



HAL
open science

Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages : application aux véhicules électriques et hybrides

An Li

► **To cite this version:**

An Li. Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages : application aux véhicules électriques et hybrides. Energie électrique. Université Claude Bernard - Lyon I, 2013. Français. NNT : 2013LYO10021 . tel-01157751

HAL Id: tel-01157751

<https://theses.hal.science/tel-01157751v1>

Submitted on 28 May 2015

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

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

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON

Délivrée par

L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1

ECOLE DOCTORALE

ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE DE LYON

DIPLOME DE DOCTORAT

(arrêté du 7 août 2006)

Soutenue le 4 février 2013

par

An LI

Ingénieur électrique de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

TITRE :

Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages – Application aux véhicules électriques et hybrides

JURY :

Marie-Cécile PERA	Professeur de l'Université de Franche-Comté – Présidente du jury
Christophe FORGEZ	Professeur de l'Université de Technologie de Compiègne – Rapporteur
Jean-Michel VINASSA	Professeur de l'Institut Polytechnique de Bordeaux – Rapporteur
Philippe GYAN	Docteur-Ingénieur de Recherche de RENAULT – Co-directeur industriel
Serge PELISSIER	Chargé de recherche de l'IFSTTAR – Co-directeur de thèse
Pascal VENET	Professeur de l'Université Lyon 1 – Directeur de thèse

Remerciement

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une thèse CIFRE avec trois partenaires dont RENAULT, le LTE de l'IFSTTAR et le laboratoire AMPERE de l'Université Lyon 1. Cette collaboration de différents partenaires m'ont permis de côtoyer, de travailler et d'échanger avec de nombreuses personnes à Guyancourt, à Bron et à Villeurbanne. Mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ces travaux de thèse.

En tout premier lieu, je remercie énormément mes trois chers encadrants, Philippe Gyan, Serge Péliissier et Pascal Venet, qui ont suivi de très près mes travaux de thèse. Sans leurs arrosages et fermentations durant les trois années passées, ce mémoire n'aurait jamais pu voir le jour.

Merci beaucoup aux collègues de RENAULT avec qui j'ai partagé un même bureau en « open space » à Guyancourt et de bons moments pendant les pauses café et les repas, à savoir Nathalie Cornet, Frédérique Delcorso, Thanh-Thuy-Van, Elise Nanini-Maury, Aurélien Gohier, David Sicsic, Fabrice Bidault, Pierre Tran-Van, Christophe Dudézert, Alain Daumard, Pablo De Haro Sacristan, Michel Geoffroy, Shuxian Lu, Pengfei Chen, Yuxiang Dong ...

Je remercie chaleureusement les membres du laboratoire AMPERE et particulièrement ceux avec qui j'ai partagé un même bureau à Villeurbanne : Alaa Hijazi, Paul Kreczanik, François Savoye, Anh Tuan Bui, Oualid Messal, Arnaud Devie et Alaa Hilal.

Un grand merci à Edouardo Redondo-Iglesias, Nicolas Perol, Paul Kreczanik de l'IFSTTAR et Younes Zitouni du laboratoire AMPERE. C'est avec leur soutien technique que j'ai pu matérialiser l'une de mes conceptions sur papier en un vrai prototype.

Merci beaucoup à Jérémy Peter de l'IFSTTAR et Yan Brunet, mon stagiaire, pour leurs aides dans l'exécution des essais à Bron quand j'étais à Paris.

Merci sincèrement à l'ensemble des membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail.

Pour finir, j'adresse ma profonde gratitude à ma famille et particulièrement à ma femme Weiguang, pour leurs encouragements chaleureux et soutiens inconditionnels.

Titre

Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages – Application aux véhicules électriques et hybrides

Résumé

Dans le cadre du développement des véhicules électriques et hybrides, la connaissance et la gestion de l'énergie du pack de batteries est une problématique majeure. Pour cela, les constructeurs automobiles ont besoin de modèles numériques pour représenter le comportement dynamique des batteries. L'objectif de cette thèse est de développer, d'une part une méthodologie de caractérisation du comportement dynamique des cellules de batterie et de leurs assemblages et d'autre part des modèles numériques associés qui soient simples, rapides, robustes, présentant le meilleur compromis précision/simplicité.

La première partie du travail de la thèse a consisté à développer une nouvelle méthode de caractérisation expérimentale avec un modèle de circuit électrique équivalent, qui permet de s'appliquer facilement à différentes batteries et de calibrer la complexité du modèle (nombre de circuits utilisés) en fonction de la durée des mesures de la phase de repos après une sollicitation. Le modèle généré est capable de suivre les évolutions rapides et lentes de la tension de la batterie, ce qui peut améliorer l'estimation de la tension dans les applications BMS (Battery Management System). Des essais de validations sur différentes batteries ont montré que les modèles générés permettent une prédiction précise du comportement dynamique de la batterie.

Ensuite, le manuscrit aborde les assemblages des cellules en série avec la méthode de caractérisation élaborée. Elle commence par une définition énergétique de l'assemblage. Puis, la modélisation de l'assemblage avec la méthode de caractérisation est discutée. Les essais de validation ont été menés sur différents assemblages et ont montré que le comportement dynamique de l'assemblage peut aussi être bien représenté avec les modèles identifiés.

Mots clés

Batterie, cellule de batterie, assemblage de cellules, module de batterie, pack batterie, modélisation, caractérisation, modèle de circuit électrique équivalent, véhicule électrique, véhicule hybride.

Title

Experimental analysis and modelling of battery cells and their packs – Application to electric and hybrid vehicles

Abstract

As part of the development of electric and hybrid vehicles, energy management in the battery pack is a major issue. Car manufacturers need a numerical model to represent the dynamic behavior of batteries. The objective of this work is to develop, on the one hand, a characterization method of the dynamic behavior of battery cells and their assemblies, and on the other hand the combined numerical models which are simple, fast, robust and with the best accuracy/simplicity compromise.

The first part of the work is dedicated to develop a new experimental characterization method with an equivalent circuit model, which can be applied easily to different battery cells and allows calibrating the complexity of the model (number of the RC circuits) according to the measurement duration of the resting phase after a solicitation. Therefore, the generated model is able to follow the rapid and slow voltage change of the battery cell, which improves voltage and state of charge estimation for the BMS (Battery Management System) applications. The validation tests on different battery cells show that the generated model allows accurate prediction of the battery cell's dynamic behavior.

The second part of the work studies the cell assemblies with cells connected in series. It begins with an energy definition of the cell assembly. Then modelling of the assembly with the developed characterization method is discussed. The validation tests were carried out on different assemblies and show that the dynamic behavior of the assembly can be also well represented with the identified models.

Keywords

Battery, battery cell, cell assembly, battery module, battery pack, modelling, characterization, equivalent circuit model, electric vehicle, hybrid vehicle.

Table des matières

Introduction Générale.....	9
Chapitre 1 : Généralités sur les batteries.....	13
1.1. Présentation des accumulateurs.....	14
1.1.1. Principe de fonctionnement des accumulateurs.....	14
1.1.2. Quelques notions concernant l'accumulateur.....	15
1.2. Besoin énergétique dans les véhicules électrifiés.....	19
1.2.1. Principales technologies pour les VEs et VEHS.....	19
1.2.2. Périmètres de fonctionnement de batteries dans les VEs et VEHS.....	23
1.3. Accumulateurs lithium-ion (Li-ion).....	25
1.3.1. Principe de fonctionnement.....	25
1.3.2. Accumulateurs Li-ion du marché.....	30
1.4. Accumulateurs NiMH.....	31
1.4.1. Principe de fonctionnement.....	31
1.4.2. Accumulateurs NiMH du marché.....	32
1.5. Conclusion.....	33
Chapitre 2 : Etude bibliographique sur la modélisation de batterie.....	34
2.1. Description du comportement dynamique de la batterie et des phénomènes électrochimiques associés.....	35
2.2. Différentes approches de la modélisation de la batterie.....	42
2.2.1. Modèles électrochimiques.....	42
2.2.2. Modèles de type boîte noire.....	44
2.2.3. Modèles de type circuit électrique équivalent.....	44
2.2.4. Choix de l'approche de la modélisation pour notre étude.....	53
2.3. Procédures de caractérisation des paramètres du modèle de la batterie dans la littérature.....	54
2.3.1. Equipements expérimentaux.....	54
2.3.2. Caractérisation de la capacité.....	56
2.3.3. Caractérisation de l'OCV.....	59
2.3.4. Caractérisation de l'impédance de la batterie (L , R_s , Z_{tc_dc} , Z_{tm}).....	63
2.3.5. Synthèse en vue de la caractérisation d'une batterie.....	77
2.4. Modèle retenus et type de caractérisation pour l'étude de la thèse.....	80
2.5. Conclusion.....	81
Chapitre 3 : Etude de la relaxation.....	82
3.1. Introduction.....	83
3.2. Expression de la relaxation avec le modèle de Thévenin.....	83
3.3. Méthode d'identification d'une relaxation.....	88
3.3.1. Démarche d'identification.....	88
3.3.2. Ré-échantillonnage de la tension pendant la relaxation.....	89
3.3.3. Division théorique de la relaxation.....	90
3.3.4. Identification des paramètres.....	96
3.3.5. Choix du nombre optimal de circuits R//C.....	99
3.4. Exemple d'identification d'une relaxation.....	101
3.4.1. Mesure expérimentale.....	101
3.4.2. Résultat d'identification.....	102
3.5. Etude des relaxations de différentes cellules.....	106
3.5.1. Mesures expérimentales.....	106
3.5.2. Résultats d'identification.....	109
3.5.3. Elaboration d'une règle générale de détermination du nombre de R//C à utiliser.....	111
3.6. Etude de l'influence de la sollicitation avant la relaxation.....	118
3.7. Extrapolation de la relaxation longue à partir d'une mesure de courte durée.....	122
3.7.1. Méthode d'estimation de U_{5_Relax} par extrapolation des mesures sur une heure.....	122

3.7.2. Méthode d'estimation de U_{5_Relax} avec la tension de relaxation tracée à l'aide d'une échelle logarithmique du temps.....	125
3.8. Conclusion.....	130
Chapitre 4 : Procédure de caractérisation expérimentale d'une cellule.....	131
4.1. Introduction.....	132
4.2. Démarche générale de caractérisation d'une cellule.....	132
4.3. Identification des paramètres avec les motifs en escalier.....	135
4.3.1. Justification de l'utilisation du motif en escalier.....	135
4.3.2. Construction du motif en escalier en fonction des caractéristiques de la cellule testée....	135
4.3.3. Documentation des paramètres à identifier avec un motif en escalier.....	139
4.3.4. Méthode d'identification des paramètres.....	142
4.3.5. Validation de la méthode d'identification des paramètres.....	154
4.4. Conception d'une procédure de caractérisation expérimentale d'une cellule.....	156
4.4.1. Principe de la procédure de caractérisation expérimentale d'une cellule.....	156
4.4.2. Logiciel de caractérisation de cellule.....	159
4.4.3. Exemple des mesures obtenues avec la procédure de caractérisation expérimentale.....	161
4.5. Validation de la procédure de caractérisation sur différentes cellules.....	165
4.6. Etude de la problématique « Précision/Coût » du modèle.....	169
4.6.1. Problématique « Précision/Coût ».....	169
4.6.2. Optimisation des essais de caractérisation [105].....	169
4.7. Conclusion.....	172
Chapitre 5 : Etude de l'assemblage des cellules en série.....	173
5.1. Introduction.....	174
5.1.1. Contexte.....	174
5.1.2. Problématiques de l'assemblage des cellules en série.....	175
5.2. Définition de la capacité réelle de l'assemblage.....	176
5.2.1. Définition proposée.....	176
5.2.2. Exemples d'application de la définition.....	179
5.3. Modélisation de l'assemblage.....	182
5.3.1. Représentation de l'assemblage.....	182
5.3.2. Démarche d'évaluation de la performance du modèle de l'assemblage.....	184
5.3.3. Résultats expérimentaux.....	184
5.3.4. Simulation de l'assemblage.....	187
Conclusion.....	192
Conclusion générale et perspectives.....	193
Références.....	196
Annexes.....	201
Annexe 1. Détail de calcul de N pour l'équation (41).....	201
Annexe 2. Détail de calcul de M_{max} pour l'équation (55).....	202
Annexe 3. Calcul de M_0 pour l'équation (56).....	203
Annexe 4. Détail de la procédure de caractérisation expérimentale d'une cellule.....	204
A.1. Phase de préparation.....	204
A.2. Phase d'expérimentation.....	206
Annexe 5. Outil de choix de la période d'échantillonnage pour la mesure de la tension de relaxation	214
Annexe 6. Paramètres du modèle de la cellule identifiés avec la mesure de la Figure 151.....	218
Annexe 7. Cartographie de la résistance série R_s identifié avec la mesure de l'essai 4.....	219
Annexe 8. Trois cellules caractérisées avec la procédure de caractérisation.....	220
Annexe 9. Justification de la dépendance au courant des tensions de relaxation par analogie avec une réponse exponentielle à une impulsion.....	221
Liste des tableaux.....	222
Liste des figures.....	224
Nomenclature.....	231

Introduction Générale

Contexte de l'étude

Le changement climatique a été reconnu comme une préoccupation majeure de la planète. Cette préoccupation a donné naissance aux efforts internationaux pour lutter contre le changement climatique, par exemple, le protocole de Kyoto : une convention entre 183 pays pour lutter contre le changement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Dans le domaine du transport en Europe, les constructeurs automobiles se sont engagés à réduire l'impact des véhicules sur l'environnement avec un objectif de moins de 95 g de CO₂/km d'ici 2020, contre plus de 130 g/km actuellement [1]. Afin de répondre à cet objectif, une rupture de technologie comme l'utilisation des véhicules électriques et véhicules électriques hybrides est nécessaire. De nombreux constructeurs automobiles ont déjà commencé à proposer leurs véhicules électrifiés dans le marché. Parmi eux, Renault est le premier constructeur automobile à commercialiser une gamme complète des véhicules électriques.

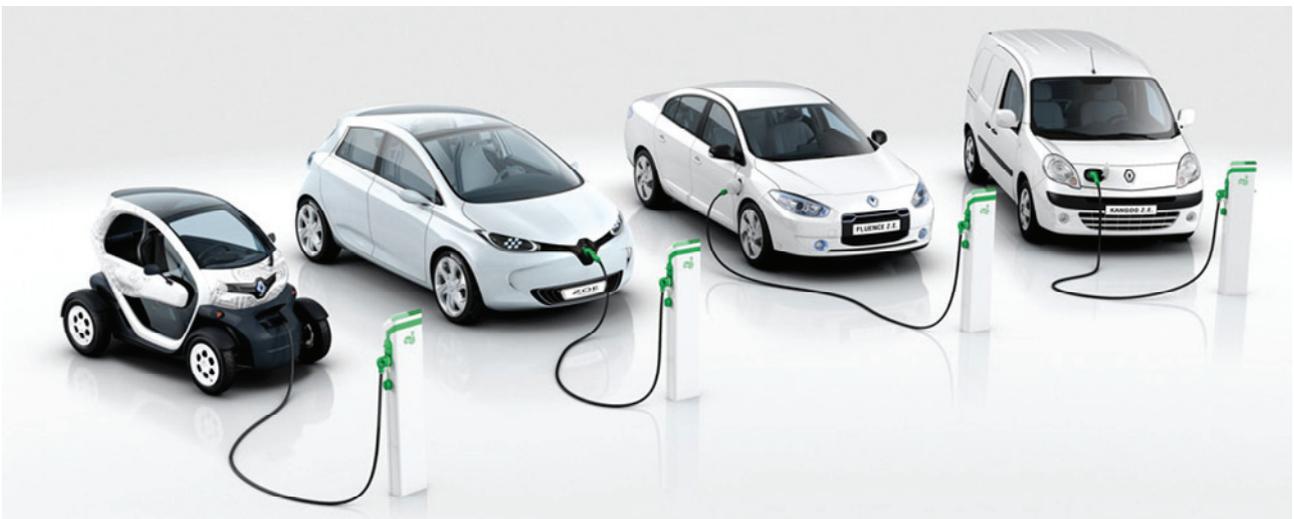


Figure 1 : Gamme des véhicules électriques de Renault (de gauche à droite : Twizy, Zoé, Fluence électrique et Kangoo électrique) [2]

Problématique et objectif de la thèse

Dans le cadre du développement des véhicules électriques et électriques hybrides, la gestion de l'énergie contenue dans les batteries est une problématique majeure. Des efforts constants de recherche sont entrepris pour trouver des solutions qui maximisent l'autonomie des véhicules et augmentent la durée de vie des batteries.

Les packs de batteries sont constitués d'assemblages de cellules, or, chacune de ces dernières peut avoir d'une part des caractéristiques légèrement différentes par rapport aux valeurs nominales données par le constructeur et d'autre part des conditions d'environnement thermiques différentes de ses voisines en fonction de leur emplacement et de ceux des sources de refroidissement. Ces conditions vont influencer le comportement et le vieillissement de chaque cellule au cours de l'utilisation de la batterie. La dispersion des caractéristiques sera alors accentuée au cours de la durée de vie du véhicule, impactant la gestion de l'assemblage. Par exemple,

l'énergie utile du pack sera limitée lors de la charge de la batterie par la cellule la plus chargée, et par la cellule la moins pleine lors de la décharge (cf. Figure 2).

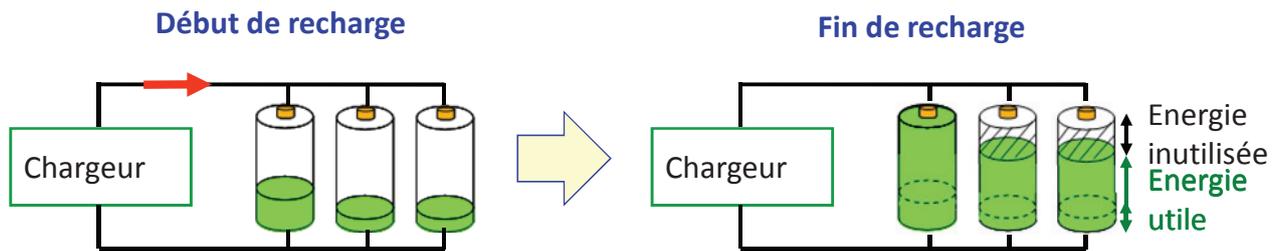


Figure 2 : Exemple de l'influence de la dispersion des caractéristiques des cellules sur l'énergie utile de l'assemblage

Afin de bien gérer les packs de batteries, les constructeurs automobiles ont besoin de pouvoir :

- caractériser rapidement des cellules à partir d'une méthodologie reproductible afin d'évaluer les différentes batteries proposées par de nombreux fournisseurs,
- disposer d'une estimation précise de l'énergie utilisable dans l'assemblage de cellules d'un pack de batteries,
- élaborer des stratégies de gestion de l'énergie afin de maximiser l'autonomie des véhicules et de préserver la durée de vie des batteries.

Pour le constructeur automobile, il sera ainsi nécessaire de disposer :

- d'un modèle numérique simple, rapide, robuste qui représente le comportement dynamique des assemblages de cellules de batteries,
- d'une procédure de caractérisation des cellules et de leurs assemblages qui permet d'identifier les paramètres du modèle à partir des mesures expérimentales.

Afin de répondre au besoin industriel, l'objectif de la thèse est donc de développer une méthodologie de caractérisation du comportement dynamique des cellules de batteries et de leurs assemblages, ainsi que des modèles numériques associés qui sont simples, rapides, robustes, et avec le meilleur compromis précision/simplicité. Cette méthodologie de caractérisation doit être générique et applicable facilement à différents types de batteries.

Démarche de la thèse

La démarche de la thèse comporte deux étapes :

La première étape consiste à étudier la modélisation d'une cellule afin d'élaborer un modèle présentant les meilleurs compromis précision/simplicité ainsi que la procédure de caractérisation associée. Parmi les différents modèles de batteries existants, l'enjeu va consister à déterminer la modélisation la plus appropriée aux applications automobiles, qui permette de représenter aussi bien une cellule individuelle, qu'un ou plusieurs assemblages de cellules, avec le meilleur compromis précision / simplicité de documentation / rapidité de calcul. En outre, le modèle élaboré doit aussi

avoir une structure permettant de tenir compte de l'effet de la température et du vieillissement pour un futur développement qui n'est pas réalisé dans le cadre de ce travail.

La deuxième étape comporte plusieurs axes en parallèle à développer, à savoir :

- appliquer la méthodologie de caractérisation à d'autres technologies de batteries,
- étudier l'assemblage des cellules.

Organisation du mémoire

La suite du mémoire est organisée en 6 chapitres.

Le premier chapitre introduit les généralités sur les batteries. Dans ce chapitre sont rappelés les notions de base, les principes de fonctionnement et l'utilisation des batteries pour les véhicules électriques et hybrides dans l'industrie automobile.

Le deuxième chapitre constitue une étude bibliographique sur les modélisations de batterie existantes dans la littérature. Ce chapitre commence par une description des comportements dynamiques de la batterie. Ensuite, un panorama sur les principaux types de modélisation de batterie est donné. Après une comparaison entre les différents types de modèle, le modèle le plus adapté aux besoins de notre étude est présenté. Par la suite, est effectuée une étude sur les procédures de caractérisation des paramètres du modèle de batterie à partir des mesures expérimentales. Cette étude permet d'aboutir à une structure du modèle à partir de laquelle une nouvelle méthodologie de caractérisation est élaborée. Cette étude permet aussi de relever un point important pour l'application automobile mais souvent négligé dans la littérature : la prise en compte de la phase de relaxation de la batterie durant laquelle la tension de la batterie continue à évoluer pendant des heures.

Le troisième chapitre traite de la relation entre la complexité du modèle (nombre de paramètres à documenter) et la relaxation des batteries. Dans ce chapitre, est développée une méthode de calibration de la complexité du modèle en fonction de la période d'échantillonnage et de la durée de relaxation.

Le quatrième chapitre présente le développement d'une méthodologie originale de caractérisation générique qui prend en compte de la relaxation et qui est applicable à différentes technologies de batteries. Les validations de cette méthodologie ont été effectuées sur 4 différentes batteries Li-ion et NiMH.

Le cinquième chapitre étudie les assemblages des cellules en série avec la méthodologie de caractérisation développée. Ce chapitre commence par une définition énergétique de l'assemblage. Ensuite, la modélisation de l'assemblage avec la méthodologie de caractérisation est discutée. Les essais de validation sont ensuite menés sur différents assemblages.

Enfin, le dernier chapitre conclut la thèse et discute des perspectives.

Chapitre 1 : Généralités sur les batteries

1.1. Présentation des accumulateurs

Dans le principe, les générateurs électrochimiques sont des dispositifs dont la fonction est de transformer l'énergie libérée par des réactions électrochimiques en énergie électrique. Ce processus de conversion d'énergie se produit aux deux électrodes du dispositif (électrode positive et électrode négative) et conduit à la décharge du générateur. En fonction de la réversibilité de ce processus, on peut distinguer les générateurs électrochimiques en deux catégories :

- Système primaire ou **pile** : dans ce cas la réaction électrochimique est irréversible, le générateur est déchargé une seule fois et de façon définitive.
- Système secondaire ou **accumulateur** : dans ce cas la réaction électrochimique est réversible, une source d'énergie extérieure peut être utilisée pour ramener les électrodes à leur état initial et charger le dispositif après sa décharge.

Dans le domaine des véhicules électriques (VEs) et véhicules électriques hybrides (VEHs), les accumulateurs se présentent comme étant l'un des moyens de stockage d'énergie électrique les plus prometteurs.

1.1.1. Principe de fonctionnement des accumulateurs

En général, un accumulateur est composé d'une électrode positive (ou cathode en convention générateur), d'une électrode négative (ou anode en convention générateur), d'un séparateur et d'un électrolyte dans lequel sont immergés l'électrode positive, l'électrode négative et le séparateur. La Figure 3 présente un exemple d'une vue éclatée d'un accumulateur.

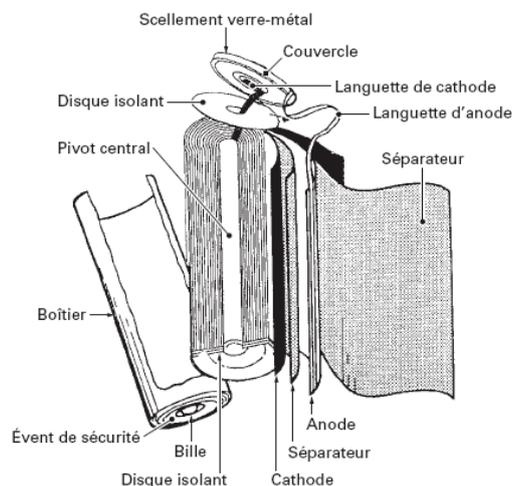


Figure 3 : Vue éclatée d'un accumulateur [3]

Le principe de fonctionnement d'un accumulateur est basé sur l'exploitation de deux couples oxydo-réducteurs, Ox_1/Red_1 et Ox_2/Red_2 , qui se déroulent respectivement à deux électrodes différentes. La Figure 4 résume le principe de fonctionnement des accumulateurs sous la forme d'un schéma simplifié.

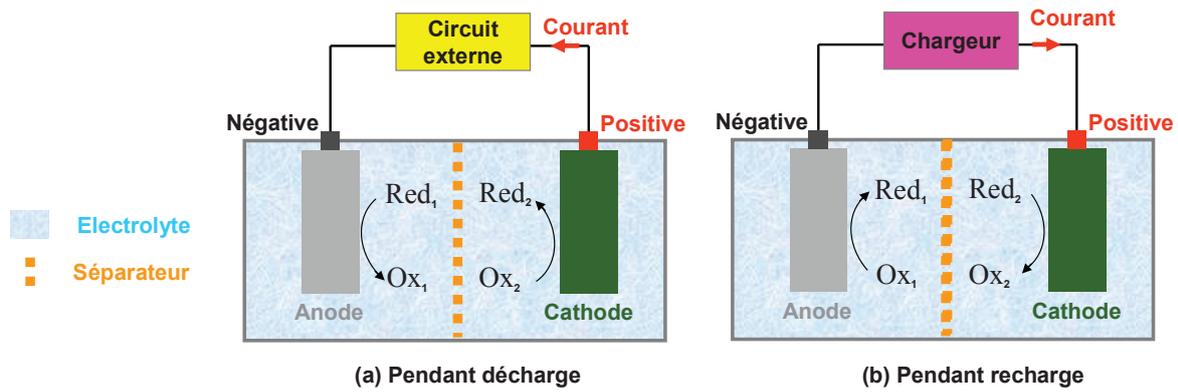


Figure 4 : Principe de fonctionnement des accumulateurs

Il existe de nombreuses technologies d'accumulateur : Plomb, NiMH, NiCd, NiZn, famille de lithium-ion (Li-ion). La Figure 5 donne un panorama de différentes technologies d'accumulateur ainsi que le positionnement de chaque technologie sur le diagramme de Ragone (la puissance massique en fonction de l'énergie massique) qui permet de comparer les performances énergétiques de différentes technologies. Parmi les technologies d'accumulateur, la famille des accumulateurs Li-ion présente les meilleures performances (en puissance et en énergie).

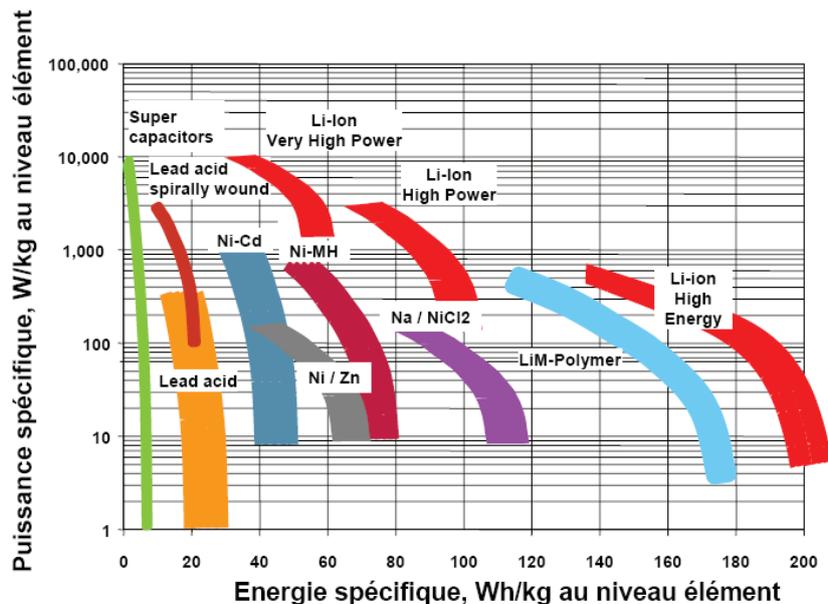


Figure 5 : Comparaison de différentes technologies d'accumulateur sur le diagramme de Ragone [4]

1.1.2. Quelques notions concernant l'accumulateur

1.1.2.1. Relation entre les noms « accumulateur », « cellule » et « batterie »

Les accumulateurs s'ils sont seuls sont parfois appelés éléments de la batterie ou cellules, une batterie contient donc un ou plusieurs accumulateurs.

1.1.2.2. Plage de tension

Chaque batterie a une plage de tension de fonctionnement qui définit la tension minimum et la tension maximum qu'elle peut atteindre. La tension minimum est aussi appelée « tension d'arrêt ». Si la batterie fonctionne en dehors de sa plage de tension, il y a des risques de dégradations.

1.1.2.3. Capacité

De façon générale, la capacité C d'une batterie est la quantité de charges électriques pouvant être délivrée lors d'une décharge complète à une amplitude de courant définie. La capacité C de la batterie est mesurée en Ampère-heure et l'amplitude du courant utilisé pour mesurer cette capacité est souvent exprimée en fonction de la capacité nominale (courant exprimé en « n.C »). Par exemple, si la capacité d'une batterie est de 0.36 Ah à 1C, cela signifie que si la batterie pleinement chargée est déchargée par un courant de 0.36 A, elle va atteindre sa tension d'arrêt après une heure de décharge. La capacité déchargée est $0.36 \text{ A} \times 1 \text{ h} = 0.36 \text{ Ah}$, un courant de 1C signifie $1 \times 0.36 = 0.36 \text{ A}$. Dans la même logique, un courant de 10C signifie $10 \times 0.36 = 3.6 \text{ A}$.

