance interne nominale (10 A, 1 s, DC)	10 mΩ
Courant de recharge recommandé (charge lente)	3 A
Courant de recharge recommandé (charge rapide)	10 A
Courant de décharge maximum (continue)	70 A (30 C)
Courant de décharge maximum (10 secondes)	120 A (52 C)
Température de fonctionnement	-30 °C à 60 °C
Température d'entreposage	-50 °C à 60 °C

minimale où l'É.D.C. = 0 % et un courant de décharge, l'équipement calcule lui-même l'intégrale du courant et mesure la capacité. La précision de mesure du courant de décharge est de ± 1 mA. Pour un courant de décharge de 1 C (2.3 A) pendant une heure, cela représente moins de 0.04 % d'erreur.

Le courant de décharge de 1 C a été arbitrairement fixé. Un courant trop petit prendrait trop de temps à décharger et un courant trop grand provoquerait trop de perte $I \cdot R_{in}$. Cette perte doit être minimisée, car elle abaissera la tension de lecture par la charge électronique, provoquant un arrêt prématuré de la décharge. Le courant de décharge 1 C a été jugé comme un bon compromis.



Figure 4.2 Charge électronique 8526 de PK Precision [37]

Chaque mesure exige donc environ une heure de décharge et la chute aux bornes de la cellule est d'environ 25 mV, en supposant R_{in} de toutes les cellules d'égales valeurs (10 mΩ).

Les résultats de cet étalonnage de la capacité initial sont donnés au tableau 4.2. Dans ce tableau, il est possible de voir que même en sortant de la boîte livrée par le fabricant, les cellules présentent déjà un écart de capacité entre elles et par rapport à leur valeur nominale de 2.3 Ah :

$$\overline{Cap}_{(Ah)} = \frac{\sum_{k=1}^{16} (Cap_{(k)})}{16} = 2.24 \text{ Ah} \quad (4.1)$$

$$\Delta_{Cap_{max}(\%)} = \frac{Cap_{max} - Cap_{min}}{\overline{Cap}} = \frac{2.27 \text{ Ah} - 2.09 \text{ Ah}}{2.24 \text{ Ah}} = 8.04 \% \quad (4.2)$$

$$\sigma(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{16} (Cap_{(k)} - \overline{Cap})^2}{16 \cdot \overline{Cap}}} = 2.17 \% \quad (4.3)$$

RÉSISTANCE INTERNE INITIALE

Deuxièmement, pour mesurer la R_{in} de chaque cellule, un oscilloscope numérique de la compagnie *Tektronix* a été branchées aux bornes de chaque cellule et celles-ci furent déchargées à l'aide de la charge électronique par des échelons de courant à 20 A pendant 15 secondes chacun. Chaque échelon a été effectué trois fois. Comme la R_{in} varie en fonction de l'É.D.C., toutes les mesures ont été effectuées à un É.D.C. de 80 %. La chute de tension produite par l'échelon de courant a été recueillie sur une clé USB et a ensuite été analysée à l'aide de MATLAB [41] pour en ressortir la moyenne des trois échantillons de R_{Ω} et R_{pol} . Tel qu'expliqué à la section 2.2.5 et sur la figure 2.10, la R_{Ω} provient de la chute instantanée de la tension alors que la R_{pol} provient de la chute de tension mesurée après 15 secondes, juste avant de relâcher l'échelon de courant. Les résultats de ces mesures de résistances sont donnés au tableau 4.2.

Comme pour la capacité, l'étalonnage montre que les cellules exposent déjà une variation significative dans leur valeur de R_{in} par rapport à la valeur prévue par le fabricant de 10 mΩ :

$$\overline{Rin}_{(m\Omega)} = \frac{\sum_{k=1}^{16} (Rin_{(k)})}{16} = 21.0 \text{ m}\Omega \quad (4.4)$$

$$\Delta_{Rin_{max}(\%)} = \frac{Rin_{max} - Rin_{min}}{\overline{Rin}} = \frac{25.1 \text{ m}\Omega - 17 \text{ m}\Omega}{21.0 \text{ m}\Omega} = 38.1 \% \quad (4.5)$$

$$\sigma(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{16} (Rin_{(k)} - \overline{Rin})^2}{16 \cdot \overline{Rin}}} = 11.69 \% \quad (4.6)$$

Tableau 4.2 Étalonnage des cellules ANR26650M1A de A123

Cellule	Numéro de série	R_{Ω} (m Ω)	R_{pol} (m Ω)	R_{in} (m Ω)	Capacité initiale (Ah)
1	7006H_1106119 – AI00313	21.7	2.7	24.4	2.26
2	7006H_1106119 – AH00278	18.0	4.3	22.3	2.21
3	7006H_1106119 – AH00235	21.7	2.5	24.2	2.27
4	7006H_1106119 – AH00243	22.7	2.4	25.1	2.27
5	7006H_1106119 – AH00243	16.0	3.7	19.7	2.27
6	7006H_1106119 – AH00282	14.5	4.5	19.0	2.21
7	7006H_1106119 – DH00191	17.2	4.5	21.7	2.26
8	7006H_1106119 – AH00246	18.4	3.5	21.9	2.25
9	7006H_1106119 – DH00297	16.3	4.3	20.6	2.26
10	7006H_1106119 – AH00229	17.2	4.1	21.3	2.09
11	7006H_1106119 – DH00299	14.0	4.0	18.0	2.26
12	7006H_1106119 – AH00431	14.4	4.1	18.5	2.26
13	7006H_1106119 – DH00445	13.9	4.1	18.0	2.26
14	7006H_1106119 – AI00471	16.7	4.7	21.4	2.25
15	7006H_1106119 – AH00247	17.7	4.8	22.5	2.17
16	7006H_1106119 – AI00476	12.5	4.5	17.0	2.27

4.1.2 Choix des composantes physiques

Choix d'architecture du S.G.B.

En premier lieu, il fallut déterminer l'architecture à adopter. La section 2.3.2 indique que pour un S.G.B. dédié à une utilisation véhiculaire, l'architecture maître-esclave serait de mise. Comme les décisions à prendre au niveau du maître sont grandement simplifiées pour le projet de recherche, c'est-à-dire aucune décision à prendre sur la gestion de l'énergie ou l'évolution dans le temps, et sont donc restreintes uniquement aux limites de surcharge et de surdécharge, il a été difficile de justifier l'utilisation d'un processeur pour le S.G.B. qui serait utilisé à quelques dixièmes de pour cent de sa capacité de calculs. De plus, comme le projet de recherche s'effectue sur 16 cellules, il est peu probablement qu'un seul esclave ne puisse répondre à la demande de surveillance. Ainsi, l'architecture choisie est de type centralisé, où l'ensemble des mesures et des décisions liées aux cellules est fait dans la même unité de calcul.

Une attention particulière a été donnée lors de l'élaboration du logiciel, détaillée à la section 4.1.3, de manière à rassembler les calculs et décisions réservés à un maître dans une architecture maître-esclave. Le logiciel rédigé pourra alors facilement être divisé ultérieurement pour décentraliser le S.G.B.

Schéma du montage à réaliser

La figure 4.3 présente, sous forme de schéma bloc, le montage réalisé dans le cadre de ce mémoire. On y retrouve, au centre, un module de 16 cellules, assemblé dans une configuration série. La tension individuelle des cellules est mesurée par un circuit intégré spécialisé de *Texas Instrument*. Le courant de ligne est mesuré depuis un capteur à effet Hall. Les charges et décharges sont contrôlées par le simulateur de véhicule, contrôlant une charge électronique et une source de tension pour créer les patrons de décharge et de recharge typique d'un véhicule hybride.

Ce montage a été réalisé dans l'esprit de respecter les standards automobiles et d'avoir un coût de fabrication à grande échelle le plus petit possible tout en minimisant le temps de développement. Les sections ci-dessous aborderont en détail chacun des modules illustrés.

Processeur de calculs

SYSTÈME DE GESTION DE BATTERIES

La pièce la plus importante du système est le processeur de calculs. Même s'il existe de super calculateurs de plusieurs Gigahertz, qui pourraient traiter les signaux d'entrée en un temps record et sortir les informations sur le comportement des cellules avec une précision plus que suffisante, leurs prix grandement supérieurs et leur consommation énergétique élevée n'en font pas le choix de prédilection pour un système de gestion des batteries d'un véhicule électrique ou hybride. Plus un processeur est puissant, plus il peut gérer et surveiller un nombre élevé de cellules. Cependant, plus le nombre de cellules est élevé, plus la distance entre celles-ci est grande, nécessitant des fils de branchements plus longs. Des fils trop longs augmentent les risques de

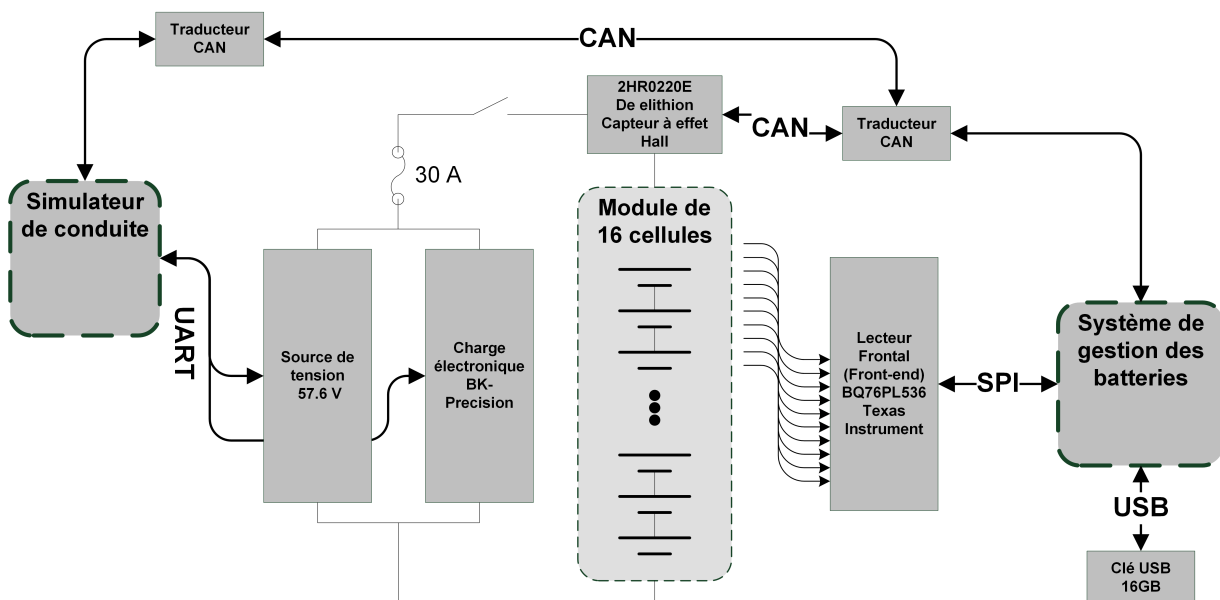


Figure 4.3 Schéma bloc du montage réalisé

déformation des signaux par le bruit et par les impédances parasites des fils. Ainsi, tel que mentionné dans la section 2.3.2, un véhicule électrique ou hybride privilégiera des unités de calculs surveillant des modules quelques cellules plutôt qu'un super ordinateur capable de gérer un grand nombre de cellules.

Au niveau du prix, un processeur dans la famille des *processeurs de signal numérique* (ou *Digital signal processor* (DSP) en anglais) est optimisé pour le traitement rapide des signaux, mais coûte 5 à 10 fois plus cher qu'un processeur générique. Ainsi, pour supporter l'objectif de recherche de proposer une solution adéquate pour les véhicules électriques. Le S.G.B. est monté sur un processeur générique PIC32MX795F512L de *Microchip Technology* [43]. Ce dispositif est disponible pour environ 10 \$, à l'opposition à 50 \$ pour un DSP [38].

Le composant PIC32MX795F512L est aussi muni d'un module d'horloge de type RTCC (*Real Time Clock and Calendar*) permettant un suivi précis du temps écoulé. Ce module permet de générer des interruptions automatiques pour la lecture des paramètres internes sans nécessiter l'ajout de périphériques externes. La précision et la stabilité de cette horloge présentée dans la littérature [38] sont nettement supérieures aux besoins du système.

Le PIC32MX795F512L a été acheté sur une plaquette d'évaluation de type *PIC32 USB Starter Kit II* [43] ayant un module USB 2.0 déjà implémenté pour l'archivage de données. Ce module est détaillé à la section 4.1.2.

SIMULATEUR DE CONDUITE

Comme la source de tension, utilisée pour recharger les cellules, et la charge électronique, utilisée pour la décharge, peuvent être contrôlées par une communication série, le processeur de calcul retenu pour le simulateur de conduite devait être muni d'un module de type UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*). Ensuite, dans l'optique où le S.G.B. serait branché dans un véhicule électrique, les seules commandes qu'il pourrait lancer au monde extérieur seraient via le réseau CAN, qui est un standard très répandu dans le milieu automobile.

Dans cette vision, pour la communication entre le S.G.B. et le simulateur de véhicule, le protocole CAN fut privilégié. Outre ces deux requis, aucune autre contrainte au niveau de la vitesse ou des capacités du processeur n'étaient critiques. Le composant dsPIC30F4013 de la compagnie *Microchip Technology* [43] répond aux besoins et est disponible à faible coût. Il est à noter que beaucoup d'autres composants auraient aussi pu remplir ces deux requis.

Mesure de la tension

La lecture de tension est effectuée à l'aide du circuit intégré BQ76PL536 de la compagnie *Texas Instrument* [45]. Il s'agit d'un convertisseur analogique à numérique où chaque entrée est isolée

et indépendante ; ce qui permet de mettre des cellules en série sans endommager la puce. Chaque circuit peut mesurer la tension de 6 cellules simultanément et peut être cascadié avec un circuit en amont ou en aval de lui-même par le biais d'une communication SPI (*Serial Peripheral Interface*). Ainsi, le S.G.B. n'a besoin que d'un seul canal de communication pour rejoindre un ensemble de BQ76PL536. Un schéma décrivant les fonctionnalités de la puce est illustré à la figure 4.4 [45].

La fiche technique du produit [45] indique un temps de conversion d'environ 6 μ secondes. La conversion se fait sur 14 bits, ce qui permet une précision typique de ± 1 mV. Comme les objectifs de ce projet de recherche concernent surtout l'algorithme de mesure, la conception électrique a été abrogée et la plateforme de développement BQ76PL536-EVM-3, montrée en figure 4.5, a été sélectionnée pour effectuer la lecture de tension. Ayant une superficie de plaque de circuits imprimés loin d'être optimale, en plus d'avoir un coût élevé, ce module d'évaluation ne serait pas une solution adaptée à un design au sein de véhicules commerciaux. D'autres puces spécialisées auraient pu faire le même travail que le BQ76PL536 de *Texas Instrument*. C'est le cas notamment du MAX11068 de la compagnie *Maxim Integrated* [42] et du LTC6804 de *Linear Technology* [40].

Lors de la conduite automobile, une soudaine accélération causera une chute de tension aux bornes de la cellule, permettant ainsi d'estimer la R_{in} . Une accélération typique est généralement inférieure à 10 secondes. 100 points de mesure ont été considérés suffisants pour bien représenter l'allure du signal et être en mesure de détecter des changements brusques. Ainsi, la tension des cellules est échantillonnée à 10 Hz par les trois BQ76PL536 et ensuite envoyée au PIC via la ligne SPI. Chaque donnée est enregistrée dans la mémoire du PIC dans un tampon circulaire d'une profondeur de 10 valeurs ; qui se remplit donc en 1 seconde. Une fois le tampon rempli, une moyenne est effectuée sur les données et la résultante est inscrite dans un deuxième tableau, aussi d'une profondeur de 10 valeurs. Cette moyenne permet d'enlever la majeure partie du bruit présent sur la ligne, sans trop affecter l'allure générale du signal. Une fois le 2e tampon rempli, un signal est envoyé au système pour tenter une mesure des paramètres des cellules, tel que décrit à la section 4.1.3

Mesure du courant

COURANT D'ALIMENTATION

Le courant de ligne, traversant l'ensemble des cellules, est évalué par un dispositif à effet Hall 2HR0220E de la compagnie *elithion* [3]. La précision de la lecture est de 10 mA pour une plage de ± 20 A. La lecture est envoyée par un canal CAN au S.G.B. Pour faciliter la suite des calculs du processeur, il est utile d'avoir une synchronisation avec les tampons des lectures de tension.

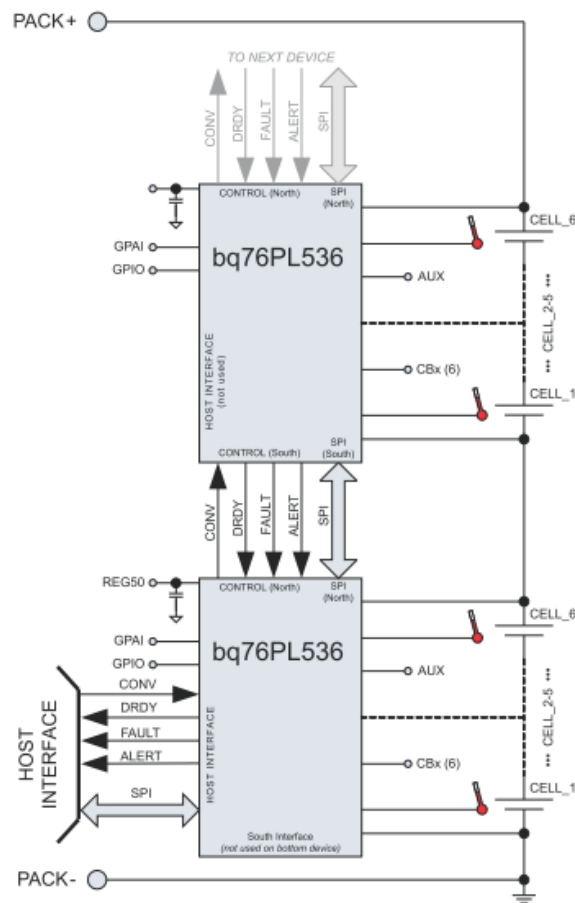


Figure 4.4 Schéma fonctionnel simple du BQ76PL536 [45]

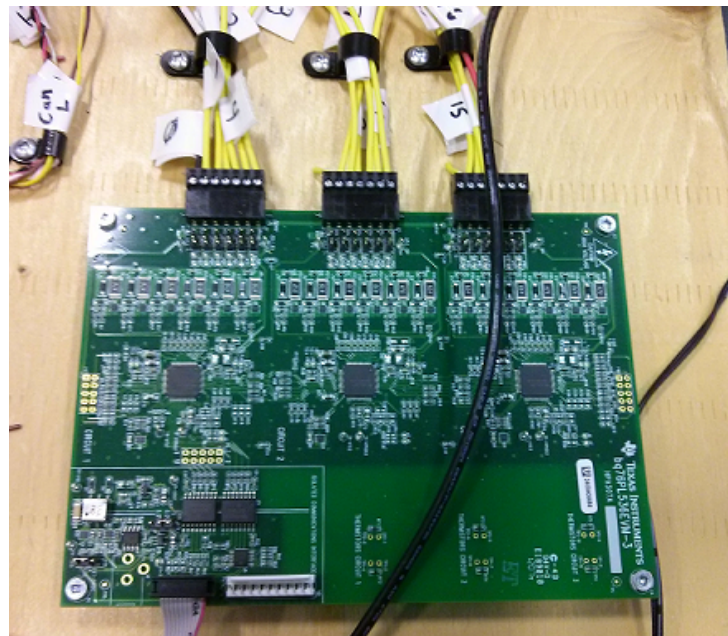


Figure 4.5 Module d'évaluation BQ76PL536-EVM-3

Ainsi, l'amplitude du courant est aussi demandée à une fréquence de 10 Hz, placée dans un tampon circulaire de 10 espaces et ensuite placé sous forme de moyenne dans un deuxième tampon. Entre chaque point de lecture, le courant est considéré constant. Comme convention, une valeur positive de courant est considérée comme sortant du bloc batterie alors qu'une valeur négative indique un courant entrant dans les cellules.

COURANT D'ÉGALISATION

Le courant d'égalisation est déterminé par la résistance mise en parallèle avec la cellule lorsque le BQ76PL536 active sa sortie d'égalisation. Sur la plaquette d'évaluation choisie, cette sortie active un transistor MOSFET, considéré ici comme un court-circuit, et permet à la cellule de se décharger dans une résistance de 47Ω . Le courant de décharge est alors évalué en fonction de la tension de la cellule tel que :

$$I_{egal} = \frac{V_{cell}}{47 \Omega} \quad (4.7)$$

Ceci correspond à un courant d'environ 70 mA. Comme il sera traité en profondeur à la section 5.5, ce courant s'est finalement avéré trop faible pour permettre un équilibrage adéquat du bloc batterie, le temps nécessaire pour équilibrer les cellules étant trop long pour un fonctionnement normal d'un véhicule électrique.

Mesure de la température

La mesure de la température est assurée par le circuit intégré BQ76PL536. Pour chaque bloc de six cellules, deux entrées analogiques sont utilisées pour mesurer la tension d'un diviseur de potentiel composé d'une résistance de $1.47 k\Omega$, d'une résistance de $1.82 k\Omega$ et d'une thermistance ERT-J1VG103FA de *Panasonic* [44]. Les branchements sont montrés à la figure 4.6 [45]. La tension lue dans les registres de la puce BQ représente donc le ratio de la résistance de $1.82 k\Omega$ par rapport à la somme des trois résistances représentées par :

$$Ratio = \frac{1.82k\Omega}{1.82k\Omega + 1.47k\Omega + R_{thermistance}} \quad (4.8)$$

Avec les informations sur la résistance de la thermistance en fonction de la température dans la fiche technique du fabricant, il a été possible de tracer le ratio de l'équation 4.8 en fonction de la température, illustré à la figure 4.7.

Il est possible, avec l'outil MATLAB [41], de déterminer une équation polynomiale pour approximer cette relation. En contrepartie, il est connu que les opérations les plus longues à effectuer pour un microprocesseur sont les multiplications, les divisions et la manipulation de flottants (*float*). Par conséquent, l'utilisation d'une équation polynomiale demanderait une charge considérable pour évaluer la température. Comme chaque valeur de température correspond à au plus

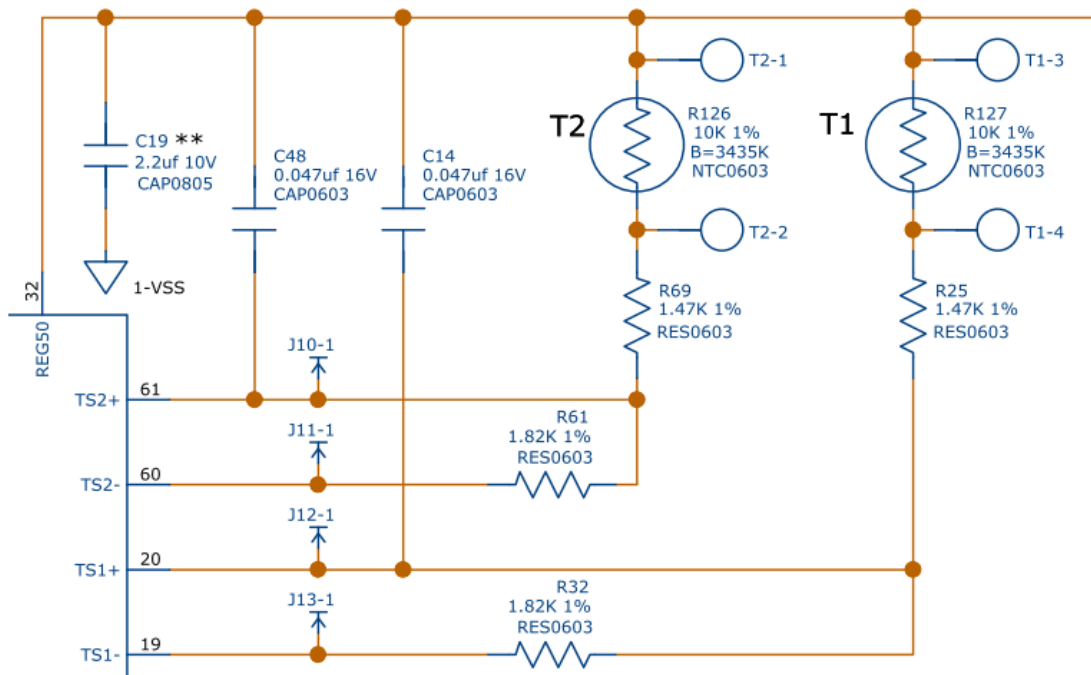


Figure 4.6 Schéma de branchement des thermistances [45]

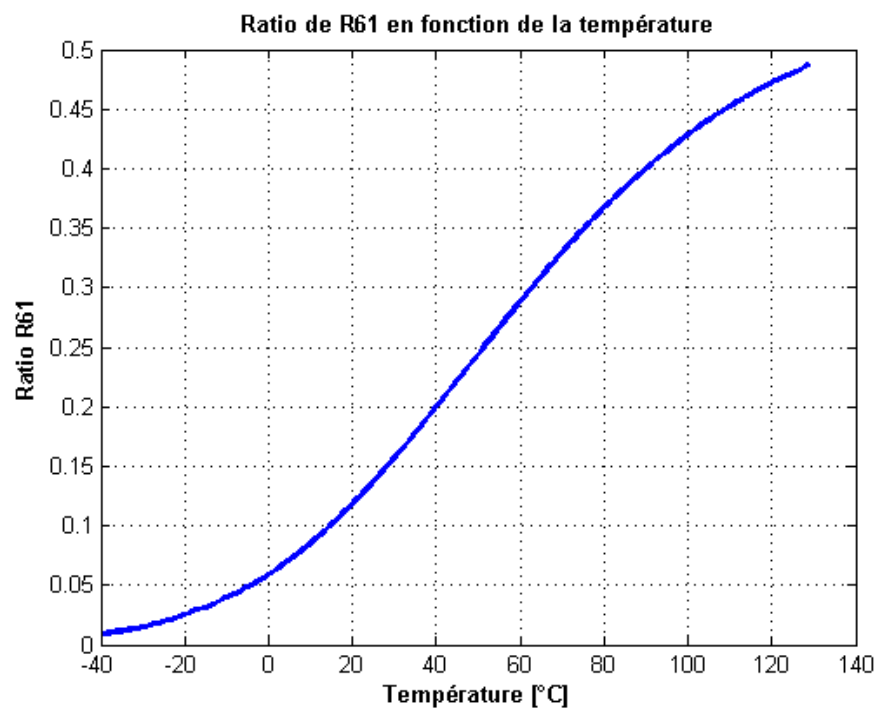


Figure 4.7 Ratio de la résistance de 1.82 kΩ en fonction de la température

une valeur de ratio de résistance, chaque valeur a été précalculée et chargée en mémoire dans le processeur sous forme de tableau. Ainsi, la comparaison de la valeur lue par rapport à une suite de valeur dans un tableau représente une charge de travail beaucoup moins élevée, sans pour autant perdre de précision. Cette méthode porte le nom de *look-up table* en anglais.

Le bloc batterie

Le projet de recherche est effectué sur un bloc batterie de 16 cellules mises en série, tel que montré en figure 4.8. Comme les conséquences d'une dispersion de paramètres sur des cellules en parallèle sont l'une des questions non résolues lors de l'écriture de ces lignes, aucune cellule n'a été placée en parallèle. Les pièces métalliques et les fils connecteurs reliant les cellules entre elles induisent une légère résistance dans le système. Suivant la même méthode que l'étalonnage de la résistance interne en section 4.1.1, la résistance totale du bloc batterie, sans les cellules, a été évaluée à $2\text{ m}\Omega$, soit environ $125\text{ }\mu\Omega$ d'ajout par cellule. Comme cette résistance est petite et que son interprétation dépasse le cadre de ce projet de recherche, elle n'est pas considérée dans les calculs de l'algorithme de mesure du S.G.B.

Comme les cellules sont en contact direct avec l'air ambiant, aucun système de refroidissement n'a été prévu. De plus, aucune des manipulations prévues n'a pour finalité d'amener les cellules hors de la température prescrite par le fabricant. Le travail présenté ici vise d'abord la méthode d'acquisition des données sur les cellules et non l'optimisation du refroidissement du bloc batterie.

Sauvegarde des données

L'ensemble des données lues par le S.G.B. est accumulé dans une structure d'une envergure de 1360 octets. Les détails de cette structure sont spécifiés dans l'annexe B. La mémoire vive du processeur utilisé est de 128 kilooctets, ce qui limite la quantité de points que le S.G.B. peut mémoriser à quelques dizaines ; considérant qu'une partie de cette mémoire est utilisée pour l'exécution du programme. Cette quantité de données est nettement insuffisante pour permettre de récolter des mesures sur l'ensemble des conditions de conduites qu'un V.É. peut rencontrer. Ainsi, sans l'ajout de mémoire externe, il aurait été impossible pour le système de mesurer l'évolution des paramètres sur de longues périodes de temps. Même si *Microchip Technologies* offre des modules d'évaluation avec les deux technologies, le protocole USB (*Universal Serial Bus*) a été choisi devant la technologie de carte de type *Secure Digital* pour des raisons de convivialité et d'accessibilité des bâtons de mémoire versus les cartes SD.

L'ajout d'une mémoire externe permettra d'augmenter le nombre d'échantillons emmagasinable et viendra inévitablement augmenter la qualité des mesures, mais ce module ajoutera automatiquement des délais dans l'exécution du code, car le transfert des données entre la mémoire vive

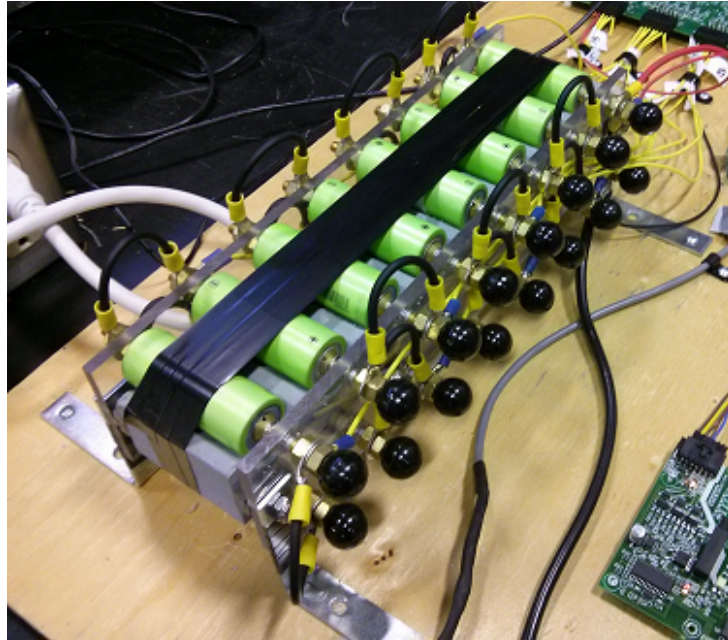


Figure 4.8 Photo du bloc batterie

du processeur et la mémoire externe ne peut pas se faire instantanément. Dans la fiche technique du module USB du PIC32, il est indiqué qu'il peut échanger des données à une vitesse maximum de 1.2 Mo/s [43]. Dans le cas d'une sauvegarde conventionnelle chronologique (i.e. les lectures sont placées les unes à la suite des autres, classées selon une référence de temps), il est possible d'approximer le délai encouru pour le transfert d'une mesure selon la structure de 1360 octets utilisée :

$$\begin{aligned}
 \text{Délai} &= \frac{\text{Volume à transiger (Octet)}}{\text{Vitesse de transfert (Octet/sec)}} \\
 &= \frac{1360 \text{ Octets}}{1\,258\,291 \text{ Octets/sec}} \\
 &= 1.081 \text{ ms}
 \end{aligned}
 \tag{4.9}$$

Pour l'écriture d'une donnée, ce délai est acceptable. Par contre, pour la lecture de plusieurs données, au moment de l'estimation d'un paramètre en fonction de l'historique des cellules par exemple, ce délai viendra limiter le nombre de données accessibles.