Il existe une non-linéarité de la capacité en fonction du courant qui peut être traduit par la loi de Peukert. La Figure 6 présente un tel exemple pour une batterie lithium-ion Kokam. Pour une même tension d'arrêt, la capacité de la batterie diminue quand le courant augmente. Il faut noter que la remontée de la courbe à 20C est due à la hausse de la température de la cellule provoquée par la décharge à fort courant.

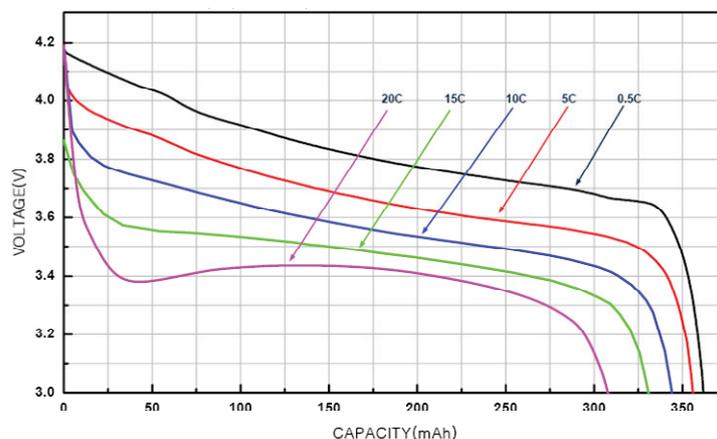


Figure 6 : Non-linéarité de la capacité en fonction du courant de décharge pour une batterie lithium-ion Kokam pour une température ambiante de 23 °C [5]

1.1.2.4. Rendement faradique

Le rendement faradique représente l'efficacité de la charge d'une batterie. Il est le rapport de la capacité de la batterie sur la quantité de charge fournie à la batterie lors de la charge complète. A cause des réactions secondaires à l'intérieur de la batterie, la quantité de charge fournie à la batterie n'est pas entièrement récupérable. Ainsi, le rendement faradique peut être inférieur à 100% et varie

en fonction de la technologie de la batterie. Par exemple, le rendement faradique est proche de 100% pour les batteries Li-ion et autour de 80~90% pour les batteries NiMH [8].

1.1.2.5. Etat de charge (SoC) et profondeur de décharge (DoD)

L'état de charge (ou SoC pour « State of Charge » en anglais) est le rapport de la charge disponible en Ah sur la capacité de la batterie (cf. Equation (1)). Par exemple, quand la batterie est pleinement chargée, l'état de charge (SoC) vaut 100% et quand la batterie est complètement déchargée, le SoC vaut 0%. La définition du SoC n'est pas unique, parce que la capacité réelle ou la capacité nominale peuvent être utilisées au dénominateur dans la formule du SoC.

$$\text{SoC} = \frac{\text{Charge disponible en Ah}}{\text{Capacité de la batterie}} \quad (1)$$

En pratique, la capacité réelle d'une batterie peut être différente de sa capacité nominale. Le calcul du SoC avec la capacité réelle correspond plus précisément à l'état réel de la batterie que le calcul du SoC avec la capacité nominale. Ce dernier ne garantit pas la validité des bornes 0% et 100% de SoC. Par exemple, pour une batterie avec une capacité nominale de 0.36 Ah, si sa capacité réelle est supérieure à 0.36 Ah et que son SoC est déterminé avec la capacité nominale, quand le SoC est égal à 0%, la batterie peut encore fournir de la charge, donc 0% de SoC dans ce cas ne correspond pas à un état complètement déchargé de la batterie. Ainsi, dans le cadre de la thèse, la capacité réelle est utilisée pour le calcul du SoC. Il est à noter que si l'état « complètement déchargé » est déterminé par des ampères heures déchargées, la valeur du courant n'intervient pas pour la définition du SoC 0%. Par contre, si l'état « complètement déchargé » est associé à une tension d'arrêt de décharge, alors le courant a une influence sur le SoC 0%. Par exemple, une batterie « complètement déchargée » par un courant de 10C, peut encore fournir de la charge sous un courant à 0.1C.

La profondeur de décharge (ou DoD pour « Depth of Discharge » en anglais) est aussi un indicateur de niveau de charge de la batterie. Son expression est donnée par :

$$\text{DoD} = 1 - \text{SoC} \quad (2)$$

1.1.2.6. Tension à vide (OCV)

La tension à vide (ou OCV pour « Open Circuit Voltage » en anglais) désigne la tension d'équilibre de la batterie au repos. La valeur de l'OCV évolue en fonction du SoC de la batterie. La Figure 7 montre un exemple de la relation OCV(SoC) d'une batterie lithium-ion A123. Il est à noter que les courbes OCV(SoC) mesurées après décharge et après charge peuvent être différentes, la présence des écarts entre les deux courbes étant appelée phénomène d'hystérésis. L'allure du graphe OCV(SoC) peut être modifiée en fonction du temps de repos utilisée pour la mesure expérimentale.

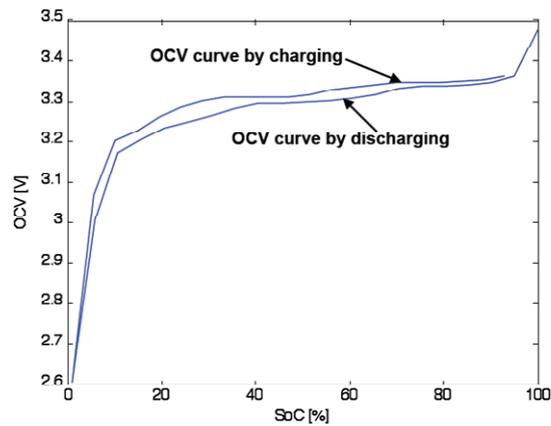


Figure 7 : La courbe OCV(SoC) mesurée 1 h après décharge et après charge d'une batterie A123 à 25°C [6]

1.1.2.7. Tension nominale

La tension nominale est la tension de référence d'une batterie. La définition de la tension nominale n'est pas unique, on peut interpréter la tension nominale comme la tension moyenne d'une batterie observée sur la plus grande partie de sa courbe OCV en fonction du SoC après décharge complète. La tension nominale varie en fonction de la technologie de batterie, par exemple, 3.3 V~3.9 V pour une cellule Lithium-ion, autour de 2 V pour une cellule au plomb et autour de 1.2 V pour une cellule NiMH et NiCd.

1.1.2.8. Autodécharge

En raison des réactions secondaires intervenant aux deux électrodes, la batterie se décharge toute seule lentement même quand elle n'est pas utilisée. Ce phénomène de perte d'énergie avec le temps est appelé autodécharge. L'autodécharge s'exprime souvent en pourcentage de la perte de charge par mois par rapport à la capacité de la batterie. Elle dépend de plusieurs facteurs comme la tension, la température et le vieillissement de la batterie. Elle varie aussi en fonction de la technologie de la batterie, par exemple, elle est de l'ordre de 5% par mois pour les batteries Li-ion et les batteries au plomb et de l'ordre de 30% par mois pour les batteries NiMH et NiCd [7][8].

1.1.2.9. Durée de vie

La durée de vie d'une batterie est souvent exprimée en année ou en nombre de cycles de charge/décharge. Elle dépend de la condition d'utilisation de la batterie (niveau et fréquence de la sollicitation, température de fonctionnement). La batterie est souvent considérée en fin de vie quand sa capacité réelle est de 80% de la capacité initiale. L'état de santé (ou SoH pour « State of Health » en anglais) est souvent utilisé pour décrire le niveau de vieillissement de la batterie. La formule de SoH est donnée par :

$$\text{SoH} = \frac{\text{Capacité actuelle de la batterie}}{\text{Capacité initiale de la batterie}} \quad (3)$$

De la même façon que pour le SoC, la définition du SoH n'est pas unique puisque la capacité réelle ou la capacité nominale peuvent être utilisées au dénominateur de la formule du SoH.

1.1.2.10. Packaging

Parmi les accumulateurs couramment rencontrés à ce jour, on trouve différents formats de packaging : bouton, cylindrique et prismatique (cf. Figure 8).



Figure 8 : Formats de packaging des accumulateurs : (a) Bouton, (b) Cylindrique, (c) Prismatique

1.2. Besoin énergétique dans les véhicules électrifiés

1.2.1. Principales technologies pour les VEs et VEHs

En fonction de niveau d'électrification, on peut distinguer des véhicules électrifiés en plusieurs catégories comme présenté sur la Figure 9 :

- **Véhicule électrique (VE)** : il est entièrement propulsé par un moteur électrique qui transforme en énergie mécanique l'électricité stockée dans un pack de batteries. Il reçoit donc toute son énergie de ses batteries qui doivent être rechargées par une source externe.
- **Véhicule électrique hybride (VEH)** : il est équipé d'un moteur thermique et d'une machine électrique. Les deux moteurs peuvent être utilisés pour propulser le véhicule (hybridation parallèle), mais il y a aussi le cas où seulement la machine électrique est utilisée pour la propulsion, le moteur thermique étant utilisé pour charger le pack de batteries par l'intermédiaire d'une génératrice (hybridation série). Les véhicules électriques hybrides (VEHs) peuvent se distinguer en deux sous catégories : quand le pack de batteries peut être chargé par une source externe, il s'agit des véhicules électriques hybrides rechargeables (VEHs rechargeable) ; sinon ce sont les véhicules électriques hybrides non rechargeables (VEHs non rechargeables).

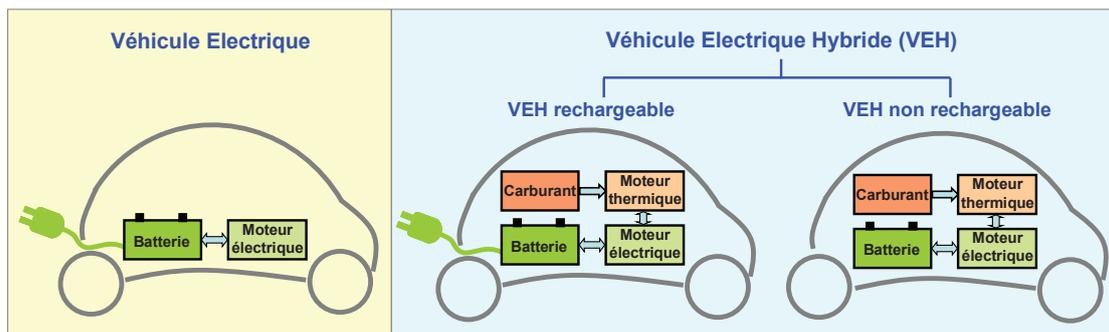


Figure 9 : Trois catégories de véhicules électrifiés

Historiquement, différents types de batterie ont été utilisés pour les véhicules électriques (VEs) ou les véhicules électriques hybrides (VEHs). On peut citer quelques exemples comme illustrés sur la Figure 10.

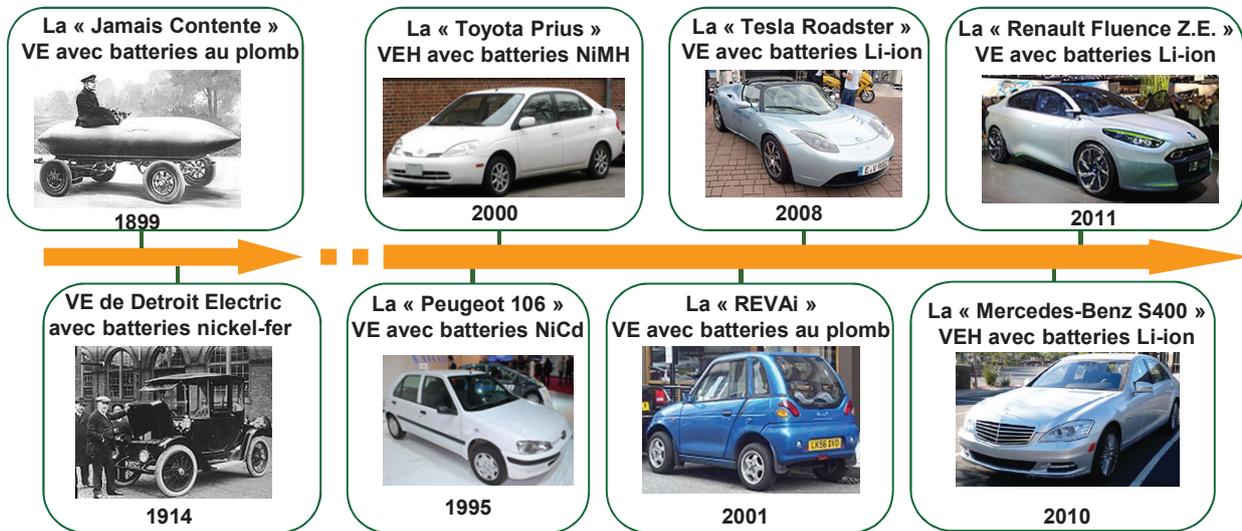


Figure 10 : Exemples des véhicules électriques et véhicules électriques hybrides dans l’histoire [9]

Une comparaison de différentes technologies des batteries est présentée sur la Figure 11. Elle montre que :

- Pour les batteries au plomb, bien qu’elles soient matures et moins chères, elles sont sources de problème pour l’environnement.
- Les batteries NiMH sont matures et sûres, mais elles donnent de mauvaises performances à froid et ont une autodécharge importante.
- Les batteries de la famille Lithium présentent de bonnes performances en termes d’énergie et de puissance, mais elles sont plus chères et moins matures.
- Les batteries Nickel Sodium donnent aussi de bonnes performances en énergie et puissance, mais elles présentent une autodécharge importante.
- Les supercondensateurs présentent de fortes puissance massique et durée de vie, mais leur performance énergétique est faible.

Aujourd’hui, les constructeurs automobiles ont porté leurs choix principalement sur deux technologies pour leurs véhicules électriques et électriques hybrides :

- les batteries nickel métal hydrure (NiMH), principalement pour des considérations de coût et de sécurité,
- les batteries lithium-ion (Li-ion) pour leurs performances.



Figure 11 : Comparaison de différentes technologies de batterie [8] (1 – Mauvais, 10 – Excellent)

Une comparaison plus en détail des technologies Li-ion et NiMH est présentée dans le Tableau 1. Ce tableau montre que la tension d'une cellule NiMH est 3 fois plus faible que celle d'une Li-ion. Ainsi, pour monter à un niveau de tension identique (par exemple 300 V), avec des cellules NiMH, il faut 3 fois plus de cellules connectées en série qu'avec des cellules Li-ion.

Technologie	Li-ion	NiMH
Tension nominale d'une cellule	3.3 V~3.9 V	1.2 V
Energie spécifique (Wh/kg)	30~220	40~80
Puissance spécifique (W/kg)	3~10000	10~1000
Durée de vie en cyclage	500~1500	500~2000
Performance aux températures extrêmes	Bonne (-30~60°C)	Moyenne (-10~65°C)
Coût	Elevé (500~750 €)	Acceptable (300~500 €)
Autodécharge	Bas (5%~10% par mois)	Elevé (30%~50% par mois)

Tableau 1 : Comparaison des technologies Li-ion et NiMH [4][7][8][10][11]

Aujourd'hui la technologie Li-ion est choisie par de nombreux constructeurs automobiles pour leurs véhicules électriques. Pour les véhicules électriques hybrides, les batteries NiMH sont largement utilisées dans les modèles déjà commercialisés, mais quelques constructeurs proposent des batteries Li-ion pour leurs futurs modèles. Les deux tableaux suivants présentent les principaux véhicules électriques et hybrides déjà ou bientôt commercialisés dans le monde.

Marque	Smart	BMW	Subaru	Mitsubishi	Tesla	Citroën	BYD	Nissan	Renault	Renault
Nom	Fortwo ED	Mini E	Stella	i-MIEV	Roadster	C0	E6	Leaf	Fluence	Zoé
Technologie du Pack	Li-ion									
Année de production	Pas encore commercialisé		2006	2008	2010	2011	2011	2011	2011	2012

Tableau 2 : Liste non-exhaustive des véhicules électriques

Marque	Honda	Lexus	Nissan	Chevrolet	Toyota	Ford	Honda	Toyota	Mercedes-Benz	Chevrolet	Italdesign-Giugiaro
Nom	Civic	RX 400h	Altima	Tahoe	Prius III	Fusion	Insight 2ème génération	Yaris	S400	Volt	Proton Emas Hybrid
Technologie du Pack	NiMH								Li-ion		
Année de production	2005	2005	2007	2008	2009	2009	2009	2012	2009	2010	Pas encore commercialisé

Tableau 3 : Liste non-exhaustive des véhicules électriques hybrides

Dans un pack de batterie, la cellule est le plus petit élément. Plusieurs cellules peuvent être connectées en série et/ou en parallèle pour constituer un module, plusieurs modules peuvent puis être connectés en série et/ou en parallèle pour composer un stack, plusieurs stacks peuvent ensuite être connectés en série et/ou en parallèle pour former finalement un pack (cf. Figure 12). Les performances typiques souhaitées des packs de batteries pour les VEs et les VEHS sont présentées dans le Tableau 4.

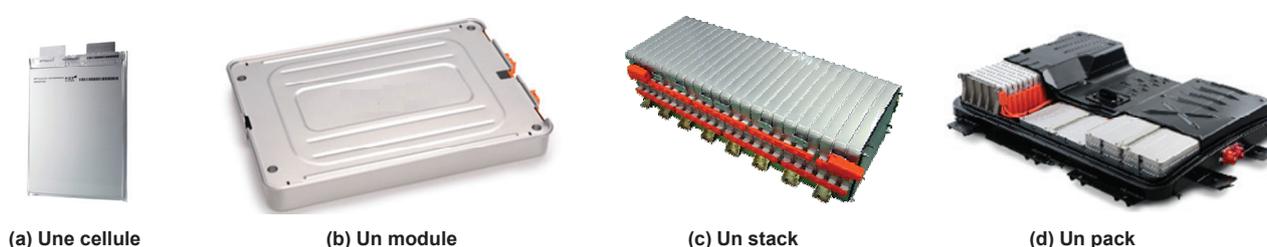


Figure 12 : Exemple de (a) cellule prismatique (b) module (c) stack (d) pack

	VEs	VEHS rechargeables	VEHS non rechargeables
Autonomie tout électrique (km)	150-200	10-60	-
Technologie	Li-ion	Li-ion	NiMH
Capacité du pack (kWh)	30-60	4-30	1.3
Energie spécifique (Wh/kg)	110-160	110-160	46
Densité énergétique (Wh/l)	400-600	400-600	200-350
Puissance maximale (kW)	-	40-100	27-35
Puissance spécifique (W/kg)	1500	500-1500	1300
Poids du pack de batteries (kg)	200-500	70-190	29
Durée de vie en année	10-15	10-15	10-15
Durée de vie en cyclage	-	>2500	-
Coût (€/kWh)	-	750-1500	600

Tableau 4 : Performances souhaitées des packs de batteries pour les VEs et VEHS [12]

Le Tableau 5 présente quelques exemples de packs de batteries pour des véhicules électriques et des véhicules électriques hybrides commercialisés.

Nom de véhicule	Mitsubishi i-MIEV	Tesla Roadster	Mercedes-Benz S400	Honda Civic
Année de production	2006	2008	2010	2005
Type	VE	VE	VEH non rechargeable	VEH non rechargeable
Autonomie annoncée (km)	144	320	-	-
Tension nominale de pack (V)	330	375	126	154
Capacité nominale de pack (kWh)	16	53	0.8	0.8
Nombre de modules	12	11	-	22
Nombre de cellules	88	6831	32	132
Technologie de cellule	Li-ion	Li-ion	Li-ion	NiMH
Tension nominale de cellule (V)	3.7	3.8	3.9	1.2
Capacité nominale de cellule (Ah)	50	2	6.5	5.5
Structure de pack	1 pack=88 cellules en série (2 modules de 4 cellules et 10 modules de 8 cellules)	1 pack=11 modules en série, 1 module=9 bricks en série, 1 brick=69 cellules en parallèle	1 pack=32 cellules en série	1 pack=22 modules en série, 1 module=6 cellules en série
Courant max estimé en décharge pour une cellule	142 A (2.8C)	7.7 A (3.9C)	119 A (18.3C)	97 A (17.7C)
Courant max estimé en charge pour une cellule	125 A (2.5C)	0.65 A (0.3C)	-	-

Tableau 5 : Exemple des structures de packs de batteries pour des véhicules électriques et des véhicules électriques hybrides selon [9][13][14][15][16][17]

1.2.2. Périmètres de fonctionnement de batteries dans les VEs et VEHs

Pour les VEs, le pack de batteries est la seule source d'énergie, il doit ainsi être dimensionné de manière à ce que la capacité du pack soit suffisamment grande afin de garantir une autonomie du véhicule (en km) acceptable. Dans ce cas, des batteries de haute énergie sont préférables. Pour les VEHs non rechargeables, les batteries sont utilisées principalement pour fournir un supplément de puissance pendant l'accélération et récupérer de l'énergie au freinage. Il n'est pas nécessaire que ces batteries aient des capacités importantes mais elles doivent être capables de fournir ou accepter une puissance importante, donc dans ce cas, des batteries de forte puissance sont préférables. Ainsi, les périmètres de fonctionnement des batteries dans les VEs et VEHs sont différents : les cellules de batteries dans les VEs subissent une excitation de courant moins violente (jusqu'à $\pm 5C$) que les cellules dans les VEHs non rechargeables (jusqu'à $\pm 40C$), par contre, les cellules dans les VEs fonctionnent sur une plage de SoC plus large que les cellules dans les VEHs non rechargeables. Quant aux véhicules hybrides rechargeables (VEHs rechargeables) qui peuvent fonctionner en mode tout électrique comme les VEs et en mode hybride comme les VEHs non rechargeables, le

périmètre de fonctionnement de leurs batteries se situe donc entre celui des VE et celui des VEHs. Le Tableau 6 résume les périmètres typiques de fonctionnement des cellules de batteries dans les véhicules électriques et électriques hybrides [12][18][19]. Il faut noter que la capacité de cellule pour les VE et les VEHs peut être différente, elle varie en fonction de la structure du pack comme ce qui est indiqué dans le Tableau 5.

Contexte	VE	VEH rechargeable	VEH non rechargeable
Plage de courant	$\pm 5C$	$\pm 10C$	$\pm 40C$
Plage de SoC	Importante (ex, 95% ~ 20%)	Importante (ex, 90% ~ 25%)	Faible (ex, 60% ~ 40%)
Plage de température ambiante	- 30 °C ~ 60 °C	- 30 °C ~ 60 °C	- 30 °C ~ 60 °C

Tableau 6 : Périmètres typiques de fonctionnement des cellules de batteries dans les VE et les VEHs [12][18][19]

Pendant le roulage, le profil de sollicitation (en puissance ou en courant) du pack de batteries est caractérisé par des impulsions de décharge et de charge. La Figure 13 représente une comparaison des profils de sollicitation des packs de batteries d'un VE et d'un VEH pour le profil de roulage FTP-75 (Federal Test Procedure). Ces profils sont obtenus sur le simulateur VEHLIB [20] de véhicules électrifiés de l'IFSTTAR. Le simulateur a été configuré en deux modes :

- mode VE pour un véhicule ayant une masse de 1600 kg avec un pack de batteries NiMH de 39 Ah,
- mode VEH non rechargeable pour un véhicule hybride parallèle présentant une masse de 1360 kg avec un pack de batteries NiMH de 6.5 Ah.

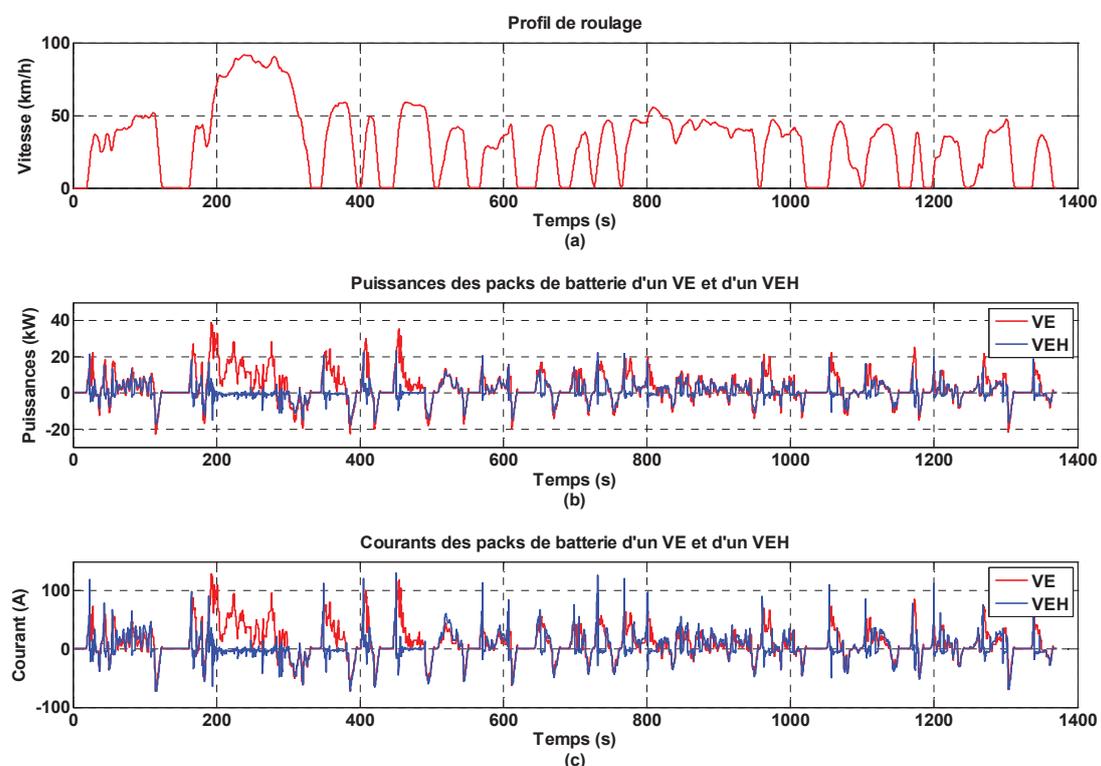


Figure 13 : Comparaison des profils de puissance et de courant des packs de batteries d'un véhicule électrique et d'un véhicule électrique hybride pour le profil de roulage FTP75

Un zoom sur une fenêtre temporelle entre 1330 s et 1370 s (cf. Figure 14) permet de révéler la différence de sollicitation entre un VE et un VEH pour un même profil de roulage :

- le pack de batterie du VE fournit de l'énergie pendant toute la phase d'accélération et récupère de l'énergie pendant la phase de décélération,
- le pack de batterie du VEH fournit de l'énergie seulement pendant le début de la phase d'accélération et récupère de l'énergie pendant la phase où l'accélération diminue et la phase de décélération.

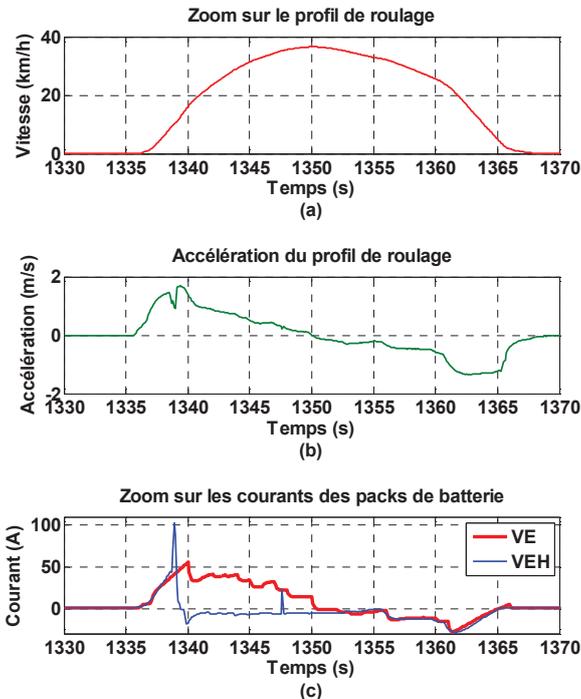


Figure 14 : Etude des courants de VE et de VEH sur une fenêtre temporelle de la Figure 13

1.3. Accumulateurs lithium-ion (Li-ion)

1.3.1. Principe de fonctionnement

Dans un accumulateur Li-ion, le lithium reste à l'état ionique dans tous les composants de la cellule. Le principe de fonctionnement des accumulateurs lithium-ion repose sur le transport des charges à l'intérieur de la batterie qui se fait par l'intermédiaire des ions lithium Li^+ (cf. Figure 15). Pendant la décharge, les ions lithium se désinsèrent de l'électrode négative, puis migrent à travers l'électrolyte et le séparateur pour s'insérer dans l'électrode positive ; pendant la charge, les ions lithium prennent le trajet inverse, ils se désinsèrent de l'électrode positive pour s'insérer dans l'électrode négative. Le passage de chaque ion lithium est compensé par le passage d'un électron dans le circuit extérieur. L'insertion et la désinsertion réversible des ions lithium de deux électrodes rendent viables les accumulateurs Li-ion.

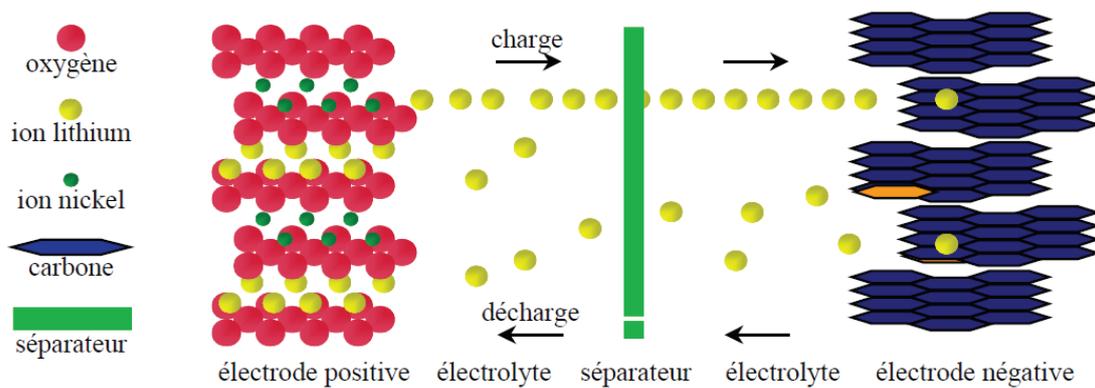


Figure 15 : Transport des ions à l'intérieur d'un accumulateur Li-ion [21]

(a). Electrodes négatives

L'électrode négative des accumulateurs lithium-ion est aujourd'hui à base de carbone lithié ou de composés de métaux de transition (par ex, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), dans lesquelles l'insertion des ions lithium dans l'électrode négative se traduit par une ionisation partielle des atomes de lithium, d'où l'appellation lithium-ion. Or, quand les premiers accumulateurs au lithium apparaissaient dans les années 1960, c'était le lithium métallique qui est utilisé comme électrode négative [3]. Liées à la réactivité du lithium métallique vis-à-vis de l'électrolyte, ces batteries souffrent de deux principaux problèmes :

- Formation d'une couche de passivation pendant chaque charge qui réduit la capacité de la batterie. Durant chaque charge, le lithium électro-déposé sur l'électrode négative est non homogène et sous forme des grains de métal. Ces grains de métal réagissent avec l'électrolyte pour former une couche de sel passivant qui rend inactif une partie du lithium métal. Comme la formation d'une couche de passivation a lieu pendant chaque charge, la capacité de l'électrode décroît rapidement [22]. Afin d'avoir une durée de vie acceptable, on est obligé d'injecter un excès important de lithium (par exemple, 4 à 5 fois la quantité requise [3]) pour compenser la quantité de lithium métal rendu inactif durant chaque charge.
- Développement de dendrites de lithium qui peut finir par provoquer un court-circuit local entre deux électrodes. Le dépôt non-homogène du lithium sur l'électrode négative provoque aussi le développement de dendrites de lithium comme représenté sur la Figure 16. La croissance des dendrites peut finir par percer le séparateur et toucher l'électrode positive, provoquant un court-circuit local qui n'est pas immédiatement dangereux, parce que la dendrite s'autodétruit par fusion. Cependant, un courant de fuite permanent pendant la charge peut être vu quand il y a une multitude de micro-dendrites.

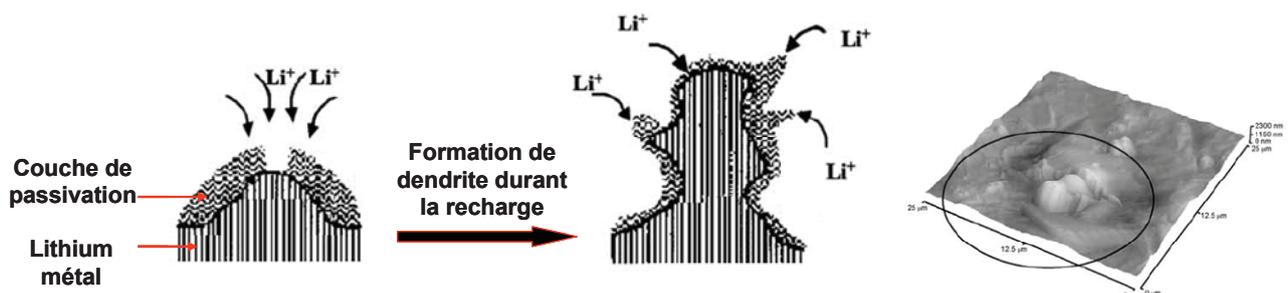


Figure 16 : Formation de dendrites durant la charge (schéma simplifié selon [23])

Afin de s'affranchir de ces problèmes, deux solutions ont été proposées. La première solution consiste à remplacer le lithium métallique par un matériau anodique dont le potentiel est voisin de celui du lithium. Le Tableau 7 donne une liste non-exhaustive des matériaux anodiques possibles. Le lithium est aussi ajouté dans ce tableau afin d'avoir une comparaison avec les autres matériaux anodiques. La deuxième solution consiste à utiliser un nouveau type d'électrolyte polymère qui sera détaillé plus loin dans ce paragraphe.

Matériau	Potentiel par rapport au lithium (V)	Capacité spécifique théorique (Ah/g)
Li-Al	0.2	0.800
Li _{0.5} C ₅ (coke)	0.2~1.3	0.185
LiC ₆ (graphite)	0.02~0.3	0.372
LiWO ₂	0.3~1.4	0.120
LiMoO ₂	0.8~1.4	0.199
LiTiS ₂	1.5~2.7	0.226
Li	0	3.860

Tableau 7 : Liste non exhaustive des matériaux anodiques pour l'électrode négative [3]

Parmi les matériaux anodiques, le graphite est le matériau le plus utilisé pour l'électrode négative des batteries Li-ion aujourd'hui. A température ambiante, le graphite est capable d'accueillir de façon réversible jusqu'à un atome de lithium pour 6 atomes de carbone. Les ions lithium sont insérés entre les plans adjacents de carbone comme représenté sur la Figure 17.

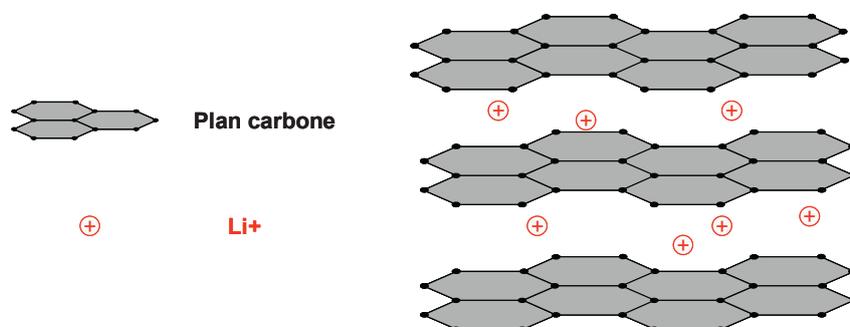


Figure 17 : Ions lithium dans la structure de graphite

La réaction d'insertion et de désinsertion des ions lithium dans le graphite peut s'exprimer comme ci-dessous selon [3] :



Durant la première charge, une partie du lithium est consommée de façon irréversible. Cette partie de lithium consommée crée un film de passivation à la surface de l'électrode qui empêche la réaction ultérieure de l'électrolyte avec le lithium. Ce film de passivation reste stable et constitue un bon conducteur ionique. Ce film est souvent appelé SEI (Solid Electrolyte Interface).

(b). Electrodes positives

Les accumulateurs lithium-ion sont généralement désignés par leur composition de l'électrode positive (cathode), bien que la composition de l'électrode négative (anode) puisse aussi être un facteur de distinction. Un grand nombre de matériaux d'insertion cathodiques ont été proposés comme candidats pour l'électrode positive, le Tableau 8 donne une liste non-exhaustive des matériaux possibles.

Matériau	Potentiel par rapport au lithium (V)	Capacité spécifique théorique (Ah/g)
MoS ₂	1.8	0.134
TiS ₂	2.1	0.239
MnO ₂	3.0	0.154
V ₆ O ₁₃	2.4	0.188
V ₂ O ₅	2.8	0.147
LiV ₃ O ₈	2.8	-
Polyacétyle	3.2	-
Polypyrole	3.2	-
LiCoO ₂ (LCO)	3.7	0.180
LiNiO ₂	3.5	0.220
LiMn ₂ O ₄	3.8	0.140
LiFePO ₄ (LFP)	3.3~3.4	0.100~0.150
Li(Ni _{1/3} Co _{1/3} Mn _{1/3})O ₂ (NCM)	3.7~3.8	0.150~0.160
Li(Al _{0.06} Co _{0.16} Ni _{0.8})O ₂ (NCA)	3.6	0.265
LiMnO ₂ (LMS)	3.0~4.9	0.100~0.210

Tableau 8 : Liste non exhaustive des matériaux cathodiques pour l'électrode positive [3][7][12][24][25][26]

La réaction de l'insertion et de la désinsertion des ions lithium dans l'électrode positive peut s'exprimer comme ci-dessous selon [3] :



où le terme A_xB_y représente les composés du Tableau 8.

(c). Electrolyte [3][27][28]

L'électrolyte sert de conducteur ionique qui permet la migration des ions lithium entre l'électrode positive et négative. Aujourd'hui, on utilise les électrolytes sous deux principales formes :

- **Electrolyte liquide** : il est composé d'un solvant (par exemple, carbonates d'alkyles) dans lequel est ajouté du sel de lithium (par exemple, LiPF_6 et LiPF_4).
- **Electrolyte polymère** : il s'agit d'incorporer le sel de lithium dans des matrices polymères. On peut classer les électrolytes polymères sous deux catégories :
 - o **Electrolyte polymère gélifié ou plastifié** : il consiste à associer une membrane polymère à un solvant liquide ; l'électrolyte de ce type constitue un gel.
 - o **Electrolyte polymère solide sec** : il ne contient pas de solvant liquide et la mobilité des ions lithium est assurée par la chaîne polymérique. L'intérêt principal de cet électrolyte est de pouvoir utiliser le lithium métallique comme électrode négative, ce qui permet d'avoir une capacité spécifique plus élevée qu'avec les autres matériaux anodiques comme indiqué dans le Tableau 7. L'inconvénient est que cet électrolyte doit fonctionner à une température élevée (par exemple, entre 80 et 90 °C pour la batterie lithium métallique polymère développée par la compagnie Batscap). En effet à température ambiante, la conductivité de cet électrolyte est de l'ordre de 10^{-8} S/cm, ce qui est très inférieure à la valeur requise de 10^{-3} S/cm [3]. La Figure 18 présente un exemple d'une batterie avec l'électrolyte polymère solide sec.

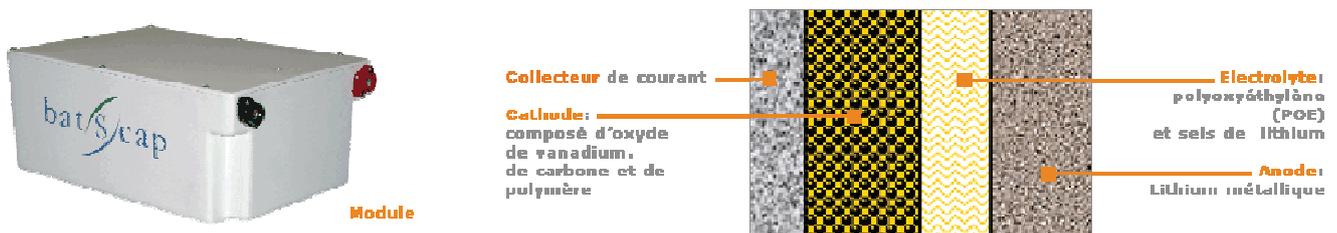


Figure 18 : Batterie lithium métal polymère de la compagnie Batscap [28]

(d). Séparateur [8]

Le séparateur sert d'isolant électronique entre l'électrode positive et négative. Il doit être poreux pour que les ions lithium arrivent à le traverser. Outre la fonctionnalité d'isolation des électrodes, le séparateur peut aussi assurer la sécurité de l'accumulateur. Aujourd'hui, les séparateurs pour les accumulateurs Li-ion sont souvent fabriqués à partir de films fins de polyéthylène (PE) ou de polypropylène (PP) avec 50% de porosité. Lorsque la température de l'accumulateur est trop élevée et dépasse le point de fusion du matériau du séparateur, ses pores se ferment, ce qui empêche la migration des ions lithium et donc stoppe le courant.

1.3.2. Accumulateurs Li-ion du marché

La Figure 19 et le Tableau 9 donnent quelques exemples de batteries Li-ion commercialisées qui montrent la diversité des caractéristiques en fonction de différentes technologies.

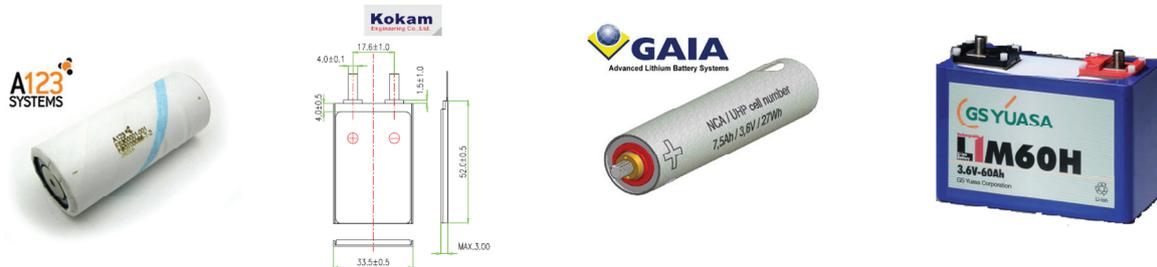


Figure 19 : Photos de quelques batteries Li-ion commercialisées

Marque	A123	Kokam	GAIA	GS Yuasa
Technologie (cf. Tableau 8)	LFP	NCM	NCA	LMS
Packaging	Cylindrique	Prismatique	Cylindrique	Prismatique
Capacité nominale (Ah)	2.3	12	7.5	60
Tension nominale (V)	3.3	3.7	3.6	3.6
Courant de décharge maximal en continu	70 A (30.4C)	60 A (5C)	150 A (20C)	600 A (10C)
Courant de décharge maximal en impulsion	120 A (52.2C)	240 A (20C)	300A (40C)	-
Courant de charge maximal en continu	10 A (4.3C)	36 A (3C)	120 A (16C)	600 A (10C)
Température d'opération (°C)	-30 ~ 60 °C	-20 ~ 60 °C	-30 ~ 60 °C	-20 ~ 60 °C
Durée de vie en cyclage	> 1000	> 500	> 1000	-
Masse (g)	70	354	320	4000
Puissance spécifique calculée (W/kg) (*)	5657	2508	3375	-
Energie massique calculée (Wh/kg) (**)	108	125	84	54

Tableau 9 : Exemples de batteries Li-ion commercialisées [29][30][31][32][33]

$$(*) \text{ Puissance spécifique} = \frac{\text{Tension nominale} \times \text{Courant de décharge maximal en impulsion}}{\text{Masse}}$$

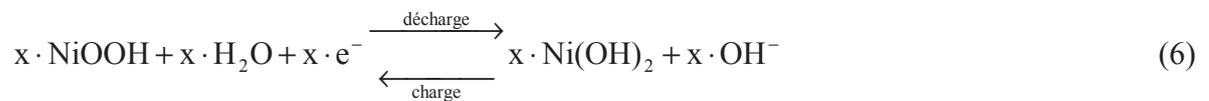
$$(**) \text{ Energie massique} = \frac{\text{Tension nominale} \times \text{Capacité nominale}}{\text{Masse}}$$

1.4. Accumulateurs NiMH

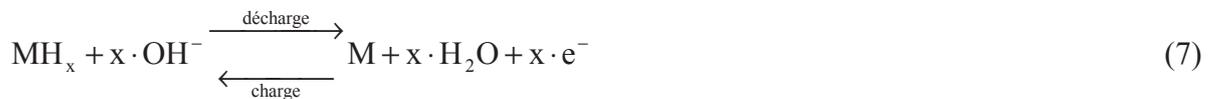
1.4.1. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement [34][35][36][37] d'un accumulateur nickel-hydrure métallique (NiMH) est basé sur le transport de charges à l'intérieur de la batterie qui se fait par l'intermédiaire des ions hydroxyde (OH^-).

L'électrode positive d'accumulateur NiMH est à base d'oxyhydroxyde de nickel (NiOOH). La réaction pendant la décharge et la charge de l'électrode positive peut s'écrire :



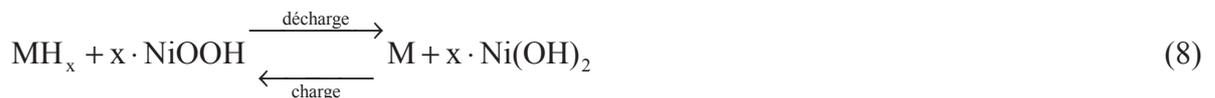
L'électrode négative est composée d'un alliage métallique de type AB_x . On peut classer les alliages métalliques en deux classes : AB_5 (par ex. LaNi_5) et AB_2 (par ex. ZrNi_2) qui sont tous capables d'absorber l'hydrogène suite à la formation d'hydrures métalliques durant la charge de la batterie. La réaction pendant la décharge et la charge de l'électrode négative peut s'exprimer ainsi :



où M représente l'alliage métallique de l'électrode négative et MH_x représente l'hydrure métallique (par ex. LaNi_5H_6).

L'électrolyte est une solution aqueuse de potasse (KOH) qui assure le transfert des ions OH^- entre les deux électrodes.

L'ensemble des réactions ci-dessus pendant la décharge et la charge à l'intérieur de l'accumulateur s'écrit :



1.4.2. Accumulateurs NiMH du marché

La Figure 20 et le Tableau 10 donnent quelques exemples de batteries NiMH commercialisées.



Figure 20 : Photos de quelques batteries NiMH commercialisées

Marque	Saft	Panasonic	Sanyo
Packaging	Cylindrique	Cylindrique	Cylindrique
Capacité nominale (Ah)	3.5	6.5	2.1
Tension nominale (V)	1.2	1.2	1.2
Courant de décharge maximal en continu	40 A (26.7C)	32.5 A (5C)	30 A (14.3C)
Courant de décharge maximal en impulsion	150 A (42.9C)	-	-
Courant de charge maximal en continu	3 A (0.9C)	6.5 A (1C)	2.1 A (1C)
Température d'opération (°C)	-10 ~ 40 °C	-10 ~ 65 °C	0 ~ 50 °C
Durée de vie en cyclage	-	-	-
Masse (g)	59	170	47
Puissance spécifique calculée (W/kg)	814	229	766
Energie massique calculée (Wh/kg)	71	46	54

Tableau 10 : Exemples de batteries NiMH commercialisées [38] [39] [40]

1.5. Conclusion

Pour les VEs et VEHS, les batteries Li-ion et NiMH sont aujourd'hui les deux technologies les plus utilisées. Après une introduction des notions concernant l'accumulateur, on a présenté le besoin énergétique dans les véhicules électrifiés. On a vu que pour les VEs ce sont les batteries de haute énergie qui sont préférables afin de garantir une autonomie correcte et pour les VEHS ce sont les batteries de forte puissance qui sont préférables car elles sont capables de fournir ou accepter des puissances importantes pendant la phase d'accélération et celle de freinage. A la fin du chapitre, une présentation détaillée des principes de fonctionnement des accumulateurs Li-ion et NiMH a aussi été exposée.

Chapitre 2 : Etude bibliographique sur la modélisation de batterie

2.1. Description du comportement dynamique de la batterie et des phénomènes électrochimiques associés

Les comportements dynamiques (en temporel et en fréquentiel) de la batterie sont liés étroitement aux phénomènes électrochimiques à l'intérieur de celle-ci. Le but de ce paragraphe est d'établir le lien entre les comportements dynamiques de la batterie et ces phénomènes électrochimiques.

La Figure 21 représente la réponse typique en tension d'une batterie à une sollicitation de courant en créneau. On peut décomposer la réponse de la batterie en plusieurs parties :

- **Saut de tension** : variation quasi instantanée de la tension après un changement du niveau de courant.
- **Régime forcé** : phase où le courant de sollicitation n'est pas nul
- **Relaxation** : phase après un arrêt de sollicitation où le courant de la batterie est nul et la tension tend vers un état d'équilibre. Cet état d'équilibre correspond à la tension à vide de la batterie.

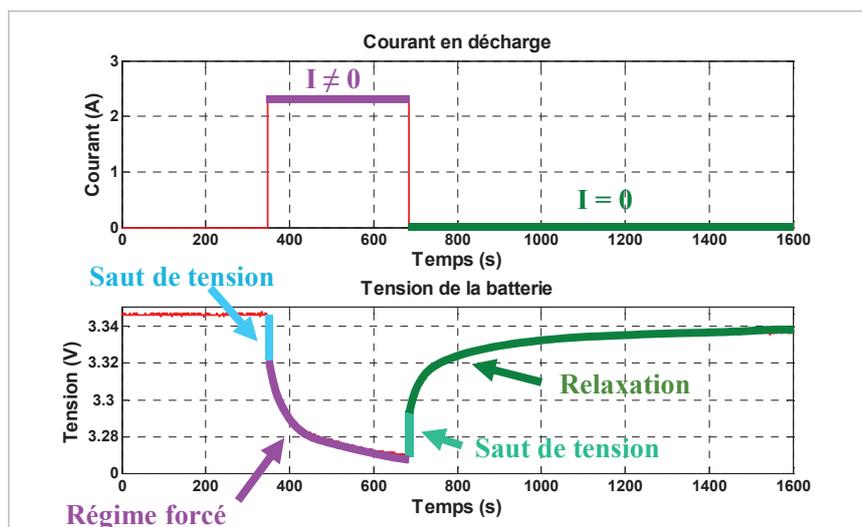


Figure 21 : Réponse en tension d'une batterie à une sollicitation de courant en décharge

Le saut de tension est causé par les chutes de tension de nature purement ohmique dans les résistances liées à la connectique et à l'électrolyte. La résistance de connectique (R_c) provient d'une part des électrodes et d'autre part du raccordement du système électrochimique au montage expérimental. La résistance de l'électrolyte (R_e) est induite par des phénomènes de migration ou mobilité des ions dans l'électrolyte. Le saut de tension peut donc être représenté par une chute de tension sur une résistance R_s dont l'expression est [41][42]:

$$R_s = R_c + R_e = R_c + \frac{l}{K \cdot A} \quad (9)$$

avec :

- K : conductivité de l'électrolyte,
- A : surface moyenne des deux électrodes en regard,
- l : distance moyenne entre les deux électrodes.

Durant la phase du régime forcé et de la relaxation, la dynamique est liée aux surtensions provoquées par les effets de transfert de charges, de double couche et de transfert de matière, qui interviennent à l'intérieur de la batterie.

- **L'effet de transfert de charges** correspond au transfert des électrons à la surface des électrodes. Pour une électrode le courant lié aux flux des électrons est régi par l'équation de Butler-Volmer comme ci-dessous [43] :

$$I = I^0 \cdot \left[\exp^{-\alpha \cdot F \cdot \eta_{tc}} - \exp^{-(1-\alpha) \cdot F \cdot \eta_{tc}} \right] \quad (10)$$

avec :

- F : constante de Faraday
- α : coefficient de transfert de charges
- η_{tc} : surtension de l'électrode
- I^0 : courant d'échange de la réaction à l'électrode considérée

- **L'effet de double couche** correspond à une zone de charge d'espace formée à l'interface entre l'électrode et l'électrolyte. Le comportement électrique de cette zone de charge d'espace peut être assimilé à celui d'un condensateur non linéaire [44]. Différents modèles non linéaires ont été développés pour décrire la double couche, par exemple, ceux de Helmholtz, de Gouy-Chapman et de Stern. L'un des plus simples est le modèle linéaire de Helmholtz dont l'expression est donnée par [41] :

$$C_H = \frac{dq}{d\Delta\Phi} = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{L} \quad (11)$$

avec :

- C_H : capacité surfacique (F/m²) de Helmholtz
- q : densité de charge
- $\Delta\Phi$: différence de potentiel entre l'électrode et l'électrolyte
- ϵ_r : constante diélectrique du milieu
- ϵ_0 : permittivité du vide
- L : distance séparant les charges négatives et les charges positives

- **Les effets de transfert de matière** [43][44][45] concernent le déplacement de matière (dans les batteries cela correspond aux ions) causé par la migration et la diffusion. **La migration** concerne le déplacement dû à l'existence d'un champ électrique à l'intérieur de la batterie. L'expression du flux causé par la migration est donnée par :

$$J_M(x, t) = -\frac{zFD}{RT} C(x, t) \frac{\partial \phi(x)}{\partial x} \quad (12)$$

avec :

- z : charge de l'ion considéré,
- F : constante de Faraday
- D : coefficient de diffusion,
- R : constante universelle des gaz parfaits,
- T : température absolue
- C : concentration de matière,

- t : temps,
- x : direction de diffusion,
- ϕ : potentiel électrostatique.

La diffusion concerne le déplacement de matière causé par l'existence d'un gradient de concentration. La direction du déplacement de matière va des milieux les plus concentrés vers les moins concentrés. L'expression du flux de matière est donnée par la loi de Fick :

$$J_D(x,t) = -D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \tag{13}$$

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}$$

Dans la plupart des cas pour la batterie, la diffusion est le principal responsable du transfert de matière [44]. La Figure 22 schématise la diffusion des ions lithium dans les électrodes durant et après une décharge. Durant la décharge des gradients de concentration apparaissent dans les deux électrodes. La batterie revient à un état d'équilibre pendant la relaxation.

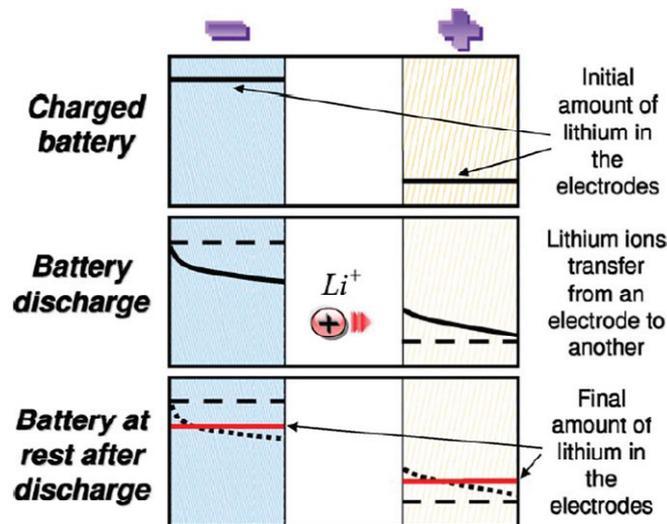


Figure 22 : Diffusion des ions lithium dans les électrodes pendant et après une décharge [46]

A la fin de la relaxation, la tension de la batterie tend vers la tension à vide OCV (Open Circuit Voltage) qui correspond à la différence des potentiels d'équilibre entre les deux électrodes. Le potentiel d'équilibre d'une électrode pour un couple oxydo-réducteur (Ox, Red) suit la loi de Nernst [47] :

$$E_{eq} = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{a_{Ox}}{a_{Red}} \right) \tag{14}$$

avec :

- E° : potentiel standard de l'électrode,
- a_{Ox} : activité de l'espèce oxydante,
- a_{Red} : activité de l'espèce réductrice,
- n : nombre d'électrons dans l'équation (15) qui définit la réaction d'oxydo-réduction :



Il est à noter que la définition de la fin de relaxation a un impact important sur la mesure de l'OCV. La Figure 23 présente les résultats de mesure de l'OCV d'une batterie Li-ion après différentes durées de relaxation et à différents SoCs. Quand la durée de relaxation augmente, la valeur mesurée de l'OCV en décharge augmente et la valeur mesurée de l'OCV en charge diminue. Ceci indique que la tension de la batterie continue à évoluer durant la relaxation. Plus la durée de relaxation est longue, plus la mesure de l'OCV est proche de la réalité. En fait, la tension de la batterie évolue encore au-delà de quelques heures. Dans [74], il est indiqué qu'il faut parfois 24 heures pour que la tension de la batterie se stabilise.

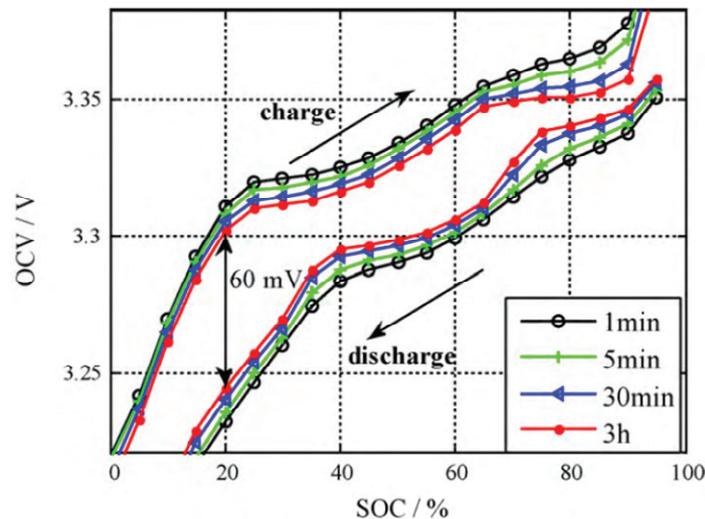


Figure 23 : Mesure de l'OCV d'une batterie Li-ion de technologie LiFePO₄ après différentes durées de relaxation [97]

En plus des effets indiqués précédemment, d'autres effets temporels interviennent aussi dans le comportement de la batterie. Par exemple, les effets très rapides comme les effets électriques et magnétiques (effets de peau, de proximité) qui interviennent en haute fréquence (au-delà de l'ordre du kilohertz) ; les effets à long terme lié au vieillissement. Ces différents effets couvrent une grande plage de temps comme présenté sur la Figure 24.