La clé USB choisie a une capacité de 16 Gigaoctets. Cela signifie qu'elle pourrait accumuler plus de 12 600 000 points de mesure avec la structure présentée. Pour une sauvegarde aux 10 secondes, cela correspond à quatre années de fonctionnement continues. Ceci a été considéré suffisant, considérant que l'évolution des paramètres se fait sur une période variant de quelques secondes à quelques dizaines de jours.

Il a été vu aussi en section 3.3 qu'une partie de la mémoire USB est aussi utilisée pour garder une sauvegarde des données sous forme de carte multidimensionnelle. Cependant, cette carte représente environ 0.1 % de la mémoire totale disponible.

4.1.3 Conception logicielle

Architecture du programme

Pour faciliter la conception et le déverminage, l'ensemble du logiciel est scindé en plusieurs modules. Chacun de ces modules remplit un rôle bien précis et n'a accès qu'à un nombre limité des ressources (données et fonctions) des autres modules. Cette limitation d'échanges permet de réduire les risques de corruption de mémoire causé par des accès non volontaires.

La séparation des modules est faite en quatre catégories : les modules de gestion, les modules d'action, les modules de définitions et les modules d'accès aux périphériques. Les modules de gestion sont ceux qui planifient les tâches à effectuer et qui assurent le transfert des données d'un module à l'autre. Les modules d'action sont ceux dédiés à des tâches bien précises et contiennent l'ensemble du code pour effectuer ces tâches. Les modules d'accès aux périphériques rassemblent le code et les configurations nécessaires pour faire fonctionner un périphérique. Les modules d'accès aux périphériques tentent d'être indépendants du projet de recherche et de ne contenir aucun code propre à la gestion des batteries. Finalement, les modules de définitions rassemblent les définitions de commandes, d'allocation de mémoire, des constantes propres à un sujet. Les figures 4.9 et 4.10 présentent l'ensemble des modules programmés dans le cadre de ce projet de recherche.

Disposer les actions ainsi offre un avantage. Advenant le changement de plateforme ou de processeur, les modules de gestion, de définitions et d'action devraient pouvoir rester passablement inchangés et les seuls modules d'accès aux périphériques auraient besoin d'une mise à jour. Les tableaux B.1 et B.3, donnés à l'annexe B, résument les types et les rôles de chaque module conçu lors de ce projet de recherche. Comme les accès aux périphériques sont propres à la plateforme et triviaux, ils ne seront pas couverts en détail dans ce projet de recherche. Il est à noter que certaines bibliothèques propres au PIC32MX795F512L et au dsPIC30F4013 développés par *Microchip Technologies* sont aussi utilisées, mais elles ne seront pas explicitement détaillées.

Estimation des paramètres

Le S.G.B. conçu dans le cadre de ce projet de recherche doit estimer certains paramètres afin d'assurer sa tâche de gestion des cellules ; et ce, indépendamment de l'algorithme de classement et de filtrage présenté précédemment. Depuis les mesures de tension, de courant, de tempéra-

ture et de temps expliquées ci-haut, le S.G.B. fera une estimation de la résistance interne, de la capacité, de la T.C.O, de la P.D.D., de l'É.D.C., et de l'É.D.S. de chaque cellule. Il rendra disponible le résultat de son estimation de résistance interne pour l'algorithme. Par contre, pour pas affecter les performances du S.G.B. et risquer une situation non sécuritaire pour les cellules ou pour l'utilisateur du bloc batterie en cas de défaillance de l'algorithme de classement, toutes les estimations sont indépendantes du résultat des valeurs filtrées de résistances internes de la section 3.3. Ce module logiciel est donc strictement basé sur les méthodes traditionnelles présentées dans le chapitre 2.

RÉSISTANCE INTERNE

Tel que discuté dans la section 2.2.5, la méthode utilisée pour obtenir la R_{Ω} des cellules vient de la mesure de la différence de tension suivant un soudain changement dans la valeur de courant. Comme les mesures de tension et de courant sont placées en mémoire sous forme de tableaux, le système attend qu'ils soient pleins (i.e. à intervalle régulier de 10 secondes) avant de tenter une estimation de R_{Ω} . Comme le courant est commun pour toutes les cellules, il est parcouru en premier pour détecter un changement important (positif ou négatif). Si la différence entre deux points est supérieure à 900 mA, alors le moniteur parcourt l'ensemble du tableau pour

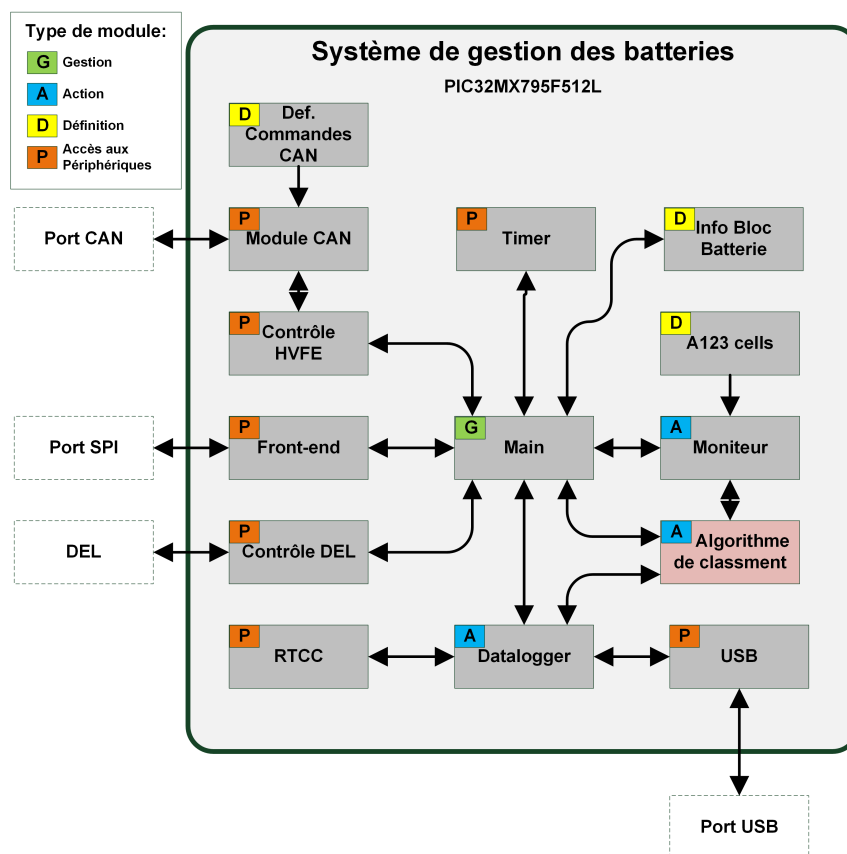


Figure 4.9 Schéma des interactions logicielles des modules du S.G.B.

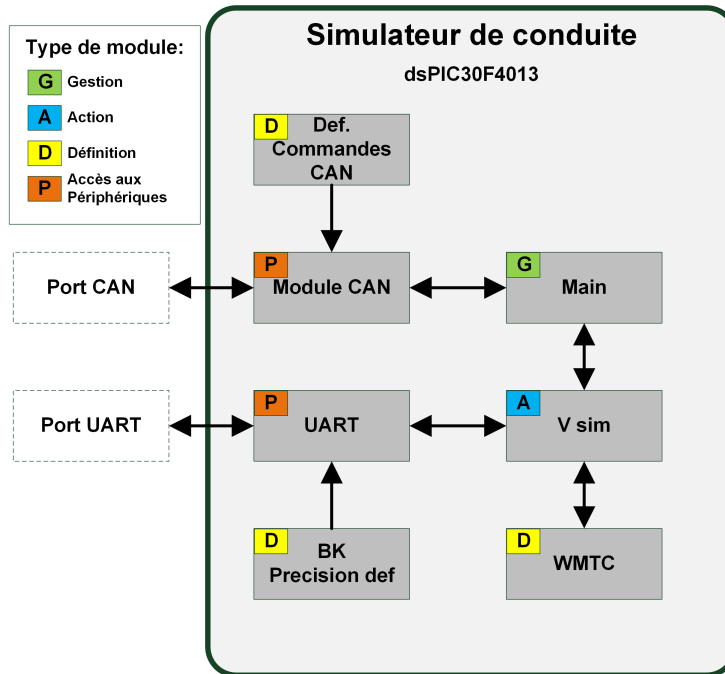


Figure 4.10 Schéma des interactions logicielles des modules du Simulateur de conduite

déterminer le changement important (généralement séparé par 3 ou 4 points dans le tableau). Il parcourt ensuite les tableaux de tensions des 16 cellules à ces mêmes points et mesure la chute de tension. L'équation 2.11 est ensuite appliquée pour déterminer la valeur de R_{Ω} . Il est à noter que des calculs erronés, menant à la mesure d'une R_{Ω} inférieur à $4\text{ m}\Omega$ ou supérieur à $120\text{ m}\Omega$, sont ignorés. Ensuite, si le courant est constant ($\pm 500\text{ mA}$) pendant plus de 5 secondes à la suite de cette chute, une deuxième mesure est effectuée en vue d'estimer la R_{pol} .

TENSION DE CIRCUIT OUVERT, PROFONDEUR DE DÉCHARGE ET ÉTAT DE CHARGE

Pour la mesure de la T.C.O., de la P.D.D. et de l'É.D.C. des cellules, deux méthodes sont utilisées :

1. Lorsque le bloc batterie est en utilisation et que le courant de ligne n'est pas zéro.
2. Lorsque le bloc batterie est à l'arrêt et que le courant de ligne se situe près de zéro depuis plus de 30 secondes.

Dans la première méthode, le S.G.B. fait le suivi de la P.D.D. et de l'É.D.C. à l'aide de l'intégration numérique du courant. À chaque mesure du courant (10 Hz), le système évalue l'augmentation ou la diminution de la P.D.D. en fonction de l'équation 2.8 et ajoute une P.D.D. supplémentaire si l'égalisation de cette cellule est active. L'É.D.C. est ensuite évalué en fonction de l'équation 2.9. La T.C.O. est finalement estimée en fonction du courant et de la dernière R_{in}

connue :

$$T.C.O._{cell} = V_{cell} + I_{ligne} \cdot R_{in_{cell}} \quad (4.10)$$

Chacune des relations entre la T.C.O., la P.D.D. et l'É.D.C. sont représentés dans des tableaux préenregistrés en mémoire (*look-up tables*) afin de réduire le nombre d'opérations mathématiques. La table de la T.C.O. en fonction de l'É.D.C. a été obtenue de manière expérimentale en mesurant l'évolution de la T.C.O. sous une décharge contrôlée.

Pour la deuxième méthode, lorsque le V.É. est à l'arrêt et qu'aucun courant ne circule dans le bloc batterie, la procédure va dans le sens inverse. Comme le courant est presque nul, les pertes $I \cdot R_{in}$ sont supposées négligeables et la tension aux bornes des cellules, mesurée par les BQ76PL536, devient la T.C.O. Dans cette condition, la T.C.O. est comparée aux tables de valeurs préenregistrées et permet d'estimer l'É.D.C. correspondant à cette T.C.O. Selon la capacité de chaque cellule, une estimation de la P.D.D. est aussi effectuée selon l'équation 2.9. Cette méthode est considérée comme imprécise lorsqu'elle est appliquée pendant l'utilisation du véhicule (avec un courant de ligne plus grand que zéro), mais lorsqu'appliquée avec un véhicule à l'arrêt et mesuré avec un appareil suffisamment précis (± 1 mV), il est possible d'obtenir une précision d'environ ± 5 % sur l'É.D.C et sur la P.D.D. Ce ± 5 % représente l'écart de ± 1 mV sur la courbe de décharge obtenue expérimentalement.

Comme la première méthode est jugée plus précise que la deuxième, elle aura priorité. Cependant, comme le capteur de courant peut parfois se polariser et donner une valeur de courant légèrement différent de la réalité (problème surtout présent pour des petits courants), la deuxième méthode sera utilisée comme une confirmation ou une infirmation des estimations. Si les deux estimations cadrent dans la même gamme de 5 %, aucune modification n'est appliquée. Cependant, lorsque les données diffèrent de plus de 5 % ; alors une dérive des estimations de la première méthode est supposée et la deuxième méthode dicte des nouveaux points à utiliser pour la suite des intégrations numériques de la première méthode.

Pour ces deux situations, les efficacités relatives des cellules en fonction de l'amplitude du courant et de la température proviennent des tables expérimentales données par K. P. Angarita Gil [18]. Pour l'instant, aucune considération relative à la variation de la T.C.O. en fonction de la température n'a été implémentée.

Lorsque la recharge complète du bloc batterie est effectuée (avec une égalisation passive de fin de charge), la P.D.D. et l'É.D.C. de toutes les cellules sont manuellement fixés à 0 Ah et 100 %, respectivement. Cette opération sert de point de départ pour toutes les intégrations numériques de courant. Tel que spécifié dans la section 2.2.4, il s'agit alors d'une calibration à 100 % d'É.D.C.

Une fois ces estimations faites, la moyenne de tous les É.D.C. des cellules est utilisée pour exprimer l'É.D.C. du bloc batterie complet.

CAPACITÉ

La seule méthode connue et fiable présentement pour mesurer la capacité est la décharge constante. L'utilisateur doit activer manuellement la mesure de la capacité à un moment opportun. Il est à noter que pendant la mesure de la capacité, le bloc batterie est inutilisable. La séquence de la mesure est la suivante :

1. Le S.G.B. charge et égalise les cellules à pleine charge. La P.D.D. est fixée à 0 Ah.
2. Le S.G.B. décharge les cellules avec un courant connu et constant de 1 C. Avec l'intégration du courant, le S.G.B. est en mesure de calculer l'évolution de la P.D.D.
3. Le S.G.B. attend que l'une des cellules tombe sous le seuil de sa tension minimale prévue par le fabricant. Le S.G.B. cesse toute décharge à ce moment.
4. À ce moment, il reste encore quelques pour cent d'énergie dans les cellules, mais le S.G.B. ne peut pas décharger par le courant de ligne, car certaines cellules se retrouveraient en surdécharge. Alors il vide individuellement chaque cellule à l'aide des résistances d'égalisation. Le S.G.B. continue de mesurer l'évolution de la P.D.D. pour chaque cellule
5. Lorsque chaque cellule est à sa tension minimale, la P.D.D. de chaque cellule représente sa capacité. Le S.G.B. garde en mémoire cette valeur.
6. Le S.G.B. charge et égalise les cellules à pleine charge

Comme le courant d'égalisation sur la plaquette d'évaluation du BQ76PL536 est d'environ 70 mA (et que la valeur exacte de chaque résistance est inconnue), le temps requis pour vider les cellules avec les résistances d'égalisation s'est avéré trop long pour donner des mesures précises. Comme il a été impossible d'obtenir des mesures claires sur les cellules, aucun filtrage ou requis de filtrage n'a été implémenté ou étudié.

ÉTAT DE SANTÉ

L'état de santé de chaque cellule est estimé selon les équations de la section 2.2.6 :

$$É.D.S.(%) = \min \left\{ \begin{array}{l} \left(1 - \frac{R_{t(\Omega)} - R_{0(\Omega)}}{R_{max(\Omega)} - R_{0(\Omega)}} \right) \cdot 100 \% \\ \left(1 - \frac{C_{0(Ah)} - C_{t(Ah)}}{C_{0(Ah)} - C_{min(Ah)}} \right) \cdot 100 \% \end{array} \right. \quad (4.11)$$

où la capacité C_0 est fixée à 2.3 Ah, la capacité C_{min} est fixée à 1.84 Ah (80 % de C_0), la R_0 est fixée à $10\text{ m}\Omega$, la R_{max} est fixée à $20\text{ m}\Omega$. La R_t utilisée provient d'une moyenne à long terme du bloc batterie afin d'éviter un É.D.S. de 0 % lorsque la demande en courant est forte et que la R_{in} mesurée monte très rapidement.

4.2 Préparation des essais expérimentaux

4.2.1 L'environnement contrôlé

Avant de plonger les cellules dans des cycles similaires à ceux rencontrés dans un véhicule électrique, il est important de cycloer les cellules selon des conditions d'utilisation contrôlées, dans lesquelles les paramètres sont facilement mesurables. Cette étape est cruciale pour calibrer le S.G.B. et valider son fonctionnement. Chaque essai est composé d'une suite d'environnements contrôlés, lesquels sont générés par l'intermédiaire de la charge électronique et la source de tension connectées sur les 16 cellules du montage d'essai (voir figure 4.3).

Lors de la réalisation des tests mentionnés ci-dessous, il est toujours ajouté aux commandes un signal de survie (*Watchdog Timer* en anglais). Celui-ci certifie que le système est toujours vivant. Dans l'éventualité où le S.G.B. se retrouverait dans un fonctionnement anormal, instable, ou tout simplement en faute ; l'absence du signal de survie dictera au simulateur de véhicule de désactiver toute source ou charge électrique, protégeant ainsi les cellules d'une surcharge ou surdécharge accidentelle. L'absence du signal de survie pour une période supérieure à 10 secondes mettra fin à n'importe quel essai, indépendamment de l'environnement en cours (incluant le cycle WMTC présenté à la section 4.2.2)

Repos

Le premier environnement créé est le mode au repos. Dans ce mode, tous les systèmes sont allumés, mais le S.G.B. n'envoie aucune commande au simulateur, autre qu'un signal de survie. Ce mode permet de vérifier que les capteurs reçoivent bien les valeurs de tension, de courant, de température et que la référence de temps est fonctionnelle. Ce mode est d'une durée de 30 secondes. Chaque essai commencera et finira dans ce mode et il pourra être ajouté entre les autres environnements pour aider la séparation de ceux-ci lors de l'analyse des données.

Décharge constante

Le deuxième environnement créé est la décharge constante. Ce mode permet de vérifier que les commandes s'échangent bien entre le S.G.B. et le simulateur de véhicule. Dans ce mode, il est possible de valider le fonctionnement de la lecture de l'É.D.C. La capacité peut être mesurée

dans ce mode, conditionnellement à vider les cellules par l'interrupteur d'égalisation à la fin de la décharge. Comme il n'y a aucune variation du courant, la mesure de la R_{in} n'est pas possible dans ce mode. La décharge peut se faire à plusieurs courant, selon les besoins.

La décharge arrêtera si l'une des cellules du bloc tombe sous le seuil de fin de décharge, à 2.0 V. La décharge maximum autorisée est de 18.4 A, équivalent à un courant de 8 C. La raison de ce maximum provient du capteur à effet Hall utilisé, limité à ± 20 A.

Recharge constante

La recharge constante simule le fonctionnement d'un chargeur autonome pour un véhicule électrique ou hybride. Pour la première phase de recharge à courant constant, telle que définie à la section 2.2.1, le courant est limité selon les recommandations du fabricant à 2.3 A (1 C). Lorsque l'une des cellules atteint sa tension maximale de 3.6 V, le S.G.B. envoie une commande pour réduire le courant et tombe alors en mode tension constante.

Malgré que la section 2.2.1 décrit une fin de recharge en tension constante, comme le bloc batterie est composé de plusieurs cellules à différente charge, la fin de recharge connaîtra de légères variations de tension. La limite de courant est diminuée progressivement afin de toujours tenir la cellule la plus haute en tension sous sa limite de 3.6 V. Au moment où la limite de courant tombe sous la valeur de courant d'égalisation (≈ 70 mA), deux cas de figure sont possibles :

1. Si l'égalisation de fin de charge n'est pas activée, la recharge prend fin. Le S.G.B. envoie une commande pour arrêter la source de tension et met fin à la tâche de recharge (et enclenche la prochaine, s'il y a lieu). Ce mode permet d'accélérer les temps de recharge, car l'étape d'égalisation représente une longue période de temps pour obtenir, au final, quelques pour cent de charge supplémentaire. Ce mode est utilisé pour une série de tests consécutifs.
2. Si l'égalisation de fin de charge est activée. Le courant est maintenu à 70 mA et le transistor d'égalisation de toutes les cellules supérieure à 3.55 V est activé. De cette manière, le courant traversera les cellules qui ne sont pas encore pleines, les rechargeant tranquillement, mais contournera les cellules pleines. Ceci représente une égalisation à pleine charge, telle que décrite à la section 2.2.4. Cette méthode permet d'avoir une utilisation plus uniforme du bloc batterie et permet d'utiliser un peu plus de charges avant qu'une cellule tombe sous le seuil de fin de décharge. En contrepartie, cette étape requiert un temps considérable. Ce mode est privilégié lorsque le temps le permet.

Comme pour la décharge constante, les faibles variations de courant lors de cette recharge ne permettent pas de mesurer précisément la valeur de R_{in} des cellules.

Décharge et recharge par échelons

Comme les environnements ci-haut ne permettent pas la mesure de la R_{in} , deux autres environnements ont été implémentés spécifiquement pour créer les conditions idéales pour mesurer les R_{in} des cellules. Comme l'estimation de la R_{in} se fait en mesurant la différence de potentiel causée par une différence de courant, le S.G.B. va demander au simulateur de conduite des changements francs pour mesurer les variations résultantes dans les tensions des cellules. De plus, comme il a été expliqué à la section 2.2.5, la R_{in} est dépendante de l'amplitude et de la direction du courant. Ainsi, l'environnement de conduite simulé alternera entre différentes amplitudes de courant. Lorsque le profil de décharge est utilisé, celui est répété jusqu'à ce que l'une des cellules affiche la tension seuil de fin de décharge (2.0 V) et à l'inverse, lors de la recharge, le profil de recharge est répété tant qu'une des cellules n'affichera pas la tension seuil de fin de charge (3.6 V). Suite à ces deux profils, une recharge standard décrite ci-haut est généralement ajoutée à la fin de l'essai pour terminer avec des cellules pleines et équilibrées.

Pour le cycle de décharge, un cycle de 60 secondes est décomposé selon le tableau 4.3 et produit le profil de courant exposé à la figure 4.11. Le cycle de recharge est quant à lui de 30 secondes et représenté par le tableau 4.4 et la figure 4.12. Lors de la décharge, les temps morts entre les échelons permettent aux capacités de polarisation de se décharger, surtout lors de fort courant (> 4 C). Comme les courants de recharge sont plus petits, les temps morts ont été réduits. Cela a permis de réduire le temps de recharge et d'accélérer le déroulement des essais.

4.2.2 Le cycle de conduite WMTC

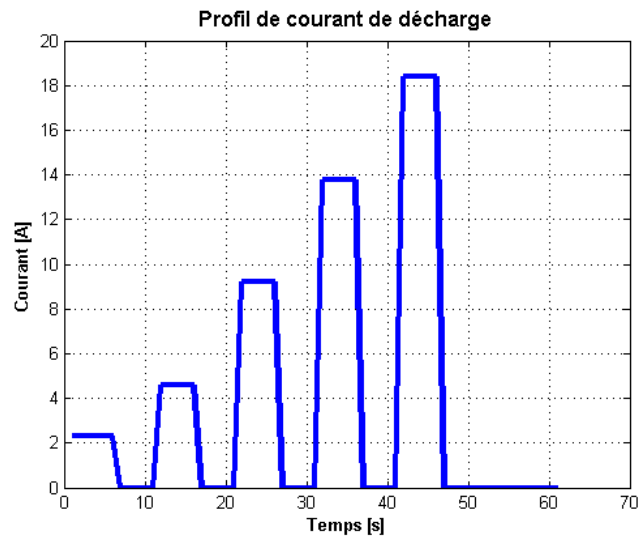
Mesurer des paramètres de cellules dans un environnement contrôlé et parfait peut amener une meilleure compréhension sur le comportement des cellules, mais cela n'aide pas l'intégration d'un meilleur algorithme de mesure au sein de véhicules électriques ou hybrides. Ainsi, les mesures produites par l'algorithme de mesure dans un environnement contrôlé ont été comparées avec les mesures issues d'un cycle de conduite plus représentatif des conditions vécues par des cellules au lithium dans un véhicule électrique.

Un profil de courant représentant l'évolution d'un bloc batterie pour la propulsion d'un véhicule selon le cycle de conduite standardisé WMTC (*World-wide Harmonised Motorcycle Emissions Test Cycle* [18, 46]). Ce cycle de vitesse est montré à la figure 4.13. Le profil de courant résultant de ce cycle pour un véhicule spécifique est donné à la figure 4.14. La transformation entre la vitesse et le courant demandé au bloc batterie est tiré de [11].

Ce cycle est utilisé pour statuer les émissions de gaz carbonique des motocyclettes. Il est composé de trois phases distinctes. La première, à basse vitesse, représente une route urbaine. La

Tableau 4.3 Profil de courant pour la mesure de la R_{in} à la décharge

Seconde	Amplitude de courant (en A)
0 à 5	2.3 (1 C)
5 à 10	0
10 à 15	4.6 (2 C)
15 à 20	0
20 à 25	9.2 (4 C)
25 à 30	0
30 à 35	13.8 (6 C)
35 à 40	0
40 à 45	18.4 (8 C)
45 à 60	0

Figure 4.11 Profil de courant pour la mesure de la R_{in} à la déchargeTableau 4.4 Profil de courant pour la mesure de la R_{in} à la charge

Seconde	Amplitude de courant (en A)
0 à 8	-1.15 (0.5 C)
8 à 10	0
10 à 18	-2.3 (1 C)
18 à 20	0
20 à 28	-4.6 (2 C)
28 à 30	0

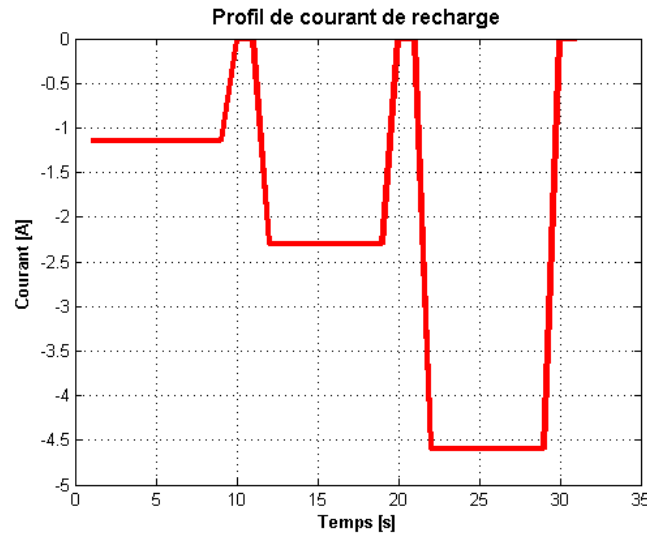


Figure 4.12 Profil de courant pour la mesure de la R_{in} à la charge

deuxième, à moyenne vitesse, représente une route rurale. La troisième, à grande vitesse, représente une autoroute. Le cycle complet dure 30 minutes (1800 secondes).

4.3 Conclusion du développement

Au cours de ce chapitre, il a été question du développement du banc d'essai et de la fabrication d'un S.G.B capable de mesurer la R_{in} de 16 cellules $LiFePO_4$ en temps réel. Dans la conception technique, il a été détaillé comment le PIC32MX795F512L de *Microchip Technology* est utilisé comme contrôleur central avec quelques modules, notamment le BQ76PL536 de *Texas Instrument*, pour former un S.G.B. complet. De plus, le logiciel embarqué incluant le système de classement des paramètres a été détaillé.

Il a aussi été question d'environnements de tests contrôlés créés à l'aide d'un dsPIC30F4013 de *Microchip Technology*, d'une charge électronique et d'une source de tension variable. Ces appareils permettent de recréer des situations similaires à celles vécues par un véritable bloc batterie dans un V.É., notamment à l'aide d'un patron de courant de décharge basé sur le cycle étalon WMTC.

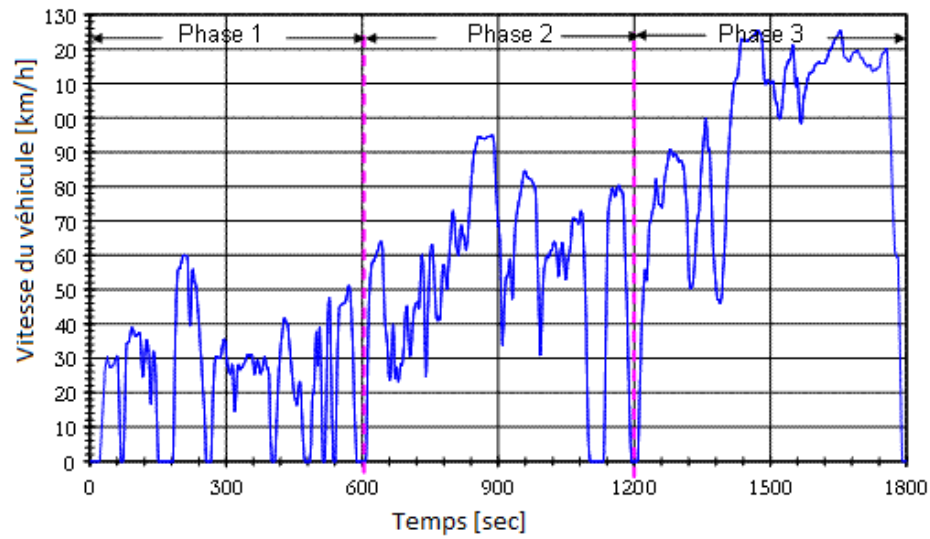


Figure 4.13 Représentation du cycle WMTC [18]

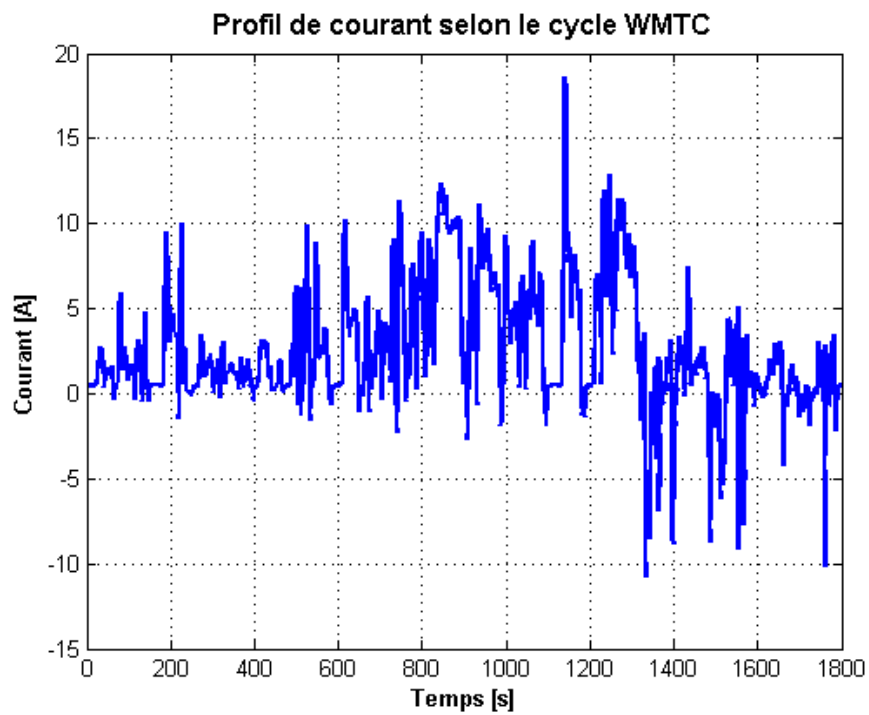


Figure 4.14 Profil de courant selon le cycle WMTC pour un véhicule hybride branchable à trois roues [11]

CHAPITRE 5

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Dans le présent chapitre, il est présenté l'ensemble des résultats issus de la conception technique et des tests présentés aux chapitres 3 et 4. Premièrement, les mesures effectuées par le S.G.B. de manière autonome sont montrées. Ensuite, les estimations brutes de R_{in} déduites de ces mesures sont présentées. Ceci sera suivi des cartes de distributions les plus pertinentes. Une analyse et une interprétation accompagneront ces résultats. Ultérieurement, une discussion sur les conséquences que ces disparités de R_{in} pourraient avoir sur les choix de conceptions de configuration de bloc batterie et sur les stratégies d'égalisation. Finalement, les choix de conceptions utilisés dans ce projet de recherche sont évalués et commentés.