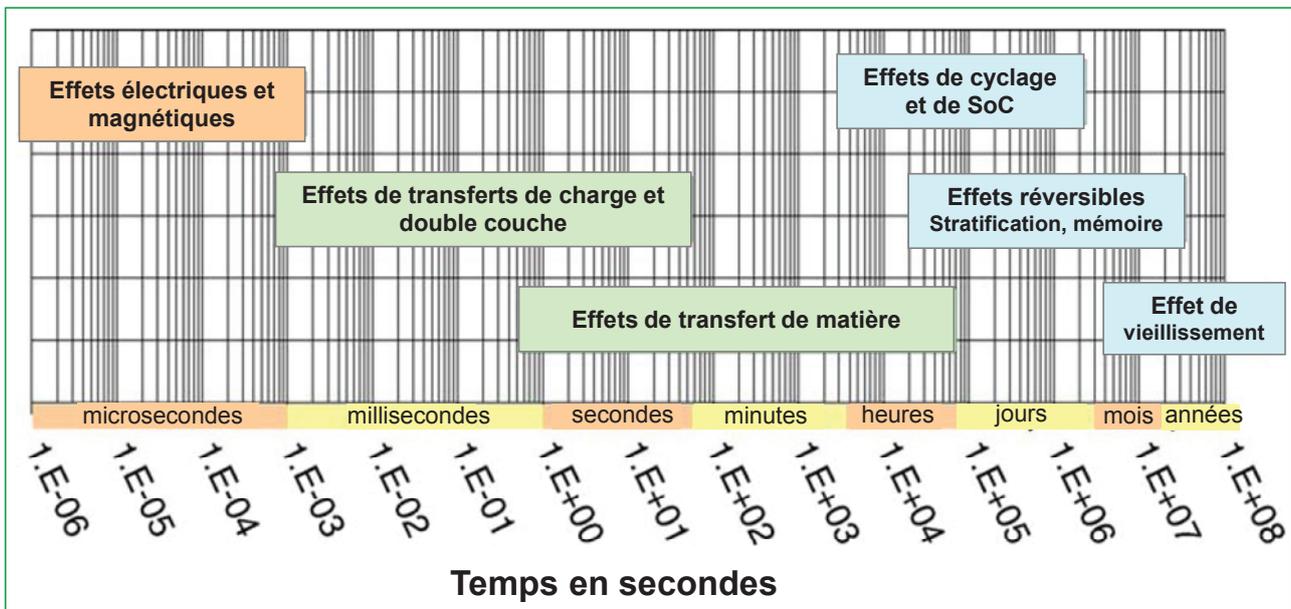


Figure 24 : Ordre de grandeur des plages de temps des effets physiques dans les batteries [44]

Le comportement dynamique en temporel de la batterie est lié étroitement à son impédance interne. En considérant la batterie comme une impédance, on peut tracer son comportement fréquentiel dans le diagramme de Nyquist grâce à l'utilisation par exemple d'un spectromètre d'impédance électrochimique. La spectrométrie d'impédance électrochimique, ou en anglais Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), est une méthode de caractérisation fréquentielle pour étudier les systèmes électrochimiques. C'est une technique de mesure stationnaire qui repose sur la mesure de la réponse électrique de l'interface électrochimique à une faible perturbation sinusoïdale de courant ou de tension pour différentes valeurs de fréquences. La Figure 25 représente le comportement fréquentiel de la batterie dans le diagramme de Nyquist (graphe correspondant à l'opposé de la partie imaginaire de l'impédance $(-Im(Z))$ en fonction de la partie réelle de l'impédance $(Re(Z))$). Sur la Figure 25, le tracé de Nyquist de la batterie peut être décomposé en trois parties :

- partie haute fréquence liée aux effets électriques et magnétiques,
- partie transfert de charges et double couche,
- partie transfert de matière.

Les phénomènes de transfert de charges et de double couche sont plus rapides que le phénomène de transfert de matière. C'est la raison pour laquelle la partie transfert de charges et double couche correspond à une plage de fréquence plus élevée que celle de la partie transfert de matière.

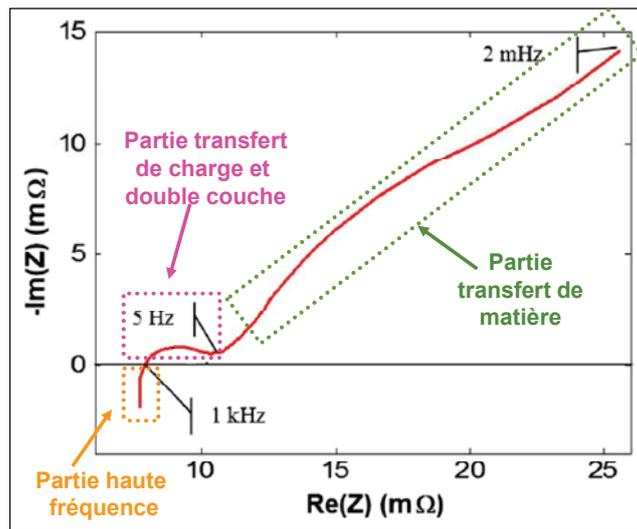


Figure 25 : Exemple de comportement en fréquentiel d'une batterie Li-ion A123 à 50% de SoC et à 25°C dans le diagramme de Nyquist [48]

Pour l'impédance de certaines batteries Li-ion comme par exemple sur la Figure 26, deux demi-cercles peuvent apparaître entre la partie haute fréquence et la partie transfert de matière. Ces deux demi-cercles sont liés à l'interface SEI (Solid Electrolyte Interface) qui est un film de passivation à la surface de l'électrode [50][51]. L'interface SEI donne naissance à deux doubles couches : électrode-SEI et SEI-électrolyte, où ont lieu les effets de transfert de charges et double couche [52].

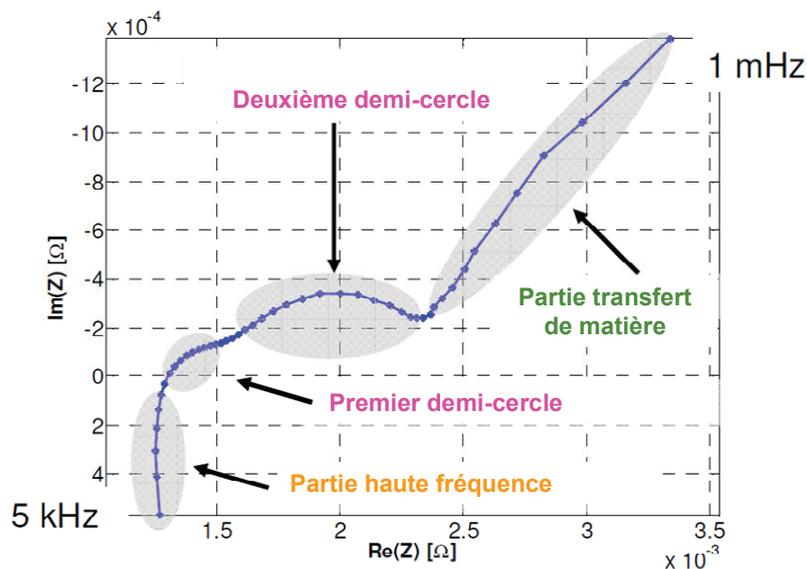
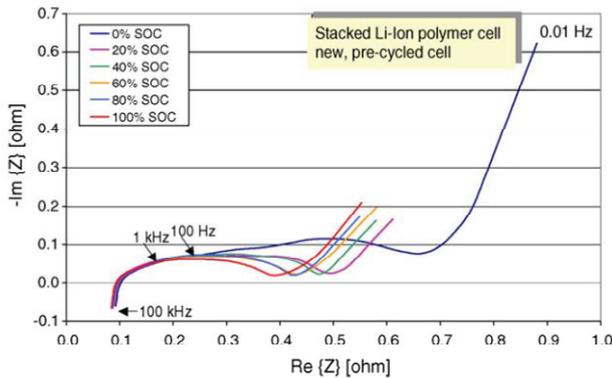


Figure 26 : Exemple de comportement en fréquentiel d'une batterie Li-ion avec l'apparition de deux demi-cercles liés à l'interface SEI (figure retravaillée à partir de [50])

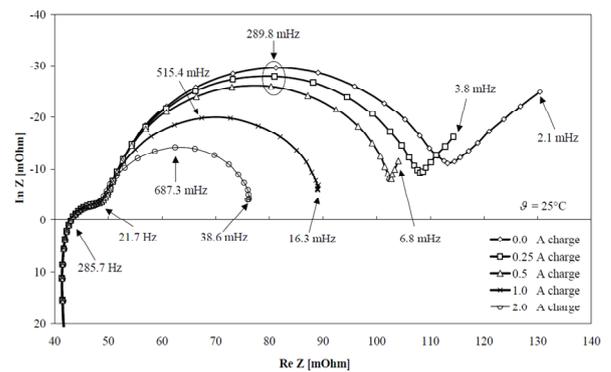
L'impédance d'une batterie varie en fonction de l'état de charge, du courant, de la température et de l'état de santé. La Figure 27 présente 4 exemples de variation de l'impédance des batteries Li-ion en fonction de l'état de charge, du courant, de la température et pendant le vieillissement. Elle montre que :

- le changement de l'état de charge influence principalement le tracé de Nyquist en basse fréquence (< 100 Hz). L'impédance en basse fréquence a tendance à augmenter quand l'état de charge diminue (cf. Figure 27 (a)) ;
- pour un même état de charge, l'impédance a tendance à diminuer quand le courant de polarisation augmente (cf. Figure 27 (b)) ;
- lorsque la température augmente, l'impédance a tendance à diminuer (cf. Figure 27 (c)) ;
- pendant le vieillissement, l'impédance a tendance à augmenter (cf. Figure 27 (d)).

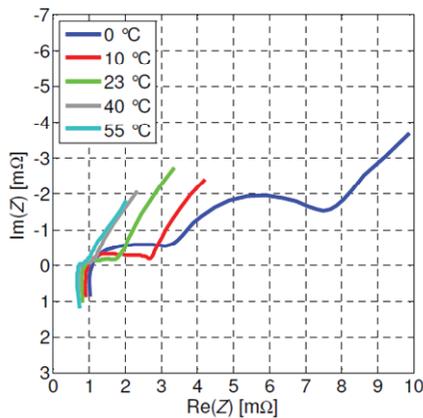
Ces exemples indiquent clairement que la batterie est un système non-linéaire variable dans le temps.



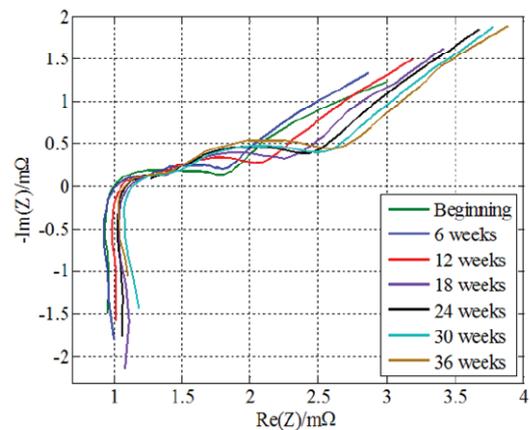
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 27 : Exemples de variation de l'impédance pour 4 différentes batteries Li-ion en fonction de : (a) Etat de charge [44], (b) Courant de polarisation [70], (c) Température [50] et (d) Vieillessement [53]

2.2. Différentes approches de la modélisation de la batterie

Il existe principalement trois types de modèles pour représenter le comportement temporel de la batterie : les modèles électrochimiques, les modèles de type circuit électrique équivalent et les modèles de type boîte noire (par ex. modèles utilisant les réseaux de neurones ou la logique floue). Le but de ce paragraphe est de dresser d'abord un panorama de ces modèles existants et de choisir un type de modèle qui correspond le mieux à nos besoins pour l'étude qui suit.

2.2.1. Modèles électrochimiques

En général, les modèles électrochimiques [54][55][56] sont utilisés pour décrire les phénomènes électrochimiques de chaque composant de la cellule en utilisant les lois électrochimiques correspondantes (cf. paragraphe 2.1). Les modèles électrochimiques sont plutôt complexes à cause de la représentation détaillée des mécanismes chimiques liés à la génération de l'énergie. Ils aboutissent souvent à la résolution d'un système d'équations aux dérivées partielles couplées. La Figure 28 présente un exemple du modèle électrochimique pour une batterie Li-ion [56]. Sur la Figure 28 (a) se trouve la nomenclature utilisée pour le modèle électrochimique. La Figure 28 (b) montre un schéma d'anatomie d'une batterie Li-ion et une synthèse du modèle électrochimique. Avec le courant $i(t)$ comme entrée et la tension de batterie $u_{\text{batt}}(t)$ comme sortie, le modèle est décrit par les équations correspondant à différents phénomènes. Il est à noter que chaque phénomène contient plusieurs équations respectivement pour l'électrode positive ($k = p$), l'électrode négative ($k = n$) et/ou le séparateur ($k = s$). Ainsi, le modèle électrochimique revient à un système complexe de 14 équations à résoudre, dont la plupart sont des équations aux dérivées partielles.

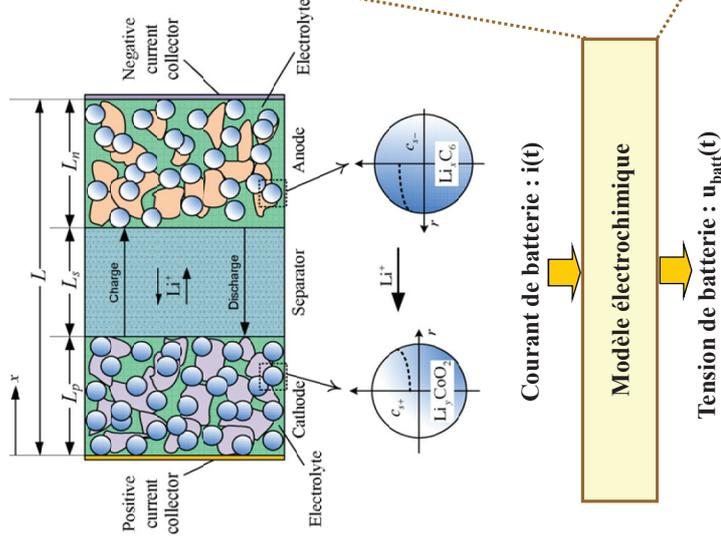
Bien que les modèles électrochimiques soient capables de donner une estimation précise du comportement de la batterie [57][59], leurs complexités les rendent difficilement applicables à la simulation. Ils ne sont donc pas bien adaptés pour élaborer les lois de contrôle et pour les applications en temps réel [58][59]. Par ailleurs, ces modèles nécessitent la connaissance d'un certain nombre de paramètres comme la géométrie des électrodes, la concentration de l'électrolyte, le coefficient de transfert de charges, le coefficient de diffusion difficiles à déterminer. Quand il est possible d'obtenir une estimation raisonnable de certains paramètres dans la littérature, d'autres, en revanche, demandent une investigation expérimentale bien plus approfondie [21] et pas toujours réalisable.

(a) Nomenclature

Nom	Description	Unité	Nom	Description	Unité	Nom	Description	Unité
A	Surface d'électrode	m ²	F	Constante de Faraday	C mol ⁻¹	t ₊	Nombre d'ions transférés dans l'électrolyte	-
a _k	Surface spécifique de l'électrode k (*)	m ² m ⁻³	I	Densité de courant d'entrée	A m ⁻²	t	Temps	s
c _{e,k}	Concentration des ions dans la région k de l'électrolyte	mol m ⁻³	J _k	Flux des ions sur la surface de particule de l'électrode k	mol m ⁻² s ⁻¹	T	Température	K
c _{e,k,max}	Maximale concentration des ions dans l'électrolyte	mol m ⁻³	K _k	Vitesse de la réaction d'intercalation /déintercalation de l'électrode k	mol (mol m ⁻³) ^{-1.5}	U _k	Potentiel à vide de l'électrode k	V
c _{s,k}	Concentration des ions dans le particule de l'électrode k	mol m ⁻³	k _{eff,k}	Conductivité effective des ions dans la région k de l'électrolyte	S m ⁻¹	x	Coordonnée axiale	m
c _{s,k,surf}	Concentration des ions sur la surface de particule de l'électrode k	mol m ⁻³	L	Epaisseur de cathode-séparateur-anode	m	ε _k	Fraction volumique de la région k	-
D _{s,k}	Coefficient de diffusion des ions dans le particule de l'électrode k	m ² s ⁻¹	r	Coordonnée radiale	m	σ _{eff,k}	Conductivité électronique effective de l'électrode k	S m ⁻¹
D _{eff,k}	Coefficient effectif de diffusion dans la région k de l'électrolyte	m ² s ⁻¹	R	Constante universelle des gaz parfaits	J mol ⁻¹ K ⁻¹	Φ _{e,k}	Potentiel de la région k de l'électrolyte	V
						Φ _{s,k}	Potentiel de l'électrode k	V
						η _{s,k}	Sur tension de l'électrode k	V

(*) **k = p pour l'électrode positive, k = n pour l'électrode négative et k = s pour le séparateur.**

(b) Schéma d'une batterie et son modèle



I. A l'entrée du modèle : I = i(t)/A

Phénomène	Equations du modèle électrochimique	Commentaire
Transport des ions en phase solide dans les électrodes	$\frac{\partial c_{s,k}(x,r,t)}{\partial t} = D_{s,k} \frac{\partial}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial c_{s,k}(x,r,t)}{\partial r} \right)$	k = p, n
Transport des ions dans l'électrolyte	$\varepsilon_k \frac{\partial c_{e,k}(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff,k} \frac{\partial c_{e,k}(x,t)}{\partial x} \right) + a_k (1-t_+) J_k(x,t)$	k = p, s, n J _s (x,t) = 0
Potentiel dans les électrodes	$\sigma_{eff,k} \frac{\partial^2 \Phi_{s,k}(x,t)}{\partial x^2} = a_k F J_k(x,t)$	k = p, n
Potentiel dans l'électrolyte	$I = -\sigma_{eff,k} \frac{\partial \Phi_{s,k}(x,t)}{\partial x} - k_{eff,k} \frac{\partial \Phi_{e,k}(x,t)}{\partial x} + \frac{2k_{eff,k} R T}{F} (1-t_+) \frac{\partial \ln c_{e,k}(x,t)}{\partial x}$	k = p, s, n $\frac{\partial \Phi_{s,s}(x,t)}{\partial x} = 0$
Sur tension des électrodes	$\eta_{s,k}(x,t) = \Phi_{s,k}(x,t) - \Phi_{e,k}(x,t) - U_k(c_{s,k}(x,t))$	k = p, n
Cinétique Butler-Volmer	$J_k(x,t) = K_k (c_{e,k,max} - c_{s,k,surf})^{0.5} (c_{e,k,surf})^{0.5} c_{e,k}(x,t) \left(e^{\frac{0.5F}{RT} \eta_{s,k}(x,t)} - e^{-\frac{0.5F}{RT} \eta_{s,k}(x,t)} \right)$	k = p, n

Pour chaque phénomène, le nombre d'équation est déterminé par le nombre de matériaux actifs k. **Le système se compose de 14 équations** avec 14 variables inconnues : c_{s,p}, c_{s,n}, c_{e,p}, c_{e,s}, c_{e,n}, Φ_{s,p}, Φ_{s,n}, Φ_{e,p}, Φ_{e,s}, Φ_{e,n}, U_p, U_n, J_p et J_n.

II. A la sortie du modèle : u_{batt}(t) = Φ_{s,p}(0,t) - Φ_{s,n}(L,t)

2.2.2. Modèles de type boîte noire

Les modèles de type boîte noire [61][62] sont issus de l'utilisation de modèles par apprentissage (par exemple grâce à l'emploi de réseaux de neurones ou de la logique floue) pour estimer le comportement de la batterie. Contrairement aux modèles électrochimiques, la connaissance des phénomènes électrochimiques n'est pas nécessaire. Par contre, une phase d'apprentissage avec des données réelles de la batterie (courant, tension, SoC, température) est nécessaire pour les entraîner. Ces modèles sont capables de donner une estimation sur les comportements de la batterie selon leurs « expériences » obtenues durant la phase d'apprentissage. La précision de ces modèles est influencée de manière significative par les données d'entraînement et la méthode d'entraînement [78]. Les modèles de type boîte noire sont principalement utilisés pour l'estimation des paramètres SoC et SoH. Il y a peu d'articles dans la littérature [61] concernant l'estimation du comportement dynamique de la batterie. Ces modèles ne sont pas retenus pour la suite de ce travail car ils ne sont pas les plus adaptés pour estimer le comportement dynamique de la batterie.

2.2.3. Modèles de type circuit électrique équivalent

Grâce à l'analogie entre les domaines de l'électrochimie et celui de l'électricité, les différents phénomènes électrochimiques peuvent être représentés en utilisant des combinaisons de composants électriques. Par exemple, le comportement électrique des électrodes poreuses d'une cellule peut être représenté par les combinaisons des résistances et condensateurs comme sur la Figure 29.

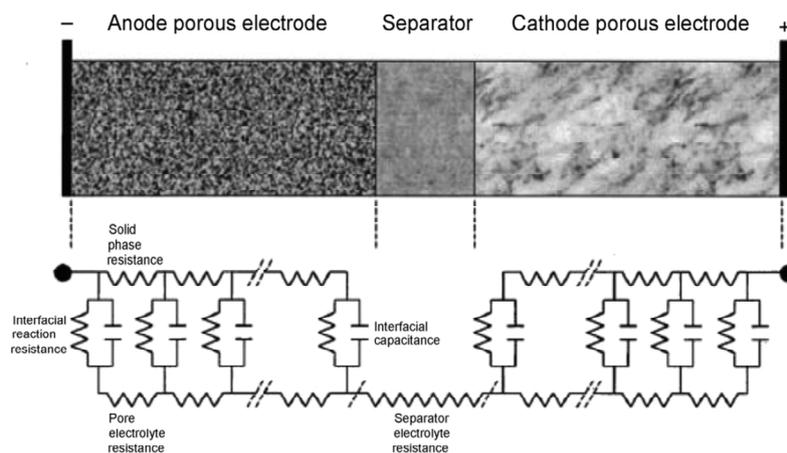


Figure 29 : Schéma circuit électrique équivalent à deux électrodes poreuses d'une cellule Li-ion [63]

Basés sur l'analogie entre l'électrochimie et l'électricité et afin de séparer différents phénomènes électrochimiques, de nombreux modèles ont été proposés dans lesquels chaque élément électrique est corrélé à un phénomène électrochimique. La Figure 30 montre un tel exemple. Dans ce circuit, différents phénomènes sont représentés pour chaque électrode. L'effet

électrique et magnétique en haute fréquence est représenté par une inductance (L_n et L_p). Le phénomène purement ohmique est traduit par une résistance ($R_{c,n}$ et $R_{c,p}$). Le potentiel d'électrode est décrit par une source de tension parfaite ($E_{eq,n}$ et $E_{eq,p}$). Les effets de transfert de charges et double couche sont respectivement représentés par une résistance ($R_{t,n}$ et $R_{t,p}$) et un condensateur ($C_{dc,n}$ et $C_{dc,p}$). Enfin, l'effet de transport de matière est représenté par deux impédances de diffusion ($Z_{o,n}$, $Z_{r,n}$ et $Z_{o,p}$, $Z_{r,p}$). Pour l'électrolyte, son comportement ohmique est représenté par une résistance (R_e).

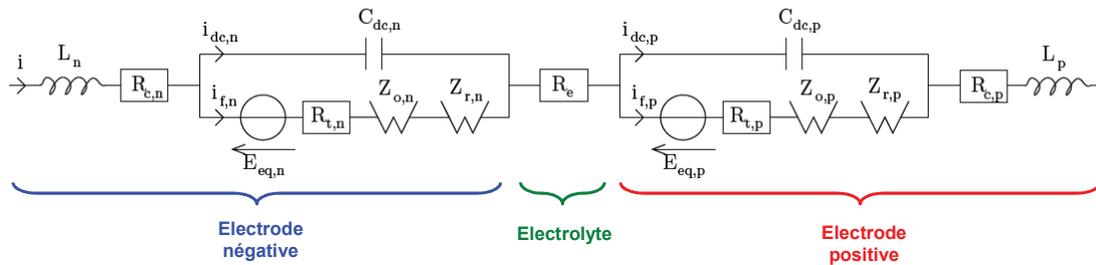


Figure 30 : Modèle de circuit électrique équivalent d'une cellule [65]

Une simplification du circuit de la Figure 30 est souvent opérée pour faciliter son utilisation et son identification. En général, les circuits simplifiés proposés dans la littérature peuvent être résumés sous forme d'un modèle générique comme représenté sur la Figure 31. Dans ce modèle, une source de tension (OCV) représente la tension d'équilibre de la cellule. Une inductance (L) traduit le comportement en haute fréquence de la cellule. Une résistance (R_s) regroupe les phénomènes purement ohmiques des connectiques et de l'électrolyte. Une impédance (Z_{tc_dc}) modélise les effets de transfert de charges et de double couche. Enfin, une impédance (Z_{tm}) représente l'effet de transport de matière. Tous les composants du circuit (OCV, L , R_s , Z_{tc_dc} , Z_{tm}) peuvent varier en fonction de l'état de charge, du courant, de la température et de l'état de santé de la cellule considérée. Comme différents effets électrochimiques sont pris en compte dans le modèle générique, le domaine de validité du modèle couvre une large plage temporelle. Dans la pratique, il est possible de ne s'intéresser qu'aux comportements dynamiques d'une plage limitée temporellement. Dans ce cas, on peut encore simplifier le modèle en négligeant les composants qui sont en dehors de la plage étudiée.

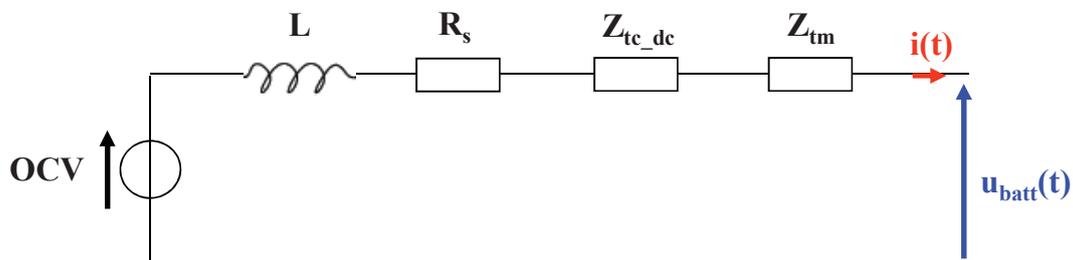


Figure 31 : Modèle générique de circuit électrique équivalent simplifié d'une cellule

En fonction de la représentation de Z_{tc_dc} et Z_{tm} , on peut classer les modèles de type circuit électrique dans la littérature en deux familles :

- les modèles adaptés à une approche fréquentielle qui comportent non seulement les éléments conventionnels comme des sources de tension, des inductances, des résistances et des

condensateurs, mais aussi des éléments non conventionnels comme des impédances CPE, et que nous désignerons par "**modèles à CPE**";

- les modèles adaptés à une approche temporelle qui ne comportent que des éléments conventionnels et que nous désignerons par "**modèles de Thévenin**".

(a) Modèles à CPE :

Les modèles à CPE peuvent être utilisés pour représenter au mieux le tracé de Nyquist de la batterie. La Figure 32 résume les éléments possibles dans les modèles à CPE ainsi que leurs comportements dans le diagramme de Nyquist :

- Une impédance CPE, ou « Constant Phase Element » en anglais, est une impédance d'ordre non entier avec un ordre compris entre 0 et 1. Sa définition est donnée sur la Figure 32. Dans le diagramme de Nyquist, l'impédance CPE est une pente passant par l'origine avec un angle θ par rapport à l'axe des réels $\text{Re}(Z)$. Quand l'exposant α varie entre 0 et 1, l'angle θ de la pente varie entre 0° et 90° . Il faut noter que, lorsque l'exposant α vaut 0, l'impédance CPE est similaire à une résistance. Lorsque l'exposant α vaut 1, l'impédance CPE est équivalente à une capacité dont le tracé devient une demi-droite verticale passant par l'origine dans le diagramme de Nyquist (partie imaginaire négative). Lorsque l'exposant α vaut 0.5, l'angle θ est égal à 45° . Dans ce cas, l'impédance CPE est appelée l'impédance complexe de Warburg dont l'expression est exprimée par :

$$Z_w = \frac{1}{Q\sqrt{j\omega}} = \sigma_w \frac{1-j}{\sqrt{\omega}} \quad (16)$$

avec :

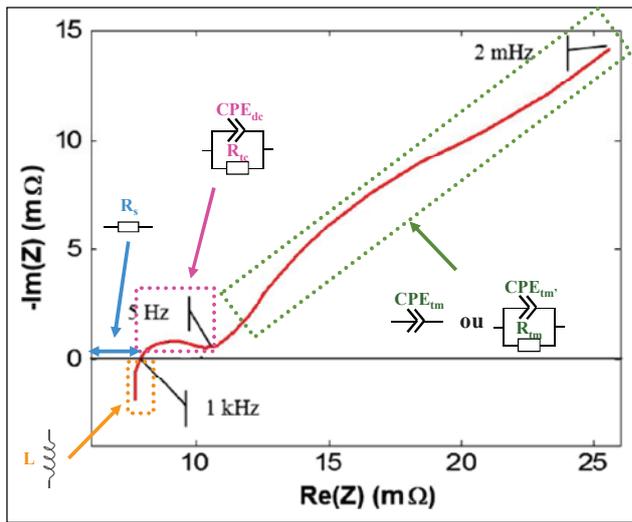
Q et σ_w : coefficients de Warburg (valeur réelle).

- Un circuit de Zarc [68] est un circuit contenant une impédance CPE en parallèle avec une résistance. Dans le diagramme de Nyquist, le comportement fréquentiel d'un circuit de Zarc se traduit par un demi-cercle plus ou moins déformé en fonction de la valeur α comme montré sur la Figure 32. Il est à noter que quand $\alpha = 1$, le CPE devient une capacité et le circuit de Zarc devient ainsi un circuit de R//C.
- Une résistance R correspond à un point sur l'axe réel dans le diagramme de Nyquist.
- Une inductance L correspond à une demi-droite verticale passant par l'origine dans le diagramme de Nyquist (partie imaginaire positive).