5.1 Rappel de la problématique justifiant les tests

Tel que présenté précédemment, pour démontrer le fonctionnement du S.G.B., il faut qu'il soit en mesure de d'acquérir la tension, le courant, la température et le temps en temps réel. Il pourra ensuite être en mesure d'estimer les paramètres de chaque cellule. Les patrons de courants présentés aux sections 4.2.1 et 4.2.2 ont été soumis au bloc batterie fabriqué afin d'obtenir les résultats de ce chapitre.

Comme un projet de recherche ne peut s'échelonner sur une période de temps trop longue, certains tests ont été abrogés afin d'assurer une fin raisonnable à ce document. Ainsi, la température a été acquise, mais aucun traitement n'a été effectué. Ne reflétant aucune information, elle ne sera jamais montrée dans les graphiques et tableaux.

Pour satisfaire les requis de temps réel défini dans les chapitres précédents, le système devra acquérir les entrées principales (V,I,T,t) à chaque secondes 1 s et être capable de compléter ses analyses aux 10 s.

Toute l'information, mesurée ou calculée, a été placée dans la mémoire USB simultanément de manière chronologique et selon la méthode présentée dans ce projet de recherche afin de comparaisons futures. Le logiciel MATLAB [41] a été utilisé pour récupérer ces deux informations, les combiner et générer les graphiques suivants.

5.2 Résultats des essais

5.2.1 Fonctionnalité générale du S.G.B.

Premièrement, il est important de vérifier le fonctionnement général du S.G.B. dans l'environnement contrôlé spécifié à la section 4.2.1.

Mesure du voltage

Sur les figures 5.1 et 5.2, il est montré comment le S.G.B. est capable de mesurer la tension individuelle du bloc batterie lors d'une décharge par échelons suivie d'une recharge constante avec égalisation de fin de charge. Sur la figure agrandie, la disparité du voltage, causée par un déséquilibre des cellules et/ou une disparité des R_{in} , est notable.

Une fois transféré dans l'ordinateur pour le traitement, la longueur des vecteurs de données est observé dans MATLAB par rapport à la référence de temps afin de déterminer que l'acquisition se fait bel et bien à 1 Hz et les calculs à 100 mHz. La cohérence entre les vecteurs a déterminée que les fréquences d'acquisitions et de calculs sont respectées, le système opère donc bel et bien en temps réel.

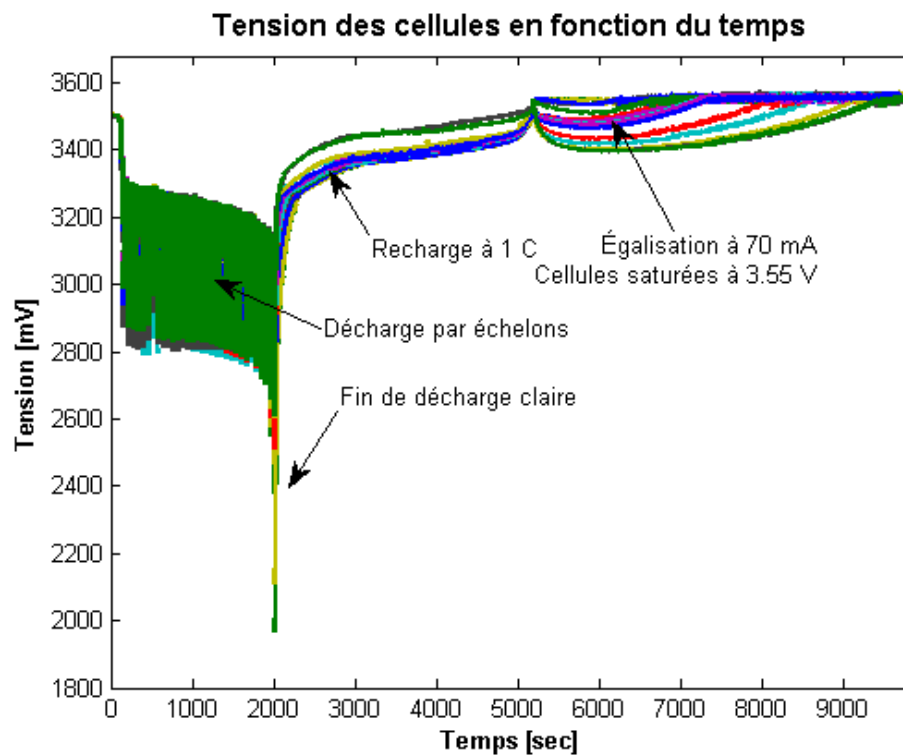


Figure 5.1 Mesure de la tension individuelle par le S.G.B.

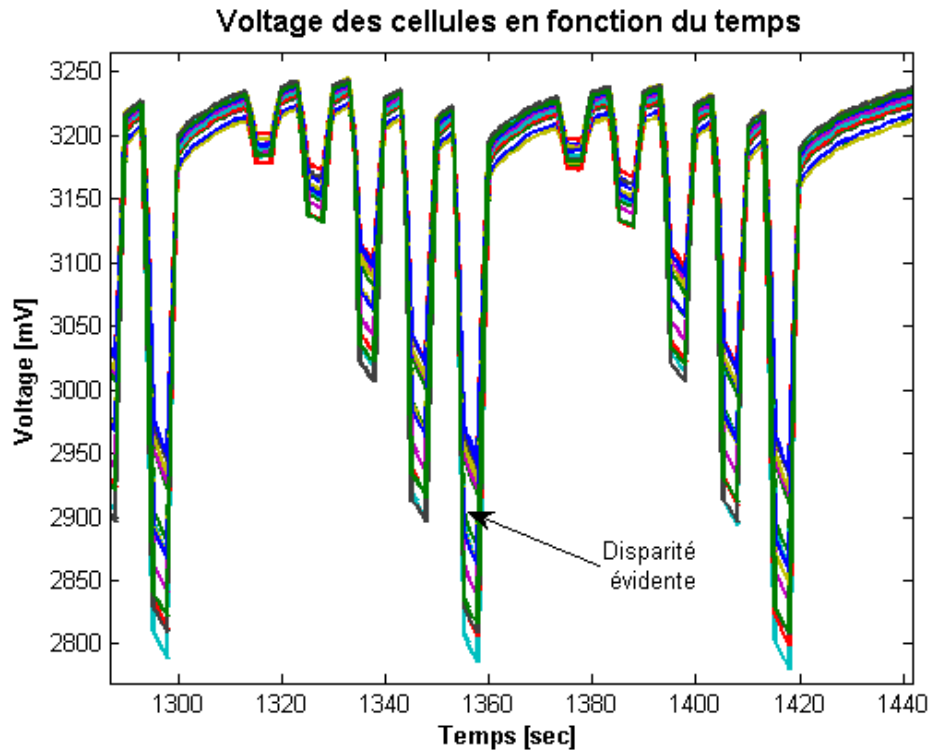


Figure 5.2 Mesure de la tension individuelle par le S.G.B. agrandie

L'affichage des vecteurs à 1 Hz proposait des graphiques peu éloquent compte tenu de la grande disparité des données, un filtre passe-bas de moyenne mobile à 10 échantillons a été utilisé pour adoucir les formes d'ondes et rendre l'information plus accessible visuellement. Il est à noter que ces données filtrées n'ont pas d'incidence sur la suite de calculs et ne sont utilisées que pour l'affichage.

Autre analyse des graphiques : le temps pris pour exécuter les tests. La décharge aura pris 2000 secondes, la charge aura pris environ 3500 secondes ; soit un peu moins qu'une heure, près du résultat attendu pour une recharge à 1 C. Un point surprenant observé est la durée de l'équilibrage. Près de 4000 secondes, un temps jugé beaucoup trop long par l'auteur pour appuyer une utilisation dans une recharge de véhicule électrique. Ce détail sera exploité à la section 5.5.

Déjà, les différences dans les chutes de tension des cellules pour un même patron de courant indique une disparité claire de la R_{in} .

Mesure du courant

Les figures 5.3 et 5.4 montrent le courant mesuré au même moment que la tension affichée ci-haut. Il est à noter que les commandes de courants forment des échelons francs, cependant,

pour limiter le bruit sur la ligne, le signal de courant est filtré par une moyenne mobile de 10 échantillons, d'où l'obtention de l'allure plus courbée sur les graphiques.

Pour chaque valeur de tension mesurée, un échantillon de courant simultanément a été enregistré. Pour une raison inconnue, pour l'ensemble des mesures où $I < 0$, le courant mesuré avait une valeur continue de -47 mA inférieure au résultat attendu. Pendant le test, le courant a été confirmé à -2.3 A pendant la recharge et de 70 mA pendant l'égalisation par les ampèremètres des sources de tensions. Cette valeur constante n'est pas observée pour les courants positifs. Le suspect principal pour cette translation vers le bas est le capteur de courant à effet Hall, possiblement ionisé différemment pour un courant inverse. Pour de multitude de tests à différents jours, cette DC semble constante ; elle a été ajoutée au code directement pour les itérations suivantes.

Mesure de la R_{in}

Pendant cette décharge par échelons, le S.G.B. procède efficacement à la mesure des R_{in} des cellules, tel que montré aux figures 5.5 et 5.6. Quelques points intéressants peuvent être ressortis de ces deux graphiques. Premièrement, la R_{in} varie grandement en fonction du courant (de 10 mΩ à 25 mΩ), soit une augmentation de 250 %. Deuxièmement la R_{in} augmente très rapi-

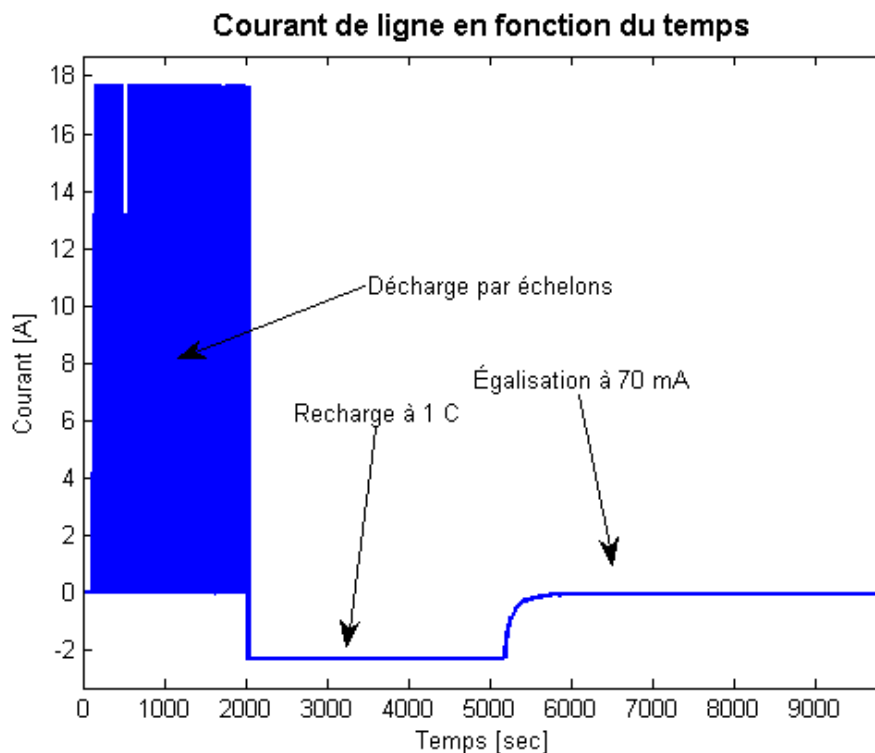


Figure 5.3 Mesure du courant de ligne par le S.G.B.

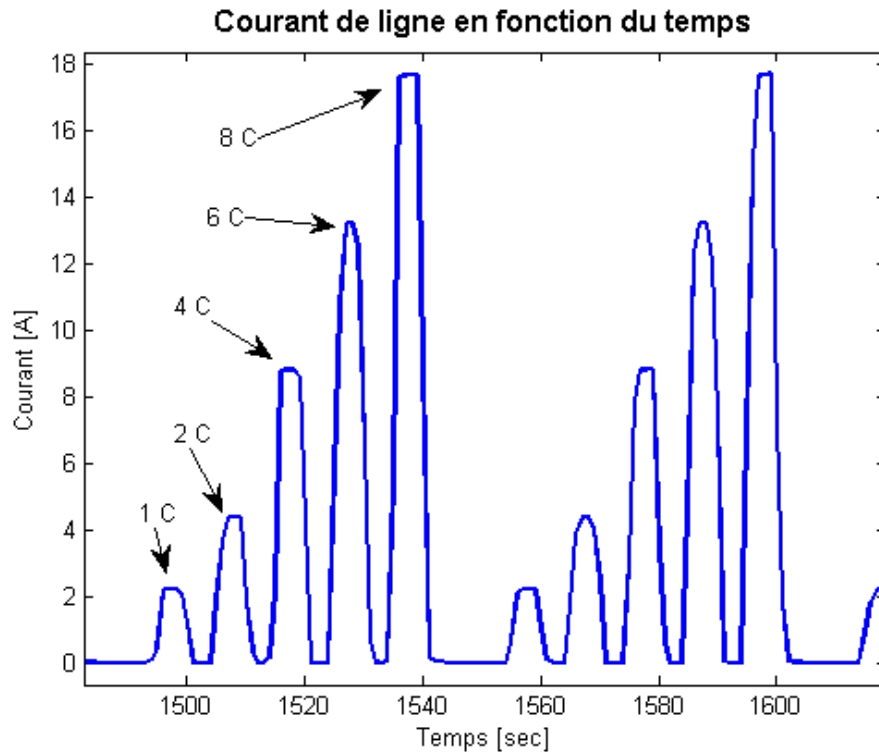


Figure 5.4 Mesure du courant de ligne par le S.G.B. agrandie

dement vers la fin de la décharge (où le courant devient difficile à produire), elle peut atteindre jusqu'à $53\text{ m}\Omega$, soit 530 % de la valeur de départ de $10\text{ m}\Omega$.

L'ensemble de ces informations permet déjà de former des premières courbes de R_{in} en fonction du courant, tel que présentées à la figure 5.7. Pour l'instant, ce graphique ne fait pas intervenir le système de classement présenté à la section 3.3, il est obtenu en procédant à la moyenne de toutes les mesures, peu importe les autres données (É.D.C., température, etc.).

Calcul de l'É.D.C

L'É.D.C. des cellules a aussi pu être suivi au cours de cet essai, comme le montre la figure 5.8. Au départ, l'interpolation de la tension au repos a permis d'estimer une différence d'É.D.C. d'environ 1 %, figure 5.9. À la fin de la décharge (figure 5.10), la différence d'É.D.C. s'étend à environ 8 %. Cette variation par rapport à la situation de départ s'explique par la différence de capacité des cellules. Comme l'intégrale du courant lors de la décharge est presque identique à l'intégrale du courant lors de la recharge pour ce test, il est normal de voir la différence d'É.D.C. réduire à près de 0.5 % à la fin de la recharge, juste avant la période d'équilibrage, présentée à la figure 5.11.

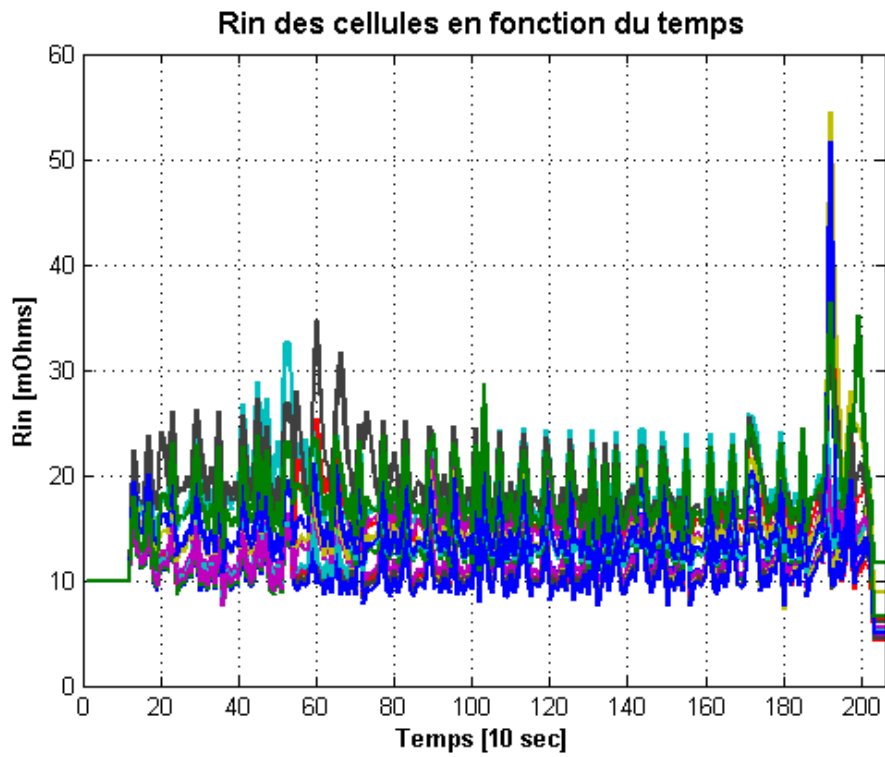


Figure 5.5 Mesure des R_{in} pendant la décharge par le S.G.B.

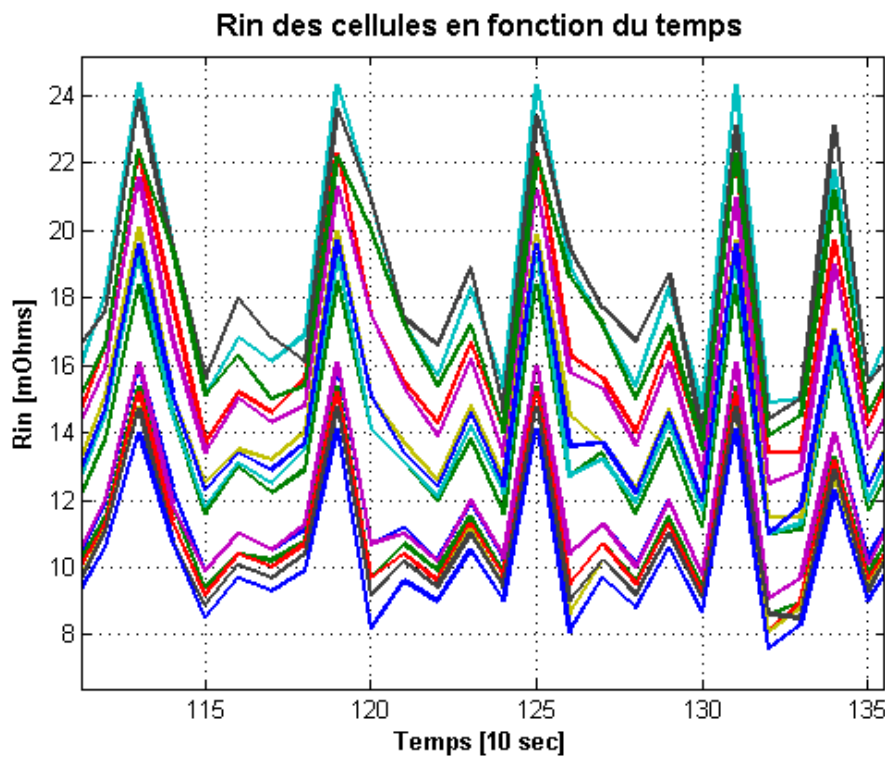


Figure 5.6 Mesure des R_{in} pendant la décharge par le S.G.B. agrandie

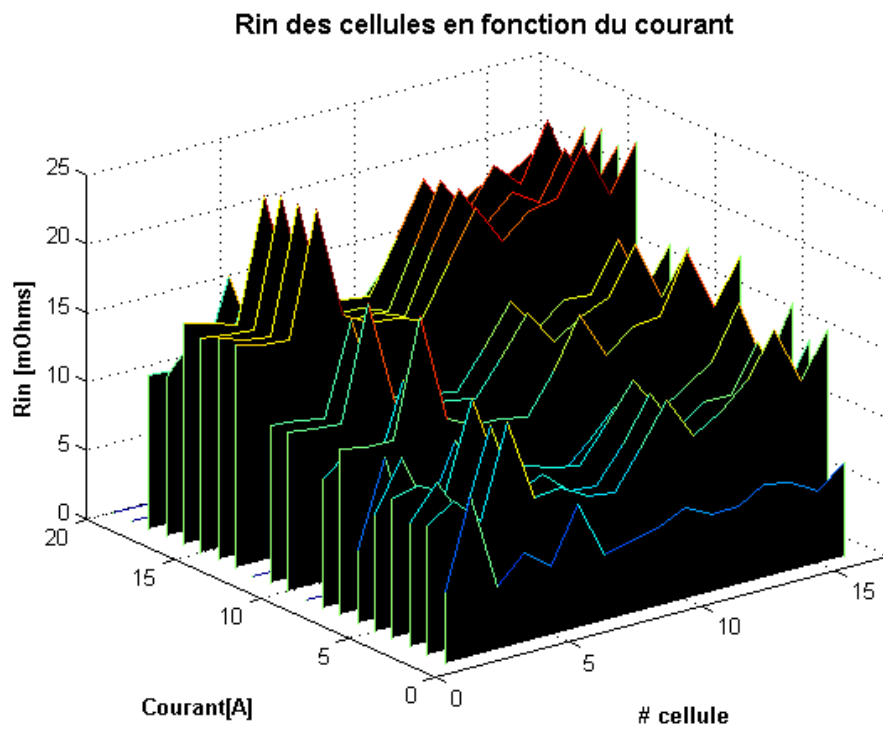
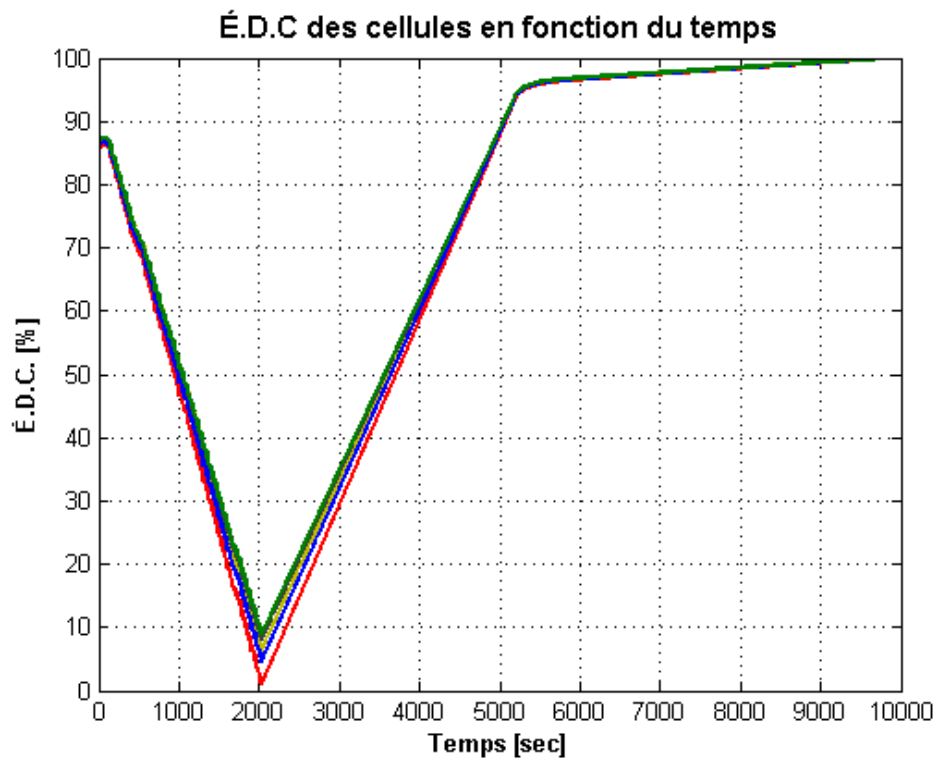
Figure 5.7 Visualisation des R_{in} en fonction du courant

Figure 5.8 É.D.C. des cellules en fonction du temps

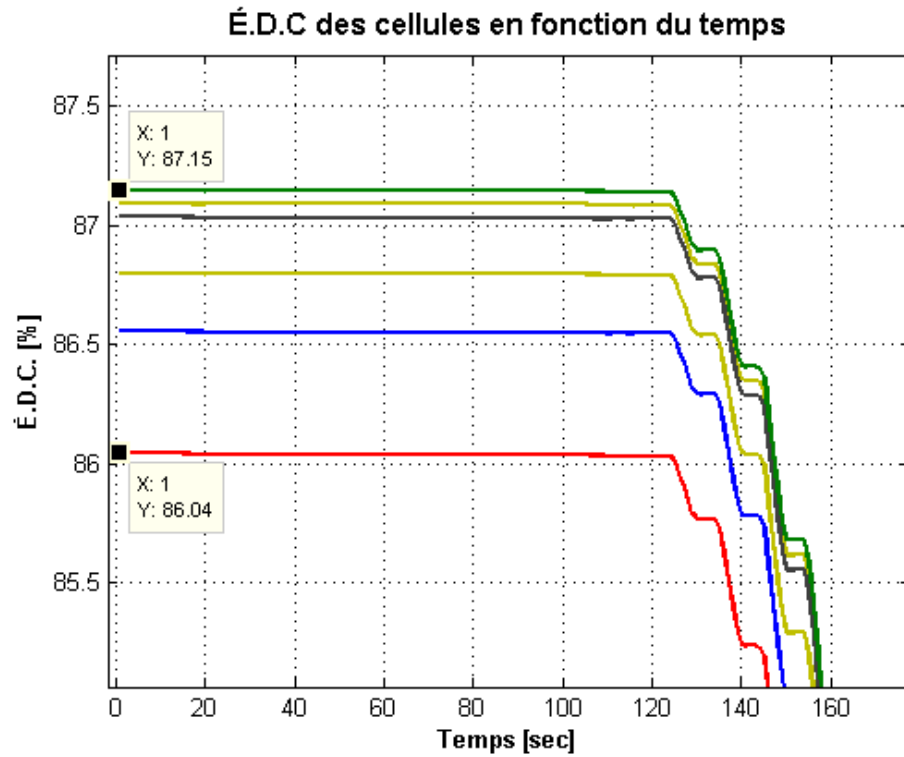


Figure 5.9 É.D.C. des cellules agrandie sur le départ

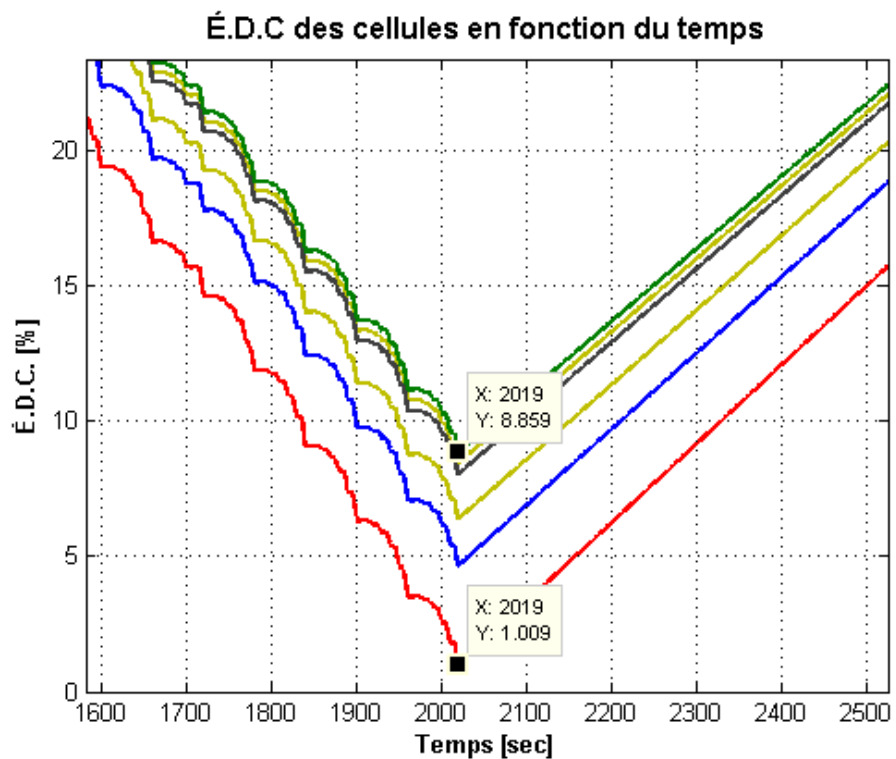


Figure 5.10 É.D.C. des cellules agrandie sur la fin de décharge

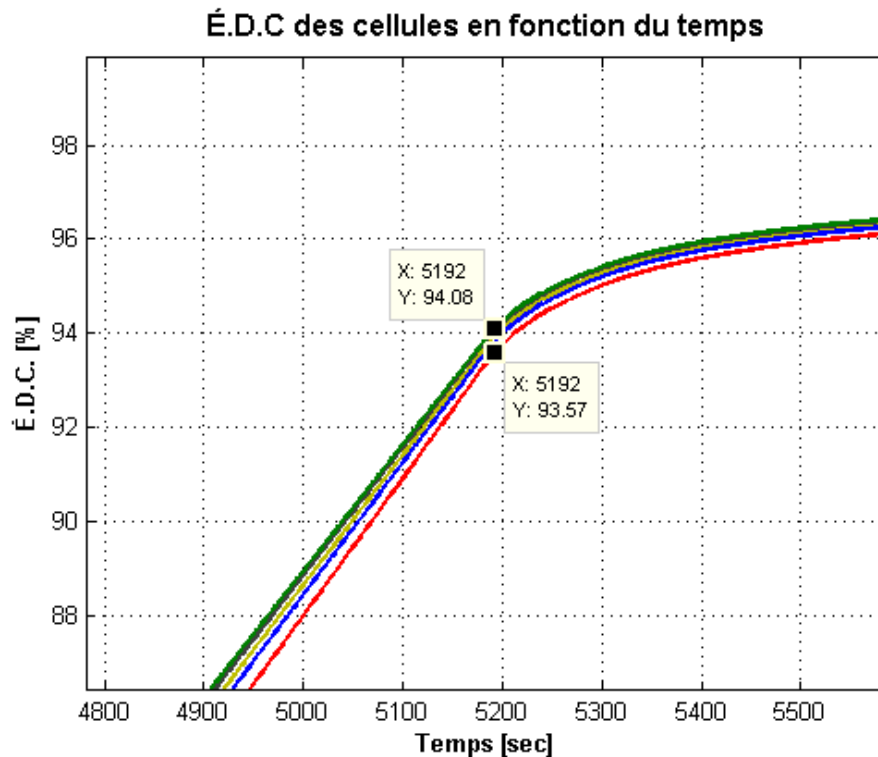


Figure 5.11 É.D.C. des cellules agrandie sur la fin de charge

Afin de contrebalancer le changement d'efficacité présenté à la section 2.2.3, il fallu trouvé un gain à donner au courant lu par le senseur à effet Hall pour obtenir un courant réel consommé par les cellules corrélé avec des É.D.C. connus. Par exemple, le S.G.B. savait qu'après l'égalisation, l'É.D.C. était de 100 % et qu'à 2.0 V, l'É.D.C. était de 0 %. Même si Angarita [18] suggérait une valeur variable en fonction du courant, une constante expérimentale de calibration de 1.010101 a donné des résultats avec une erreur de moins de 1 % par rapports aux points de repère. Ces repères sont les moments où le S.G.B. détecte correctement les seuils d'É.D.C. de 100 % et de 0 % tout en ayant une lecture de 10.0 A pour un courant imposé de 10.0 A ou une lecture de -2.30 A pour un courant imposé de -2.30 A). Cette mince erreur de 1 % a été jugée suffisante pour les besoins du projet de recherche et l'analyse complète d'un gain variable en fonction de l'amplitude de courant et de la température a été jugé comme non essentiel.

Ce gain constant n'a pas été étudié en profondeur (par exemple, sa variation sur plusieurs jours) ; principalement parce que cela n'était pas inclus dans l'échéancier de l'étude originale et que le temps ne l'a pas permis. La valeur en fonction de la température n'a pas été étudiée non plus pour les mêmes raisons.

Dans l'ensemble du code produit par l'auteur pour résoudre la problématique, le gain appliqué à la lecture du courant est l'unique variable de type flottant (*float* en anglais). En augmentant le

nombre de bit autorisé en mémoire pour la lecture de courant à 32 bits, il aurait été possible de remplacer cet unique flottant par une valeur entière de 1 010 101 plutôt que 1.010101. L'unité de travail passerait alors de 1 mA à $\frac{1}{1010101}$ mA. Malheureusement, l'échéancier n'a pas permis de tester les cas limites de cette transition. Si cette transition avait été faite, le code complet n'aurait contenu que des nombres entiers et aurait donc pu être monté sur un processeur n'ayant pas de module de calcul de nombres flottants ; donc moins cher à l'achat.

5.2.2 Fonctionnalité du S.G.B. sous le cycle WMTC

Similaire à la section précédente, il est important de valider que le S.G.B. soit capable de procéder à ses mesures dans un environnement plus aléatoire. Ainsi, les figures 5.12, 5.13 et 5.14 montrent les lectures de tensions, de courant et de R_{in} lorsque le bloc batterie est soumis à un cycle WMTC.

La relation entre la R_{in} et le courant de ligne sous un cycle WMTC, montrée à la figure 5.15, est similaire aux mesures sous environnements contrôlés. La R_{in} est légèrement plus haute lorsque le courant augmente et les cellules ayant une R_{in} plus élevée (cellule #4 et #14) sur la figure 5.7 ont aussi une R_{in} plus élevée sur la figure 5.15.

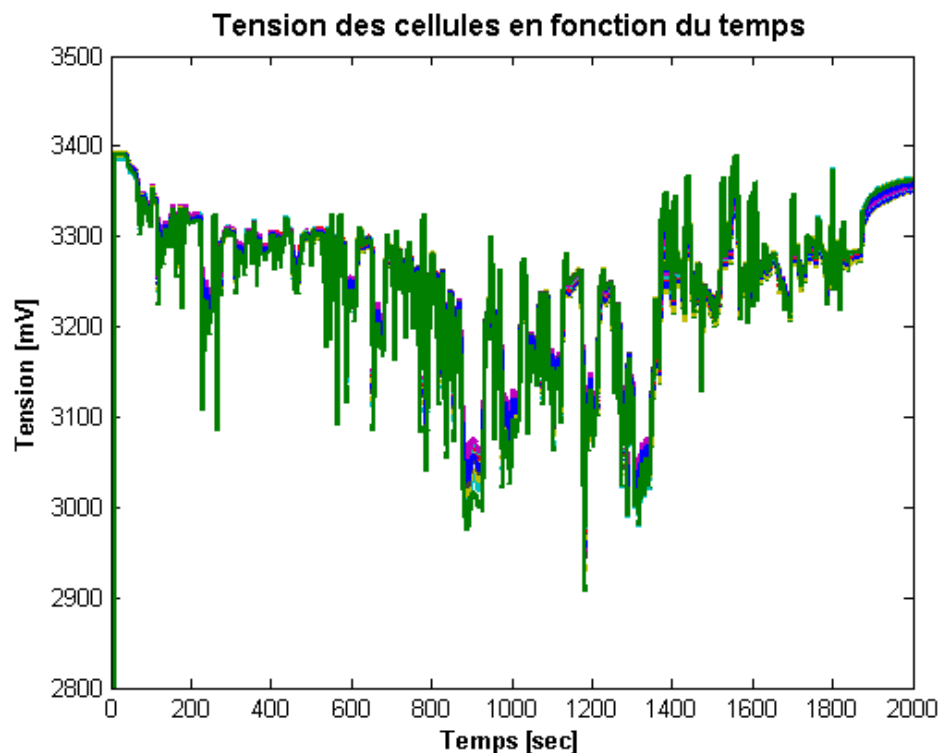


Figure 5.12 Mesure de la tension individuelle par le S.G.B. sous le cycle WMTC

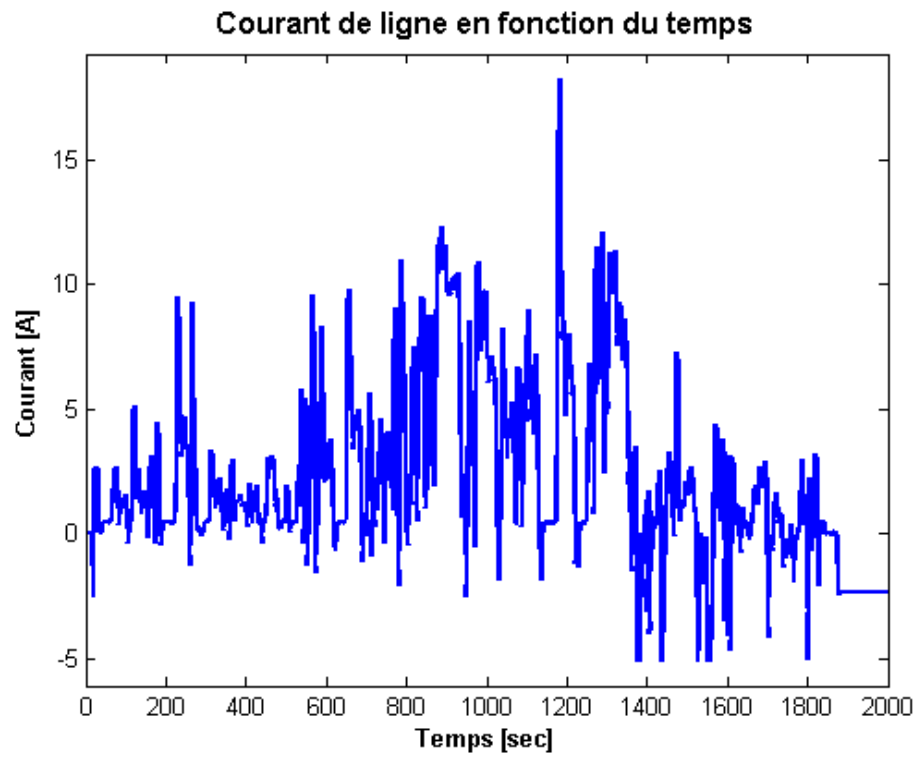


Figure 5.13 Mesure du courant de ligne par le S.G.B. sous le cycle WMTC

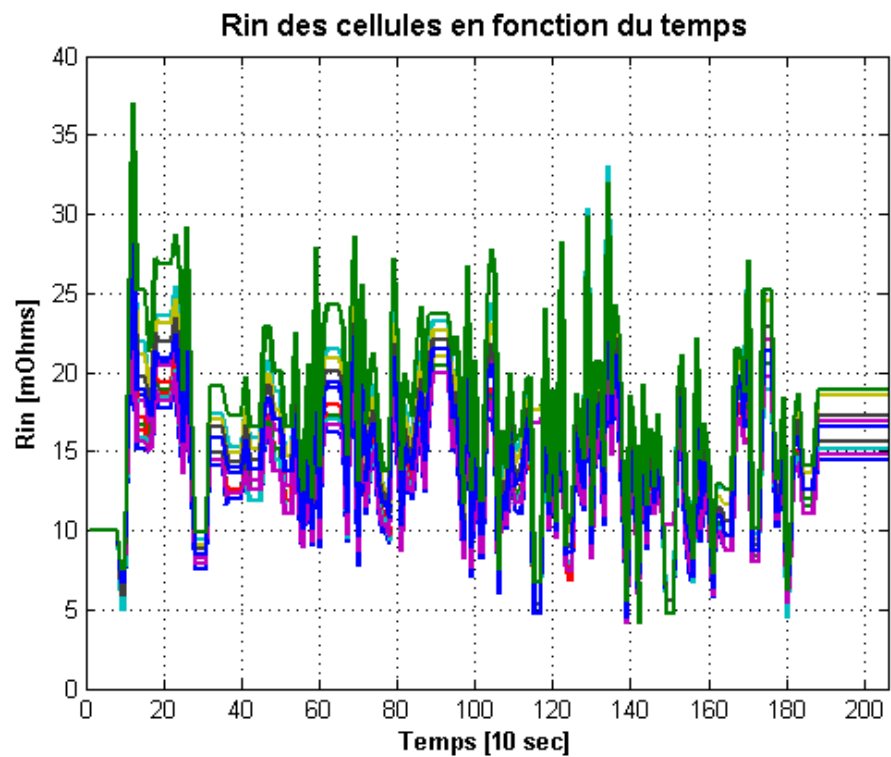


Figure 5.14 Mesure des R_{in} sous le cycle WMTC

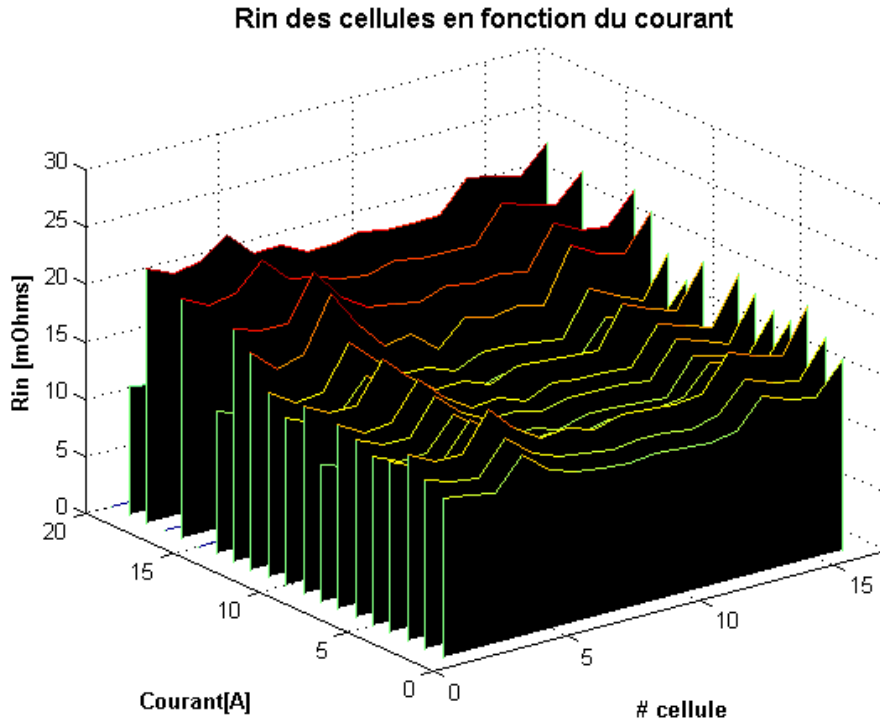


Figure 5.15 Visualisation des R_{in} en fonction du courant sous le cycle WMTC

Par les graphiques suivants, les mesures et calculs effectués par le S.G.B. sont similaire à ceux obtenus dans les environnements contrôlés. Cela indique que peu importe les valeurs des vecteurs d'entrées, le système est stable et cohérent, montrant son potentiel pour de vrais véhicules.

Encore une fois, le S.G.B. a été bel et bien en mesure de suivre l'évolution de l'É.D.C. tout au long du cycle, tel que montré à la figure 5.16. La similitude avec l'allure montrée à la figure 5.7 démontre que le suivi de la R_{in} est aussi possible avec des vecteurs d'entrée aléatoires. Dans les deux graphiques, la R_{in} de la cellule # 4 et # 9 sont plus élevée que le reste du bloc batterie. L'allure générique de toute les cellules semble vouloir monter aussi en fonction de l'amplitude du courant.

Par contre, il est à noter que comme les fronts de changements de tensions et de courants étaient moins francs et que les durées des impulsions étaient aléatoire, la capacité de polarisation C_{pol} n'était chargée au même niveau pour chaque lecture de R_{in} . Ainsi, la somme $R_{in} = R_{\Omega} + R_{pol}$, tel que proposée à la section 2.2.5, était faussée. Si l'hypothèse est donnée que toutes les combinaisons de largeur d'impulsion et d'amplitude de la demande en courant ont une distribution statistique uniforme et qu'elles ont toutes une durée inférieure au temps requis pour que C_{pol} ne soit pleinement chargée, l'aplatissement de l'écart en R_{in} maximum et

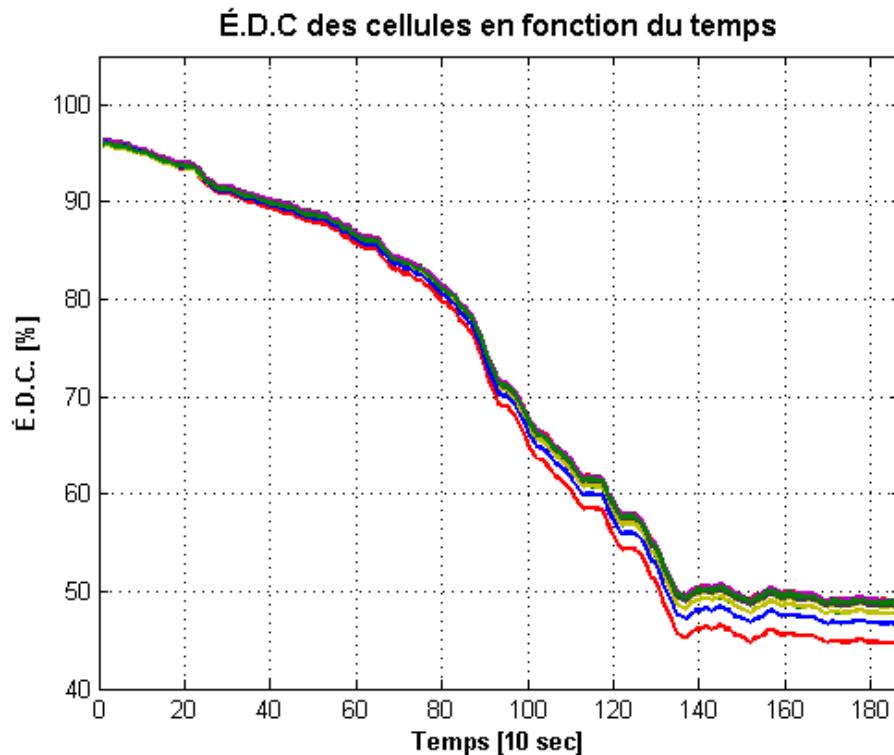


Figure 5.16 É.D.C. des cellules en fonction du temps sous le cycle WMTC

minimum par rapport à la figure 5.7 s'explique en admettant que la valeur affichée se rapproche de $R_{\Omega} + \overline{R_{pol}}$ plutôt que $R_{\Omega} + R_{pol}$.

La similitude et la cohérence des résultats du cycle WMTC avec les résultats des essais en environnement contrôlé montre la fonctionnalité du S.G.B. Ainsi, le premier objectif du projet de recherche est réalisé, soit de faire la conception et la validation d'un S.G.B. capable de mesurer les caractéristiques individuelles des cellules simultanément sur un processeur adapté à un bloc batterie de véhicules électriques.

5.3 Distribution statistique des paramètres

5.3.1 Dispersion de la R_{in} en fonction du courant

Avec le système de classification présenté à la section 3.3, il a été possible de représenter les mesures de R_{in} pendant la décharge en fonction du courant de décharge et de l'É.D.C. Plus important encore, cette méthode a aussi permis de définir à quel point chaque mesure se répète ou ne se répète pas. Comme l'ensemble des graphiques et des tableaux de données rendrait ce

document très lourd, les données complètes des 16 cellules ont été placées à l'annexe C. Seules les données extrêmes sont présentées ici.

Premier point à comparer : la R_{in} en fonction du courant. En comparant la valeur des compteurs pour chaque combinaison de courant et de R_{in} , il est possible de voir si une mesure de R_{in} se répète souvent, où si elle varie beaucoup. À l'aide des figures 5.17 et 5.18, il est intéressant de voir comment la cellule # 13 a une R_{in} très constante au fil des mesures alors que la cellule # 11 a des mesures qui divergent beaucoup.

Malgré toutes les différences entre les graphiques de l'annexe C, un point marquant est que l'ensemble des R_{in} augmentent clairement avec l'augmentation de la demande en courant. Un comportement conforme avec la littérature.

Observation importante, l'augmentation n'est pas égale pour chacune des cellules. Il a été impossible de dresser une constante multiplicative, commune pour tout le bloc batterie, qui permettrait de prédire la R_{in} à haut courant depuis des mesures à bas courant. Il est impératif de dresser un portrait pour chaque cellule.

Ces données peuvent aussi être exprimées sous forme de tableaux. Ces valeurs numériques ajoutent une dimension importante dans l'analyse qui ne peut être appréciée par les graphiques. Ainsi, les tableaux C.1 à C.16, présentés à l'annexe C, montrent les valeurs minimums et maxi-

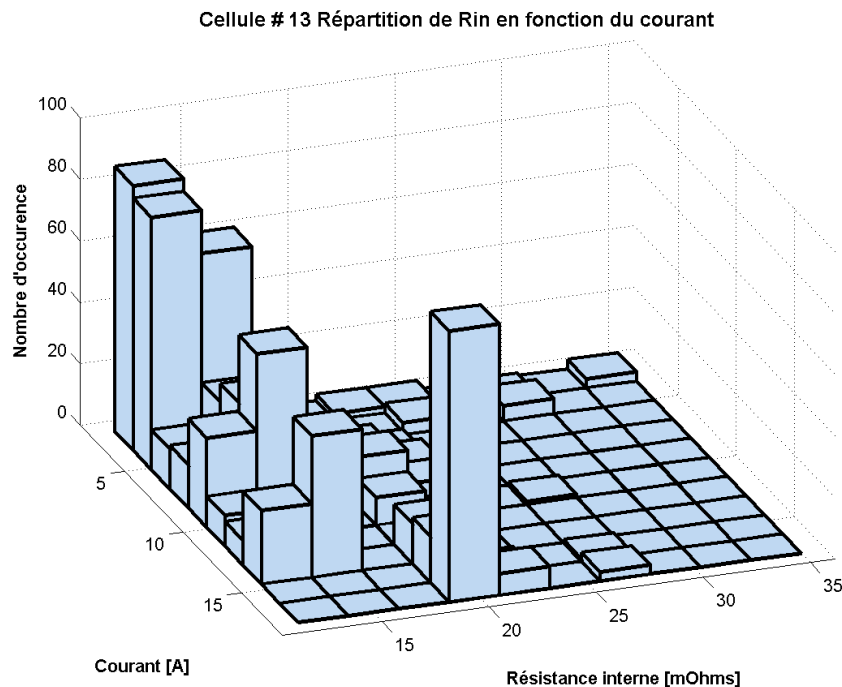


Figure 5.17 Nombre d'occurrences des R_{in} en fonction du courant - cellule #13

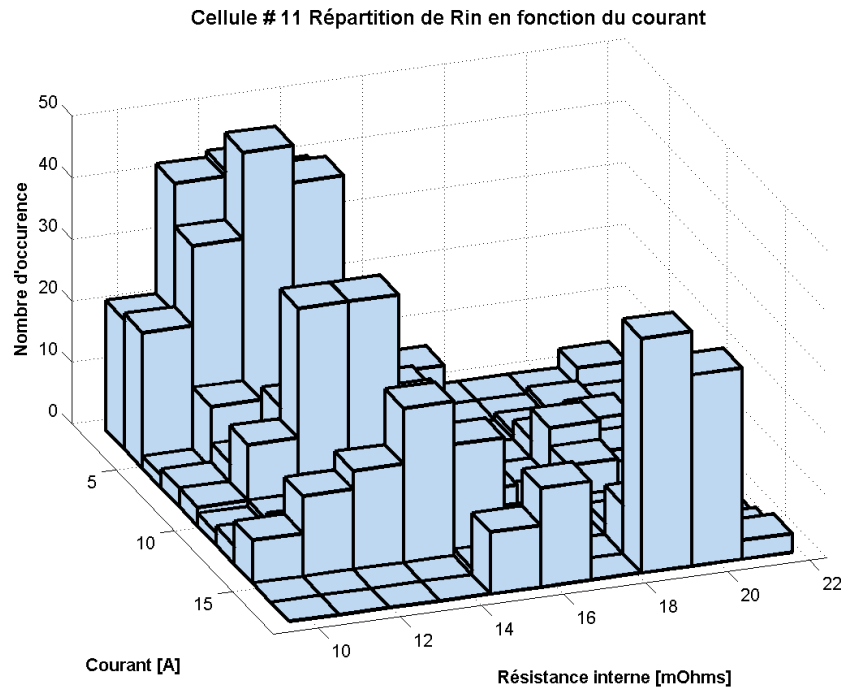


Figure 5.18 Nombre d'occurrences des R_{in} en fonction du courant - cellule # 11

mums mesurées pour chaque amplitude de courant utilisé lors de la décharge par échelons. Une analyse par MATLAB a aussi été utilisée pour ressortir l'écart type pour chacun de ces ensembles de données. Le tableau 5.3 représente, quant à lui, la moyenne de l'ensemble des 16 cellules.

Dans les tableaux les plus importants à observer, les tableaux 5.1 et 5.2 montrent les écarts type les plus différents. La cellule # 4 a affiché un σ de 3.96 pour un courant de 6 C alors que la cellule # 8 de 0.52 pour un courant de 8 C. La visualisation concrète de l'écart type sur ce genre de mesure n'est pas chose courante dans la littérature. La raison exacte de ces variations dans les écarts type n'est pas connue et pour l'instant, aucune théorie n'est en place pour l'expliquer.

Tableau 5.1 Variations de la R_{in} de la cellule # 4

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	14.1	17.29	27.2	2.22
2 C	14.7	17.64	32.6	2.47
4 C	14.7	19.06	28.9	3.44
6 C	14.7	18.67	32.6	3.98
8 C	23	24.49	27.2	0.78

Tableau 5.2 Variations de la R_{in} de la cellule # 8

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	8.3	9.72	16.3	1.26
2 C	8.7	10.08	14.8	1.14
4 C	8.7	11.02	15.9	1.90
6 C	8.7	10.96	15.9	1.89
8 C	13.8	14.35	15.9	0.52

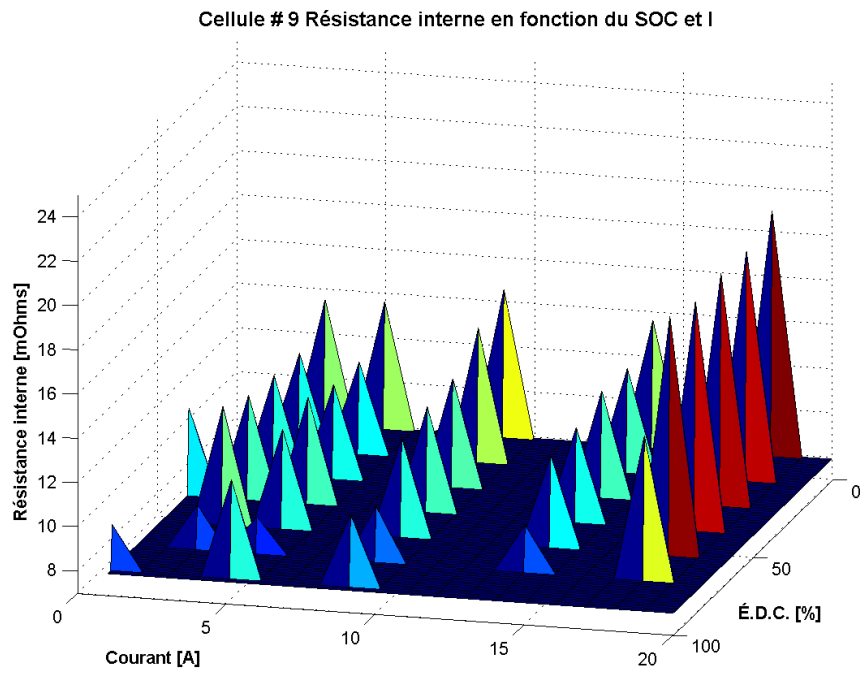
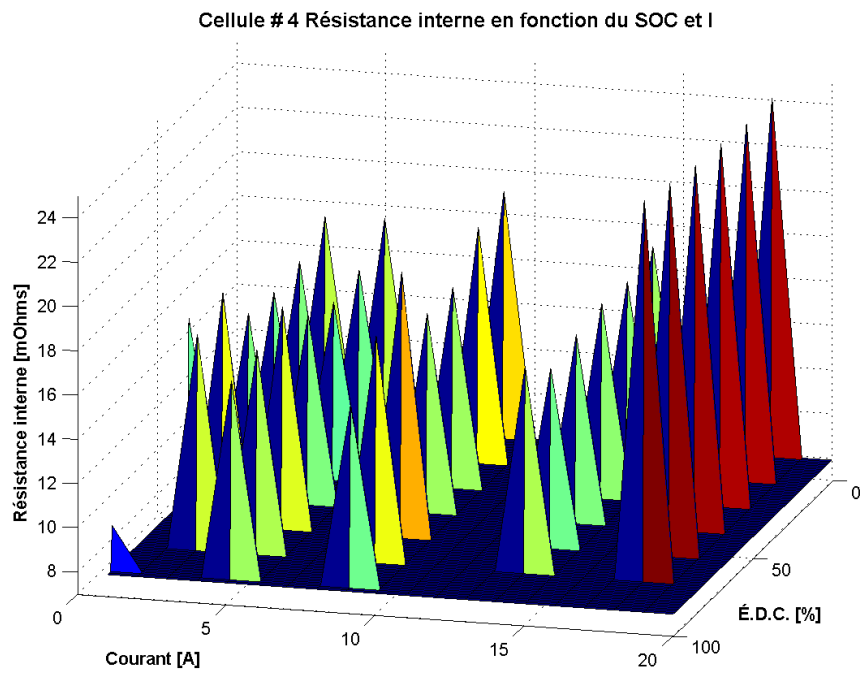
Tableau 5.3 Moyennes des variations de la R_{in} des 16 cellules

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	10.1	13.05	23.2	2.12
2 C	10.4	13.25	21.0	1.87
4 C	10.4	14.30	21.2	2.59
6 C	10.6	14.06	21.4	2.60
8 C	16.4	18.55	21.1	1.09

Les tableaux des 16 cellules montrent quelques faits intrigants. Premièrement, la R_{in} diverge beaucoup à bas courant, donc a un écart type assez haute, cependant, pour presque toutes les cellules, l'écart type diminue significativement à un haut courant (8 C). Deuxièmement, il n'y a pas beaucoup d'augmentation de la R_{in} entre les courants de 1 C et 6 C, par contre, la différence entre 6 C et 8 C est très notable. Finalement, il est à noter comment une R_{in} basse à bas courant sera aussi plus basse à haut courant.

5.3.2 R_{in} en fonction de l'É.D.C. et du courant

Dans une même méthode d'analyse, il est possible de représenter la R_{in} des cellules en fonction de l'amplitude du courant et de l'É.D.C. grâce au système de classification présenté. Les graphiques les plus parlants de l'annexe C sont ceux des cellules # 4 et # 9. La cellule # 9, en figure 5.19, affiche le comportement le plus typique du bloc batterie. La R_{in} commence assez haute à un É.D.C. près de 100 %, puis elle diminue au centre de la décharge et monte en flèche à la fin de la décharge, où l'É.D.C. est près de 0 %. De plus, comme dans les graphiques précédents, l'augmentation de la R_{in} lorsque le courant augmente est aussi facilement notable. Ces mesures concordent avec le comportement observé dans la littérature [2, 18]. La figure 5.20 monte les mêmes informations, mais cette fois pour la cellule # 4. Tel qu'observée dans les graphiques précédents, la R_{in} de cette cellule est nettement supérieure aux autres et ce, dans toutes les conditions de courant et d'É.D.C.

Figure 5.19 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 9Figure 5.20 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 4

5.4 Retour sur les configurations de bloc batterie et l'équilibrage

5.4.1 Ligne en série

Conséquemment aux graphiques présentés à la section 5.3, il est possible d'estimer les avantages des choix de configuration de bloc batterie, présentés à la section 2.2.9.