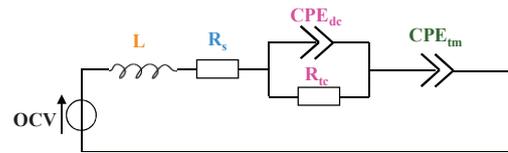
Elément	Symbole	Expression	Dans le diagramme de Nyquist
CPE		$CPE = \frac{1}{Q \cdot (j\omega)^\alpha}$ avec $\alpha \in (0,1)$ ω en rad/s	<p>Cas particulier de CPE :</p> <ul style="list-style-type: none"> $\alpha = 1, \theta = 90^\circ$ CPE \rightarrow C $\alpha = 0, \theta = 0^\circ$ CPE \rightarrow R $\alpha = 0.5, \theta = 45^\circ$ CPE \rightarrow Warburg
Zarc		$\frac{R}{1 + (j\omega)^\alpha RQ}$	
Résistance		R	
Inductance		L	

Figure 32 : Composants utilisés dans les modèles à CPE

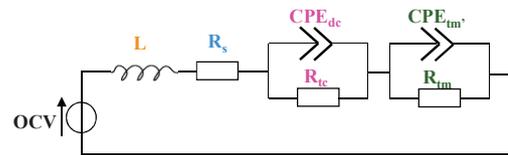
Grâce aux éléments de la Figure 32, les différentes parties d'un tracé de Nyquist d'une batterie peuvent être représentées comme illustré sur la Figure 33 (a). Il est à noter que deux éléments sont envisageables pour représenter la partie de transfert de matière : une impédance CPE ou un circuit de Zarc [68] qui contient une impédance CPE en parallèle avec une résistance. En utilisant l'un ou l'autre des éléments pour la partie transfert de matière, on aboutit à deux structures génériques des modèles à CPE utilisés dans la littérature (cf. Figure 33 (b) et (c)).



(a)



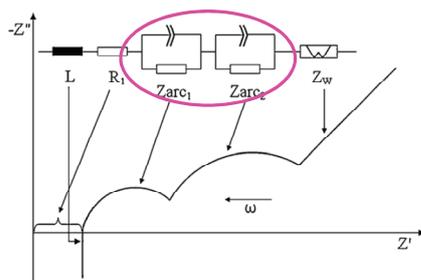
(b)



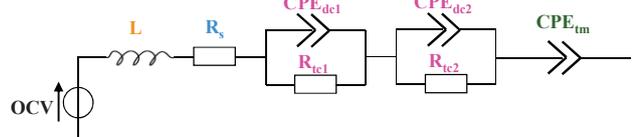
(c)

Figure 33 : (a) Eléments possibles pour représenter différentes parties du tracé de Nyquist d'une batterie Li-ion sur la Figure 25 (b) structure du modèle utilisé dans [41]~[43], [47]~[49], [67] (c) structure du modèle utilisé dans [64][66]

Dans le cas où deux demi-cercles liés à l'interface SEI sont apparus dans le tracé de Nyquist, deux circuits de Zarc peuvent être utilisés pour représenter les deux demi-cercles (cf. Figure 34 (a)). On aboutit alors au modèle illustré sur la Figure 34 (b). Il est à noter que, dans la littérature, la valeur de l'impédance à l'intersection entre le tracé de Nyquist et l'axe réel est souvent considérée comme la valeur de la résistance R_s [49][64][68]. Cependant, la présence d'une inductance en série dans le modèle de la batterie déforme la courbe du tracé de Nyquist. Dans ce cas, l'intersection avec l'axe réel surestime la résistance R_s comme illustré sur la Figure 35.



(a)



(b)

Figure 34 : (a) Un exemple de représentation de l'impédance de la batterie pour le cas où deux demi-cercles liés à l'interface SEI sont apparus dans le tracé de Nyquist [68] (b) Structure du modèle utilisée dans [68][69][70]

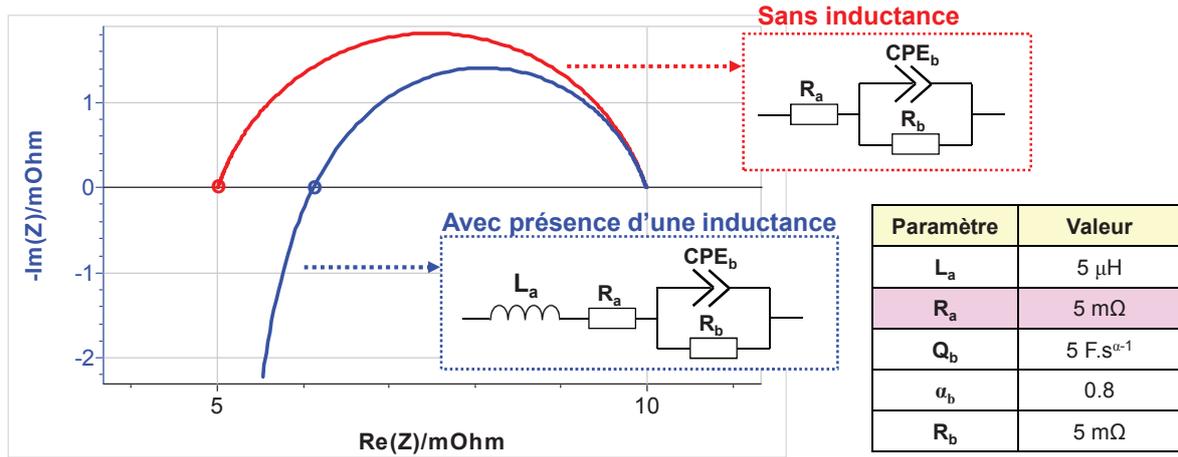


Figure 35 : Influence de l'inductance sur l'intersection avec l'axe réel dans le tracé de Nyquist (Simulation effectuée à l'aide du logiciel EC-Lab de Biologic [89])

Les modèles à CPE ne peuvent pas être simulés facilement en temporel à cause du fait qu'ils contiennent un composant non conventionnel, à savoir un CPE. Afin de s'affranchir de cet inconvénient, différentes méthodes d'approximation de l'élément CPE par des circuits avec résistances et condensateurs sont proposées dans la littérature :

- **Dans** [42], le composant CPE est approximé par une impédance de Warburg en tangente hyperbolique dont l'expression est :

$$Z_w(j\omega) = \frac{a_2}{\sqrt{j\omega}} \tanh\left(\frac{a_1}{a_2} \sqrt{j\omega}\right) \quad (17)$$

avec a_1 et a_2 deux valeurs constantes. Ensuite, deux structures de circuits R et C (nommées respectivement Foster et Caer) sont utilisées pour approximer l'impédance comme illustrées sur la Figure 36. L'expression de la structure de Foster est donnée par :

$$Z_F(j\omega) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{R_k}{1 + j\omega R_k C_k} \quad (18)$$

avec $R_k = \frac{8a_1}{(2k-1)^2 \pi^2}$ et $C_k = \frac{a_1}{2a_2^2}$ d'où leurs constantes de temps $\tau_k = \frac{8a_1^2}{2a_2^2 (2k-1)^2 \pi^2}$.

L'expression de la structure de Caer est donnée par :

$$Z_C(j\omega) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_n}{1 + j\omega R_n C_n} \quad (19)$$

avec $R_n = \frac{a_1}{4n-3}$ et $C_n = \frac{a_1}{a_2^2 (4n-1)}$ d'où leurs constantes de temps $\tau_n = \frac{a_1^2}{a_2^2 (4n-1)(4n-3)}$.

Si l'on calcule le rapport (γ) entre deux constantes de temps pour chacune des structures, comme dans les équations (20) et (21), les rapports ne sont pas constants pour les deux structures.

$$\gamma_k = \frac{\tau_k}{\tau_{k+1}} = \frac{(2k+1)^2}{(2k-1)^2} \quad (20)$$

$$\gamma_n = \frac{\tau_{n+1}}{\tau_n} = \frac{(4n+1)(4n+3)}{(4n-1)(4n-3)} \quad (21)$$

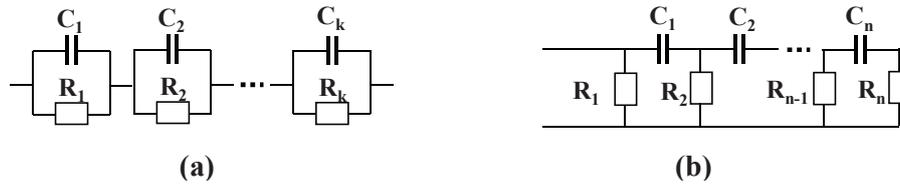


Figure 36 : Structure de Foster (a) et de Cauer (b) pour approximer l'impédance de Warburg [42]

- **Dans** [49] et [65], le composant CPE est aussi approximé par des circuits R//C en série comme la structure de Foster de la Figure 36. Mais la façon de calculer les valeurs de R_k et C_k dans l'expression (18) est différente. La Figure 37 présente le principe de l'approximation avec 5 circuits de R//C en série dont l'allure du logarithme de l'impédance est donnée dans le diagramme de Bode. Sur un diagramme de Bode, le composant CPE est représenté par une droite de pente constante (cf. courbe bleue de la Figure 37). Les caractéristiques de 5 circuits R//C sont judicieusement choisies afin d'approximer la pente de CPE sur une plage de fréquence limitée (entre ω_{\min} et ω_{\max}). Cette approximation peut se rapprocher d'une structure de Foster avec un rapport (γ) entre deux constantes de temps qui est constant.

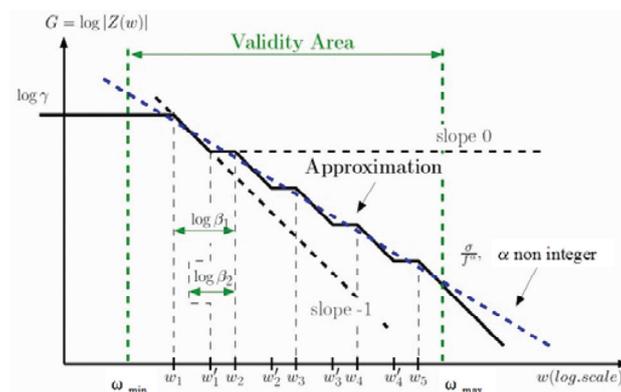


Figure 37 : Approximation de l'élément CPE dans le diagramme de Bode par 5 circuits de R//C en série [49]

- **Dans** [68] et [70], 5 circuits R//C en série sont utilisés pour approximer le circuit de Zarc (cf. Figure 38). Les valeurs des résistances et capacités sont calculées par un algorithme d'optimisation dont le détail se trouve dans [70]. Il est à noter que, pour les 5 circuits R//C identifiés, le rapport (γ) entre deux constantes de temps n'est pas constant.

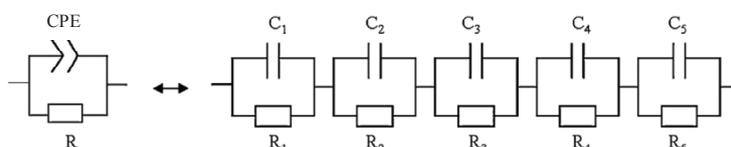


Figure 38 : Approximation du circuit de Zarc par 5 circuits de R//C en série [68]

En résumé, les modèles à CPE permettent facilement de connaître la réponse en fréquence de l'impédance de la batterie. Ils sont très utilisés pour suivre une évolution en cours de vieillissement [53]. Cependant, la réponse temporelle à une sollicitation réelle n'est pas toujours facile à déterminer numériquement avec ces modèles. Les modèles de Thévenin, qui seront présentés par la suite, sont mieux adaptés au calcul d'une réponse temporelle.

(b) Modèles de Thévenin :

Les impédances Z_{tc_dc} et Z_{tm} sur la Figure 31 peuvent être approximées par les circuits avec des éléments conventionnels comme des résistances et des condensateurs. Par exemple, les effets de transfert de charges et double couche peuvent être représentés par un simple circuit R//C [44] comme sur la Figure 39 (a). L'effet de transfert de matière peut être représenté par une mise en série de circuit R//C [42] comme sur la Figure 39 (b) ou par un circuit de transmission [60] comme sur la Figure 39 (c). La précision d'approximation de l'effet de transfert de matière dépend du nombre de cellules élémentaires utilisées (k et m) [41][60].

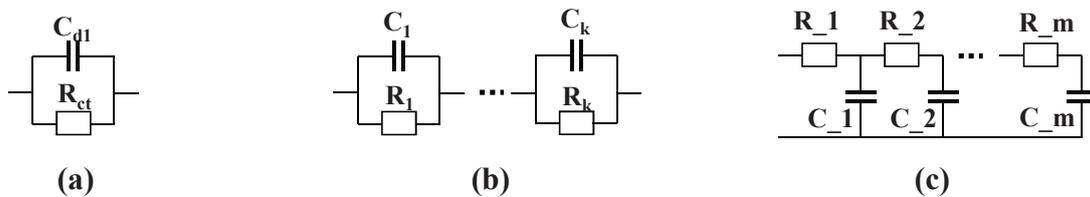


Figure 39 : (a) Circuit simplifié pour représenter les effets de transfert de charges et double couche (b) Circuits R//C en série pour représenter l'effet de transfert de matière (c) Circuit de transmission pour représenter l'effet de transfert de matière

Les modèles de Thévenin peuvent être utilisés pour représenter le tracé de Nyquist [68], mais ils sont principalement utilisés pour représenter au mieux la réponse temporelle de la batterie. Parmi les modèles de Thévenin dans la littérature, la structure la plus répandue est présentée sur la Figure 40. Dans cette structure, les circuits R//C en série sont utilisés pour représenter les impédances liées aux effets de transfert de charges, de double couche et de transfert de matière (cf. Z_{tc_dc} et Z_{tm} de la Figure 31). Dans la littérature, différents nombres de circuits R//C ont été utilisés. Par exemple, on peut trouver des modèles avec 1 circuit R//C comme dans [58][71][72][76][77], avec 2 circuits R//C comme dans [57][59][73][74][79][80][81][82] ou avec 3 circuits R//C comme dans [83][84].

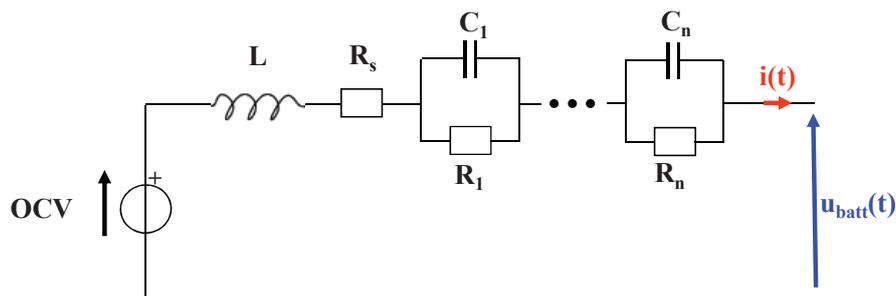


Figure 40 : Modèle de Thévenin avec les circuits R//C connectés en série

Dans le cadre des modèles de Thévenin, on trouve aussi d'autres modèles atypiques. La Figure 41 présente un tel modèle proposé pour une batterie Li-ion dans [60]. Ce modèle est constitué :

- d'une résistance série r_{HF} pour les chutes de tension de nature ohmique dans les électrodes et l'électrolyte,
- d'un condensateur de double couche C_{DL} ,
- d'une impédance Z_t pour modéliser la diffusion des ions dans l'électrolyte,
- d'une impédance Z_p pour décrire la diffusion des ions à l'intérieur de l'électrode,
- d'un condensateur C_s non-linéaire en fonction de l'état de charge pour symboliser la tension d'équilibre,
- d'une branche supplémentaire qui apparaît seulement pendant la relaxation et composée d'une résistance r_r et un condensateur C_r pour améliorer la performance du modèle pendant la relaxation.

Il est à noter que chacune des impédances Z_t et Z_p pour la diffusion correspond au circuit de transmission sur la Figure 39 (c).

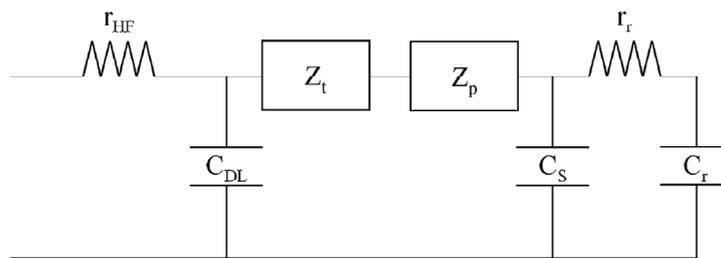


Figure 41 : Modèle utilisé dans [60]

La Figure 42 présente un autre modèle atypique qui est utilisé pour des batteries au plomb dans [86][87]. Ce modèle est composé :

- d'un condensateur de capacité C_{bulk} à valeur constante pour symboliser la tension d'équilibre compte tenu du fait que la variation de l'OCV des batteries au plomb considérées est quasi linéaire en fonction du SoC,
- d'une branche avec une résistance R_s en série avec un condensateur de capacité $C_{surface}$ pour représenter la dynamique liée à l'effet de diffusion dans le régime forcé et dans la relaxation,
- de deux autres résistances R_t et R_e qui, ensemble avec la résistance R_s , traduisent la résistance interne de la batterie.

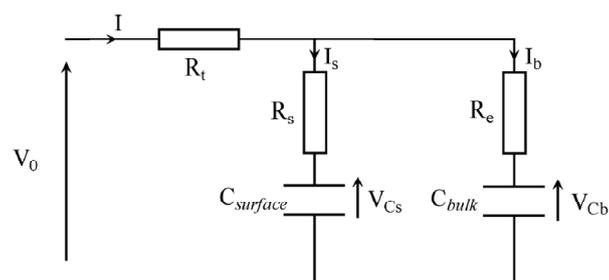


Figure 42 : Modèle utilisé dans [86][87]

Quand les modèles de type circuit électrique équivalent ont moins de lien avec les mécanismes physico-chimiques par rapport aux modèles électrochimiques, ils présentent plusieurs avantages :

- Ils sont simples au niveau de la structure [59], et donc faciles à implémenter dans un logiciel de simulation [58] comme Matlab, Simplorer et Amesim.
- Ils sont rapides au niveau du calcul, et donc plus adaptés à l'application en temps réel [58][59].
- Ils sont adaptés pour élaborer les lois de contrôle [58].
- Ils peuvent donner des estimations précises sur le comportement dynamique en temporel de la batterie [68][84].
- On peut calibrer la complexité du modèle en fonction de la précision voulue et la plage de validité voulue.
- L'effort de caractérisation est moins important par rapport aux modèles électrochimiques. Tous les paramètres des modèles de type circuit électrique équivalent peuvent être identifiés à partir de l'impédance ou la réponse temporelle de la batterie.
- Ils peuvent représenter le comportement d'une batterie contenant plusieurs cellules sans besoin de connaître le modèle de chaque cellule et leur topologie de connexion (en parallèle, en série ou en série-parallèle).

2.2.4. Choix de l'approche de la modélisation pour notre étude

Compte tenu de l'un des objectifs de la thèse est d'élaborer un modèle simple, rapide, robuste, avec le meilleur compromis précision/simplicité et adapté à l'application des véhicules électrifiés, les modèles électrochimiques et les modèles de type circuit électrique équivalent sont comparés avec les critères correspondants à nos besoins (cf. Tableau 11). La comparaison est faite selon les présentations précédentes des modèles (cf. paragraphes 2.2.1 et 2.2.3). Le Tableau 11 montre que les modèles de type circuit électrique équivalent présentent plus d'avantages vu les besoins affichés dans le cadre de la thèse. Ainsi, ils sont choisis pour l'étude par la suite.

Critère	Simplicité		Rapidité		Robustesse	Précision	Adaptabilité
	Structure	Effort de caractérisation	Simulation	Durée de caractérisation			
Modèles électrochimique	2	2	2	2	1	1	2
Modèles de type circuit électrique équivalent	1	1	1	1	2	1	1

Tableau 11 : Comparaison entre les modèles électrochimiques et les modèles de type circuit électrique équivalent en vue du besoin dans le cadre de la thèse (1 – Bon, 2 – Moins bon)

2.3. Procédures de caractérisation des paramètres du modèle de la batterie dans la littérature

Une procédure de caractérisation des paramètres du modèle d'une batterie comprend deux étapes : réalisation des essais sur la batterie et identification de la valeur de chaque paramètre à partir des données expérimentales. Dans le cadre des modèles de type circuit électrique équivalent, bien que de nombreux modèles dans la littérature puissent rentrer dans la même structure générique comme sur la Figure 31, les procédures de caractérisation associées peuvent être très différentes. Afin de choisir une structure de modèle qui correspond le mieux aux besoins de la thèse, il est ainsi nécessaire d'effectuer un état des lieux sur les principales procédures de caractérisation dans la littérature. Cette section commence par une introduction sur les équipements expérimentaux de caractérisation, puis sont présentées les procédures de caractérisation pour chacun des éléments (OCV, L , R_s , Z_{tc_dc} , Z_{tm}) dans le modèle générique de type circuit électrique équivalent (cf. Figure 31). Les sensibilités de chaque composant au SoC, au courant, à la température et au vieillissement sont aussi discutées.

2.3.1. Equipements expérimentaux

Pour identifier les paramètres du modèle d'une batterie, les données expérimentales dont nous avons besoin sont en général la tension, le courant et la température de la batterie. La Figure 43 présente des équipements typiques et l'instrumentation de la batterie pendant l'essai de caractérisation. On trouve sur la Figure 43 (a) le schéma de principe qui contient :

- la batterie en test,
- une enceinte thermique dans laquelle se trouve la batterie et qui régule la température ambiante de la batterie à une valeur constante,
- un dispositif de test de batterie qui délivre des profils de sollicitation de courant ou de puissance à la batterie au travers d'une voie de puissance et qui enregistre les mesures de la tension et de la température de la batterie respectivement par une voie de mesure de tension et une voie de mesure de la température.

La Figure 43 (b) présente un exemple réel d'instrumentation d'une batterie pendant un essai de caractérisation [88]. On retrouve les voies de puissance, de mesure de tension et de mesure de température qui sont déjà mentionnées sur la Figure 43 (a). Sur la Figure 43 (b), la température mesurée est la température à la surface du boîtier de la batterie.

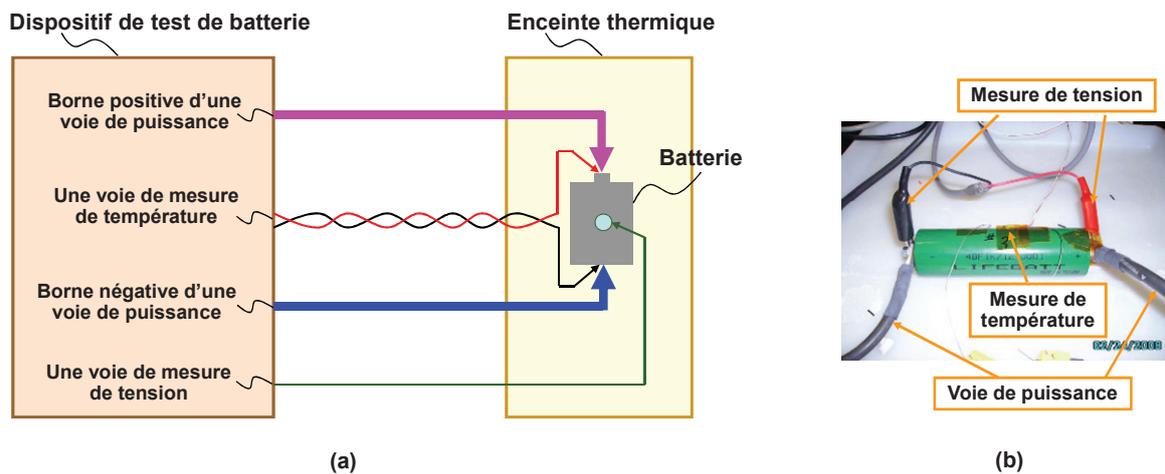


Figure 43 : (a) Schéma typique des équipements pour la caractérisation d'une batterie (b) un exemple d'instrumentation d'une batterie Li-ion [88]

Dans la pratique, le dispositif de test de batterie correspond souvent à un banc de test de batterie piloté par un ordinateur. Le banc de test de batterie permet de la délivrance du profil de sollicitation et l'acquisition des signaux (tension, courant et température) de la batterie sous le pilotage de l'ordinateur. Les données des signaux acquises par le banc sont enregistrées sur le disque dur de l'ordinateur. De nombreux bancs de test de batterie commerciaux existent aujourd'hui sur le marché. La Figure 44 présente trois exemples des bancs commerciaux. Parmi les bancs commerciaux, certains ont même la fonctionnalité du spectromètre d'impédance électrochimique qui permet de mesurer l'impédance de la batterie. Ceci est le cas pour le banc Biologic de la Figure 44 (a).



Figure 44 : (a) Un banc de Biologic (VMP3+Amplificateur de courant) [89] (b) Un banc d'Arbin (BT-2000) [90] (c) Un banc de Digatron (UBT) [91]

2.3.2. Caractérisation de la capacité

(a) Procédure de caractérisation

La caractérisation de la capacité permet de déterminer la capacité réelle d'une batterie en décharge. Cette dernière est souvent utilisée pour calculer l'évolution de l'état de charge (SoC) pendant une sollicitation de courant. L'expression de l'état de charge à un instant t est donnée par l'équation (22).

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}_{\text{Init}} - \frac{\delta_r \cdot \int_0^t i(t) dt}{3600 \cdot C_{\text{Batt_R\u00e9el}}} \cdot 100\% \quad (22)$$

Avec :

- t : temps en second,
- SoC_{Init} : \u00e9tat de charge initial compris entre 0% et 100%,
- $C_{\text{Batt_R\u00e9el}}$: capacit\u00e9 r\u00e9elle de la batterie en Ah,
- $i(t)$: courant de la batterie, avec $i(t) > 0$ pendant la d\u00e9charge,
- δ_r : coefficient de rendement, qui est \u00e9gale \u00e0 100% pendant la d\u00e9charge et au rendement faradique (η_r) de la batterie pendant la charge.

Il est \u00e0 noter que la capacit\u00e9 nominale de la batterie peut \u00eatre utilis\u00e9e \u00e0 la place de $C_{\text{Batt_R\u00e9el}}$, comme par exemple dans [65]. L'inconv\u00e9nient d'utiliser la capacit\u00e9 nominale est que l'on peut rencontrer les \u00e9tats de charge n\u00e9gatifs comme dans [65] quand la capacit\u00e9 r\u00e9elle est sup\u00e9rieure \u00e0 la capacit\u00e9 nominale. Il est aussi \u00e0 remarquer que pour les batteries Li-ion dont le rendement faradique est proche de 100%, le coefficient de rendement est souvent n\u00e9glig\u00e9 dans l'expression de l'\u00e9tat de charge dans la litt\u00e9rature, comme par exemple dans [64][96][98].

La proc\u00e9dure de test de la capacit\u00e9 dans la litt\u00e9rature peut \u00eatre r\u00e9sum\u00e9e par les \u00e9tapes suivantes :

- \u00c9tape 1 : charger la batterie \u00e0 plein selon un protocole de charge.
- \u00c9tape 2 : laisser reposer la batterie pendant une certaine dur\u00e9e.
- \u00c9tape 3 : d\u00e9charger la batterie \u00e0 un courant constant jusqu'\u00e0 ce que sa tension atteigne la tension minimale de la batterie.

La capacit\u00e9 r\u00e9elle de la batterie est la quantit\u00e9 totale de charge enlev\u00e9e pendant la d\u00e9charge de l'\u00e9tape 3. Le rendement faradique de la batterie est le rapport de la capacit\u00e9 r\u00e9elle sur la quantit\u00e9 totale de charge fournie par le protocole de charge. Certains chercheurs proposent de r\u00e9p\u00e9ter plusieurs fois le cycle de charge/d\u00e9charge (\u00e9tape 1 \u00e0 \u00e9tape 3) afin de stabiliser la performance de la cellule [88][99]. Par exemple dans [88], trois cycles de charge/d\u00e9charge ont \u00e9t\u00e9 effectu\u00e9s et la quantit\u00e9 de charge enlev\u00e9e lors de la 3^{eme} d\u00e9charge est consid\u00e9r\u00e9e comme la capacit\u00e9 r\u00e9elle de la batterie. Les explications plus d\u00e9taill\u00e9es de chaque \u00e9tape sont donn\u00e9es par la suite.

Dans l'\u00e9tape 1, le protocole de charge doit \u00eatre sp\u00e9cifi\u00e9 en fonction du type de batterie et selon les contraintes d'exp\u00e9rimentation (par exemple, courant maximal et disponibilit\u00e9 du banc). La batterie est consid\u00e9r\u00e9e \u00e0 100% de SoC \u00e0 l'issue d'une charge selon le protocole. Pour diff\u00e9rentes batteries, la m\u00e9thode de charge peut \u00eatre diff\u00e9rente. On pr\u00e9sente par la suite seulement les m\u00e9thodes standards pour charger les batteries lithium-ion et NiMH qui sont les plus utilis\u00e9es pour les

véhicules électriques et hybrides aujourd'hui. La méthode standard pour charger les batteries lithium-ion, souvent recommandée par des fournisseurs, est celle appelée « Courant constant / Tension constante », ou CCCV en anglais pour « Constant Current / Constant Voltage ». Cette méthode consiste à :

- charger d'abord la batterie avec un courant constant jusqu'à ce que la tension atteigne une limite de tension dépendante de la nature de l'élément (NCA, LMS, LFP,...),
- charger ensuite avec une tension constante égale à la tension précédente jusqu'à ce que le courant diminue et atteigne une valeur donnée (si le constructeur n'indique pas cette valeur, C/10 est une valeur communément admise).

La Figure 45 présente un exemple d'évolution de la tension, du courant et de la capacité durant une charge d'une batterie lithium-ion de Kokam.

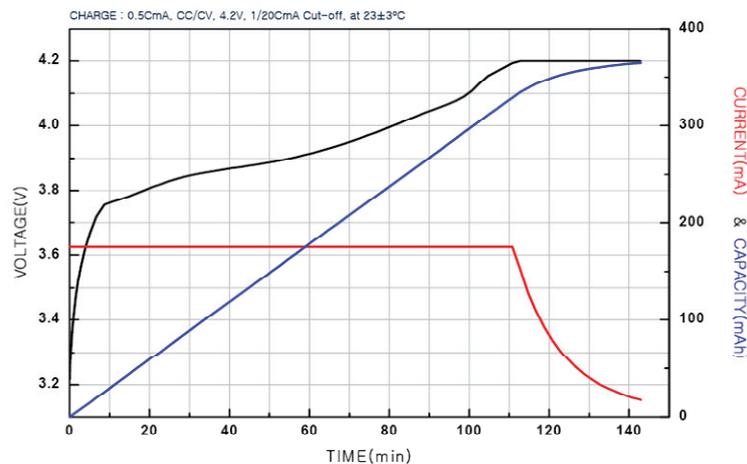


Figure 45 : Caractéristique de la tension, du courant et de la capacité pendant une charge CCCV pour une batterie Li-ion de Kokam de 0.36 Ah [5]

A la différence des batteries lithium-ion, la méthode standard pour charger les batteries NiMH, souvent recommandée par des fournisseurs, consiste à charger avec un courant constant. La fin de charge peut être déterminée par un ou plusieurs indicateurs ci-dessous qui correspondent aux instants où il y a :

- une variation de tension négative (ΔU) qui apparaît après un maximum de tension, la valeur typique de ΔU est de l'ordre de -10 mV par cellule [34],
- une vitesse d'augmentation de la température ($\Delta T/\Delta t$) supérieure à une certaine limite.