Lorsque les cellules sont placées en série, le courant qui traverse l'ensemble des cellules provoquera une chute d'É.D.C. dépendante de la capacité de chaque cellule. Ainsi, si le bloc batterie n'a pas accès à une égalisation active, la ligne de cellule sera limitée par la cellule la plus petite en capacité. Dans le cas du bloc batterie utilisé, il s'agit de la cellule # 10 à 2.09 Ah. L'excédent de charges des autres cellules ne pourra pas être utilisé sans pousser la cellule # 10 sous le seuil d'un É.D.C. de 0 %, l'endommageant irrévocablement au passage. Ceci représente seulement 90 % de la capacité annoncé par le manufacturier. L'autonomie du V.É. sera donc aussi diminuée d'environ 10 % (variable en fonction du style de conduite appliqué). Cette quantification peut être utilisée pour comparer l'augmentation de coût d'une égalisation active versus l'ajout de cellule pour compenser cette perte. Une égalisation active, qu'en à elle, pourrait transférer une partie de l'énergie du bloc vers les cellules en difficultés et ainsi utilisé une plus grande quantité d'énergie embarquée. Si un l'égalisation avait un transfert parfait et sans pertes, le bloc batterie pourrait utilisé exactement la moyenne des capacités des cellules, dans le cas présent, 2.24 Ah. Dans un désign réel, les pertes encourues dans le transfert réduiront légèrement ce chiffre.

Le courant maximum que pourra délivrer le bloc batterie sera déterminé par la cellule ayant la R_{in} la plus haute parce que cette cellule sera celle qui dégagera le plus de chaleur pour un même courant de ligne. Alors que la valeur prescrite par le fabricant de $10 \text{ m}\Omega$ ne dégagerait que 3.39 W sous un courant de 8 C, la moyenne des valeurs obtenues de la cellule # 4 à 8 C de $24.49 \text{ m}\Omega$ indiquerait plutôt un dégagement de 8.3 W. S'il est considéré que la puissance utile fournie par la cellule comme le voltage à ses bornes (après les pertes $I \cdot IR_{in}$) multiplié par le courant de ligne, le rapport entre la puissance fournie et la puissance totale soutirée de la cellule devient :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{utile nominal}} &= (3.3 \text{ V} - (18.4 \text{ A} \cdot 10 \text{ m}\Omega)) \cdot 18.4 \text{ A} = 57.3 \text{ W} \\
 P_{\text{utile mesurée}} &= (3.3 \text{ V} - (18.4 \text{ A} \cdot 24.49 \text{ m}\Omega)) \cdot 18.4 \text{ A} = 52.4 \text{ W} \\
 \text{Rapport}_{\text{nominal}} &= \frac{57.3}{57.3 + 3.39} = 94.4\% \\
 \text{Rapport}_{\text{mesuré}} &= \frac{52.4}{52.4 + 8.3} = 86.3\%
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Il est à rappeler que cette différence par rapport aux chiffres du manufacturier s'amplifiera au fur et à mesure que la R_{in} augmentera avec le temps, quand la cellule vieillera. Ce dernier calcul doit être effectué lors de la conception d'un bloc batterie afin de bien dimensionner le système de refroidissement des cellules.

5.4.2 Cellules en parallèle

Si les cellules sont placées en parallèle, le courant se distribuera entre les cellules au prorata de leurs R_{in} respectives. Dans un exemple avec deux cellules en parallèle, si une cellule de haute R_{in} est placée aux côtés d'une cellule de basse R_{in} , alors sa chute de potentiel sera plus importante lors d'une forte demande en courant ; sa cellule voisine, ayant une chute plus faible, fournira plus courant pour que la somme soit égale à la demande de la ligne ; où jusqu'à ce que l'augmentation de R_{in} provoqué par cette surcharge de courant soit égale à la R_{in} de sa voisine. Lors du relâchement de la demande en courant, la cellule s'étant la moins déchargée des deux (ayant fourni moins de courant) aura une T.C.O. légèrement plus haute que sa voisine. Ceci provoquera sa décharge et la recharge de la cellule voisine. Donc la cellule ayant une R_{in} plus faible s'échauffera non seulement à la décharge du bloc, mais aussi lors des repos, car elle sera rechargée par sa voisine. Même si certaines analyses montrent que la mise en parallèle de cellules permet de réduire les écarts entre les paramètres en considérant les cellules comme un tout uni ayant une R_{in} équivalente à la moyenne des R_{in} des cellules et à une capacité totale égale à la sommes des capacités (donc, ayant plus de chance d'être près de la moyenne du lot de cellule), les analyses thermiques, d'augmentation de température et de refroidissement deviennent très complexe.

5.5 Courant minimum d'égalisation

L'une des caractéristiques pratiquement jamais détaillées dans la littérature des S.G.B. est l'amplitude du courant d'égalisation pour une égalisation passive. Dans le montage présenté à la section 4.1, la plateforme de développement achetée munie du BQ76PL536 est montée avec des MOSFET pour la décharge des cellules en combinaison avec une résistance de 47Ω , le tout permettant une décharge de 70 mA. Pour les cellules utilisées, cela correspond à une décharge de 0.03 C ; donc inférieur au courant de fin de charge, où les cellules sont considérées pleines, de 0.05 C. Avec ce courant très faible, un problème a été remarqué : dès qu'une cellule atteint son seuil de voltage maximal, le S.G.B. limite le courant de charge de la ligne à la valeur de courant d'égalisation (0.03 C). Dès lors, les cellules ne se rechargent presque plus. Ce faible courant augmente donc énormément le temps d'égalisation. S'il est posé une différence d'É.D.C. de 3 %

pour un cycle de décharge, l'égalisation telle que montée prendra :

$$t = \frac{3 \% \cdot Cap}{I_{\text{égal}}} = \frac{0.069 Ah}{0.07 A} = 0.98 h \quad (5.2)$$

Si le bloc batterie est rechargé à un courant nominal de 1 C, il est espéré d'avoir une recharge complète en une heure. Avec cette égalisation, 59 minutes supplémentaires sont requises pour recharger et balancer le bloc batterie.

Pour des design futurs, il serait plus judicieux de réduire la résistance d'égalisation afin de permettre un courant de fin de charge un peu plus élevé. Si le courant était plutôt fixé à 0.1 C, cette même différence de 3 % prendrait maintenant 18 minutes.

Évidemment, les concepteurs ne pourront pas réduire la résistance d'égalisation sans conséquence. Plus le courant qui la traverse sera grand, plus elle dissipera de chaleur, donc plus celle-ci devra être montée dans un boîtier résistant. Une résistance de 1 W sera nécessairement plus grosse qu'une résistance de 0.25 W. Ainsi, les concepteurs devront composer entre la réduction du temps d'égalisation et l'espace disponible sur le S.G.B. pour les résistances d'égalisation.

Dans un même ordre d'idée, si le S.G.B. dispose d'une égalisation active, le même problème s'expose. Si la capacité d'échange n'est pas suffisamment grande, le S.G.B. ne sera pas en mesure d'égaliser les cellules dans un temps raisonnable. Par conséquent, le bloc batterie sera encore limité par la cellule la plus faible, ne pouvant pas recevoir suffisamment de charges pour compenser. Inversement, une conception permettant un échange plus important sera aussi plus volumineuse et plus coûteuse.

Lorsque les cellules sont placées en parallèle, la capacité totale du nœud de cellule se rapproche de la somme des capacités individuelles des cellules. Il est important d'en prendre considération lorsqu'un concepteur quantifie le courant minimum d'égalisation en fonction de la capacité.

5.6 Retour sur les choix de conception

En rétrospective, la qualité des mesures et estimations effectuées par le S.G.B. et la ressemblance avec les tests effectués sur des cellules individuelles dans la littérature montrent que le système est fonctionnel et efficace. La capacité du S.G.B. à effectuer ses mesures simultanées sur un bloc de cellules tout en utilisant des pièces de faible volume et de moindre coût indique aussi une compatibilité avec les idéologies des systèmes pour V.É. ou V.É.H.

Le seul aspect qui aurait place à amélioration est le système d'égalisation, ayant une capacité de courant trop faible, celui-ci ne permet pas d'effectuer une recharge complète dans un temps

raisonnable. Comme il a été détaillé à la section 5.5, le système développé n'a finalement pas été en mesure de mesurer la capacité de manière efficace, car le courant de décharge en fin de test (lorsque les cellules sont presque vides) n'était pas assez grand et le temps ajouta une erreur cumulative trop grande pour donner confiance aux mesures.

De plus, l'ensemble des tests a été effectué à 21°C. Même si le système de classification des mesures permettait de classer selon la température, le temps n'a pas permis de valider les mesures.

CHAPITRE 6

CONCLUSION

6.1 Sommaire

Ce document porte sur la compréhension du comportement et de l'utilisation des cellules au lithium. Ce document présente donc un outil pour le développement des moniteurs des systèmes de gestion de batteries surveillant des cellules au lithium-ion ; plus précisément les cellules destinées à un bloc batterie utilisées pour la propulsion d'un véhicule électrique ou hybride. Un nouveau système de classement multidimensionnel en mémoire, permettant d'emmagasiner un grand nombre de données avec un minimum d'effort pour le processeur, figure dans les contributions les plus marquantes. En utilisant les conditions de conduites comme coordonnées de classement plutôt que le temps, cet algorithme de mesure et d'estimation des paramètres internes permet d'en apprendre plus sur le comportement des cellules pendant leur utilisation.

6.1.1 Rappel du modèle utilisé de cellule au Li-ion

La réaction d'oxydoréduction des cellules au li-ion peut être transposée dans des modèles très précis, mais ces modèles font généralement intervenir des fonctions exponentielles et logarithmiques (par exemple, l'équation de Nernst). Lors de l'implémentation de ce modèle dans un processeur de S.G.B, ces fonctions mathématiques ralentissent considérablement les calculs. Ainsi, le modèle utilisé dans ce projet de recherche a été simplifié pour n'utiliser que des fonctions d'additions, de soustractions, de multiplications et de divisions.

Afin de bien visualiser le comportement d'une cellule au lithium, un S.G.B. doit connaître ou estimer la résistance interne, la capacité, l'état de santé, l'état de charge et la profondeur de décharge de celle-ci. Avec le modèle utilisé, l'ensemble de ces paramètres peuvent être trouvés à partir de la tension, du courant, de la température et d'une référence de temps. Les figures 6.1 et 6.2 et les équations 6.1 à 6.4 résument le modèle utilisé.

$$R_{in(\Omega)} = R_{ohm(\Omega)} + R_{pol(\Omega)} \approx \frac{\Delta V_{(V)}}{\Delta I_{(A)}} \quad (6.1)$$

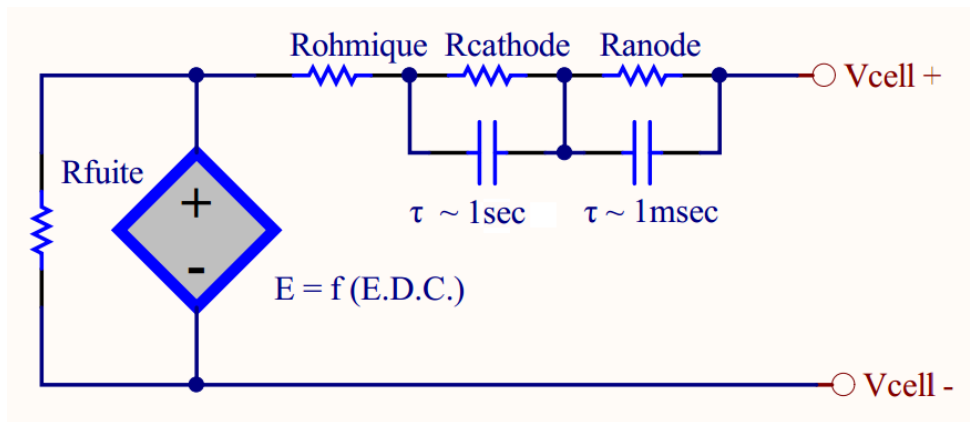


Figure 6.1 Modèle électrique avec effet de relaxation [2]

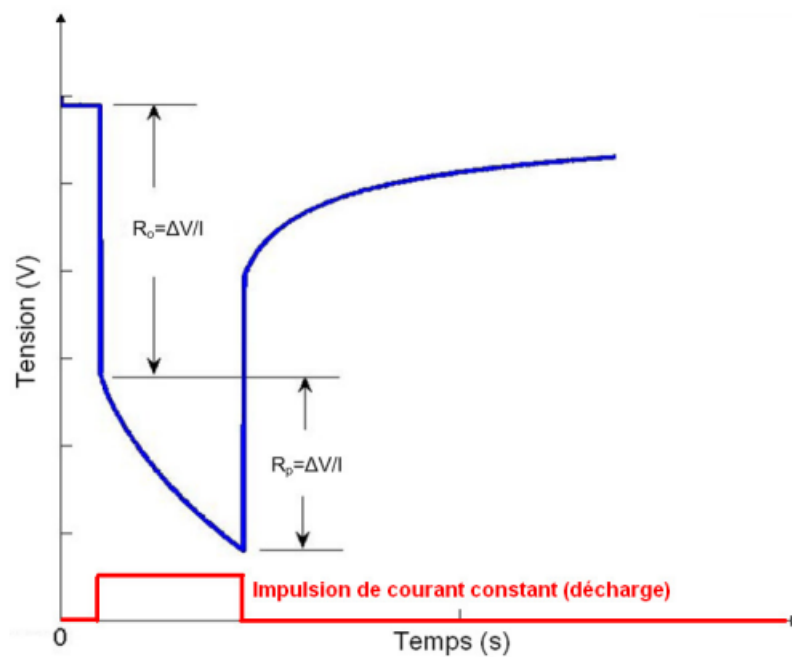


Figure 6.2 Mesure de la R_{Ω} et R_{pol} depuis une impulsion de courant [54]

$$\acute{E}.D.S.(\%) = \min \left\{ \begin{array}{l} \left(1 - \frac{R_t(\Omega) - R_{0(\Omega)}}{R_{max(\Omega)} - R_{0(\Omega)}} \right) \cdot 100 \% \\ \left(1 - \frac{C_{0(Ah)} - C_t(Ah)}{C_{0(Ah)} - C_{min(Ah)}} \right) \cdot 100 \% \end{array} \right. \quad (6.2)$$

$$\acute{E}.D.C.(\%) = \frac{Capacit\acute{e}_{(Ah)} - P.D.D._{(Ah)}}{Capacit\acute{e}_{(Ah)}} \cdot 100\% \quad (6.3)$$

$$\Delta P.D.D._{(Ah)} = \int_0^t k1[i(t)] \cdot k2[T(t)] \cdot I(t)_{(A)} \cdot dt \quad (6.4)$$

Lorsque que les estimations de ces param\etres sont int\egrer tous ensembles dans un logiciel, les microcontr\oleurs embarqu\es dans le bloc batterie, essayant de mesurer simultan\ement quelques centaines de cellules, ne peuvent suffire aux contraintes temps r\eel que s'ils sont tr\es puissants ou tr\es nombreux. Ce requis de puissance influence \a la hausse le co\ut total du syst\eme de gestion de batteries.

6.1.2 Rappel de la probl\ematique

Le probl\eme majeur actuellement v\ecu dans la conception de S.G.B. est l'acc\es au p\eriph\erique m\emoire. La grande quantit\e de donn\ees mesur\ees ou estim\ees utilis\ees dans la pr\ediction du comportement ne peuvent \^etre conserv\ees dans la m\emoire vive, tr\es limit\ee, d'un microprocesseur de S.G.B. Ces donn\ees doivent donc automatiquement \^etre emmagasin\ee sur un support externe. Le va-et-vient des donn\ees pour mener \a terme les mod\elisations atteint rapidement la limite de transfert du support externe.

Le projet de recherche s'est alors d\efini comme la cr\eeation et l'impl\ementation d'un algorithme de classement de donn\ees permettant de r\eduire le nombre d'acc\es aux p\eriph\eriques m\emoire sans pour autant affect\ee de mani\ere critique la pr\ecisions des calculs. Le projet voulait d\emontrer qu'avec cet algorithme de classement, il \etait possible de conserver la relation entre les donn\ees et les conditions de conduites sans affect\es les performances du logiciel. Il fallu d\emontrer que cet algorithme de classement, juxtapos\ee aux autres fonctionnalit\es normales d'un S.G.B. peuvent s'ex\ecuter en temps r\eel sur un processeur de puissance de calcul modeste.

Le syst\eme de classement est diff\erent de la m\ethode traditionnel de classement car il classe les mesures en fonction des conditions de conduites pr\esentes lors de la mesure, plut\ot que de mani\ere chronologique. La R_{in} de chaque cellule est alors \evalu\ee en fonction du courant, de la temp\erature et de l'\acute{E}.D.C. du bloc batterie. Pour chaque combinaison possible, un compteur

est conservé en mémoire, représentant le nombre de fois que cette R_{in} a été mesurée dans ces conditions. Au moment de la récupération des données, un ratio d'importance est affecté à chaque valeur en fonction de la valeur du compteur et de la distance par rapport au point de mesure actuel (représenté par une table de poids). La moyenne des lectures, représentant la R_{in} la plus pertinente pour les calculs du S.G.B., est alors exprimée par l'équation 6.5.

$$R_{in\ filtrée} = \frac{\sum_{\forall k \in \mathbb{E}} (R_{in(k)} \cdot Compteur_{(k)} \cdot Poids_{(k)})}{\sum_{\forall k \in \mathbb{E}} (Compteur_{(k)} \cdot Poids_{(k)})} \quad (6.5)$$

Pour mener à bien le projet de recherche, un banc de test a été monté à l'aide d'un PIC32MX795F512L de *Microchip Technology* [43], utilisé comme processeur central du S.G.B. Ce processeur générique est de puissance et de prix adapté à une production commerciale de S.G.B. pour véhicules électriques ou hybrides. Les cellules ont ensuite été soumises à différents cycles de charge/décharge afin de valider le fonctionnement du S.G.B. et de l'algorithme de classement. L'un des cycles de charge/décharge utilisé est le cycle WMTC, cycle très représentatif des patrons de courant observés dans un bloc batterie de véhicule électrique.

6.1.3 Rappel des résultats

Les résultats issus de la surveillance de 16 cellules montées dans un bloc batterie ont démontrés que les paramètres varient en fonction des conditions de conduites et qu'il est possible de suivre ces variations avec le logiciel et l'électronique proposés. Il a été observé notamment que la variation d'un paramètre par rapport aux mêmes conditions de conduite ou par rapport à un autre paramètre n'est pas corrélée d'une cellule à l'autre. Le logiciel produit a aussi démontré que les contraintes temps réel peuvent être respectés avec un microcontrôleur modeste. Les mesures ont permis d'observer que la R_{in} augmente avec l'augmentation de la demande en courant mais aucune relation linéaire pertinente n'a pu être observée. Le tableau 6.1 expose la moyenne de toutes les cellules et de l'écart-type associés aux mesures. Les résultats obtenus ont aussi montrés que la R_{in} varie beaucoup d'une mesure à l'autre ; et encore plus intéressant, l'écart-type des mesures n'est pas constant d'une cellule à l'autre.

Il a été observé que devant un patron de courant pseudo-aléatoire, la R_{in} estimée se rapproche de $R_{\Omega} + \overline{R_{pol}}$ plutôt que $R_{\Omega} + R_{pol}$ car la capacité de polarisation C_{pol} n'est jamais pleinement chargée.

Il est difficile de quantifier la réduction du nombre d'accès au périphérique mémoire car la méthode traditionnelle n'a pas un nombre d'accès constant (et croît avec le temps). L'algorithme de classement proposé dans ce document offre l'avantage d'avoir un nombre d'accès et un nombre

Tableau 6.1 Moyennes des variations de la R_{in} des 16 cellules

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	10.1	13.05	23.2	2.12
2 C	10.4	13.25	21.0	1.87
4 C	10.4	14.30	21.2	2.59
6 C	10.6	14.06	21.4	2.60
8 C	16.4	18.55	21.1	1.09

de multiplications constants. Ce nombre prévisible peut ensuite être utilisé pour monter un logiciel plus fiable ; à l'opposé de la méthode traditionnelle, qui pourrait ne pas respecter les contraintes temps réels lorsque le nombre d'accès mémoire devient trop grand.

6.2 Contributions

Les résultats issus du projet de recherche ont permis de donner de nouvelles informations très pertinentes pour la suite des développements entourant les cellules au li-ion pour véhicules électriques. Premièrement, il est maintenant clair que la R_{in} d'une cellule est une entité hautement variable qui ne peut se mesurer de manière superficielle. La R_{in} change clairement de valeur en fonction du courant et de l'É.D.C. et il est impératif de la mesurer dans une multitude de conditions avant d'avoir une information pertinente. Les résultats obtenus ont démontré que la R_{in} des cellules est systématiquement plus élevée que la valeur prescrite par le fabricant d'un facteur variant de 100 % à 300 %. Devant la multitude de données à acquérir, il est clair que l'algorithme de classement des données proposé est très pertinent pour le développement d'un S.G.B. professionnel.

Cet algorithme pourra maintenant être utilisé pour mesurer des divergences de paramètres et aider la quantification des besoins en égalisation du bloc batterie. La puissance à dissiper ou à échanger par le système d'égalisation du S.G.B. pourra être extraite des divergences de paramètres et des cycles de conduites prévus pour le bloc batterie. Ces informations pourront aussi guider les concepteurs vers des configurations de bloc batteries plus optimales pour leurs applications.

Avec les informations tirées du S.G.B. proposé, permettant de suivre l'évolution des paramètres, plusieurs points positifs pourront être observés dans le futur des véhicules électriques :

- une modélisation de l'état du bloc batterie plus représentative de la réalité, rendant les estimations d'autonomie ou de durée de vie des cellules plus exacte ;

- des conseils sur la conduite dans l'interface usager pour optimiser la durée de vie des cellules, ou une quantification des pertes en durée de vie pour un gain en performance ;
- des stratégies de conduites optimisant la durée de vie des cellules.

Le projet de recherche a aussi démontré que les données provenant des fiches des manufacturiers ne sont pas des données fiables pour la conception, surtout au niveau de la R_{in} , et que des étalonnages en laboratoire devraient toujours être entrepris pour des designs professionnels.

Bien que le système ait été réalisé dans le but d'accommoder une problématique vécue dans le domaine des véhicules électriques, tout assemblage de centaines de cellules au lithium-ion et de grosses pointes de puissance, abordant alors les mêmes problématiques de déséquilibres et de variation de paramètres, pourra bénéficier des fruits de ce projet de recherche. Les systèmes d'alimentation sans interruption (*uninterruptible power supply* ou *UPS* en anglais) ou systèmes d'alimentation de satellite ne sont que deux exemples qui pourraient utiliser ce système de classement dans leur système de gestion de batterie.

6.3 Travaux futurs

La réussite de ce projet de recherche ouvre la porte à plusieurs innovations. Premièrement, aucune optimisation du logiciel n'a été entreprise. L'ajout d'une librairie implémentant un système d'exploitation de base et une exécution multitâches permettrait sans doute de simplifier le séquenceur de tâche et diminuerait les délais présents dans la machine à états finis implémentée. Une meilleure utilisation de certains périphériques internes, comme le contrôleur DMA (*Direct Memory Access*) ou les ports de communications, réduira le temps de traitement et laissera plus temps au processeur pour demeurer en mode *économie d'énergie* (*Sleep mode*). Dans une même optique, une optimisation de l'utilisation des périphériques externes amènera aussi un gain sur les performances. Au final, il serait possible de diminuer significativement la consommation énergétique du S.G.B. simplement en optimisant le logiciel. Suite à l'optimisation complète du système, il serait intéressant de sortir un besoin en terme de puissance de calcul par cellule surveillée de type Hz/cellule (en terme de fréquence de fonctionnement du processeur) ou en terme de MIPS/cellule (en terme de millions d'instructions par seconde).

Deuxièmement, l'intégration de ce système dans un bloc batterie utilisé dans un véritable véhicule électrique amènera forcément de nouvelles problématiques. Des travaux seront menés afin de vérifier la sensibilité et la fiabilité de cet algorithme de classement face aux bruits électromagnétiques d'un moteur électrique de véhicule électrique.

Troisièmement, les filtres numériques utilisés sont très simples, l'idée première du projet de recherche était de faire la preuve du concept. Il sera pertinent dans les conceptions futures de construire des filtres numériques adaptés aux signaux mesurés, avec des fréquences de coupures et des délais de traitement plus réfléchis. Une étude pourrait aussi être menée sur le fenêtrage des délimitations des zones dans l'algorithme de classement.

Finalement, la construction d'un historique et la mesure du vieillissement de cellules provenant de différents fabricants pourront offrir une dimension supplémentaire sur le choix du fournisseur pour l'achat de cellules au li-ion destinées à un véhicule électrique. Un fabricant offrant des cellules avec une disparité faible sera considéré meilleur qu'un fournisseur offrant des cellules à haute disparité.

ANNEXE A

TYPES D'ÉGALISATEUR DE CHARGES

A.1 Dissipateurs

Le premier type d'égalisateur disponible sur le marché a été le système à dissipation. Lorsqu'un déséquilibre est noté sur une cellule (par mesure de la *tension en circuit ouvert* (T.C.O.) ou par calcul de l'*état de charge* (É.D.C.)), l'excédant d'énergie est retiré de la cellule et est transmis à un dissipateur pour libérer cette énergie en chaleur. Pour de faibles puissances, une simple résistance peut être utilisée. Pour une puissance plus élevée, un transistor à jonction bipolaire ou un MOSFET avec un dissipateur peuvent être utilisés. D'autres dissipateurs peuvent être utilisés, telles une lampe ou une DEL pour ainsi indiquer visuellement quelles cellules sont présentement sous décharge.

Il est à noter que la plupart des circuits intégrés disponibles sur le marché sont de ce type d'égalisation [2]. Cette méthode est la plus simple à contrôler et à implémenter. Mais comme l'énergie n'est pas redistribuée dans le module, l'efficacité de cette méthode est donc nulle.

Comme cette méthode ne permet pas de transférer de l'énergie, la capacité totale d'une série de cellules est limitée à la cellule ayant le moins de capacité ; qui atteindra les limites de charge/décharge en premier.

Un exemple d'égalisation par dissipateur est donné à la figure [A.1](#).

A.2 Transporteurs

La deuxième méthode d'égalisation est le transport de l'excédant d'énergie des cellules les plus fortes vers les cellules les plus faibles. L'implémentation de cette méthode est plus complexe que les dissipateurs, mais permet d'utiliser la capacité moyenne d'une série plutôt que la capacité la plus faible. Ce type d'égalisation permet d'égaliser les cellules d'un module entre elles, mais ne permet pas d'égaliser les modules entre eux ; sauf si le concepteur ajoute un transporteur de plus haute puissance entre les modules. Pour transporter l'énergie, un accumulateur de transition fera le point entre les cellules. Ce transporteur sera un condensateur, une inductance, un transformateur à bobinage multiple ou plusieurs transformateurs. Il y aura des pertes lors du transfert de la cellule vers le transporteur et encore d'autres du transporteur vers la deuxième cellule. Les transporteurs capacitifs ont une efficacité d'environ 50 % ; les inductifs et par transformateur ont une efficacité d'environ 70 % [2]. Des précautions doivent être prises lors de l'utilisation des inductances en source de courant, car elles peuvent créer des pointes de courant importantes si le circuit est ouvert lorsqu'elles sont chargées d'énergie.

Trois exemples de transporteurs sont donnés aux figures [A.2a](#), [A.2b](#) et [A.2c](#).

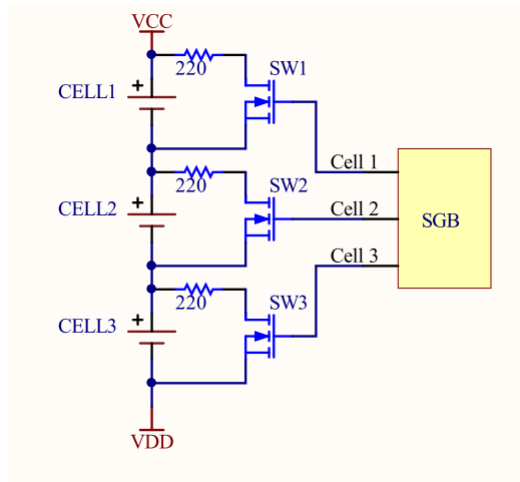


Figure A.1 Égalisation par dissipateur

A.3 Convertisseurs

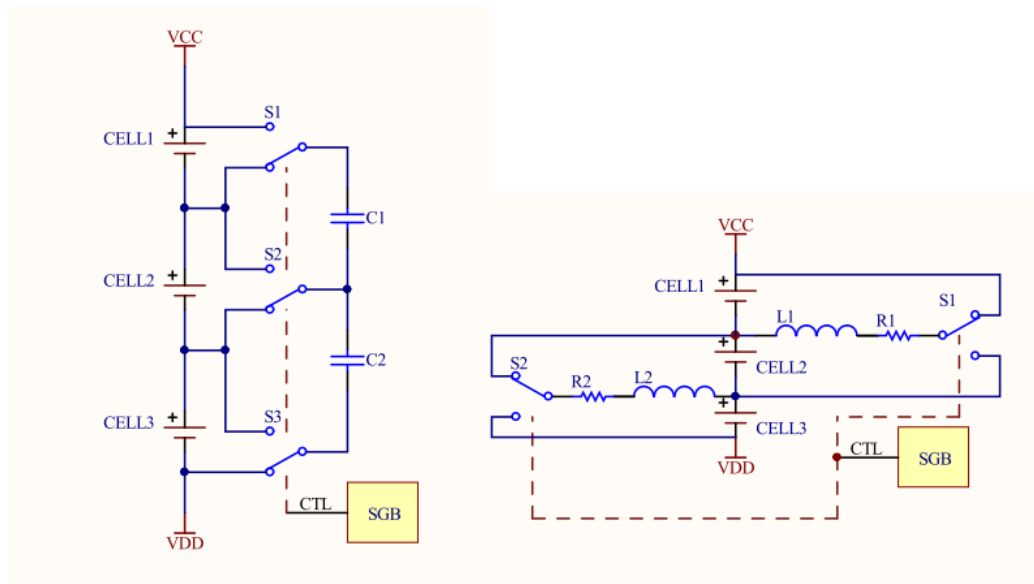
La dernière topologie d'égalisateur utilise un ou des convertisseurs de tension pour transférer l'énergie d'une cellule vers une autre cellule ou vers le module en entier ; ou du module vers une cellule. L'énergie peut aussi s'échanger dans les deux directions pour de meilleures performances, au coût d'une plus grande complexité de design. Les convertisseurs cellule à cellule sont en fait les transporteurs couverts dans la section précédente. La topologie cellule à cellule est simple et moins dispendieuse que les autres, mais offre peu d'efficacité : l'énergie doit souvent traverser plusieurs convertisseurs avant d'atteindre la cellule à égaliser.

L'avantage des convertisseurs bidirectionnels est qu'ils sont indépendants de l'état des cellules, contrairement aux convertisseurs unidirectionnels qui seront moins efficaces lorsque les cellules sont en bas É.D.C. [2].

Les configurations cellule vers module sont plus efficaces pour deux raisons. Premièrement, les redresseurs provoquent des pertes importantes lorsqu'ils sont placés du côté basse tension. Inversement, les composants d'électronique de contrôle des convertisseurs sont plus efficaces lorsqu'ils opèrent en basse tension, donc du côté des cellules. Leur efficacité peut atteindre 80 %.

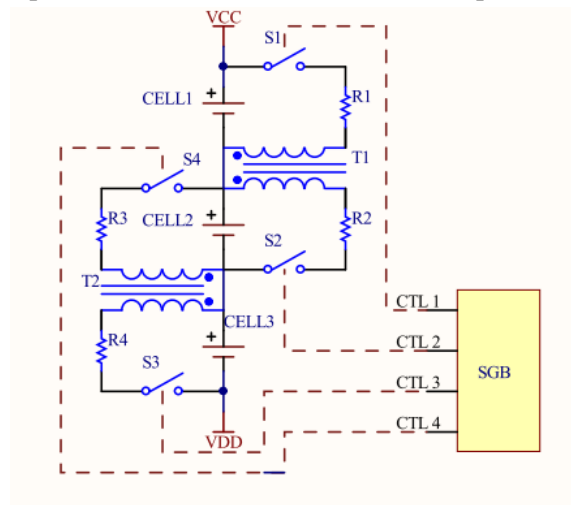
Nouvellement, un nouveau type de convertisseur a fait apparition. Altemose [1] propose un convertisseur bidirectionnel à bus partagé. Il agit dans la même optique qu'un convertisseur cellule à cellule, cependant il permet à toutes les cellules de rejoindre toutes les autres cellules d'un seul coup ; comme si elles étaient tout en parallèle. Il est beaucoup plus simple et efficace que ses confrères, cependant il requiert une bonne précision des pièces (résistances et transformateurs) sinon l'égalisation ne convergera pas sur des valeurs d'É.D.C. égales. De plus, il est facile de partager le bus entre les modules et ainsi balancer les modules entre eux.

Trois modèles de convertisseurs sont présentés aux figures [A.3a](#), [A.3b](#) et [A.3c](#).



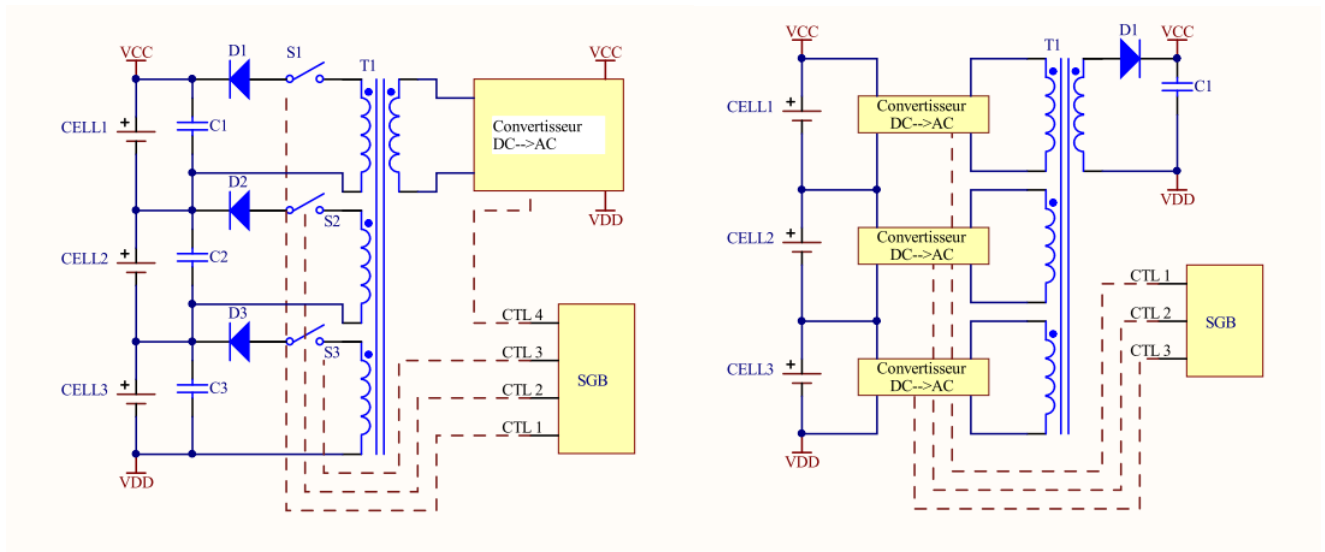
(a) Transporteur capacitif

(b) Transporteur inductif



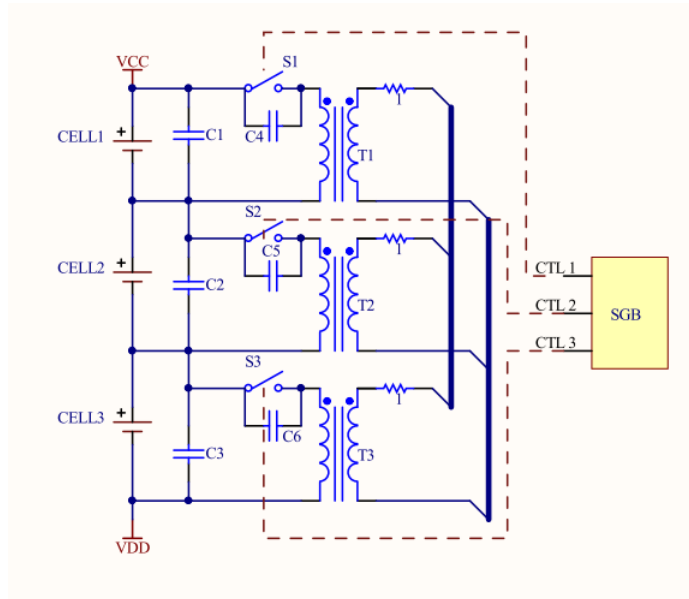
(c) Transporteur par transformateur

Figure A.2 Égalisation par transport d'énergie



(a) Convertisseur module vers cellules

(b) Convertisseur cellules vers module



(c) Convertisseur à bus partagé

Figure A.3 Égalisation par conversion d'énergie

D'autres méthodes d'égalisation existent [6]. Plusieurs sont des variantes de celles présentées ici, comme le partage d'un seul condensateur pour un transporteur capacitif ; où l'utilisation de plusieurs transformateurs plutôt que d'un seul à enroulements multiples. Pour les V.É. et V.É.H., une méthode trop complexe est, en général, évitée pour un souci de grosseur de S.G.B. Seulement les méthodes les plus compactes et les plus simples ont été présentées.

ANNEXE B

INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES SUR LE LOGICIEL DÉVELOPPÉ

B.1 Définition et rôle de chaque module développé

Tableau B.1 Description des modules logiciels du système de gestion de batterie implantés

Nom	Description	Type
Main	Rassemble la configuration du PIC32, la définition des interruptions, l'initialisation des modules et la répartition des tâches de haut niveau.	Gestion
A123_cells	Rassemble les informations du fabricant des cellules utilisées.	Définition
Batt_pack_info	Rassemble les informations sur le bloc batterie fabriqué pour le projet de recherche.	Définition
BMS_monitor	Contient la liste des actions à faire une fois les données physiques de voltage, courant et température recueillies. Ce module contient aussi l'implémentation des calculs permettant d'obtenir les autres paramètres des cellules.	Action
Can_command_def	Contient la liste des commandes et des réponses prévues entre le S.G.B. et le simulateur de véhicule.	Définition
Can_module	Contient les instructions pour acheminer et recevoir un message au périphérique CAN.	Accès aux périphériques
Datalogger	Contient la liste des actions à prendre pour avoir accès à la mémoire USB. Ce module contrôle aussi les actions du RTC.	Action
Front_end	Contient la liste des commandes à envoyer au BQ76PL536 par le module SPI pour demander une conversion et pour lire les registres des valeurs lues.	Accès aux périphériques
HVFE_CTRL	Contient la liste des commandes à envoyer au 2HR0220E pour configurer l'envoi, sur le réseau CAN, des conversions de lecture de courant.	Accès aux périphériques
Led_control	Permet l'accès aux lumières LED sur la plateforme. Utilisées surtout pour le déverminage.	Accès aux périphériques
Algorithme de Classement	Contient le code de l'algorithme de classement et la base des calculs permettant d'estimer un paramètre basé sur l'expérience passée selon les conditions d'utilisations.	Action
RTCC	Permet l'accès et le contrôle du module interne au PIC32, le RTC.	Accès aux périphériques

12 ANNEXE B. INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES SUR LE LOGICIEL DÉVELOPPÉ

Nom	Description	Type
Shared	Contient les définitions et commandes partagées entre tous les modules.	Action
Timer_module	Permet l'accès et le contrôle du module interne au PIC32, les compteurs (<i>Timer</i> en anglais).	Accès aux périphériques
USBControl	Contient les routines pour le transfert d'information entre la mémoire du processeur et la mémoire USB.	Accès aux périphériques

Tableau B.3 Description des modules logiciels du simulateur de véhicule

Nom	Description	Type
Main	Rassemble la configuration du PIC32, la définition des interruptions, l'initialisation des modules et la répartition des tâches de haut niveau.	Gestion
BK_precision_def	Liste et définition des formats des commandes à envoyer par le port série UART aux appareils de la compagnie <i>BK Precision</i> .	Définition
Can_command_def	Contient la liste des commandes et des réponses prévues entre le S.G.B. et le simulateur de véhicule.	Définition
CAN_module	Contient les instructions pour acheminer et recevoir un message au périphérique CAN.	Accès aux périphériques
Shared	Contient les définitions et commandes partagées entre tous les modules.	Action
UART	Contient la liste des commandes à envoyer au port série (UART) de manière à envoyer et recevoir de l'information.	Accès aux périphériques
V sim	Contient l'implémentation des commandes envoyées par le S.G.B.	Action
WMTC	Contient la liste complète des courants demandé pendant un cycle WMTC, ramené sur une échelle de 0 à ± 20 A.	Définition

B.2 Description des structures de données utilisées

Cette section est dédiée à la description et définition des structures de données utilisés dans le S.G.B.

La première structure est l'ensemble des données recueillie pour une cellule, appelée *CELL DATA*. Le S.G.B. a un tableau de 16 de ces structures, une par cellule.

```
//Definition of the structure that stores the cell information
typedef struct CELL_DATA
{
    //Voltage
    unsigned short terminal_voltage[BMS_BUFFER_DEPTH]; // [mV] Terminal voltage and 9 last values
    unsigned char terminal_voltage_ptr; // Pointer of terminal voltage stack
    unsigned short mean_term_voltage[BMS_BUFFER_DEPTH]; // [mV] Last 100 values averaged each 10
    unsigned char mean_term_voltage_ptr; // Pointer of mean terminal voltage

    unsigned short OCV; // [mV] Cell Open Circuit Voltage

    //temperature
    char cell_temp[BMS_BUFFER_DEPTH]; // [°C] Cell temperature (from -40 to 127)
    unsigned char cell_temp_ptr;

    //Parameters
    unsigned short Cap; // [mAh] Cell Capacity
    unsigned short Rin; // [10^-4 Ohms] Internal Resistance
    unsigned short Rpol; // [mOhms] Polarisation resistance
    unsigned short Cpol; // [10 nF] Polarisation capacitance
    unsigned short Rleak; // [Ohms] Leak resistance

    //States
    unsigned short SOH; // [%] State of health
    unsigned short SOC; // [1/10000]State of charge, from 0 to 100%, 0.01% increment
    int DOD; // [uA*min] Depth of discharge, from 0 to Cap

    BOOL bal_sw_enabled; //boolean : 0 = equalisation is not active, 1= eq is active
} cell_data_t;
```

La deuxième structure est les données concernant l'ensemble du bloc batterie, appelée *STACK DATA*.

```
//Definition of the structure that stores the stack information
//common to every cell in stack
typedef struct STACK_DATA
{
    //current information
    short hall_current[BMS_BUFFER_DEPTH]; // [mA] current from hall effect sensor
    unsigned char hall_current_ptr;
    short mean_current[BMS_BUFFER_DEPTH]; // [mA] current from hall effect sensor
    unsigned char mean_current_ptr;

    //Common Parameters
    unsigned short cycle_counter;
    unsigned short last_DOD;
    unsigned short pack_SOC; // [1/10000]State of charge, from 0 to 100% 0.01% increment
    char pack_temp; // [°C] Cell temperature (from -40 to 127)
} stack_data_t;
```

128 ANNEXE B. INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES SUR LE LOGICIEL DÉVELOPPÉ

Troisièmement, l'énumération *BALANCING METHOD* et *BALANCING CONFIG* contient les informations sur l'équilibrage en cours.

```
/* Defines Cell balancing method
 * NO_BALANCING      : no balancing is performed
 * HIGHEST_VOLTAGE  : balance for BAL_TIME sec the highest cell voltage defined by the
 *                   : threshold, then recalculate the highest cell
 * ALL_OVER_MIN     : All cells that are over (V_cell_min + BAL_THRESHOLD) will be
 *                   : balanced for BAL_TIME seconds at any time.
 * END_OF_CHARGE    : Most common mode, wait until end of charge to trigger balance
 *                   : Bleeds all cell to (V_cell_min + BAL_THRESHOLD)
 */
typedef enum BALANCING_METHOD
{
    NO_BALANCING = 0,
    HIGHEST_VOLTAGE,
    ALL_OVER_MIN,
    END_OF_CHARGE,
} bal_method_t;

typedef struct BALANCING_CONFIG_T
{
    bal_method_t bal_method;

    // This defines the balancing time in sec
    // after this time, the BQ automatically lift all switches
    // maximum value is 63 seconds
    // to set time value in minutes, make the 'selector' at TRUE when setting time
    unsigned char bal_time;
    BOOL bal_time_selector;

    // defines minimum threshold to trigger balancing in mV
    unsigned short bal_threshold;
} balancing_config_t;
```

La structure *SAVE DATA* rassemble toute ces structures, en plus d'une information sur le temps, donnée par le module *RTC*, d'une information sur les erreurs en cours et d'un numéro d'identification.

```
typedef struct SAVE_DATA
{
    union
    {
        struct
        {
            // data ID
            unsigned int id;

            //time stamp
            rtccDate date_stamp;
            rtccTime time_stamp;

            //data
            cell_data_t cell_data[NB_CELL_IN_STACK];
            stack_data_t stack_data;
            balancing_config_t balance_state;

            //general info
            unsigned int error_code0;
        };
        struct
        {
            unsigned char package[1360];
        };
    };
} save_data_t;
```


Au niveau du nuage de points utilisé lors de l'estimation des paramètres, les noeuds sont définis de la manière suivante :

```
typedef struct MATRIX_PIN
{
    union
    {
        struct
        {
            unsigned SOC:4;
            signed  TEMP:4;
            signed  I:6;
            unsigned :2;
            unsigned char rin;

            unsigned char count;
        };

        struct
        {
            unsigned char package[4];
        };

        //state is used to quickly check state in list
        // do not use for USB offset as it's mapped backward :
        // [TEMP SOC patch_0 I RIN] --> [RIN patch_0 I TEMP SOC]
        struct
        {
            unsigned state:24;
            unsigned char count;
        };
    };
};
} matrix_pin_t;
```


ANNEXE C

RÉSULTATS COMPLETS

C.1 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant

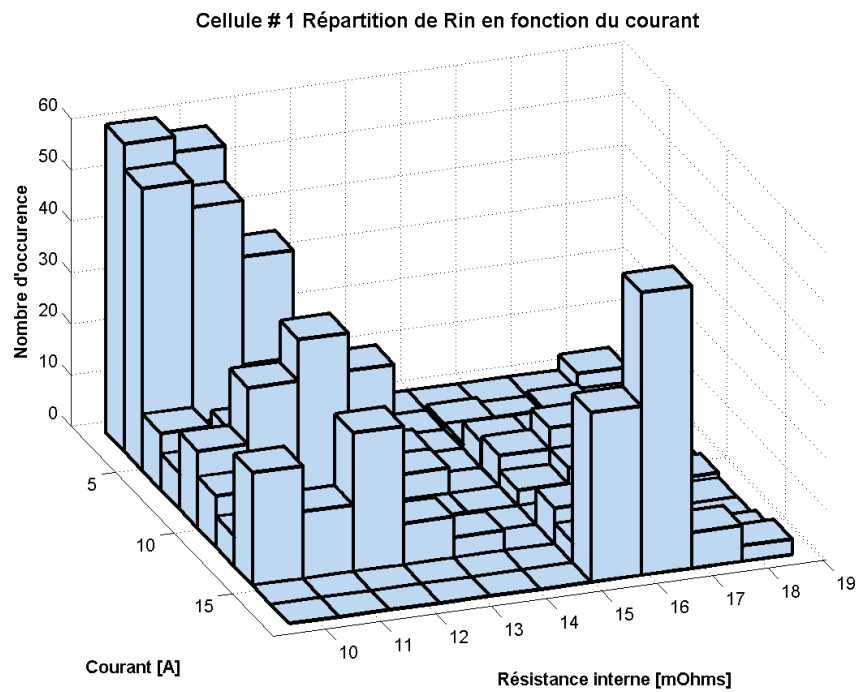


Figure C.1 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 1

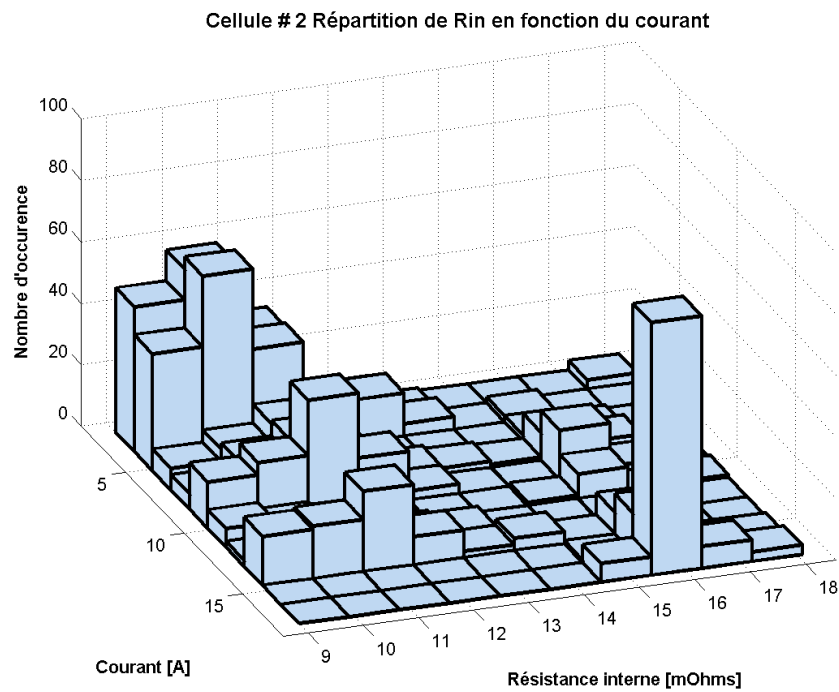


Figure C.2 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 2

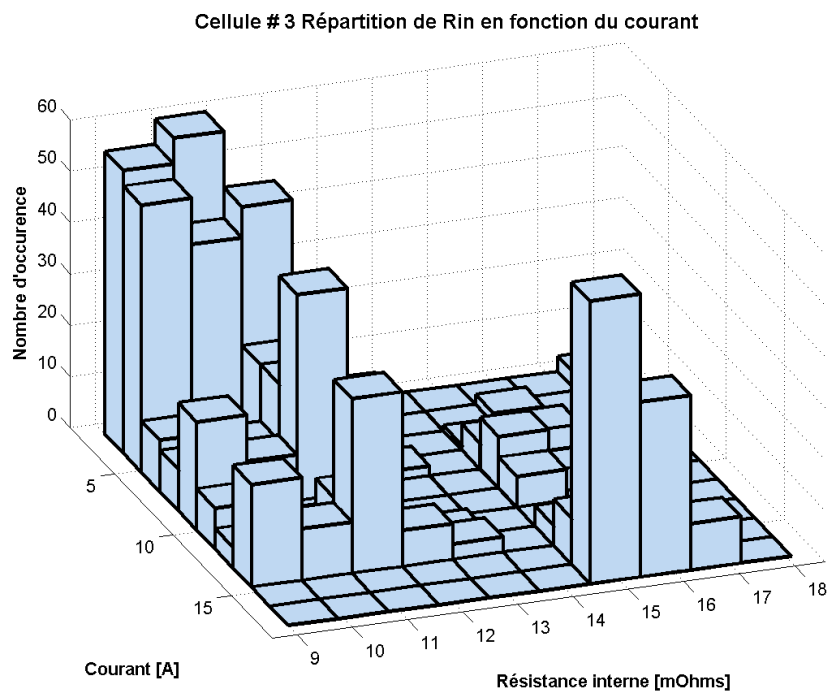
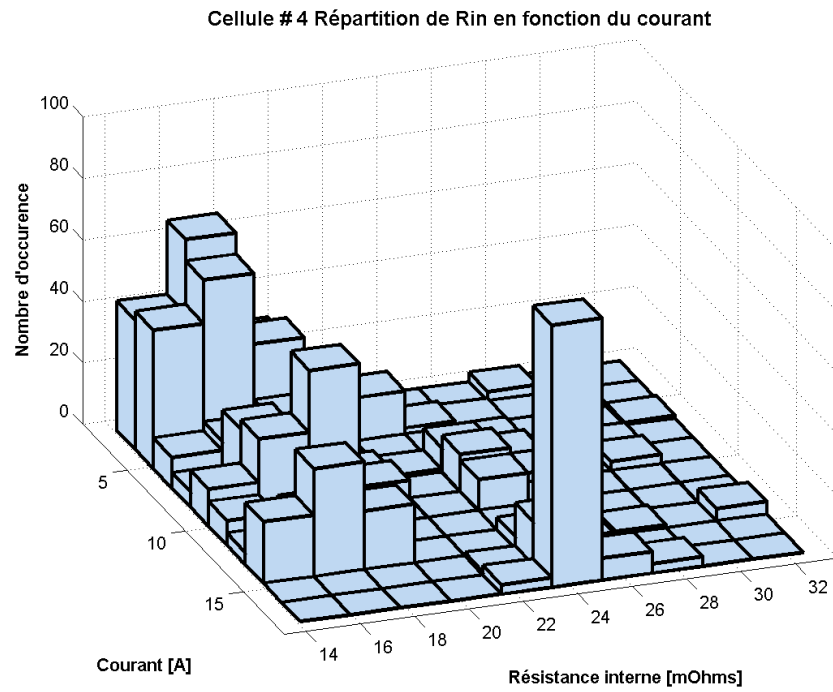
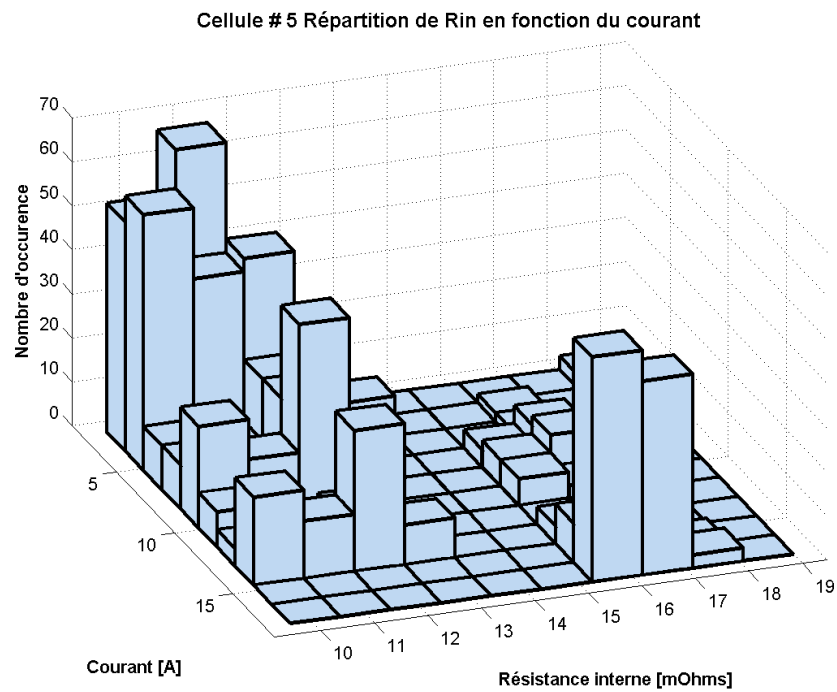


Figure C.3 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 3

Figure C.4 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 4Figure C.5 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 5

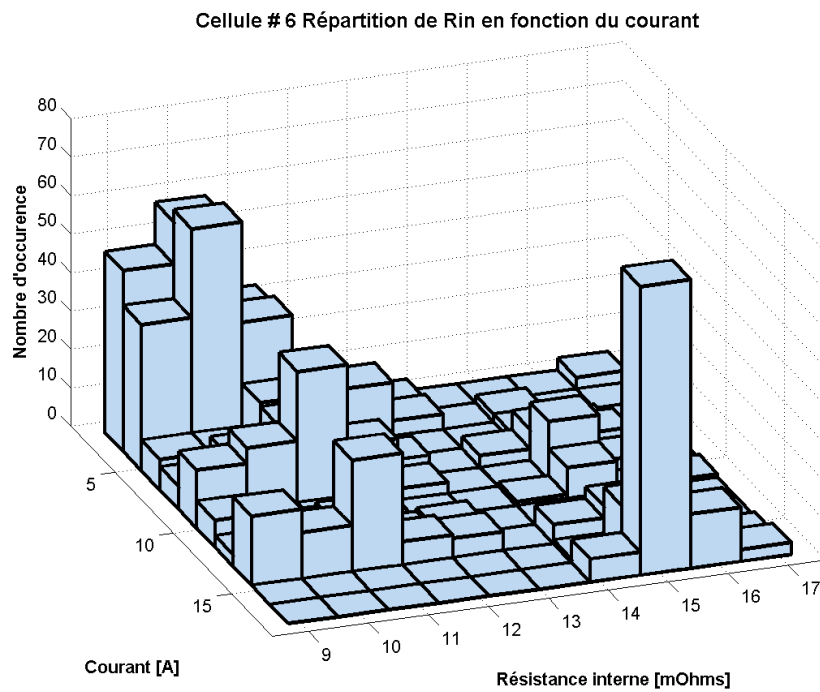


Figure C.6 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 6

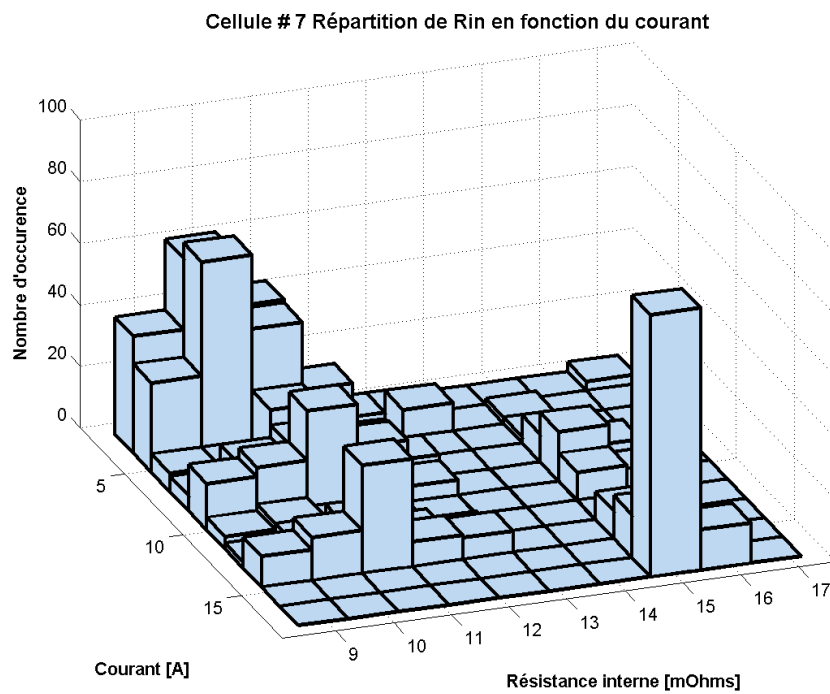
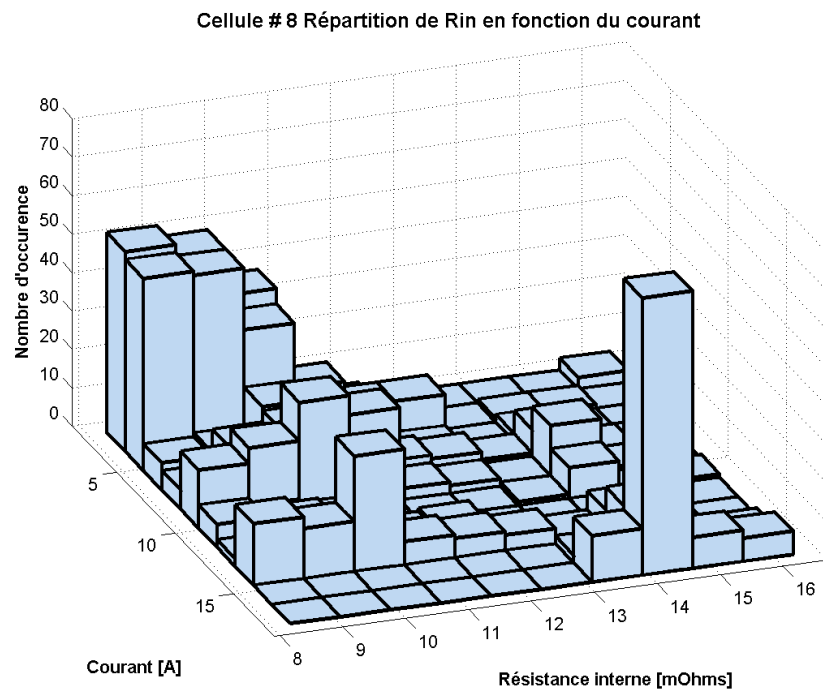
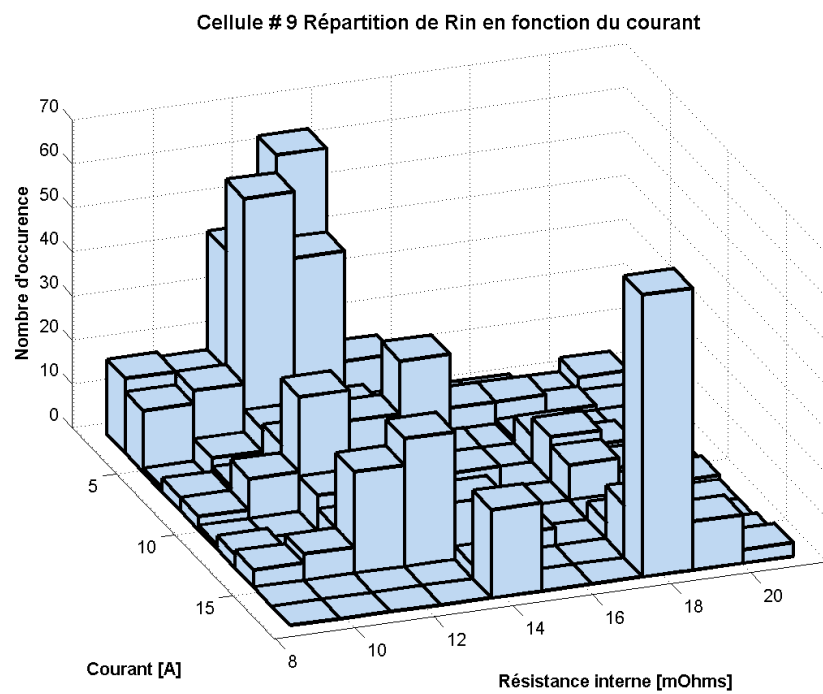