La Figure 46 présente un exemple d'évolution de la tension et de la température durant une charge d'une batterie NiMH de Saft.

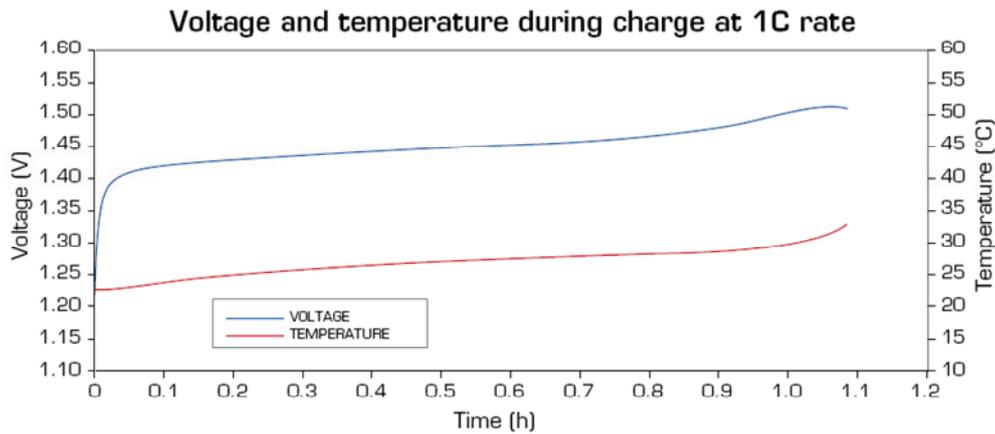
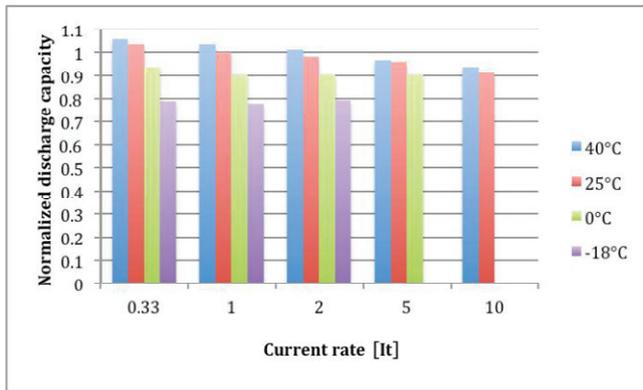


Figure 46 : Caractéristique de la tension et de la température pendant une charge à 1C pour une batterie NiMH de Saft de 3.5 Ah [38]

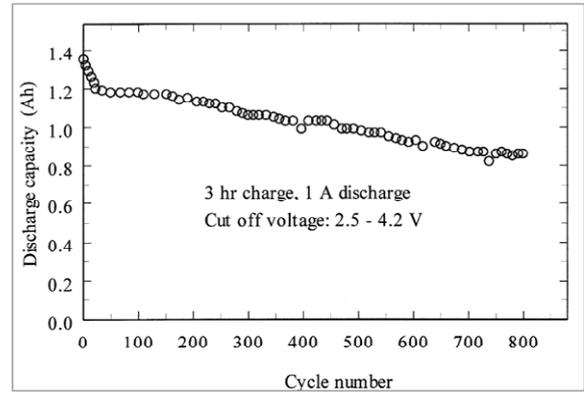
Pour l'étape 2, le repos est nécessaire pour refroidir la batterie et la laisser retourner vers un état équilibre [74]. Différentes durées de repos sont utilisées dans la littérature, par exemple, 30 minutes dans [88], une heure dans [74] et 6 heures dans [93]. Pour l'étape 3, différentes valeurs de courant peuvent être utilisées, par exemple, 1C dans [59] et C/25 dans [72].

(b) Sensibilité de la capacité

La capacité réelle est sensible à différents facteurs comme la température, le courant de décharge et l'état de santé de la batterie. La Figure 47 présente des exemples d'évolution de la capacité réelle de la batterie en fonction de courant de décharge, de la température et pendant le vieillissement. La Figure 47 (a) montre que, pour un même courant, la capacité réelle décroît quand la température diminue. Pour les températures élevées (25 et 40 °C), la capacité réelle a tendance à diminuer quand le courant de décharge augmente. Pour les températures basses (0 et -18 °C), la tendance d'évolution de la capacité réelle en fonction du courant est peu évidente. La capacité réelle semble indépendante du courant à 0°C pour les courants $\geq 1C$. Il y a même un gain de capacité à -18°C quand le courant passe de 1C à 2C. Cela est en fait lié à l'échauffement de la batterie pendant la décharge qui permet de dégager plus de quantité de charge [93]. Par exemple, pendant le test de capacité à 0 °C (cf. Figure 47 (a)), la température de la batterie passe de 0 °C à 25 °C à la fin de la décharge pour le courant à 5C et à 42 °C pour le courant à 10C [94]. En ce qui concerne la Figure 47 (b), elle montre que la capacité réelle de la batterie a tendance à diminuer pendant le vieillissement.



(a)



(b)

Figure 47 : (a) Evolution de la capacité réelle normalisée en fonction de courant de décharge (en C) et de la température pour une batterie Li-ion [94] (b) Evolution de la capacité réelle pour une batterie Li-ion pendant le vieillissement [95]

2.3.3. Caractérisation de l'OCV

(a) Procédure de caractérisation

Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour la caractérisation de l'OCV. Une **première méthode**, qui est la plus utilisée, consiste à mesurer l'OCV à différents SoCs. Pour cela, la batterie initialement chargée à plein est d'abord sollicitée par une succession de décharges à courant constant jusqu'à un SoC faible (par exemple, 0%). Puis une succession de charges à courant constant est appliquée à la batterie pour la charger jusqu'à un SoC élevé (par exemple, 100%). Entre deux sollicitations, un repos est imposé pour stabiliser la tension de la batterie. La tension mesurée à la fin de chaque repos est considérée comme l'OCV au SoC correspondant. En reliant les OCVs à différents SoCs, on obtient l'évolution de l'OCV en fonction du SoC après décharge et après charge.

La Figure 48 (a) présente un exemple du profil avec succession de décharges qui permet la caractérisation de l'OCV à différents SoCs après décharge. Il est à noter que la durée de chaque sollicitation peut être différente. On peut diminuer la durée de sollicitation sur certaines plages de SoC afin d'avoir plus de résolution de l'OCV. Par exemple, la Figure 48 (b) présente un résultat de mesure de l'OCV à différents SoCs pour une batterie Li-ion. Sur cette figure, l'OCV est mesurée :

- à chaque 10% de SoC entre 90% ~10% de SoC,
- et à chaque 5% de SoC entre deux extrémités (100%~90% et 10%~0% de SoC) où l'évolution de l'OCV est plus rapide qu'entre 90% ~10% de SoC.

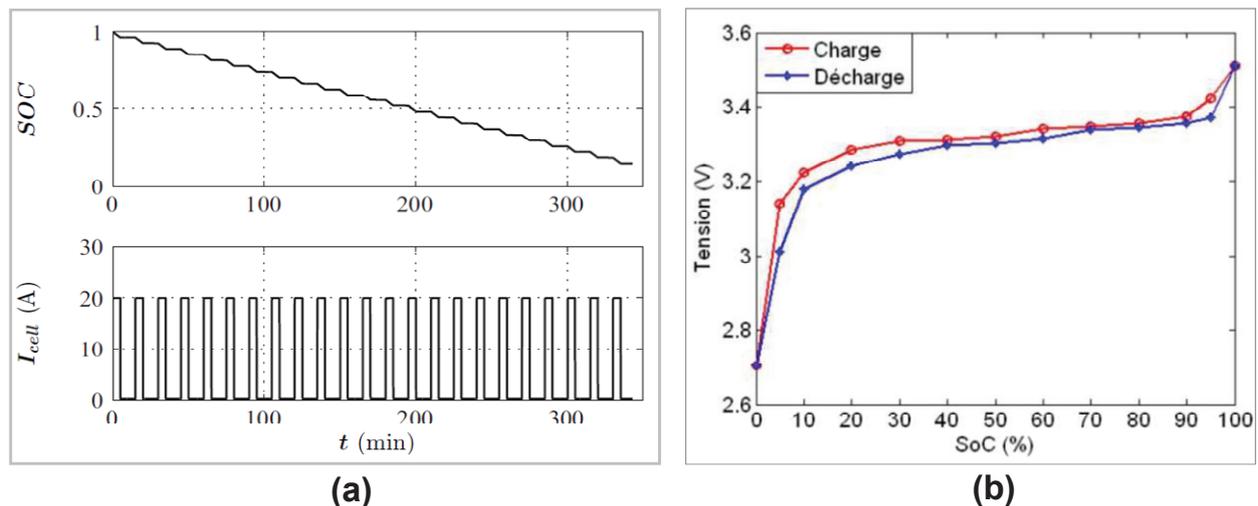


Figure 48 : (a) Exemple de profil avec succession de décharge pour la mesure de l'OCV en fonction du SoC [96] (b) Exemple d'évolution de l'OCV en fonction du SoC pour une batterie Li-ion (OCVs mesurées après une heure de repos) [47]

La durée de repos entre deux sollicitations a un impact important sur le résultat de mesure de l'OCV comme ce qui est présenté par la Figure 23. Malgré le fait qu'il faut environ 24 heures pour stabiliser la tension en relaxation [74], de nombreux chercheurs ont adopté des durées de repos plus courtes dans la littérature pour des raisons pratiques (durée de test, précision voulue), par exemple :

- pour les batteries Li-ion : 10 minutes dans [57], 30 minutes dans [98], 1 heure dans [49][59][78] et 2 heures dans [64] ;
- pour les batteries NiMH : 1000 secondes dans [67], 2 heures dans [65] et 3 heures dans [59].

Une **deuxième méthode** de caractérisation de l'OCV consiste à décharger la batterie initialement chargée à plein avec un courant très faible par rapport à sa capacité ($C/25$ par exemple dans [72][99]) jusqu'à 0% de SoC où la tension de la batterie atteint sa tension minimale. Puis une charge avec le même niveau de courant est appliquée pour charger la batterie jusqu'à ce que la tension de la batterie atteigne sa tension maximale. Comme la batterie peut être considérée à un état quasi stationnaire pendant la sollicitation de ce faible courant [99], la tension de la batterie pendant la sollicitation peut donc servir comme la référence de l'OCV. La Figure 49 illustre le résultat d'une mesure de la tension d'une batterie Li-ion en fonction du SoC pendant la sollicitation à $C/25$ en décharge et en charge. Par rapport à la première méthode qui mesure l'OCV à différents SoCs, l'avantage de la deuxième méthode est qu'elle permet d'obtenir les courbes continues de l'OCV. Son inconvénient est que la durée d'essai est longue et peu flexible, tandis que la première méthode permet une modulation de la durée d'essai en fonction du nombre de SoCs testés et de la durée de repos entre deux sollicitations.

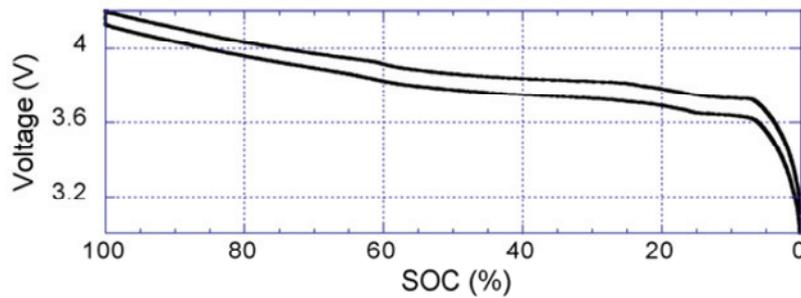


Figure 49 : Mesure de la tension d'une batterie Li-ion en fonction du SoC pendant la sollicitation à C/25 en décharge et en charge [72]

Une **troisième méthode**, proposée par le même auteur dans [59][85] et présentée sur la Figure 50, consiste à :

- appliquer successivement le profil des motifs en escalier sur la Figure 50 (a) à la batterie pour balayer une grande plage de SoC en décharge comme les premières 4000 s sur la Figure 50 (b),
- puis utiliser le profil des motifs avec signe de courant inversé pour charger successivement la batterie, comme la période entre 6000 et 12000 s sur la Figure 50 (b).

La durée d'essai ne dure qu'environ 4 heures pour une plage de SoC entre 80% et 25%.

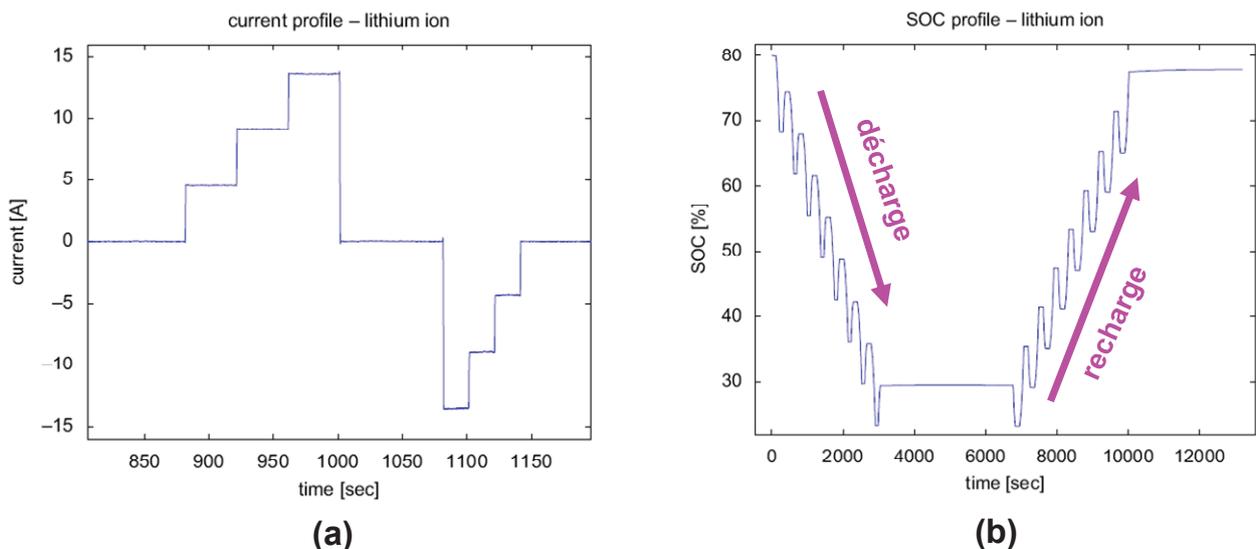


Figure 50 : (a) Profil des motifs en escalier pour décharger la batterie [59] (b) Evolution du SoC de la batterie pendant la caractérisation avec l'application successive du profil de (a) [59]

Une procédure d'identification en utilisant l'algorithme génétique développée dans [59] est ensuite empruntée pour extraire une courbe unique de l'OCV ainsi que l'impédance (voir paragraphe 2.3.4) de la batterie. Le résultat d'extraction de l'OCV (courbe 'ID') est présenté sur la Figure 51. Sur la même figure sont aussi présentées les mesures de l'OCV à chaque 5% de SoC par la première méthode avec 1h de repos entre deux successions de sollicitation à 1C (courbes 'meas'), dont la durée d'essai est environ 24 heures. Ces mesures de l'OCV par la première méthode (courbes 'meas') sont utilisées pour valider la précision de la courbe 'ID' obtenue par la troisième méthode. La Figure 51 montre que la courbe 'ID' arrive à décrire correctement l'évolution de l'OCV en fonction du SoC comme elle se trouve bien à l'intérieur des courbes 'meas'. Par rapport

aux deux premières méthodes de caractérisation de l'OCV, les avantages de la troisième méthode sont qu'elle demande une durée d'essai plus courte et permet d'identifier l'impédance de la batterie dans le même temps. Son inconvénient est que la courbe de l'OCV obtenue ne contient pas d'information sur l'hystérésis.

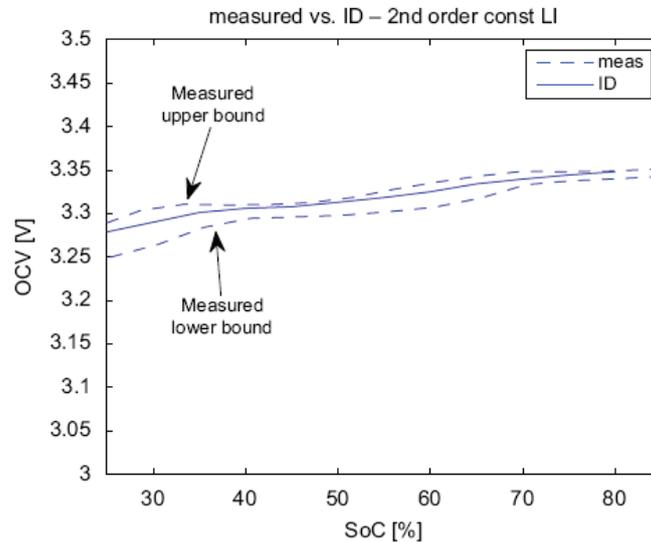


Figure 51 : Comparaison des résultats de l'OCV identifiés par la troisième méthode (ID sur la figure) et des résultats de l'OCV mesurés par la première méthode (meas sur la figure) pour une batterie Li-ion [59]

(b) Sensibilité de l'OCV

Tout comme la capacité réelle de la batterie, l'OCV évolue aussi en fonction de la température. La Figure 52 illustre un exemple de mesure de l'OCV en fonction du SoC à trois températures pour une batterie Li-ion. Sur la Figure 52, la courbe de l'OCV à température élevée (62.5 °C) a peu de différence par rapport à celle à température ambiante (27 °C). Mais à basse température (3 °C), une diminution de l'OCV à même SoC peut être observée.

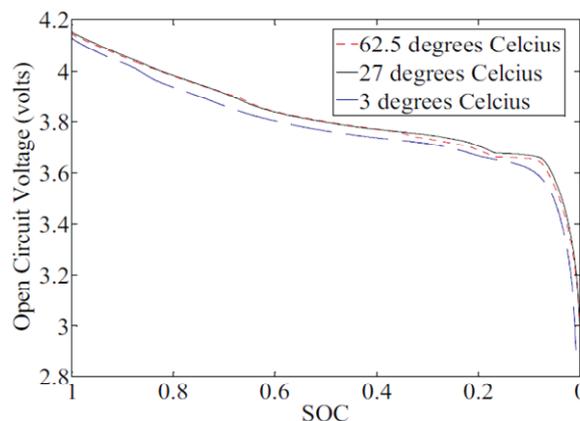


Figure 52 : Mesures de l'OCV en fonction du SoC d'une batterie Li-ion à trois températures [83]

Contrairement à la capacité réelle de la batterie, l'OCV évolue peu pendant le vieillissement. La Figure 53 présente les résultats de mesure de l'OCV en fonction du SoC obtenus auprès d'une dizaine de batterie Li-ion de même type à différents avancements de vieillissement (jusqu'à -30%

de capacité). Sur la Figure 53, la courbe de l'OCV reste quasiment identique pour une large plage de SoC (10% ~ 100%). Il n'y a que quelques petites différences aux faibles SoCs (< 10%).

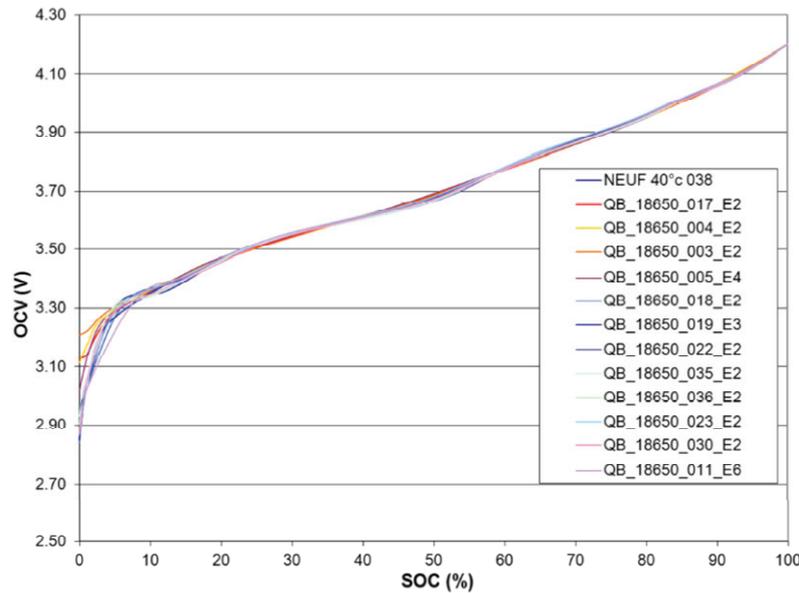


Figure 53 : Mesures de l'OCV d'une dizaine de batteries Li-ion 18650 à différents avancements de vieillissement (jusqu'à -30% de capacité) [100]

2.3.4. Caractérisation de l'impédance de la batterie (L , R_s , Z_{tc_dc} , Z_{tm})

2.3.4.1. Procédure de caractérisation

Pour le modèle d'une batterie de la Figure 31, l'impédance de la batterie correspond à l'ensemble des composants comme l'inductance L , la résistance série R_s , l'impédance de transfert de charges et double couche Z_{tc_dc} et l'impédance de transfert de matière Z_{tm} . En fonction des mesures utilisées, les procédures de caractérisation de l'impédance de la batterie peuvent être classées en deux familles :

- **caractérisation fréquentielle** qui identifie l'impédance de la batterie avec les modèles à CPE en utilisant principalement les mesures fréquentielles (les tracés de Nyquist) de la batterie,
- **caractérisation temporelle** qui identifie l'impédance de la batterie avec les modèles de Thévenin principalement à partir des mesures temporelles (courant et tension) de la batterie.

(a) Caractérisation fréquentielle avec les modèles à CPE

Avec un tracé de Nyquist, l'identification de différents paramètres d'un modèle à CPE se fait généralement en utilisant l'optimisation numérique qui minimise la différence entre la mesure expérimentale et l'impédance du modèle. La méthode de l'optimisation numérique souvent utilisée dans la littérature est la méthode des moindres carrés [42][49][67][68][69]. La Figure 54 présente un exemple de résultat d'optimisation numérique pour un tracé de Nyquist d'une batterie Li-ion. Elle montre que l'estimation du modèle à CPE (courbe rouge) correspond bien au tracé de Nyquist (courbe bleu). En répétant cette identification sur des tracés de Nyquist à différents SoCs, courants et températures, on obtient les cartographies des différents éléments de l'impédance (L , R_s , Z_{tc_dc} et Z_{tm}) en fonction du SoC, du courant et de la température.

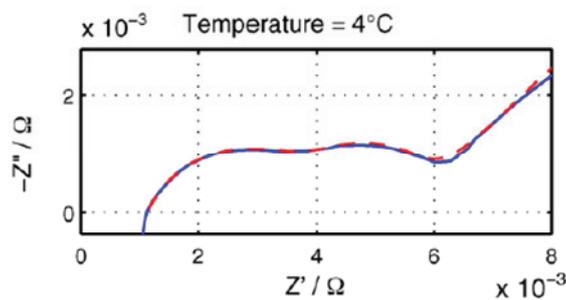


Figure 54 : Comparaison entre un tracé de Nyquist (courbe bleu) d'une batterie Li-ion à 4 °C et l'estimation avec le modèle à CPE (courbe rouge) de la Figure 34 (b) [68]

La caractérisation de la réponse fréquentielle nécessite donc d'effectuer les mesures de l'impédance de la batterie à différents SoCs, courants et températures. Pour une température donnée, ceci consiste à mettre la batterie initialement chargée à différents SoCs par une succession de décharges. Entre deux décharges, un repos est imposé pour stabiliser la tension de la batterie. A la fin de chaque repos, une mesure de l'impédance est effectuée avec ou sans courant de polarisation. On rencontre souvent trois difficultés pendant les mesures de l'impédance de la batterie :

- La **première difficulté** est liée à la durée de repos avant la mesure de l'impédance. Si l'impédance est mesurée juste après la décharge, elle est différente de celle mesurée après un repos. La Figure 55 présente des mesures de l'impédance après 0, 30 et 50 minutes de repos d'une batterie Li-ion. Les mesures après 30 et 50 minutes sont identiques et sont un peu différentes par rapport à la mesure après 0 minutes de repos. La différence est liée au phénomène de la relaxation pendant le repos [51]. C'est donc la raison pour laquelle un repos judicieusement choisi est nécessaire entre deux successions de décharge. Dans la littérature, différentes durées de repos sont utilisées en fonction de la température et du SoC, par exemple, 15 à 90 minutes dans [51], 15 à 30 minutes dans [64].

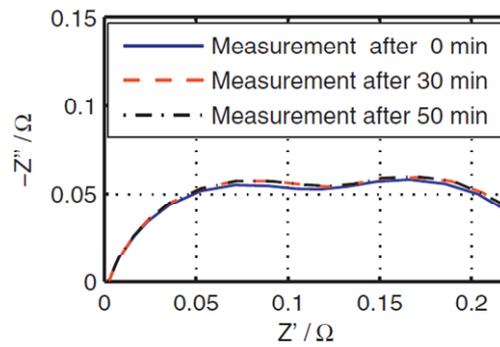


Figure 55 : Influence de la durée de repos sur la mesure de l'impédance pour une batterie Li-ion à 50% de SoC et à -30 °C [51]

- La **deuxième difficulté** est liée à la durée de la mesure de l'impédance. La durée de mesure est fonction de la plage de fréquence balayée (surtout la fréquence minimale) et du nombre de points de mesure dans la plage. Le Tableau 12 présente un exemple des durées estimées de mesure de l'impédance avec le banc Biologic VMP3 piloté par le logiciel EC-Lab [89] et avec une fréquence maximale fixée à 5 kHz. Différentes durées estimées sont données en fonction de la fréquence minimale et du nombre de points de mesure par décade de fréquence. Ce tableau montre que la durée augmente quand la fréquence minimale diminue et quand le nombre de points de mesure augmente. Il faut donc bien choisir la plage de fréquence et le nombre de points en fonction du besoin de l'utilisateur. Par exemple, l'auteur de [51] a choisi une plage de fréquence de 10 mHz ~ 5 kHz avec 10 points de mesure par décade de fréquence. Il est à noter que pour investiguer complètement l'impédance liée aux effets de transfert de matière qui couvrent une grande plage temporelle jusqu'à quelques dizaines d'heures (cf. Figure 24), il faut une fréquence minimale de l'ordre de 10 μ Hz. Avec cette faible fréquence, la mesure de l'impédance à un seul SoC peut durer plusieurs jours, ce qui est difficile à accepter dans la pratique. En outre, la précision de la mesure de l'impédance pendant une longue durée n'est pas garantie. Comme présenté dans le paragraphe 2.1, le spectromètre d'impédance électrochimique repose sur une technique de mesure stationnaire qui consiste à mesurer la réponse électrique de l'interface électrochimique à une faible perturbation sinusoïdale de courant ou de tension pour différentes valeurs de fréquences. Pendant une longue durée de mesure, la perturbation sinusoïdale de courant ou de tension, bien que faible, engendre une variation de SoC de la batterie, particulièrement pendant la mesure aux faibles fréquences. Cette variation de SoC introduit une imprécision dans la mesure de l'impédance de la batterie.

f_{\min} \ N_{pt}	500 mHz	100 mHz	10 mHz	1 mHz	0.1 mHz	10 μ Hz
5	12 s	36 s	5 min	49 min	8 h	82 h
10	25 s	67 s	9 min	88 min	15 h	147 h

Tableau 12 : Durées estimées de mesure de l'impédance en fonction de la fréquence minimale (f_{\min}) et du nombre de points de mesure par décade de fréquence (N_{pt}) avec le banc Biologic VMP3 piloté par le logiciel EC-Lab [89] avec la fréquence maximale fixée à 5 kHz

- La **troisième difficulté** est liée au courant de polarisation pendant la mesure de l'impédance. La Figure 56 illustre des mesures de l'impédance d'une batterie Li-ion avec différents courants de polarisation dans [49]. Sur cette figure, la fréquence minimale des mesures de l'impédance avec courant de polarisation non nul est plus grande que celle avec courant de polarisation nul (500 mHz contre 10 mHz). En effet, avec la présence d'un courant de polarisation, le SoC de la batterie évolue pendant la mesure de l'impédance. L'évolution de SoC entraîne une évolution de l'OCV et une modification de l'impédance. Afin de diminuer l'évolution de SoC et préserver une mesure de l'impédance stable et précise, la fréquence minimale de mesure doit être augmentée pour diminuer la durée de mesure. Dans ce cas, on perd donc des informations en basses fréquences sur les tracés de Nyquist obtenus.