Figure C.7 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 7

Figure C.8 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 8Figure C.9 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 9

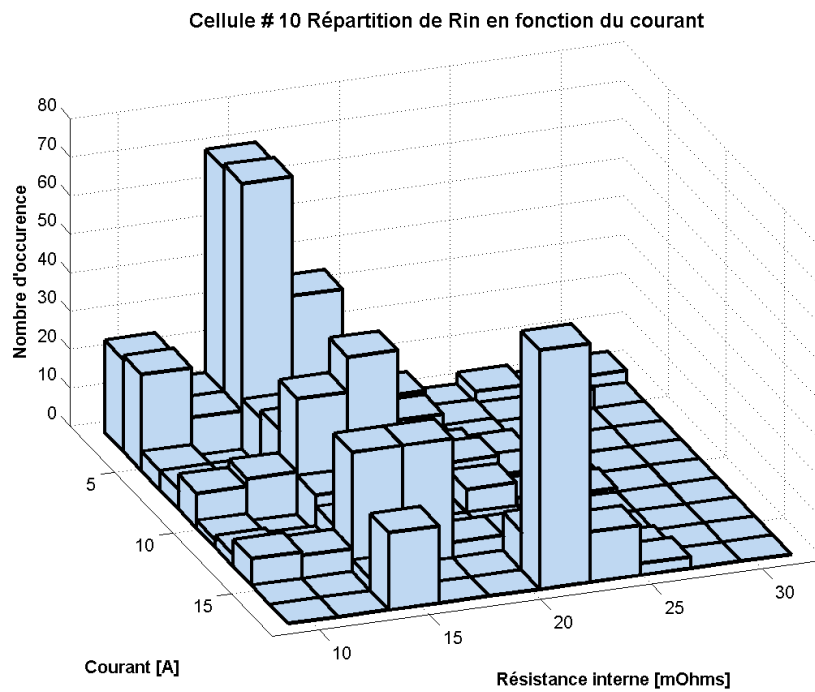


Figure C.10 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 10

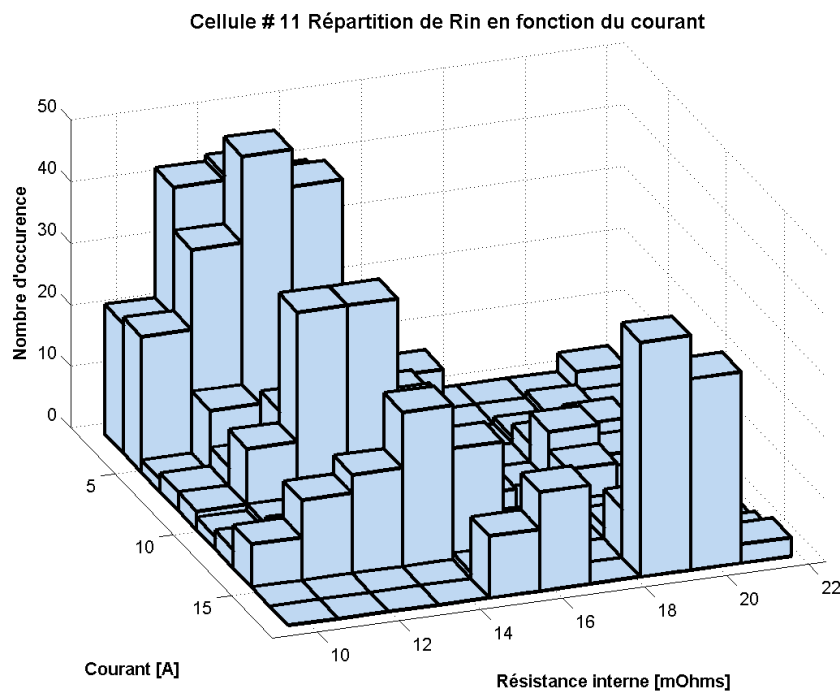
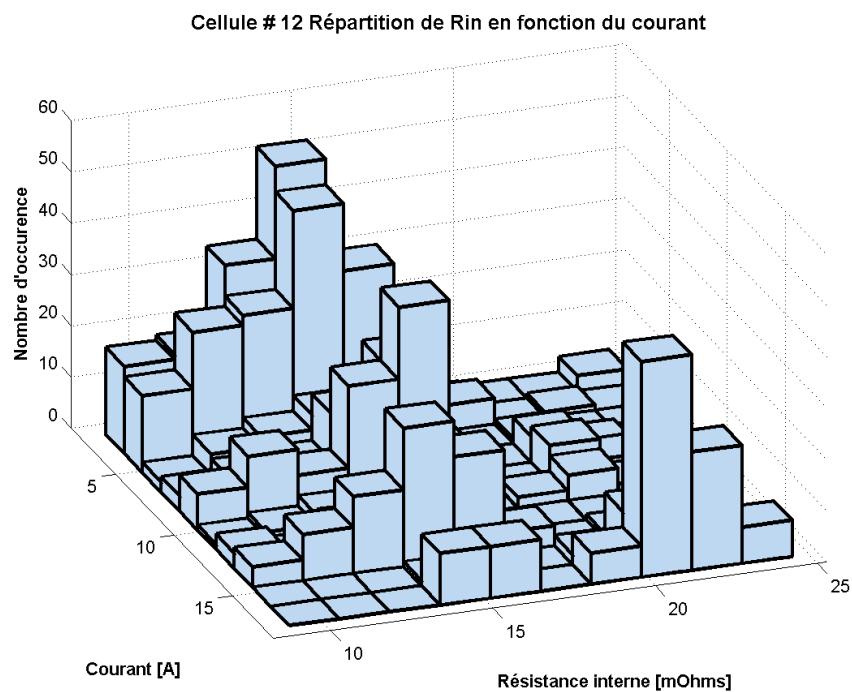
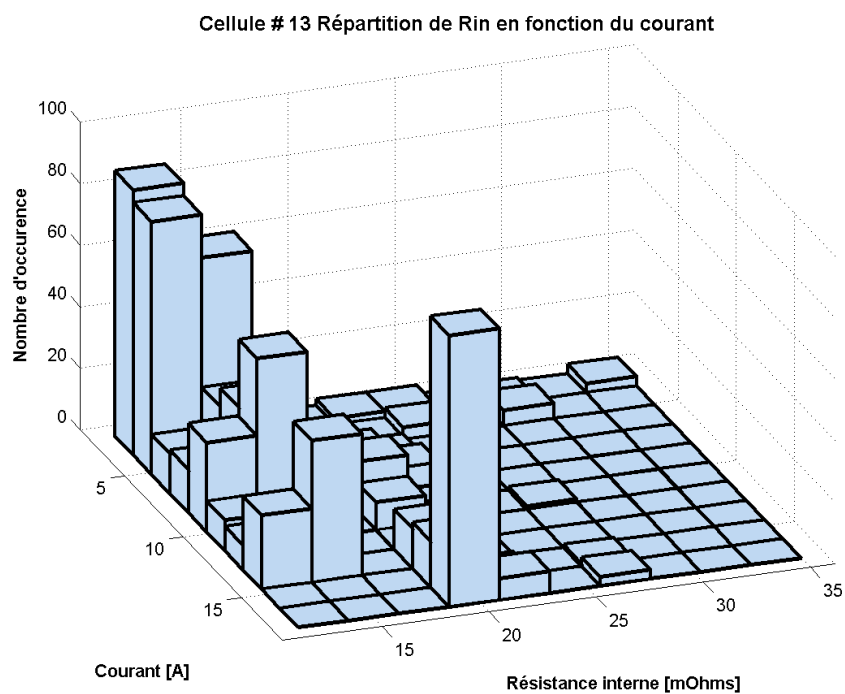


Figure C.11 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 11

Figure C.12 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 12Figure C.13 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 13

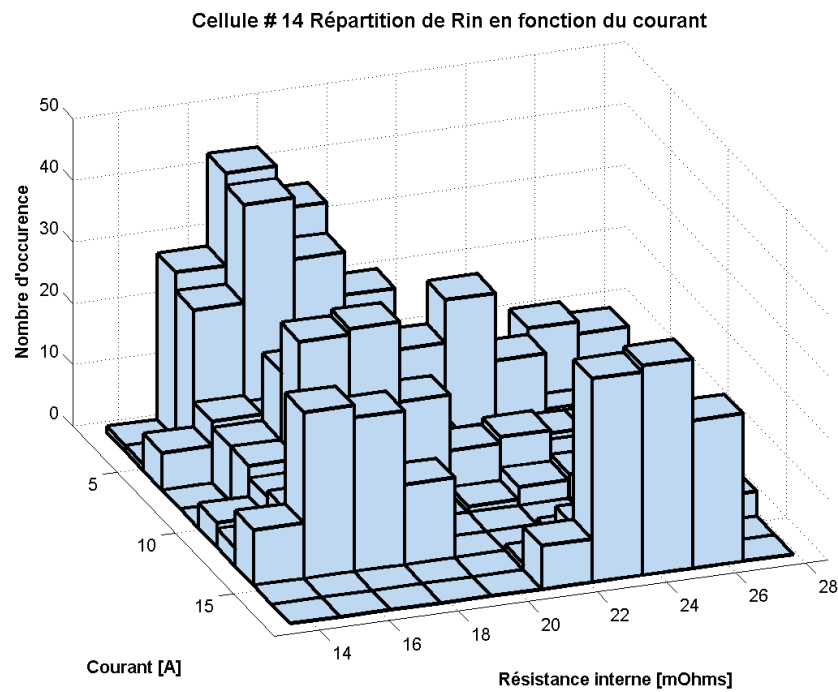


Figure C.14 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 14

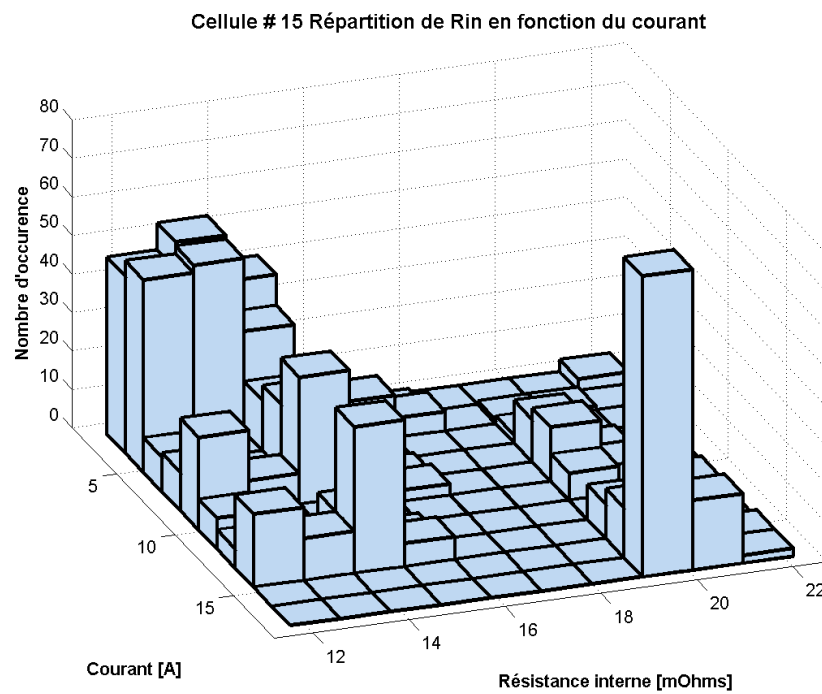


Figure C.15 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 15

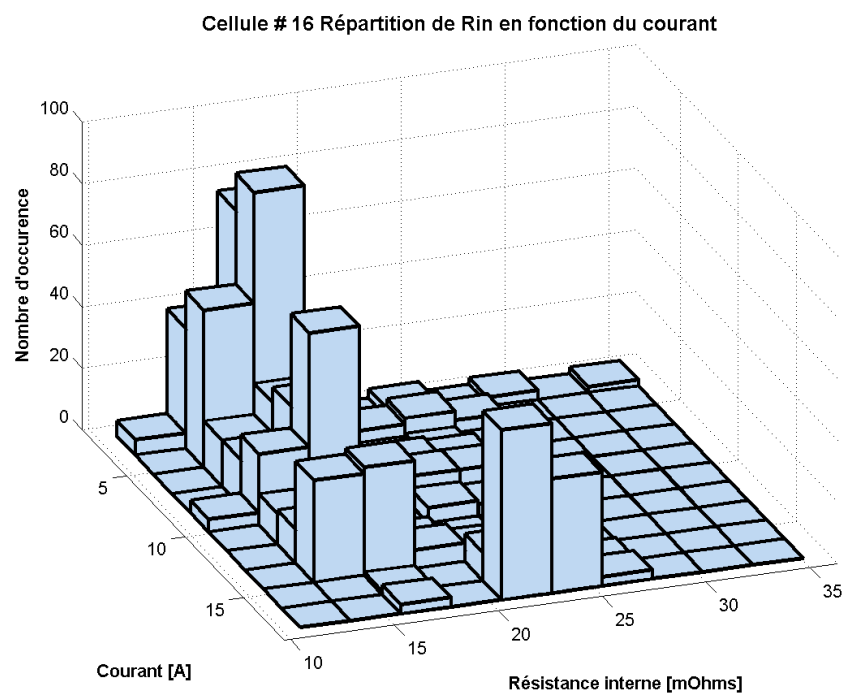


Figure C.16 Nombre d'occurrence des R_{in} en fonction du courant - cellule # 16

C.2 Tableaux de données de R_{in}

Tableau C.1 Variations de la R_{in} de la cellule # 1

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	9.5	10.96	18.6	1.43
2 C	9.6	11.26	16.9	1.27
4 C	9.7	12.32	18.5	2.12
6 C	9.7	12.24	18.5	2.13
8 C	15.4	16.11	18.5	0.59

Tableau C.2 Variations de la R_{in} de la cellule # 2

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	9.0	10.67	18.1	1.43
2 C	9.4	11.01	16.4	1.31
4 C	9.4	12.08	17.2	2.13
6 C	9.4	12.00	17.2	2.07
8 C	15.2	15.67	17.2	0.41

Tableau C.3 Variations de la R_{in} de la cellule # 3

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	9.0	14.47	18.1	1.40
2 C	9.3	10.8	16	1.19
4 C	9.3	11.82	16.5	2.03
6 C	9.3	11.79	16.5	2.05
8 C	14.9	15.5	16.5	0.42

Tableau C.4 Variations de la R_{in} de la cellule # 4

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	14.1	17.29	27.2	2.22
2 C	14.7	17.64	32.6	2.47
4 C	14.7	19.06	28.9	3.44
6 C	14.7	18.67	32.6	3.98
8 C	23	24.49	27.2	0.78

Tableau C.5 Variations de la R_{in} de la cellule # 5

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	9.6	11.05	19.0	1.41
2 C	9.8	11.38	16.7	1.21
4 C	9.8	12.42	17.4	2.11
6 C	9.8	12.40	17.4	2.16
8 C	15.9	16.29	17.4	0.34

Tableau C.6 Variations de la R_{in} de la cellule # 6

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	8.8	10.26	17.2	1.37
2 C	9.1	10.61	15.6	1.27
4 C	9.1	11.63	16.9	2.06
6 C	9.1	11.55	16.9	2.02
8 C	14.6	15.08	16.9	0.49

Tableau C.7 Variations de la R_{in} de la cellule # 7

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	8.5	10.15	17.2	1.31
2 C	9.1	10.49	15.3	1.15
4 C	9.1	11.46	16.3	16.3
6 C	9.1	11.45	16.3	1.96
8 C	14.6	14.99	16.3	0.39

Tableau C.8 Variations de la R_{in} de la cellule # 8

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	8.3	9.72	16.3	1.26
2 C	8.7	10.08	14.8	1.14
4 C	8.7	11.02	15.9	1.90
6 C	8.7	10.96	15.9	1.89
8 C	13.8	14.35	15.9	0.52

Tableau C.9 Variations de la R_{in} de la cellule # 9

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	8.6	12.37	21.3	2.07
2 C	8.9	12.56	19.0	1.80
4 C	8.9	13.56	20.7	2.54
6 C	9.3	13.38	20.7	2.47
8 C	14	17.74	20.7	1.72

Tableau C.10 Variations de la R_{in} de la cellule # 10

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	9.0	15.26	31.7	4.10
2 C	9.3	15.26	27.7	3.29
4 C	9.3	16.31	25.4	3.57
6 C	9.8	15.91	25.4	3.36
8 C	14.8	21.17	25.4	3.04

Tableau C.11 Variations de la R_{in} de la cellule # 11

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	9.5	12.40	21.8	1.90
2 C	9.6	12.77	19.7	1.65
4 C	9.6	14.01	20.7	2.56
6 C	10.0	13.91	20.7	2.50
8 C	15.1	18.47	20.7	1.61

Tableau C.12 Variations de la R_{in} de la cellule # 12

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	9.0	13.71	24.5	2.58
2 C	9.2	14.05	21.4	2.30
4 C	9.2	15.29	23.0	3.13
6 C	9.7	14.91	23.0	2.99
8 C	14.5	19.99	23.0	2.67

Tableau C.13 Variations de la R_{in} de la cellule # 13

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	11.5	14.52	35.0	3.93
2 C	12.0	14.59	28.5	2.94
4 C	12	15.77	27.9	2.98
6 C	12.0	15.53	27.9	2.91
8 C	19.0	20.47	27.9	1.42

Tableau C.14 Variations de la R_{in} de la cellule # 14

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	14.6	19.14	27.9	3.6
2 C	13.4	18.65	27.3	2.73
4 C	13.4	19.13	27.3	3.20
6 C	13.4	18.00	26.8	3.47
8 C	21.6	23.91	26.2	1.35

Tableau C.15 Variations de la R_{in} de la cellule # 15

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	11.7	13.57	22.2	1.64
2 C	12.0	13.89	20.3	1.48
4 C	12.0	15.09	21.2	2.55
6 C	12.0	15.00	21.2	2.54
8 C	19.1	19.79	21.2	0.41

Tableau C.16 Variations de la R_{in} de la cellule # 16

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	10.9	17.33	35.1	3.44
2 C	12.8	16.96	27.4	2.50
4 C	12.8	17.80	25.8	3.11
6 C	13.5	17.21	25.8	3.11
8 C	17.4	22.86	25.8	1.23

Tableau C.17 Moyennes des variations de la R_{in} des 16 cellules

Courant	R_{in} min ($m\Omega$)	R_{in} moyenne ($m\Omega$)	R_{in} max ($m\Omega$)	σ ($m\Omega$)
1 C	10.1	13.05	23.2	2.12
2 C	10.4	13.25	21.0	1.87
4 C	10.4	14.30	21.2	2.59
6 C	10.6	14.06	21.4	2.60
8 C	16.4	18.55	21.1	1.09

C.3 Visualisation de la R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C.

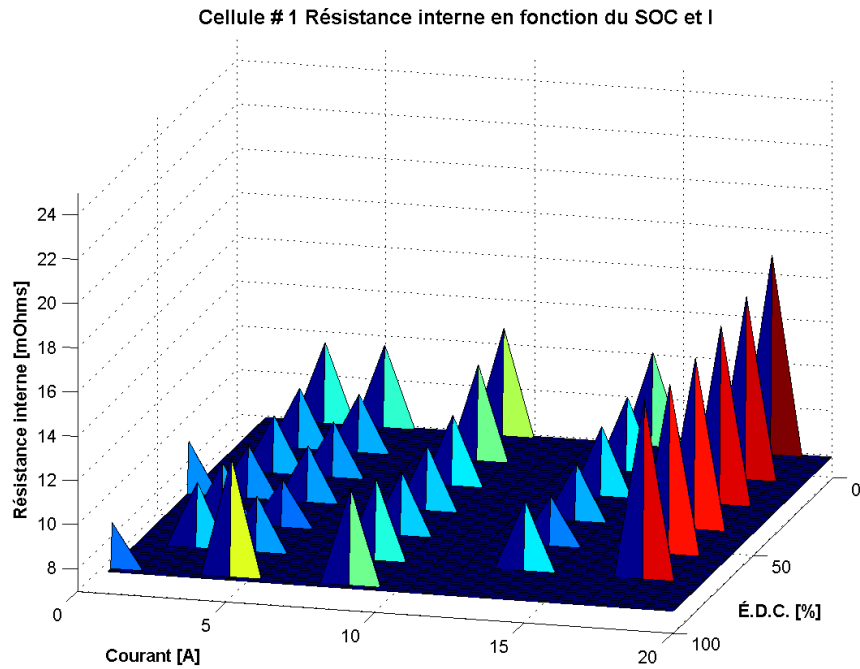


Figure C.17 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 1

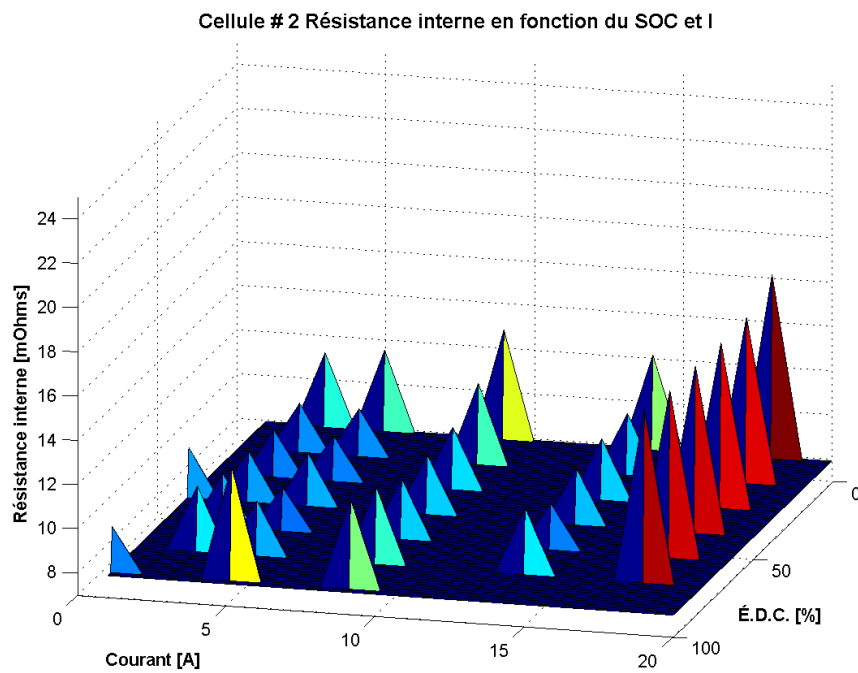


Figure C.18 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 2

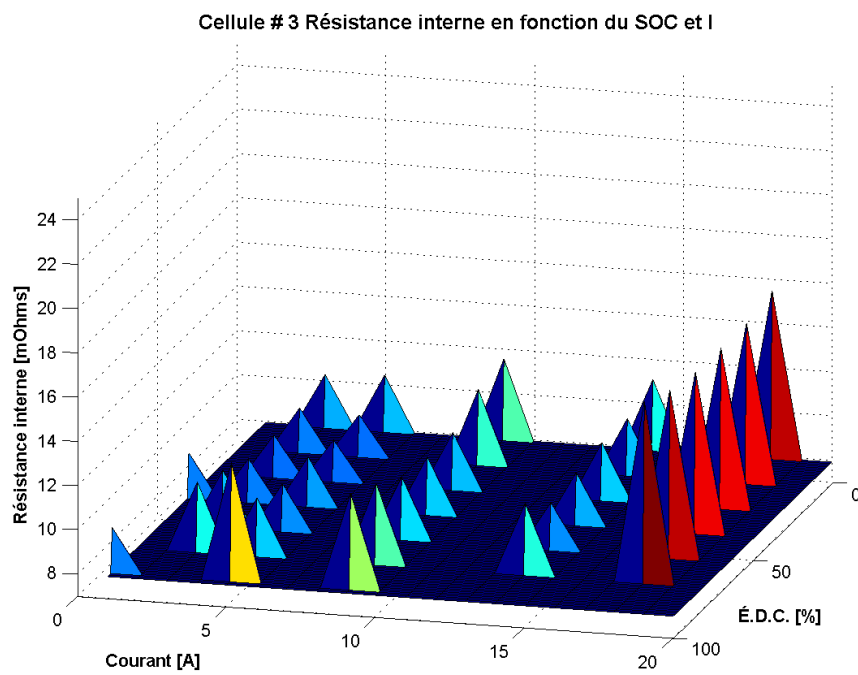


Figure C.19 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 3

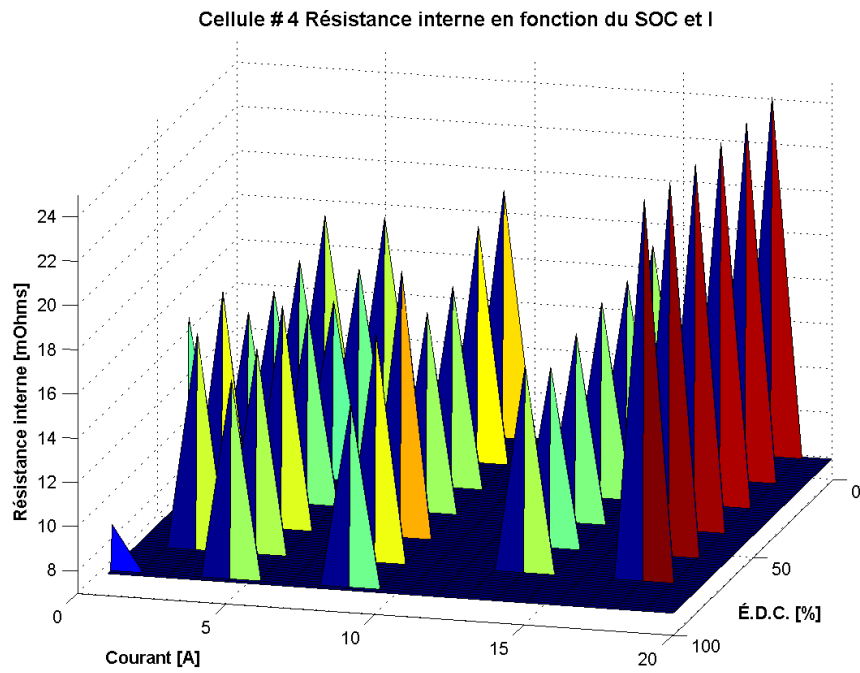


Figure C.20 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 4

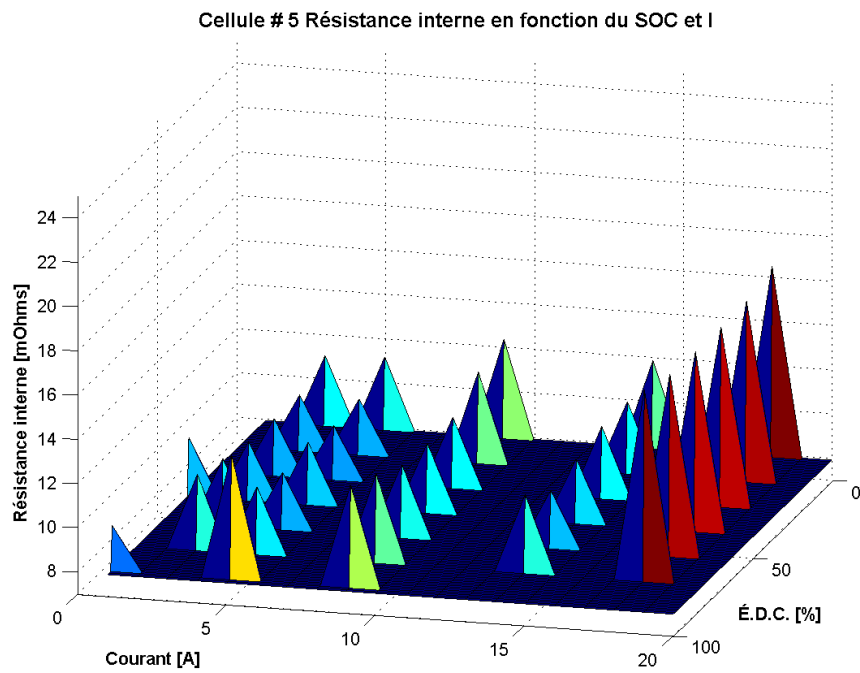


Figure C.21 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 5

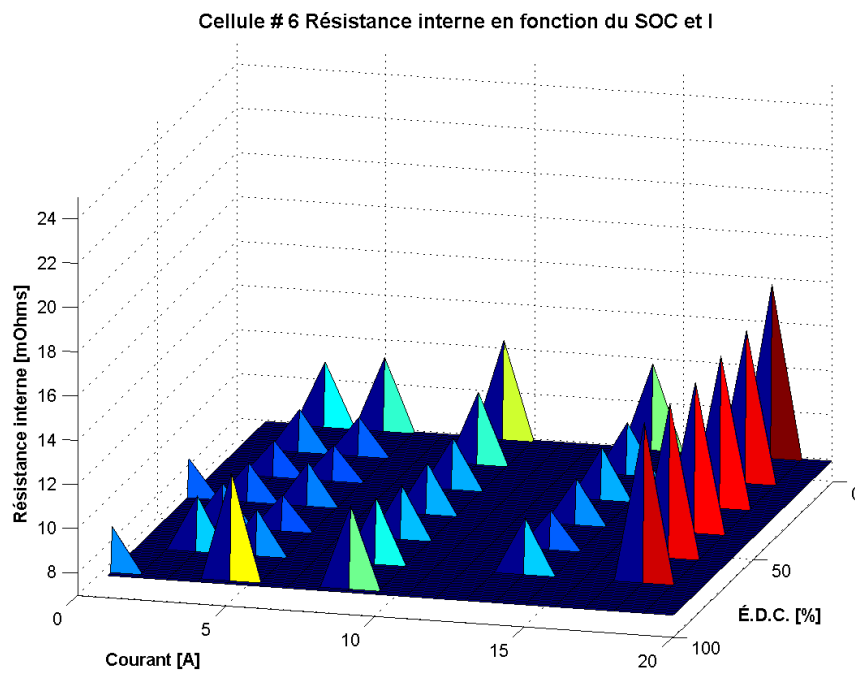


Figure C.22 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 6

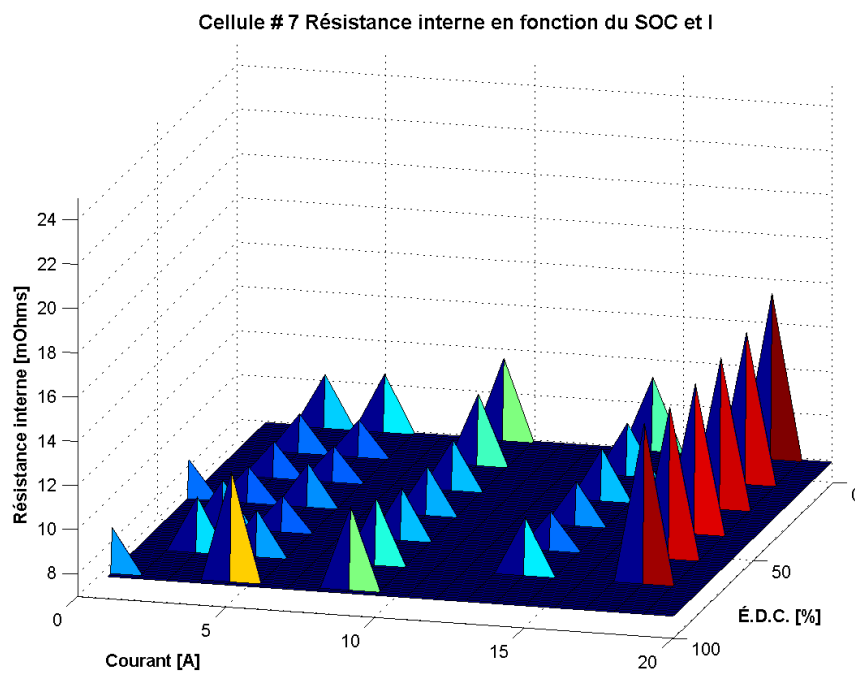


Figure C.23 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 7

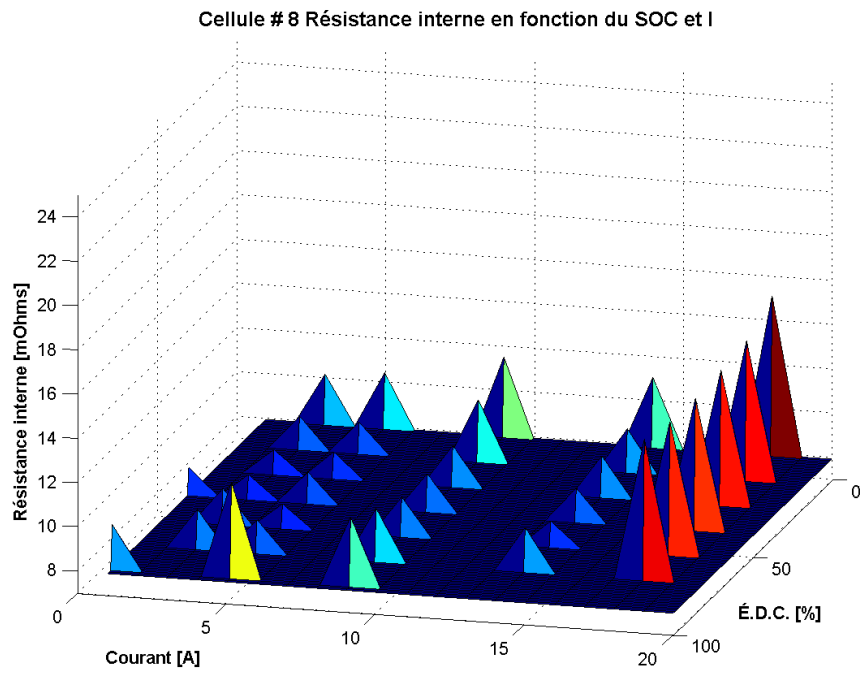


Figure C.24 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 8

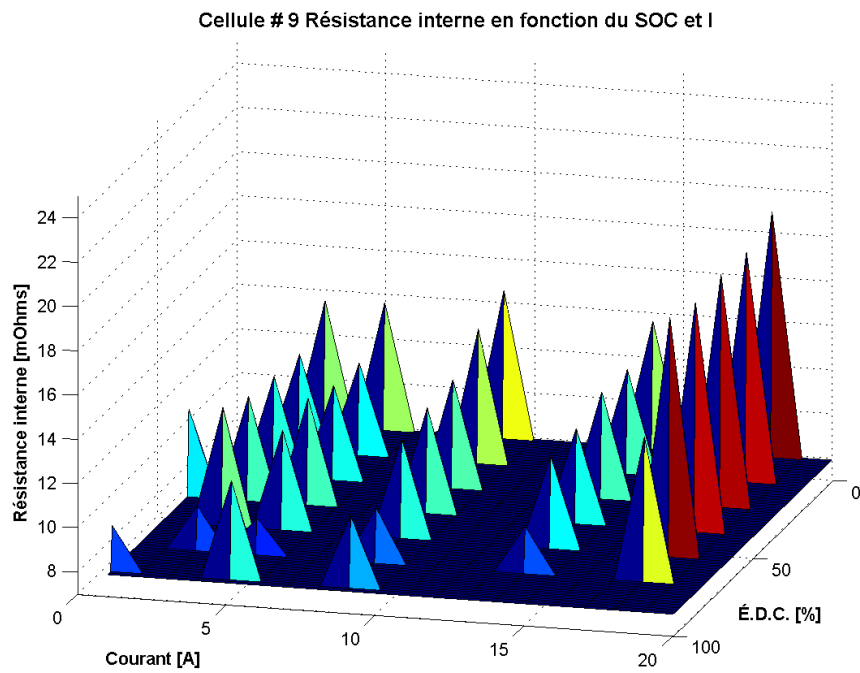


Figure C.25 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 9

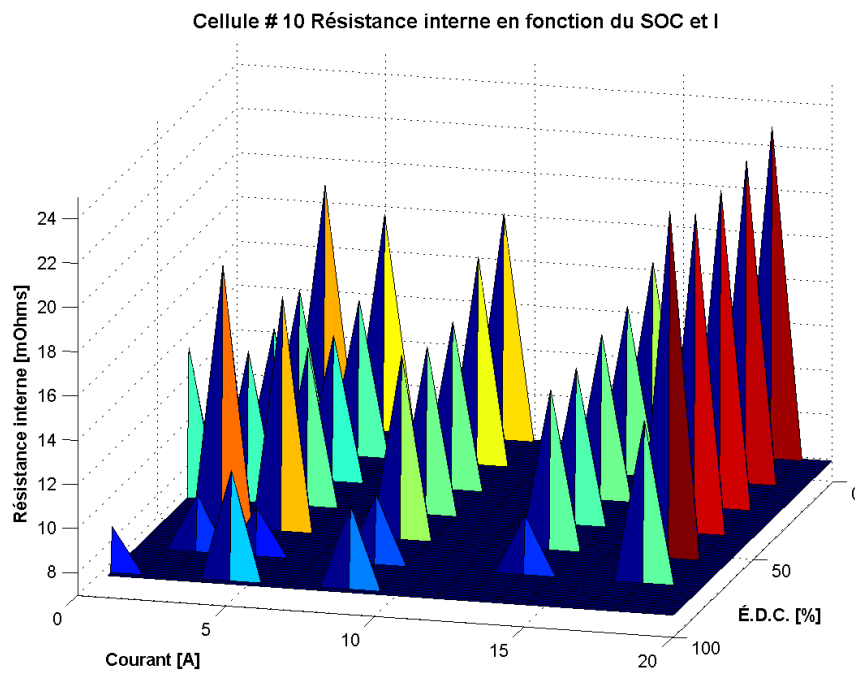


Figure C.26 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 10

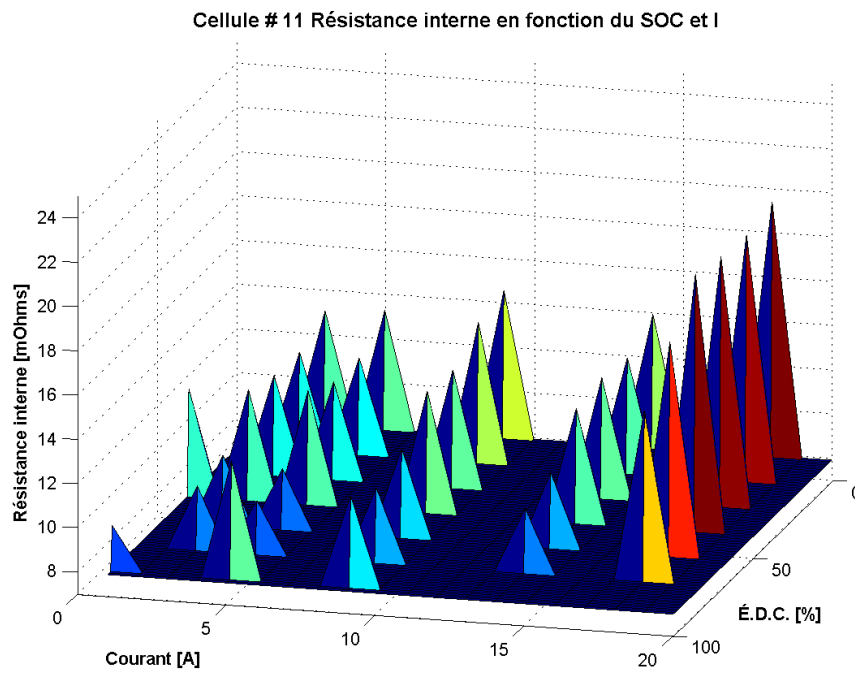


Figure C.27 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 11

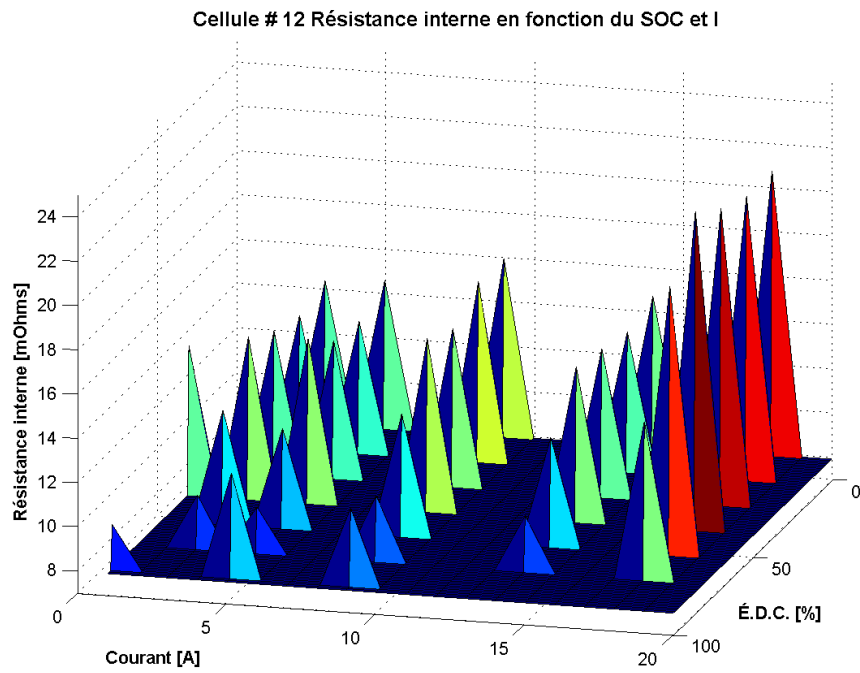


Figure C.28 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 12

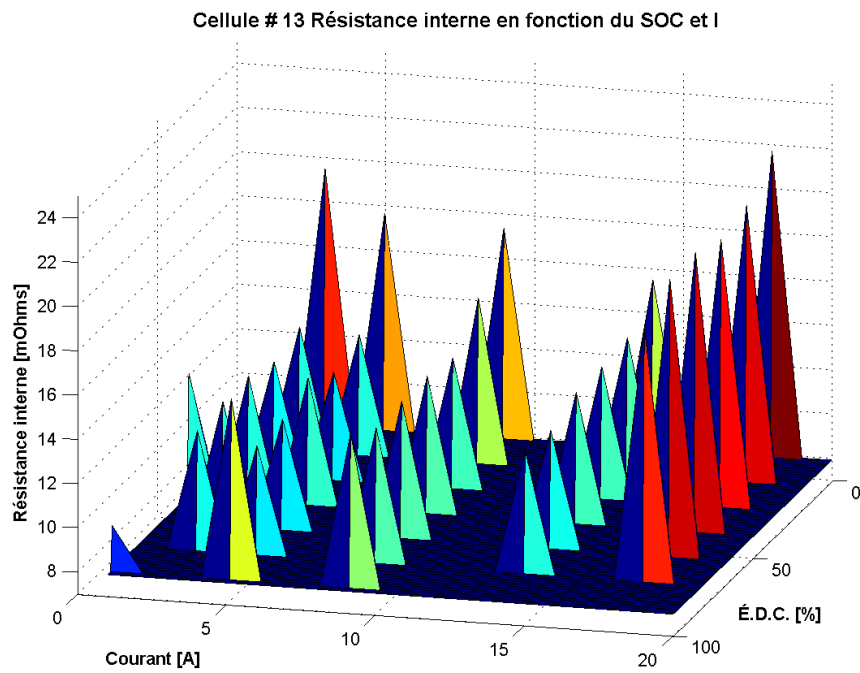


Figure C.29 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 13

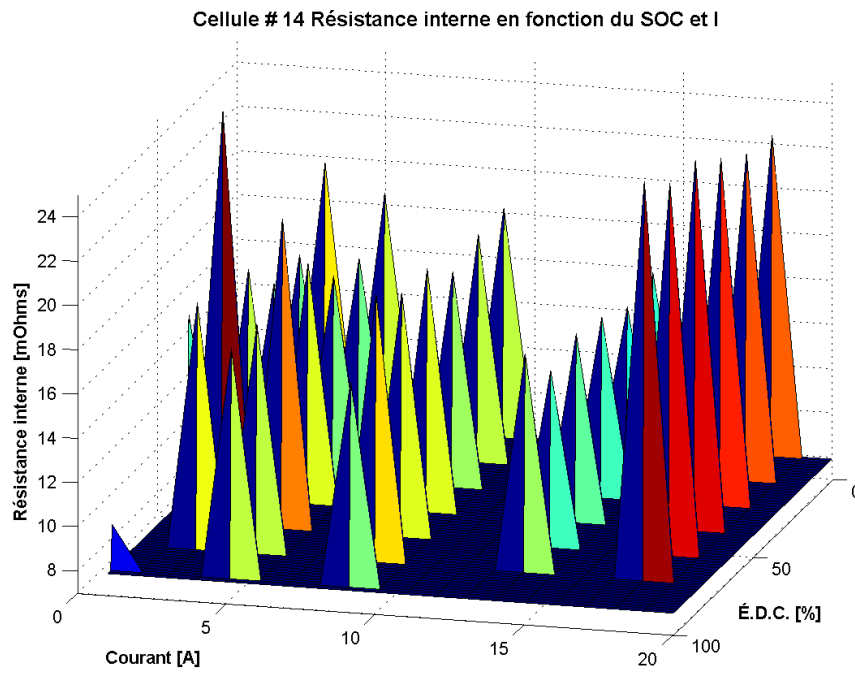


Figure C.30 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 14

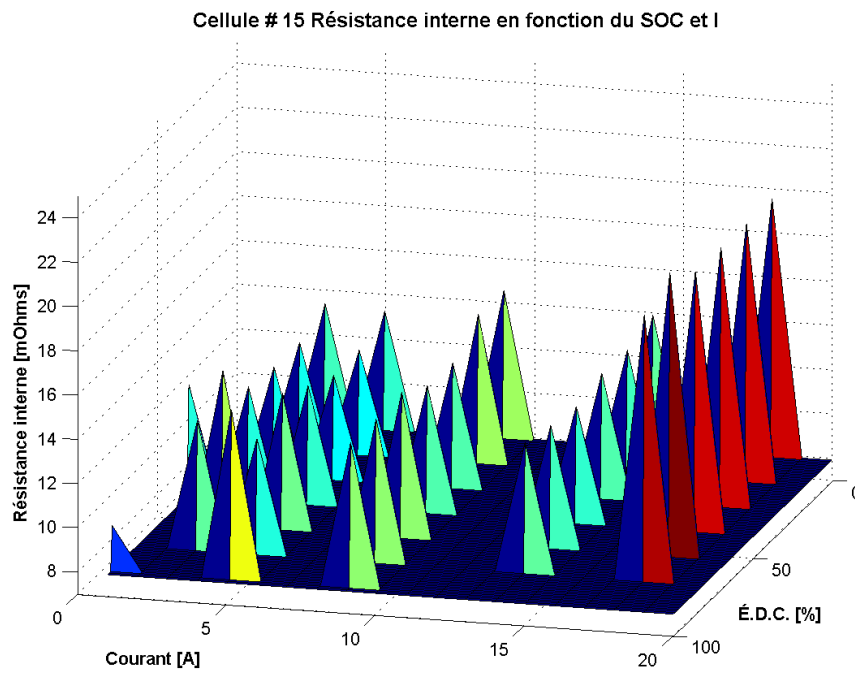


Figure C.31 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 15

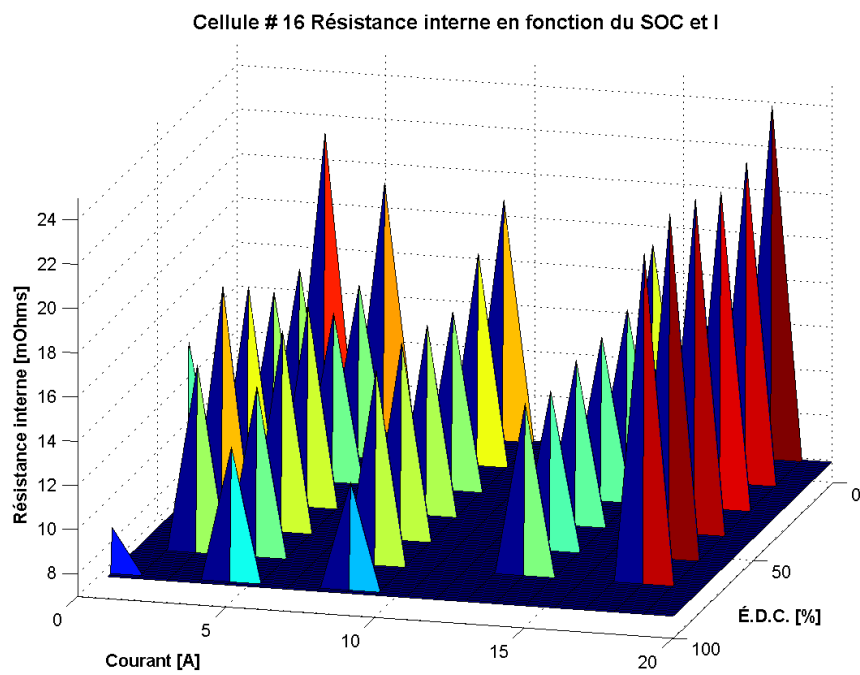


Figure C.32 R_{in} en fonction du courant et de l'É.D.C. - cellule # 16

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] Altemose, G., Hellermann, P. et Mazz, T. (2011). Active cell balancing system using an isolated share bus for li-ion battery management : Focusing on satellite applications. Dans *Systems, Applications and Technology Conference (LISAT), 2011 IEEE Long Island*. p. 1–7.
- [2] Andrea, D. (2011). *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*, 1^{re} édition. Artech Hous Publishers, 300 p.
- [3] Andrea, D. (2013). *Site web de Elithion*. <http://elithion.com/> (page consultée le 30 septembre 2013).
- [4] Boutin, N. (2008). *Principes de base des systèmes de communication analogiques et numériques*, 1^{re} édition. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada.
- [5] BP (2012). *BP Statistical Review of World Energy* (Rapport technique). 46 p.
- [6] Cao, J., Schofield, N. et Emadi, A. (2008). Battery balancing methods : A comprehensive review. Dans *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*. p. 1–6.
- [7] Cassani, P. A. et Williamson, S. S. (2009). Significance of battery cell equalization and monitoring for practical commercialization of plug-in hybrid electric vehicles. Dans *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE*. p. 465–471.
- [8] Chassaing, R. (2008). *Digital Signal Processing and Applications with the TMS320C6713 and TMS320C6416 DSK*, 2^e édition. Wiley-IEEE Press, 608 p.
- [9] Commission de Santé et Sécurité au Travail du Québec (2005). *Fluorure d'hydrogène CAS # 7664-39-3* (Rapport technique). 12 p.
- [10] Danilov, D., Lyedovskikh, A. et Notten, P. H. L. (2011). Voltage and temperature dynamic simulations for advanced battery management systems. Dans *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE*. p. 1–6.
- [11] Denis, N. (2014). *Système de gestion d'énergie d'un véhicule électrique hybride rechargeable à trois roues*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, CA, 239 p.
- [12] Domenico, D. D., Fiengo, G. et Stefanopoulou, A. (2008). Lithium-ion battery state of charge estimation with a kalman filter based on a electrochemical model. Dans *Control Applications, 2008. CCA 2008. IEEE International Conference on*. p. 702–707.
- [13] Dubarry, M., Vuillaume, N. et Liaw, B. Y. (2010). Origins and accommodation of cell variations in li-ion battery pack modeling. *International Journal of Energy Research*, volume 34, numéro 2, p. 216–231.
- [14] EIG Battery LTD. (2010). *Material Safety Data Sheet : F014 Cells* (Rapport technique). 11 p.

-
- [15] Enden, N. V. D. et VERHOECKX, N. (2003). *Traitement Numerique du Signal : Une Introduction*, 3^e édition. Dunod, 402 p.
- [16] Gao, L., Liu, S. et Dougal, R. A. (2002). Dynamic lithium-ion battery model for system simulation. *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on*, volume 25, numéro 3, p. 495–505.
- [17] Gibson, C. (4 février 2008). <http://www.smartgauge.co.uk/peukert2.html> (page consultée le 20 juillet 2014).
- [18] Gil, K. P. A. (2012). *Modélisation électrique et analyse d'une cellule Lithium*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, CA, 146 p.
- [19] Hu, Y., Yurkovich, B. J., Yurkovich, S. et Guezennec, Y. (2009). Electro-thermal battery modeling and identification for automotive applications. *ASME Conference Proceedings*, volume 2009, numéro 48937, p. 233–240.
- [20] Hu, Y. et Yurkovich, S. (2011). Linear parameter varying battery model identification using subspace methods. *Journal of Power Sources*, volume 196, numéro 5, p. 2913–2923.
- [21] Kim, H. et Shin, K. G. (2009). On dynamic reconfiguration of a large-scale battery system. Dans *Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2009. RTAS 2009. 15th IEEE*. p. 87–96.
- [22] Kim, T., Qiao, W. et Qu, L. (2011). Series-connected self-reconfigurable multicell battery. Dans *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE*. p. 1382–1387.
- [23] Kizilel, R., Sabbah, R., Selman, J. R. et Al-Hallaj, S. (2009). An alternative cooling system to enhance the safety of li-ion battery packs. *Journal of Power Sources*, volume 194, numéro 2, p. 1105–1112.
- [24] Larminie, J. et Lowry, J. (2003). *Electric Vehicle Technology Explained*, 1^{re} édition. John Wiley and sons, Angleterre, 296 p.
- [25] Les Éditions Larousse (2013). *L'oxydoréduction*. <http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/oxydoréduction/75923> (page consultée le 26 avril 2013).
- [26] Les Éditions Larousse (2013). *L'électrochimie*. <http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/electrochimie/46196> (page consultée le 26 avril 2013).
- [27] Loud, J., Nilsson, S. et Du, Y. (2002). On the testing methods of simulating a cell internal short circuit for lithium ion batteries. Dans *Battery Conference on Applications and Advances, 2002. The Seventeenth Annual*. p. 205–208.
- [28] Manenti, A., Onori, S. et Guezennec, Y. (2011). A new modeling approach to predict 'peukert effect' for lead acid batteries. Dans *World Congress*. volume 18. p. 12289–12294.
-

- [29] Marano, V., Onori, S., Guezennec, Y., Rizzoni, G. et Madella, N. (2009). Lithium-ion batteries life estimation for plug-in hybrid electric vehicles. Dans *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE*. p. 536–543.
- [30] Musk, E. (19 mars 2013). Ted talks - elon musk : The mind behind tesla, spacex, solarcity. Dans YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=IgKWPdJWuBQ> (page consultée le 9 septembre 2014).
- [31] Nadeau, J. (2013). *Effets du vieillissement de la batterie li-ion sur les performances d'un véhicule récréatif hybride branchable à trois roues*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, CA, 146 p.
- [32] Ogata, K. (1995). *Discrete-Time Control Systems*, 2^e édition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, US, 746 p.
- [33] Paul, C. (2004). *Electromagnetics for engineers : with applications to digital systems and electromagnetic interference*. John Wiley & Sons, 403 p.
- [34] Peukert, W. (1897). Über die abhängigkeit der kapazität von der entladestromstärke bei bleiakumulatoren, elektrotechnische zeitschrift. *Elektrotechnische Zeitschrift*, volume 20, p. 20–21.
- [35] Samaras, C. et Meisterling, K. (2008). Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles : Implications for policy. *Environmental science & technology*, volume 42, numéro 9, p. 3170–3176.
- [36] Site web de A123 systems (2013). <http://www.a123systems.com/> (page consultée le 30 septembre 2013).
- [37] Site web de B&K Precision Corporation (2013). <http://www.bkprecision.com/> (page consultée le 07 octobre 2013).
- [38] Site web de Digikey Corporation (2013). <http://www.digikey.ca/> (page consultée le 30 septembre 2013).
- [39] Site web de EIG Battery LTD. (2013). <http://www.eigbattery.com/> (page consultée le 30 septembre 2013).
- [40] Site web de Linear Technologie (2014). <http://www.linear.com/> (page consultée le 8 décembre 2014).
- [41] Site web de Mathworks (MATLAB) (2013). <http://www.mathworks.com/> (page consultée le 30 septembre 2013).
- [42] Site web de Maxim Integrated (2014). <http://www.maximintegrated.com/> (page consultée le 5 mai 2014).
- [43] Site web de Microchip Technology inc. (2013). <http://www.microchip.com/> (page consultée le 30 septembre 2013).
-

-
- [44] Site web de Panasonic Electronic Components (2013). <http://www.panasonic.com/industrial/electronic-components/> (page consultée le 30 septembre 2013).
- [45] Site web de Texas Instrument (2013). <http://www.ti.com/> (page consultée le 30 septembre 2013).
- [46] Site web de United Nations Economic Commission for Europe (2014). <http://www.unece.org/> (page consultée le 14 mai 2014).
- [47] Skoog, D., West, D. et Holler, J. (1997). *Chimie Analytique*, 3^e édition. De Boeck Supérieur, Italie, 996 p.
- [48] Speltino, C., Domenico, D. D., Fiengo, G. et Stefanopoulou, A. (2009). Comparison of reduced order lithium-ion battery models for control applications. Dans *Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on*. p. 3276–3281.
- [49] Speltino, C., Stefanopoulou, A. et Fiengo, G. (2010). Cell equalization in battery stacks through state of charge estimation polling. Dans *American Control Conference (ACC), 2010*. p. 5050–5055.
- [50] Spurrett, R., Thwaite, C., Holland, A., Lizius, D. et Dudley, G. (2002). Modelling of highly-parallel lithium-ion batteries. Dans *Proceedings of 6th European Space Power Conference*, Culham Sci. Centre, AEA Technol. Space, Abingdon, UK. ESA/ESTEC, Noordwijk, Netherlands, p. 685–91.
- [51] Sun, F., Hu, X., Zou, Y. et Li, S. (2011). Adaptive unscented kalman filtering for state of charge estimation of a lithium-ion battery for electric vehicles. *Energy*, volume 36, numéro 5, p. 3531–3540.
- [52] Tremblay, O., Dessaint, L. A. et Dekkiche, A. I. (2007). A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. Dans *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE*. p. 284–289.
- [53] Uno, M. et Tanaka, K. (2011). Influence of high-frequency charge/discharge cycling induced by cell voltage equalizers on the life performance of lithium-ion cells. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, volume 60, numéro 4, p. 1505–1515.
- [54] Wei, X., Zhu, B. et Xu, W. (2009). Internal resistance identification in vehicle power lithium-ion battery and application in lifetime evaluation. Dans *Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2009. ICMTMA '09. International Conference on*. volume 3. p. 388–392.
- [55] Wikipedia, the free encyclopedia (15 août 2014). *La Pile électrique*. http://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_électrique (page consultée le 9 septembre 2014).
- [56] Wikipedia, the free encyclopedia (15 avril 2014). *Pile électrique de Bagdad*. http://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_électrique_de_Bagdad (page consultée le 9 septembre 2014).
-

- [57] Wikipedia, the free encyclopedia (17 juin 2014). *La Jamais Contente*. http://fr.wikipedia.org/wiki/La_Jamais_contente (page consultée le 9 septembre 2014).
- [58] Wikipedia, the free encyclopedia (2 septembre 2014). *Lithium-ion Battery*. http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery (page consultée le 9 septembre 2014).
- [59] Wikipedia, the free encyclopedia (21 août 2014). *Alessandro Volta*. http://fr.wikipedia.org/wiki/Alessandro_Volta (page consultée le 9 septembre 2014).
- [60] Wikipedia, the free encyclopedia (27 juillet 2014). *Histoire de l'automobile*. http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_l'automobile (page consultée le 9 septembre 2014).
- [61] Wikipedia, the free encyclopedia (9 septembre 2014). *Description du protocole CAN*. http://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus (page consultée le 9 septembre 2014).
- [62] Wronecki, M.-H., Blondel, C. et Wolff, B. (Août 2010). *La "pile de Bagdad" : une pile électrique il y a deux mille ans*. <http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/mythesetlegendes/bagdad/index.php> (page consultée le 29 avril 2013).
- [63] Wu, G., Lu, R., Zhu, C. et Chan, C. C. (2010). Apply a piece-wise peukert's equation with temperature correction factor to nimh battery state of charge estimation. *Journal of Asian Electric Vehicles*, volume 8, numéro 2, p. 1419–1423.
- [64] Yang, H., Zhuang, G. V. et Ross Jr, P. N. (2006). Thermal stability of LiPF_6 salt and li-ion battery electrolytes containing LiPF_6 . *Journal of Power Sources*, volume 161, numéro 1, p. 573–579.
- [65] Yoshio, M., Brodd, R. J. et Kozawa, A. (2009). *Lithium-Ion Batteries : Science and Technologies*, 1^{re} édition. Springer, New-York, 452 p.
- [66] Yurkovich, B. J. et Guezennec, Y. (2009). Lithium ion dynamic battery pack model and simulation for automotive applications. *ASME Conference Proceedings*, volume 2009, numéro 48937, p. 241–248.
-