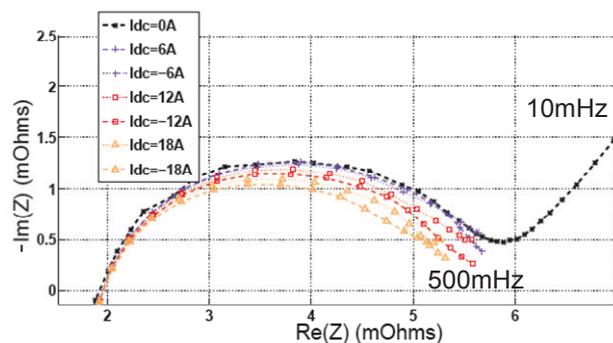


Figure 56 : Influence du courant de polarisation sur la fréquence minimale de mesure de l'impédance pour une batterie Li-ion de 12Ah à 80% de SoC [49]

Avec ces tracés de Nyquist, il est difficile d'obtenir l'évolution de l'impédance de transfert de matière en fonction des courants forts. Les travaux dans la littérature qui caractérisent l'impédance de transfert de matière avec les tracés de Nyquist à différents courants de polarisation [64][70] sont effectués pour des valeurs de courant inférieures ou égales à $C/2$. Certains auteurs négligent simplement l'influence du courant sur l'impédance de transfert de matière et caractérisent l'impédance de transfert de matière avec seulement les tracés de Nyquist à courant de polarisation nul [42][68]. Afin d'améliorer la précision d'identification de l'impédance de transfert de matière à plus fort courant, certains auteurs [49] proposent de caractériser l'impédance de transfert de matière par des réponses temporelles de la batterie à des créneaux de courant à 1C comme sur la Figure 57. Le principe est d'approximer d'abord l'élément CPE par des circuits de R//C en série, puis d'identifier les circuits à différents SoCs par l'optimisation numérique avec les réponses temporelles.

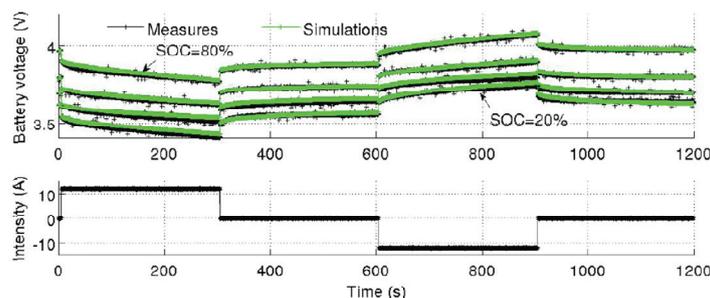


Figure 57 : Identification de l'élément CPE par les réponses temporelles de la batterie à des créneaux de courant à 1C à différents SoCs pour une batterie Li-ion de 12 Ah [49]

(b) Caractérisation temporelle avec les modèles de Thévenin

La caractérisation temporelle de l'impédance de la batterie avec les modèles de Thévenin consiste à appliquer des profils de courant à la batterie afin de provoquer les sauts de tension, les régimes forcés et les relaxations à différents SoCs, courants et températures. Ensuite, les mesures temporelles de la batterie sont utilisées pour identifier différents composants de l'impédance de la batterie :

- **Pour la résistance série R_s** , les sauts de tension sont utilisés pour l'identifier avec la loi d'Ohm comme illustré sur la Figure 58 :

$$R_s = \frac{\Delta u}{\Delta i} \quad (23)$$

Avec :

Δu : saut de tension,

Δi : variation de courant qui provoque le saut de tension.

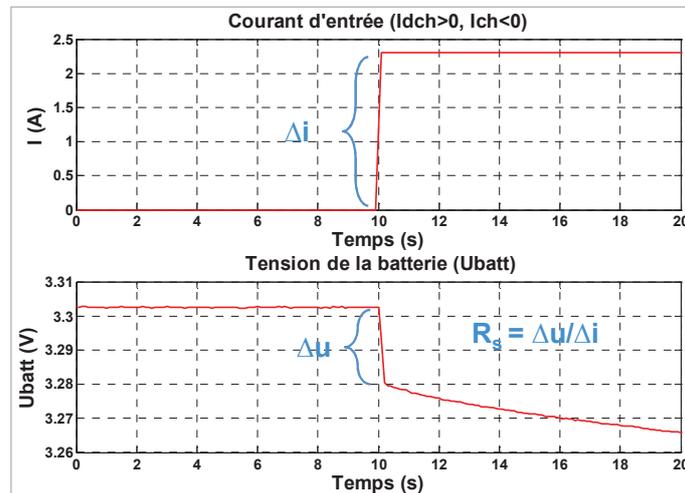


Figure 58 : Exemple de caractérisation temporelle de la résistance R_s

Il est à noter que, pour une même batterie, la valeur de la résistance série R_s identifiée par la caractérisation fréquentielle est en général différente de celle identifiée par la caractérisation temporelle. Dans le diagramme de Nyquist, la résistance série correspond à la valeur de l'impédance à une fréquence de l'ordre du kHz (cf. Figure 33). Pour observer précisément le saut de tension lié à la résistance série dans la réponse temporelle de la batterie, une fréquence d'échantillonnage supérieure à cette fréquence doit être utilisée. Sinon avec une faible fréquence d'échantillonnage, par exemple 10 Hz dans [59] et 20 Hz dans [58], le saut de tension mesuré contient non seulement la variation de tension liée à la résistance série mais aussi la variation de tension au début du régime forcé qui est lié aux effets de transfert de charges, de double couche et de transfert de matière. Cette surévaluation du saut de tension peut donc conduire à une surestimation de la résistance série.

- **Pour l'impédance de transfert de matière Z_{tm}** qui est représentée par des circuits R//C en série ou des circuits de transmission (cf. Figure 39 (b) et (c)), ses valeurs des résistances et

des capacités sont identifiées par l'optimisation numérique avec les régimes forcés et/ou les relaxations. Il est aussi possible d'identifier R_s et Z_{tm} ensemble par l'optimisation numérique.

- **Pour les composants hautes fréquences L et Z_{tc_dc}** dont les fréquences sont en général supérieures à quelques Hz, elles sont rarement caractérisées avec les mesures temporelles. Cela est dû au fait que les caractérisations précises de ces composants nécessitent les mesures temporelles échantillonnées à de très hautes fréquences pouvant être supérieures à quelques kHz, ce qui est difficilement réalisable avec la plupart des bancs aujourd'hui. Ainsi, afin de compléter les modèles de Thévenin, certains auteurs [60] caractérisent ces composants hautes fréquences avec les mesures fréquentielles (tracés de Nyquist).

Les profils de courant utilisés pour la caractérisation temporelle peuvent être classés en trois sous-familles :

- **Profil avec créneaux simples** [57][58][74][96][98] :

Un exemple du profil avec créneaux se trouve sur la Figure 48 (a). Ce profil permet d'obtenir les régimes forcés à différentes plages de SoCs. En changeant le niveau de courant du profil et réappliquant le profil à la batterie, comme dans [57][58], on peut identifier les paramètres du modèle en fonction du SoC à différents courants. L'avantage de ce genre de profil est qu'il est facilement applicable à des batteries de différentes caractéristiques.

- **Profil avec créneaux composés** [102] :

La Figure 59 illustre un exemple de tel profil pour la caractérisation d'une batterie Li-ion proposé dans [102]. Ce profil est une combinaison des créneaux de courant avec différentes amplitudes et durées (Partie gauche de la Figure 59). La répétition du profil permet de balayer une grande plage du SoC de la batterie (Partie droite de la Figure 59). Ce profil n'a pas pour vocation d'identifier les paramètres du modèle en fonction du courant parce que les amplitudes et durées des créneaux sont choisies de manière aléatoire. En outre, il ne peut pas être appliqué directement aux batteries qui ont des caractéristiques différentes (capacité, courant maximal en décharge et en charge). Des efforts de ré-calibration des amplitudes et durées des créneaux sont nécessaires pour des batteries possédant des caractéristiques différentes.

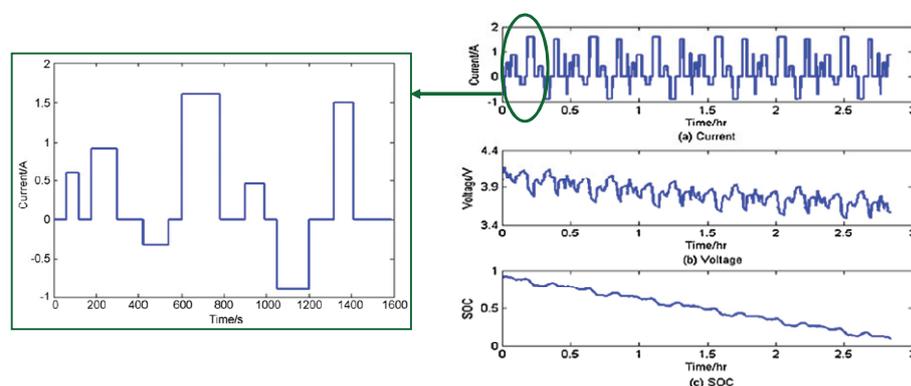


Figure 59 : Profil avec créneaux composés pour une batterie Li-ion de 0.94 Ah [102]

- **Profil avec motifs en escalier** [59][101] :

Un exemple du profil avec motifs en escalier se trouve sur la Figure 50. Par rapport aux créneaux, les motifs en escalier permettent d’obtenir à la fois les régimes forcés à différents courants, ce qui évite d’appliquer à plusieurs reprises le profil pour obtenir l’évolution des paramètres du modèle à différents courants. Cependant, il nécessite des efforts de recalibration du motif en escalier pour des batteries possédant des caractéristiques différentes. Par exemple dans [59], le profil pour une batterie NiMH de 6.5 Ah est celui de la Figure 60, qui est très différent de celui de la Figure 50 (a) pour une batterie Li-ion de 2.3 Ah. L’auteur de [59] n’a pas explicité le passage entre les deux profils.

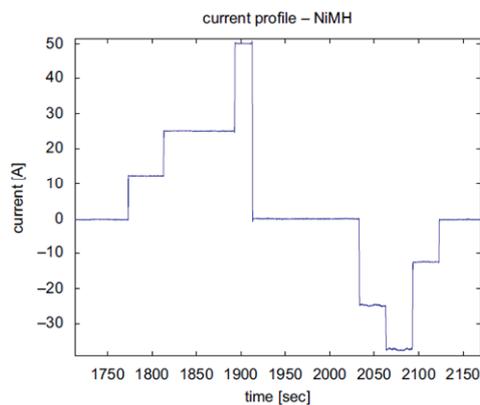


Figure 60 : Profil de motif en escalier pour une batterie NiMH de 6.5 Ah [59]

2.3.4.2. Sensibilité des éléments de l’impédance

(a) Sensibilité de l’inductance L

Plusieurs travaux dans la littérature [64][65][70] ont montré que l’inductance L ne varie pas significativement avec le courant et le SoC. La Figure 61 présente un exemple de l’inductance en fonction du SoC et à différents courants de polarisation pour une batterie Li-ion (courant exprimé en n·C). Sur la Figure 61, la valeur de l’inductance reste quasiment identique pour différents SoCs et différents courants. Ceci est dû au fait que ce paramètre n’est dépendant principalement que de la géométrie de la batterie et de son câblage [64]. Probablement à cause de cette dépendance au câblage, l’évolution de l’inductance pendant le vieillissement de la batterie est rarement présentée dans la littérature.

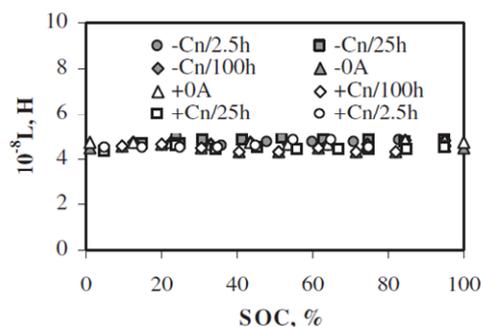


Figure 61 : Inductance L en fonction du SoC à différents courants de polarisation en charge et en décharge pour une batterie Li-ion [64]

Les travaux dans [65] montrent aussi que l'inductance peut être sensible à la température. Le Tableau 13 présente des valeurs de l'inductance à différentes températures respectivement pour deux batteries Li-ion utilisées dans [65]. Dans ce tableau, les valeurs de l'inductance à température élevée (40 °C) sont plus grandes que celles à température ambiante (20 °C). L'auteur ne justifie pas cette variation. Ce résultat difficilement explicable resterait à confirmer.

Batteries Li-ion	40 Ah		100 Ah	
Température (°C)	20	40	20	40
L (μH)	0.17 ± 0.01	0.26 ± 0.02	0.28 ± 0.01	0.37 ± 0.02

Tableau 13 : Valeurs de l'inductance à différentes températures pour deux batteries Li-ion [65]

(b) Sensibilité de la résistance série R_s

En cas de la caractérisation fréquentielle, la résistance série R_s mesurée n'est pas sensible au SoC et au courant pour les batteries Li-ion selon les travaux dans [64][65][70]. La Figure 62 illustre un résultat de caractérisation fréquentielle de la résistance série en fonction du SoC et à différents courants de polarisation pour une batterie Li-ion (courant exprimé en n·C). Sur la Figure 62, la valeur de la résistance série reste quasiment identique pour différents SoCs et différents courants.

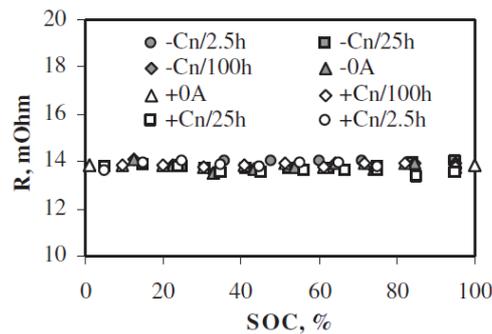


Figure 62 : Résistance série mesurée par caractérisation fréquentielle en fonction du SoC à différents courants de polarisation pour une batterie Li-ion [64]

Dans le cas de caractérisation temporelle, le résultat obtenu est différent à cause de la surévaluation du saut de tension. De nombreux travaux dans la littérature [57][58][74] ont montré que la résistance série mesurée R_s est alors sensible au SoC et au courant. Par exemple, la Figure 63 présente des résultats de caractérisation temporelle de la résistance série en fonction du SoC et à différents courants de polarisation pour une batterie Li-ion. Les résultats montrent que la résistance série :

- a tendance à augmenter aux faibles SoCs,
- a une valeur plus faible quand le courant augmente,
- a des valeurs différentes pour la même amplitude de courant en charge et en décharge.

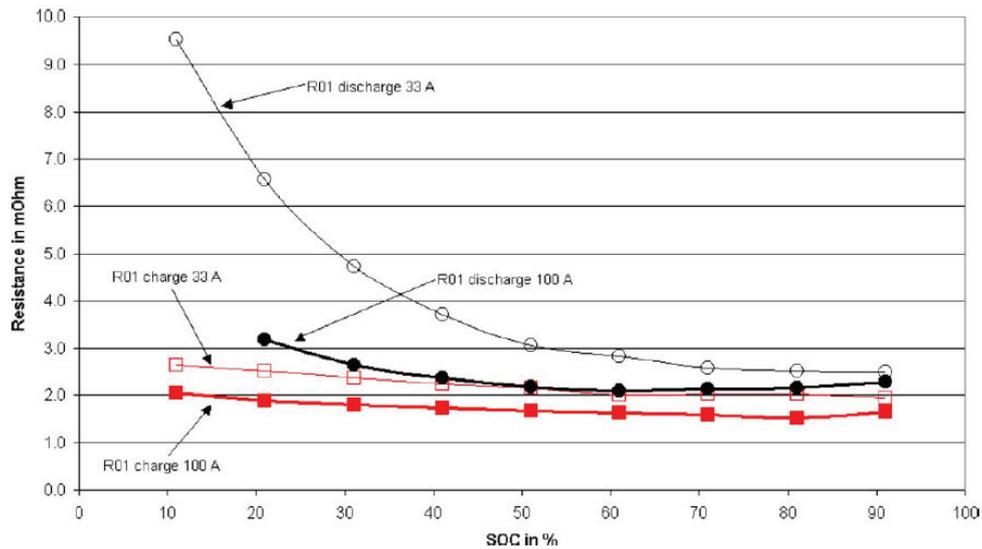
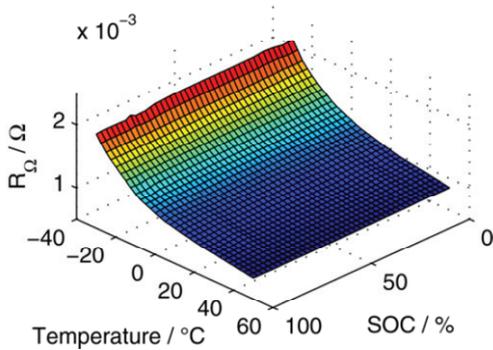
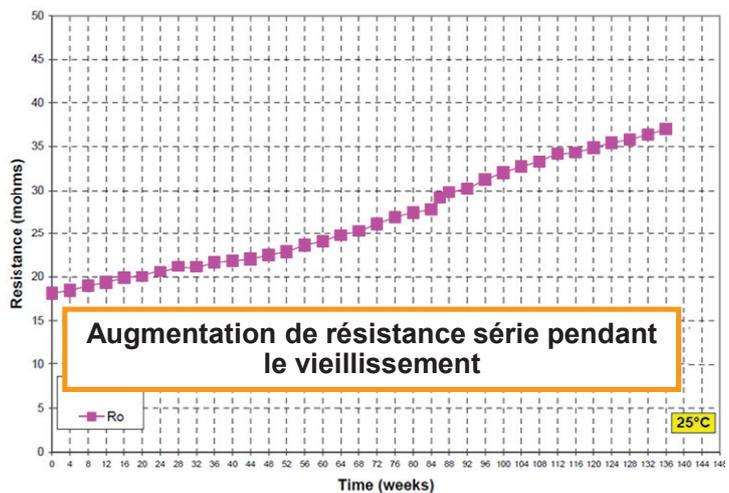


Figure 63 : Résistance série en fonction du SoC à différents courants de polarisation pour une batterie Li-ion de 100Ah [74] par caractérisation temporelle

Quelle que soit la procédure de caractérisation adoptée (fréquentielle ou temporelle), la résistance série identifiée présente une dépendance à la température et au vieillissement [51][99]. La Figure 64 (a) illustre l'évolution de la résistance série en fonction de la température et du SoC d'une batterie Li-ion. Elle montre que la résistance a tendance à augmenter quand la température baisse. La Figure 64 (b) présente un exemple d'augmentation de la résistance série pendant le vieillissement en cyclage à 25 °C d'une batterie Li-ion.



(a)



(b)

Figure 64 : (a) Résistance série en fonction de la température et du SoC d'une batterie Li-ion par caractérisation fréquentielle [51] (b) Résistance série pendant le vieillissement en cyclage à 25 °C d'une batterie Li-ion par caractérisation temporelle (Figure refaite à partir de [99])

(c) Sensibilité de l'impédance de transfert de charges et double couche $Z_{TC, dc}$

Les différents travaux dans [49][65][70] montrent que les paramètres (cf. R, α et Q sur la Figure 32) de l'impédance de transfert de charges et double couche sont plus ou moins sensibles au SoC et au courant. La Figure 65 présente un exemple des évolutions des paramètres en fonction du SoC et du courant pour une batterie Li-ion dont l'impédance de transfert de charges et double couche est représentée par un circuit de Zarc [49]. Elle montre que tous les paramètres sont

dépendants du SoC. La valeur de R a tendance à diminuer quand le courant augmente et l'évolution de la valeur de Q a une tendance inverse. Le paramètre α est moins sensible au courant par rapport aux deux autres paramètres. Sur la Figure 65 est aussi présentée l'évolution du produit de R et Q qui est considéré comme constante de temps du circuit de Zarc. La dénomination « constante de temps » est un abus de langage puisque la dimension de R.Q est s^α . La valeur de cette constante de temps est comprise entre 15 et 35 ms d'après l'auteur, soit entre 15 et 35 ms^α en respectant l'unité de R.Q. Compte tenu de cette faible valeur, l'auteur dans [49] a choisi de remplacer le circuit de Zarc par la résistance R pour une simulation temporelle avec une période d'échantillonnage de 100 ms.

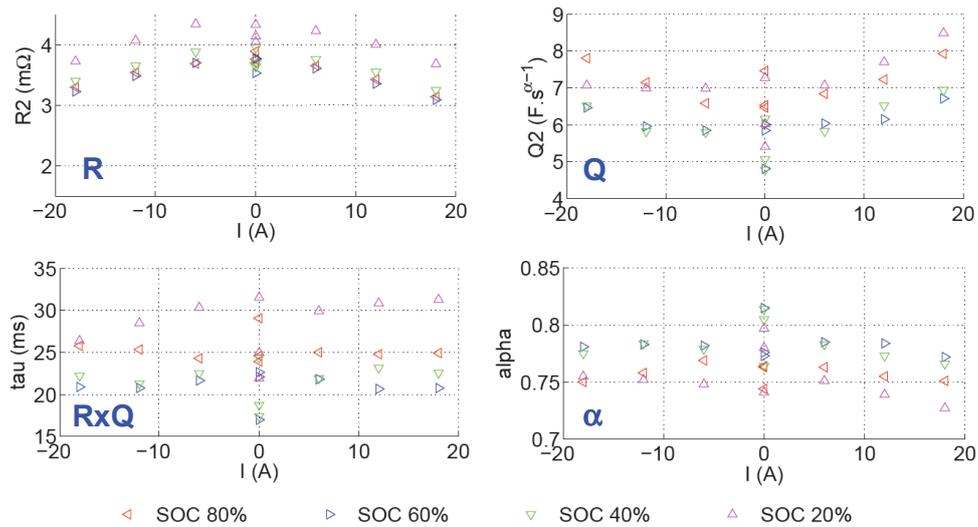


Figure 65 : Evolution des paramètres (R, Q, RxQ et α) de l'impédance de transfert de charges et double couche en fonction du SoC et du courant pour une batterie NCM de 12 Ah [49]

Plusieurs travaux montrent aussi que le paramètre R évolue en fonction de la température et pendant le vieillissement [53][65]. La Figure 66 (a) représente l'évolution de la résistance R de l'impédance de transfert de charges et double couche en fonction du courant à différentes températures pour des batteries Li-ion. La valeur de la résistance R a tendance à diminuer quand la température augmente pour les deux batteries de 40 Ah et de 100 Ah. La Figure 66 (b) illustre la variation de la capacité et de la résistance R de l'impédance de transfert de charges et double couche pendant le vieillissement en cyclage pour une batterie Li-ion. La valeur de la résistance R a tendance à augmenter pendant le vieillissement.

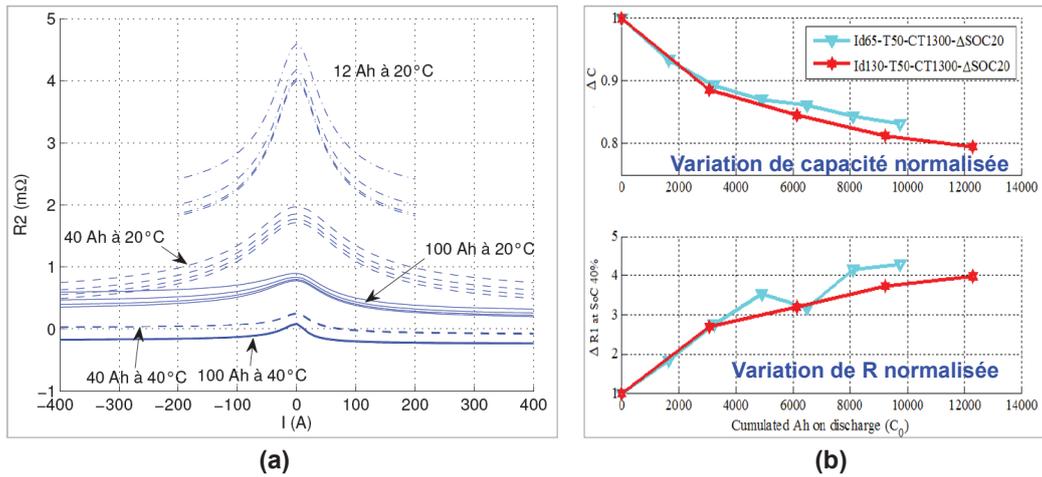


Figure 66 : (a) Evolution de résistance R de l'impédance de transfert de charges et double couche en fonction du courant à différentes températures pour des batteries Li-ion [65] (b) Variation de la capacité et de la résistance R de l'impédance de transfert de charges et double couche pendant le vieillissement en cyclage pour une batterie Li-ion [53]

(d) Sensibilité de l'impédance de transfert de matière Z_{tm}

Dans le cadre des modèles à CPE, les paramètres de l'impédance de transfert de matière peuvent varier en fonction du SoC et du courant selon [64]. La Figure 67 illustre la variation des paramètres de l'impédance de transfert de matière en fonction du SoC et à différents courants de polarisation en charge et en décharge pour une batterie Li-ion présentée dans [64]. L'impédance de transfert de matière est représentée par un circuit de Zarc (cf. Figure 32) qui est identifié à partir des tracés de Nyquist à différents SoCs et à différents courants de polarisation. Le paramètre α du circuit de Zarc est fixé à 0.7 parce que l'auteur de [64] l'a trouvé indépendant du SoC et du courant. Il est à noter que le paramètre α est aussi fixé constant dans d'autres travaux dans la littérature pendant l'identification de l'impédance de transfert de matière, par exemple, à 0.5 dans [49][42]. Sur la Figure 67 :

- R_b a tendance à augmenter aux deux extrémités du SoC et Q_b a une tendance inverse.
- Quand l'amplitude de courant augmente, R_b a tendance à diminuer sauf pour les SoCs proches de la fin de la charge et de la décharge où R_b a une tendance inverse. L'influence de courant sur Q_b est limitée seulement pour les SoCs proches de la fin de la charge et de la décharge où Q_b a tendance à diminuer quand l'amplitude de courant augmente.
- Si l'on calcule une pseudo constante de temps pour le circuit de Zarc par le produit de R_b et Q_b , la valeur maximale de cette pseudo constante de temps est environ 700 s^a. Avec cette grandeur de constante de temps, le modèle identifié n'arrive pas à représenter correctement la dynamique pendant la relaxation où la tension de batterie évolue durant des heures, comme ce qui est présenté sur la Figure 68. Ceci est lié au fait que la fréquence minimale des tracés de Nyquist utilisés pour l'identification de l'impédance de transfert de matière n'est pas suffisamment petite. Il est à noter que les fréquences minimales des tracés de Nyquist utilisées dans la littérature [42][64][68][69][70] sont toutes supérieures ou égales à 1 mHz, qui correspond à une période temporelle de 1000 s. Ainsi, avec cette valeur de fréquence minimale, il est difficile d'avoir une investigation complète sur les effets de transfert de matière dont la plage de temps peut s'étendre à quelques dizaines d'heures (cf. Figure 24)

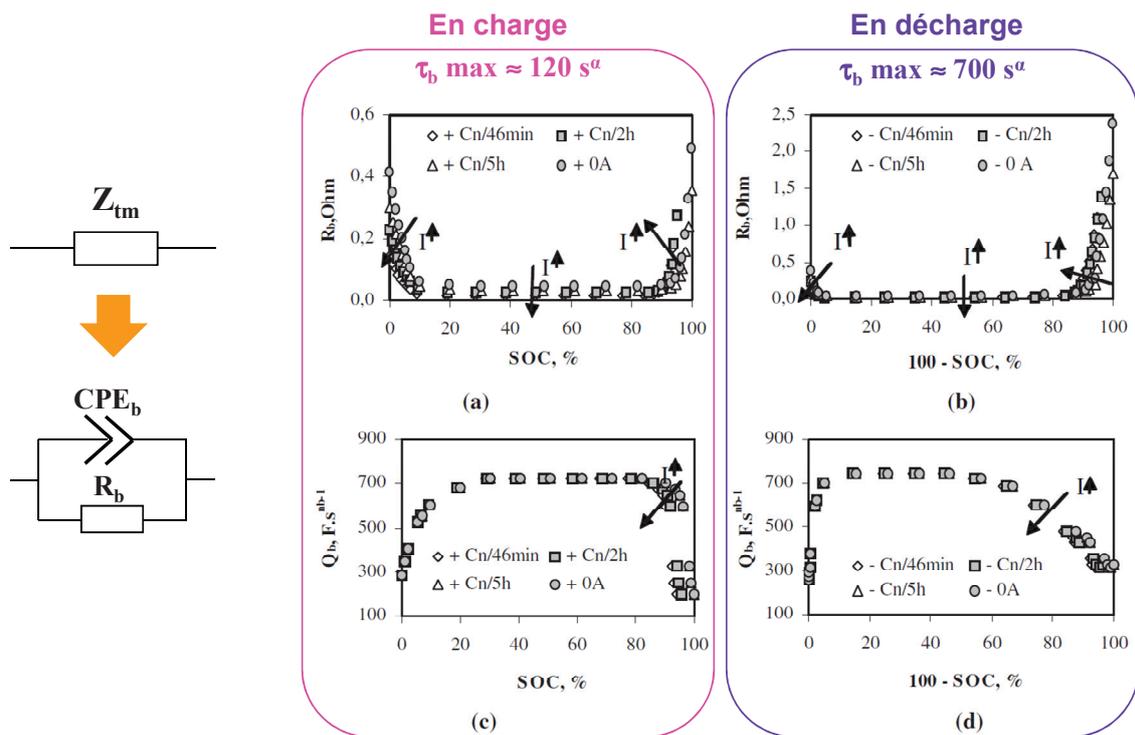


Figure 67 : Variation des paramètres de l'impédance de transfert de matière en fonction du SoC et à différents courants de polarisation en charge et en décharge pour une batterie Li-ion de 2.3 Ah (Figure refaite à partir de [64])

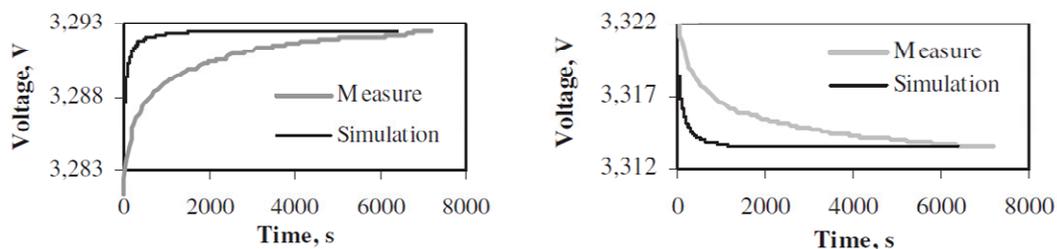


Figure 68 : Tensions simulée et mesurée pendant la relaxation d'une batterie Li-ion de 2.3 Ah à 50% de SoC après décharge et charge [64]

Dans le cadre des modèles de Thévenin, les paramètres de l'impédance de transfert de matière sont aussi sensibles au SoC et au courant selon différents travaux dans la littérature [57][58]. Par exemple, la Figure 69 présente la variation des paramètres de l'impédance de transfert de matière en fonction du SoC et à différents courants de décharge pour une batterie Li-ion dans [57]. L'impédance de transfert de matière est représentée par deux circuits R//C. Elle montre que :

- Les résistances ont tendance à augmenter aux faibles SoCs (< 10%) et les capacités ont une tendance inverse.
- Les valeurs des résistances et des capacités évoluent aussi en fonction du courant. A différents SoCs, les tendances d'évolution des paramètres en fonction du courant ne sont pas identiques. Malgré cette dépendance au courant, l'influence de courant sur l'impédance de transfert de matière est souvent négligée dans de nombreux travaux dans la littérature [59][78][83][98][96][102].

- Si les constantes de temps pour les deux circuits R/C sont calculées, la valeur maximale des constantes de temps est environ 600 s, ce qui n'est pas non plus suffisant pour représenter correctement la dynamique lente de la relaxation. Il est à noter que, dans le cadre des modèles de Thévenin, les constantes de temps identifiées dans la littérature [57][58][78][80][85][98][96] dépassent rarement l'ordre de mille secondes. Afin de pouvoir représenter correctement la dynamique lente de la relaxation, il faut ajouter plus de circuits RC dont les constantes de temps sont plus grandes. Dans [60], un circuit RC est ajouté au modèle (cf. Figure 41) pour améliorer sa performance pendant la relaxation. Cependant, le résultat de simulation avec une relaxation longue de plus de 5 h (cf. Figure 70) montre que l'ajout d'un circuit de RC n'est pas encore suffisant pour représenter correctement toute la dynamique de la relaxation. Un écart évident entre les tensions mesurée et simulée est visible autour de mille secondes sur la Figure 70. En fait, dans la littérature, aucun travail a été fait pour étudier la relation entre le nombre de circuit R/C nécessaire et la durée de relaxation.

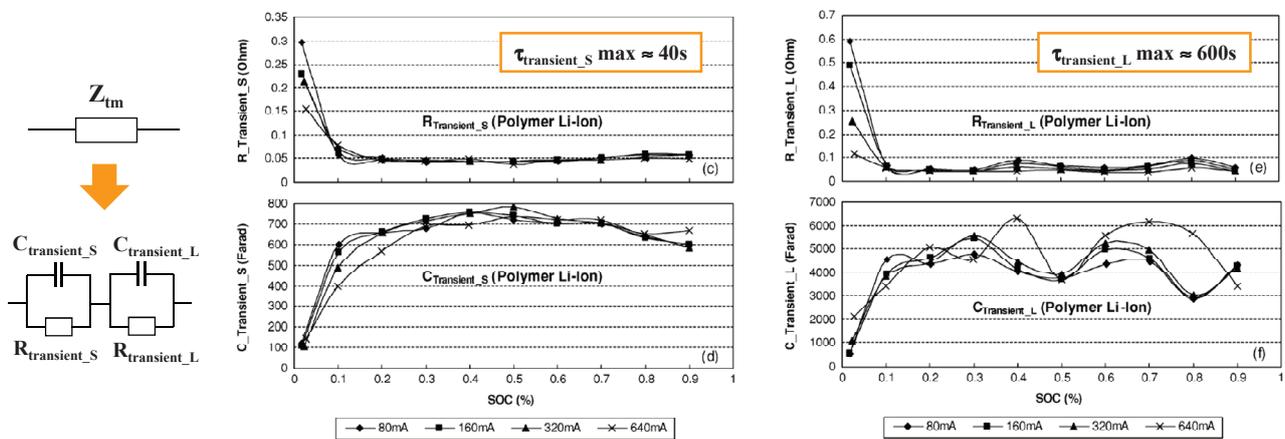


Figure 69 : Variation des paramètres de l'impédance de transfert de matière en fonction du SoC et à différents courants de décharge pour une batterie Li-ion de 0.85 Ah (Figure refaite à partir de [57])

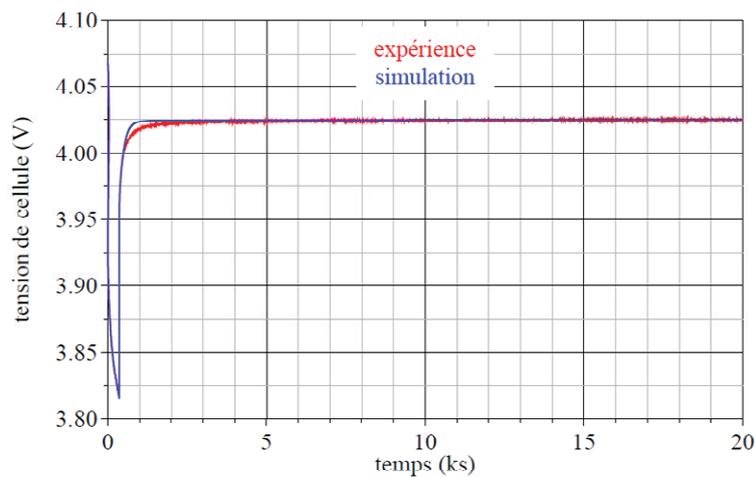


Figure 70 : Tension mesurée et simulée d'une batterie Li-ion pour une décharge en créneau à C/2 suivie par une relaxation de plus de 5 h [60]

Les travaux dans [65] montrent que l'impédance de transfert de matière est aussi sensible à la température. Dans [65], L'impédance de transfert de matière est représentée par un élément CPE avec l'exposant α fixé à 0.5 (cf. Figure 32). Dans ce cas il n'y a qu'un paramètre Q à identifier. La Figure 71 présente la variation du paramètre Q en fonction du SoC et à différentes températures pour des batteries Li-ion de capacités différentes. Une comparaison entre les courbes à 20 °C et à 40 °C sur la Figure 71 montre que la valeur de Q augmente quand la température augmente.

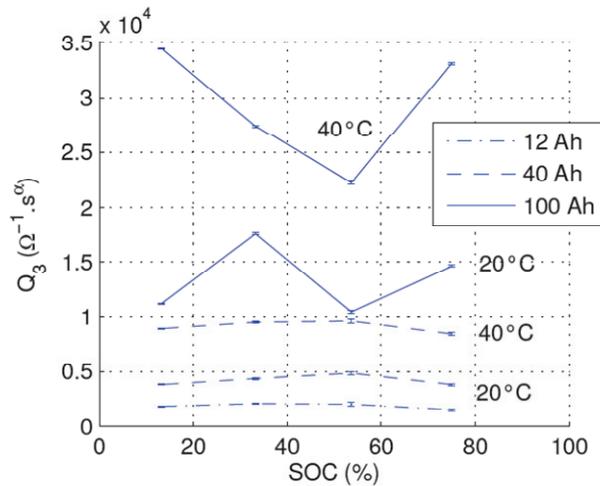


Figure 71 : Variation du paramètre Q de l'impédance de transfert de matière en fonction du SoC et à différentes températures pour des batteries Li-ion de capacités différentes [65]

Les travaux dans [103] montrent que l'impédance de transfert de matière évolue aussi pendant le vieillissement. Dans [103], L'impédance de transfert de matière est représentée par une impédance de Warburg dont l'expression se trouve dans l'équation (16). Le seul paramètre de l'impédance de Warburg est ainsi le coefficient Warburg σ_w qui augmente pendant le vieillissement comme illustré sur la Figure 72.

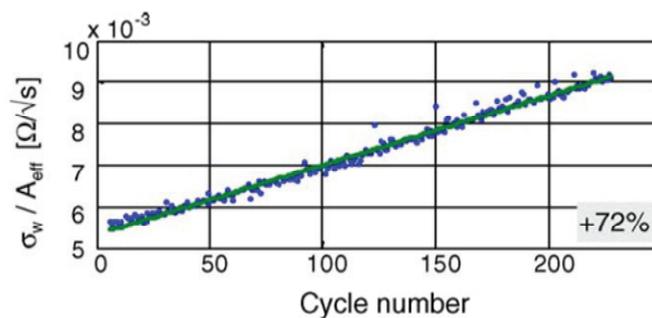


Figure 72 : Evolution du coefficient de Warburg pendant le vieillissement en cyclage pour une batterie Li-ion [103]

2.3.5. Synthèse en vue de la caractérisation d'une batterie

Le Tableau 14 résume des procédures de caractérisation et des sensibilités des paramètres du modèle générique de circuit électrique équivalent. En fonction des données utilisées, les procédures de caractérisation sont de deux types : caractérisation fréquentielle et caractérisation temporelle. Une combinaison des données fréquentielles et temporelles permet d'identifier l'ensemble les paramètres du modèle générique de la Figure 31. Cependant, comme les composants hautes fréquences L et Z_{tc_dc} (dont les fréquences sont en générales supérieures à quelques Hz) ont peu d'intérêt pratique pour la simulation en temporel de batterie, ils sont souvent négligés dans les modèles. Dans ce cas, les paramètres du modèle peuvent être caractérisés seulement avec les données temporelles, ce qui évite d'utiliser un équipement spécifique qui a la fonctionnalité du spectromètre d'impédance. Le Tableau 14 montre aussi que de nombreux paramètres peuvent varier en fonction du SoC, du courant, de la température et du vieillissement.

		$C_{Batt_R\acute{e}el}$	OCV	L	R_s	Z_{tc_dc}	Z_{tm}
Procédure de caractérisation	Fréquentielle			x	x	x	x
	Temporelle	x	x		x		x
Sensibilité	SoC		x		x	x	x
	Courant	x			x	x	x
	Température	x	x	x	x	x	x
	Vieillessement	x		?	x	x	x

Tableau 14 : Résumé des procédures de caractérisation et des sensibilités des paramètres du modèle générique de circuit électrique équivalent selon l'étude bibliographique de ce chapitre (? – A priori n'est pas modifiée car l'inductance ne dépend que de la géométrie du circuit où est intégrée la cellule)

Afin d'avoir une vue global sur la caractérisation d'une batterie dans la littérature, on résume dans le Tableau 15 la caractérisation de différents modèles de la littérature et leurs performances pour la simulation temporelle de la batterie. Les modèles présentés sont principalement des modèles de type circuit électrique équivalent (modèles à CPE et modèles de Thévenin). Dans le tableau est aussi présenté, afin de le comparer avec les modèles de type circuit électrique équivalent, un modèle électrochimique qui donne de bonnes performances en simulation en temporel de la batterie. Le tableau montre que :

- L'impédance des modèles à CPE est principalement caractérisée avec les données fréquentielles et l'impédance des modèles de Thévenin est principalement caractérisée avec les données temporelles. Sachant que la capacité réelle ($C_{Batt_R\acute{e}el}$) et l'OCV peuvent seulement être caractérisées en temporel, les modèles de Thévenin présentent donc un avantage d'être moins exigeants au niveau des équipements d'essais.
- Les modèles de type circuit électrique équivalent ont été testés sur différents types de batterie (Li-ion, NiMH, Plomb) et à différentes conditions (plage de SoC, température). Malgré la non prise en compte de l'influence du courant et de l'hystérésis pour certains de ces modèles, ils sont performants et comparables au modèle électrochimique en termes d'erreur d'estimation.

Réf	Type de modèle	Structure de l'impédance (+ : en série, // : en parallèle)	Caractérisation de l'impédance (T : Temporelle, F : Fréquentielle)				Etendu du modèle					Performance du modèle				
			L	R _s	Z _{tc_dc}	Z _{tm}	Prise en compte du courant		Prise en compte de l'hystérésis dans l'OCV	Plage de SoC	Type de batterie	SoC du profil de validation	Température (°C)	Courant max (charge/décharge)	Erreur d'estimation (*)	
						R _s	Z _{tc_dc}	Z _{tm}								
[49]	Fréquentiel	$R_s + R_{tc} // CPE_{dc} + CPE$	-	T	F	T	oui	non	oui	80~20%	Li-ion de NCM de 12Ah	40%	20	-10C/10C	$\epsilon_{max} \leq 2\%$	
[64]	Fréquentiel	$L + R_s + R_{tc} // CPE_{dc} + CPE_{tm} // R_{tm}$	F	F	F	F	non	oui	oui	100~0%	LiFePO ₄ de 2.3Ah	100~20%	22	-1C/1C	$\epsilon_{max} \leq 2\%$	
[68]	Fréquentiel	$R_s + R_{tc1} // CPE_{dc1} + R_{tc2} // CPE_{dc2} + CPE_{tm} // R_{tm}$	-	F	F	F	non	non	non	100~0%	Li-ion de 6.5Ah	100~0%	-20, -8, 12, 30, 50	Non indiqué	$|\bar{\epsilon}| = 7 \sim 16$ mV	
[58]	Thévenin	$R_s + R_{tm} // C_{tm}$	-	T	-	T	oui	-	non	90~20%	Plomb de 55Ah	Non indiqué	20	0C/1.6C	$\epsilon_{max} \leq 60$ mV	
[57]	Thévenin	$R_s + R_{tm1} // C_{tm1} + R_{tm2} // C_{tm2}$	-	T	-	T	non	non	non	100~0%	Li-ion de 0.85Ah NiMH de 0.75Ah	100~0%	Non indiquée	-0.1C/0.75C	$\epsilon_{max} \leq 21$ mV	
[84]	Thévenin	$R_s + R_{tm1} // C_{tm1} + R_{tm2} // C_{tm2}$	-	T	-	T	non	non	non	80~25%	LiFePO ₄ de 2.3Ah	65~25%	25	-10C/10C	$|\bar{\epsilon}| = 7$ mV	
[60]	Thévenin	Modèle atypique sur la Figure 41	-	F	F	T	oui	oui	non	95~75%	NiMH de 6.5Ah Li-ion de 6.5Ah	$\Delta SoC = 25\%$	25	-6.2C/7.7C	$|\bar{\epsilon}| = 25$ mV	
[54]	Electrochimique	Modèle électrochimique	-	-	-	-	-	-	-	100~0%	Li-ion de 1.5Ah	76~35%	Non indiquée	-3C/6.7C	$|\bar{\epsilon}| = 13$ mV	

Tableau 15 : Exemples des modèles de la littérature et leurs performances pour la simulation temporelle de la batterie

(* ϵ_{max} : erreur maximale, $|\bar{\epsilon}|$: erreur moyenne absolue)

Il est à noter que deux sujets ne sont pas encore bien traités dans la littérature pour les modèles de type circuit électrique équivalent :

- Un **premier sujet** est la prise en compte de la relaxation. La prise en compte de la relaxation est importante pour les véhicules électriques (VEs). Dans le contexte de l'utilisation des VEs, les véhicules sont souvent repris après de longues périodes de repos qui donne lieu à des relaxations longues du pack de batteries. Par conséquent, l'estimation de l'OCV, et donc du SoC présente une erreur si cette variation n'est pas prise en compte dans la mesure de l'OCV et dans le modèle de la batterie. Pour étudier la problématique de relaxation longue, l'utilisation des mesures temporelles est préférable par rapport à l'utilisation des mesures fréquentielles parce que la précision de la mesure de l'impédance n'est pas garantie pour une longue durée de mesure (cf. paragraphe 2.3.4).
- Un **autre sujet** est la conception d'une méthodologie de caractérisation de batterie (modèle et procédure) qui est facile à appliquer à différents types de batteries. Une telle méthodologie est particulièrement intéressante pour l'industrie automobile qui a besoin d'évaluer différentes batteries proposées par de nombreux fournisseurs. Les modèles et les procédures de caractérisation de batterie proposés dans la littérature sont souvent calibrés pour un type de batterie spécifique. Quand on veut les appliquer à une autre batterie dont les caractéristiques sont différentes, l'effort de ré-calibration (ex, structure du modèle, niveau de courant de sollicitation, durée de sollicitation, durée de repos) est parfois important.

2.4. Modèle retenus et type de caractérisation pour l'étude de la thèse

Après avoir présenté les modèles de type circuit électrique équivalent et leurs procédures de caractérisation, il est possible de choisir une structure de modèle et un type de caractérisation qui répondent les mieux aux besoins de la thèse. Les choix sont finalement portés sur un modèle illustré par la Figure 73 et sur la caractérisation temporelle. Le modèle est choisi pour les raisons suivantes :

- Premièrement, étant donné que le modèle dont on a besoin est pour simuler le comportement dynamique en temporel de la batterie à des fréquences égales ou inférieures à 1 Hz, les composants hautes fréquences comme l'inductance L et l'impédance de transfert de charges et double couche peuvent être négligés.
- Deuxièmement, le modèle avec les circuits R//C peut être facilement appliqué à différentes batteries. A l'inverse pour les modèles à CPE, il est souvent nécessaire de changer la structure du modèle en fonction de la forme du tracé de Nyquist de la batterie.
- Troisièmement, dans le cadre des modèles de Thévenin, l'expression de chaque constante de temps ($R_i \cdot C_i$) des circuits R//C en série est plus explicite que les circuits de transmission (cf. Figure 39 (c)).
- Quatrièmement, on peut calibrer facilement la complexité du modèle en modifiant le nombre de circuit R//C.

La caractérisation temporelle est choisie pour les raisons suivantes :

- Premièrement, les données temporelles sont plus adaptées pour étudier la problématique de la relaxation par rapport aux données fréquentielles.
- Deuxièmement, avec la structure du modèle de la Figure 73, on peut caractériser le modèle de batterie seulement avec des données temporelles, ce qui évite l'utilisation d'équipements spécifiques (spectromètre d'impédance).
- Troisièmement, on peut caractériser le modèle de batterie à des forts courants.

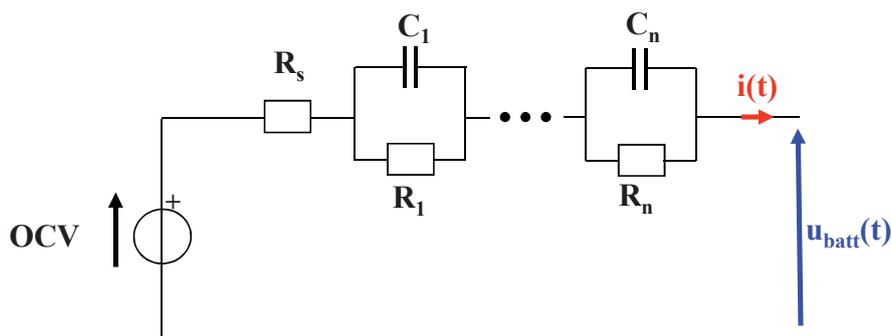


Figure 73 : Structure de modèle retenue pour l'étude de la thèse

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, on a effectué une étude bibliographique sur la modélisation de la batterie afin d'identifier le modèle et le type de caractérisation les plus adaptés aux besoins de la thèse. Tout d'abord, après une introduction sur les comportements dynamiques de la batterie et les phénomènes électrochimiques associés, on a vu que la batterie est un système non linéaire variable dans le temps. Par la suite, on a présenté trois principales approches de la modélisation de la batterie dans la littérature : modèles électrochimiques, modèles de boîte noire et modèles de type circuit électrique équivalent. Une comparaison des trois approches permet d'identifier que les modèles de type circuit électrique équivalent répondent les mieux aux besoins de la thèse. Ensuite, une présentation est exposée sur les procédures de caractérisation des modèles de type circuit électriques équivalent. Cette présentation permet de révéler deux problématiques qui ne sont pas bien présentes dans la littérature : la prise en compte de la relaxation et la conception d'une méthodologie générique de caractérisation de batterie adaptée à différents types de batteries. Finalement, un modèle avec des circuits R//C en série et la caractérisation temporelle sont choisis pour l'étude parce qu'ils sont les plus adaptés pour résoudre les deux problématiques dans le cadre de la thèse.

Chapitre 3 : Etude de la relaxation

3.1. Introduction

Comme cela a été souligné dans le chapitre d'étude bibliographique, la prise en compte de la relaxation dans le modèle de batterie, rarement traitée dans la littérature, est importante pour avoir une estimation précise de SoC. Par exemple comme illustré sur la Figure 74, si l'on utilise la courbe OCV(SoC) mesurée après 1 h comme la référence pour estimer le SoC à partir d'une mesure de tension, l'augmentation de la tension pendant la relaxation après décharge entre 1 h et 24 h introduira une surestimation du SoC.

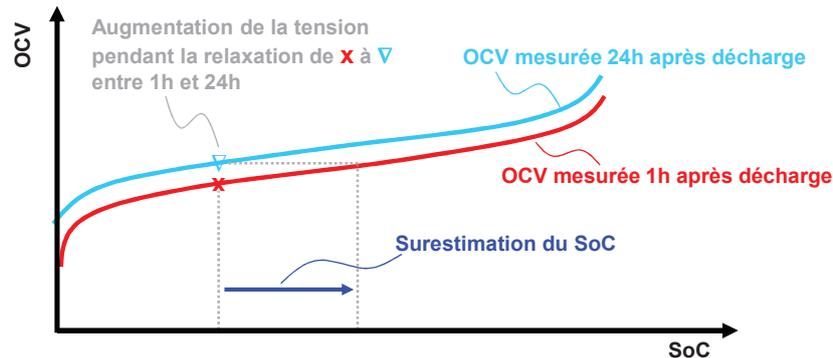


Figure 74 : Illustration de la surestimation du SoC causée par la relaxation longue

Ainsi, il est nécessaire d'effectuer une étude sur la relaxation afin de maîtriser le comportement dynamique de la batterie durant cette phase. Ce chapitre commence par une analyse du comportement dynamique de la batterie pendant la relaxation avec le modèle de Thévenin afin de cibler les paramètres de la relaxation à identifier. Ensuite, une méthode d'identification des paramètres est élaborée. Sa performance est vérifiée par un exemple d'identification d'une relaxation d'une cellule. La méthode est par la suite utilisée pour étudier des relaxations de différentes cellules. Enfin, une investigation sur l'influence de la sollicitation avant la relaxation est menée pour vérifier si les paramètres de relaxation varient en fonction de la sollicitation précédente.

3.2. Expression de la relaxation avec le modèle de Thévenin

Avant de caractériser le comportement dynamique de la batterie pendant la relaxation, il est nécessaire de connaître les paramètres inconnus à identifier qui permettent de représenter la tension de batterie pendant la relaxation. Ceci peut se faire au travers d'une décomposition de la réponse temporelle de la batterie à l'aide du modèle de Thévenin présenté au Chapitre 2 et rappelé sur la Figure 75. L'expression de la tension de batterie $u_{\text{batt}}(t)$ du modèle est donnée par :

$$u_{\text{batt}}(t) = \text{OCV}(\text{SoC}(t)) - u_s(t) - \sum_{i=1}^n u_i(t) \quad (24)$$

avec :

- OCV(SoC(t)) : Tension de circuit ouvert qui évolue en fonction de l'état de charge,
- $u_s(t)$: Chute de tension sur la résistance série R_s ,
- $u_i(t)$: Chute de tension sur le $i^{\text{ème}}$ circuit R//C.

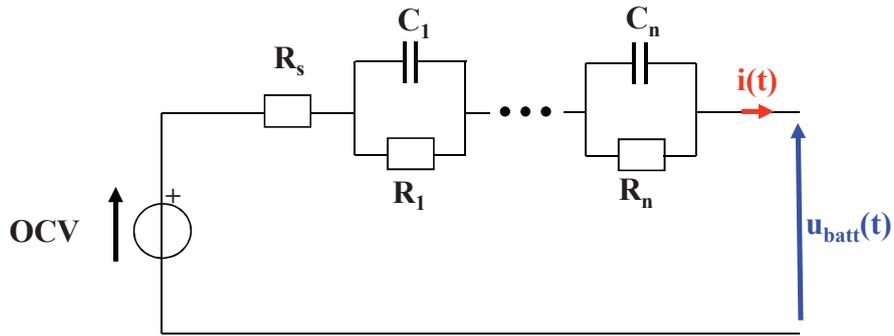


Figure 75 : Structure de modèle retenue pour l'étude de la thèse

La Figure 76 présente un exemple de la réponse de la batterie sollicitée par un courant de décharge en créneau ainsi que la contribution de chaque élément de l'équation (24). La Figure 76 montre que :

- La tension de circuit ouvert évolue seulement pendant la phase de régime forcé où un courant non nul fait varier l'état de charge de la batterie.
- La chute de tension sur la résistance série $u_s(t)$, qui vaut $R_s \cdot i(t)$, est nulle pendant la phase de relaxation.
- L'évolution de la tension en relaxation, liée à l'effet de transfert de matière, est représentée par la chute de tension sur les circuits R/C.

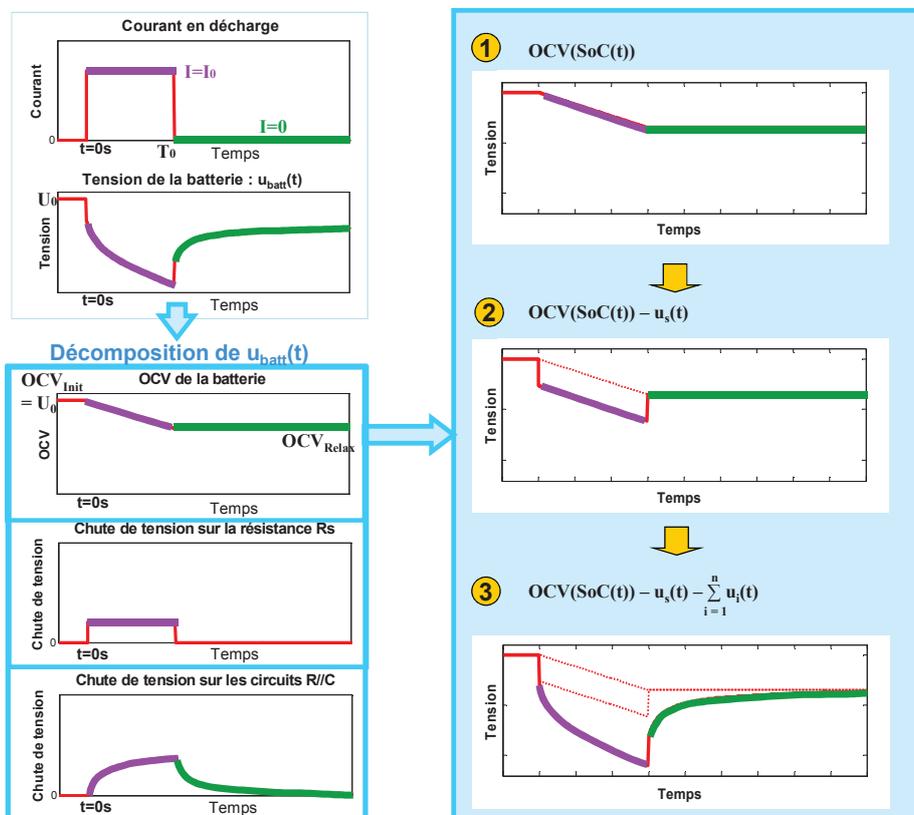


Figure 76 : Exemple de la réponse de la batterie et contribution de chaque élément de l'équation (24)

L'évolution de la chute de tension sur les circuits R//C en régime forcé et en relaxation est expliquée plus en détail ci-dessous :

- **En régime forcé**, la chute de tension sur les circuits R//C est donnée par :

$$\sum_{i=1}^n u_i(t) = \sum_{i=1}^n I_0 \cdot R_{i_RF} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{i_RF}}}) \quad (25)$$

avec :

R_{i_RF} : Résistance d'un circuit R//C en régime forcé

τ_{i_RF} : Constante de temps d'un circuit R//C ($\tau_i = R_i \cdot C_i$) en régime forcé,

$$\tau_{1_RF} < \tau_{2_RF} < \dots < \tau_{n_RF}.$$

A la fin du régime forcé qui correspond à l'instant $t = T_0$, l'expression (25) devient :

$$\sum_{i=1}^n u_i(T_0) = \sum_{i=1}^n I_0 \cdot R_{i_RF} \cdot (1 - e^{-\frac{T_0}{\tau_{i_RF}}}) = \sum_{i=1}^n U_{i_Relax} \quad (26)$$

avec :

U_{i_Relax} : Chute de tension sur un circuit R//C au début de la relaxation

- **En relaxation**, l'expression de la chute de tension sur les circuits R//C est :

$$\sum_{i=1}^n u_i(t - T_0) = \sum_{i=1}^n U_{i_Relax} \cdot e^{-\frac{t - T_0}{\tau_{i_Relax}}} \quad (27)$$

avec :

τ_{i_Relax} : Constante de temps d'un circuit R//C en relaxation,

$$\tau_{1_Relax} < \tau_{2_Relax} < \dots < \tau_{n_Relax}.$$

Il faut noter que les constantes de temps en régime forcé (τ_{i_RF}) et en relaxation (τ_{i_Relax}) peuvent être différentes. Après une sollicitation, les chutes de tension sur les circuits R//C tendent vers 0 durant la phase de la relaxation, ainsi, la tension de la batterie $u_{batt}(t)$ tend vers une valeur finie qui est OCV_{Relax} sur la Figure 76. Dans ce cas, la tension de la batterie pendant la relaxation devient donc :

$$u_{batt}(t) = OCV_{Relax} - \sum_{i=1}^n U_{i_Relax} \cdot e^{-\frac{t - T_0}{\tau_{i_Relax}}} \quad (28)$$

Afin de faciliter l'étude de la relaxation, on réinitialise la base du temps pour faire disparaître T_0 de l'expression (28) au travers d'un changement de variable défini par l'équation (29) et illustré sur la Figure 77 :

$$t_{Relax} = t - T_0, \quad \text{pour } t > T_0 \quad (29)$$

L'expression de la tension de la batterie en relaxation devient donc :

$$u_{batt}(t_{Relax}) = OCV_{Relax} - \sum_{i=1}^n U_{i_Relax} \cdot e^{-\frac{t_{Relax}}{\tau_{i_Relax}}} \quad (30)$$

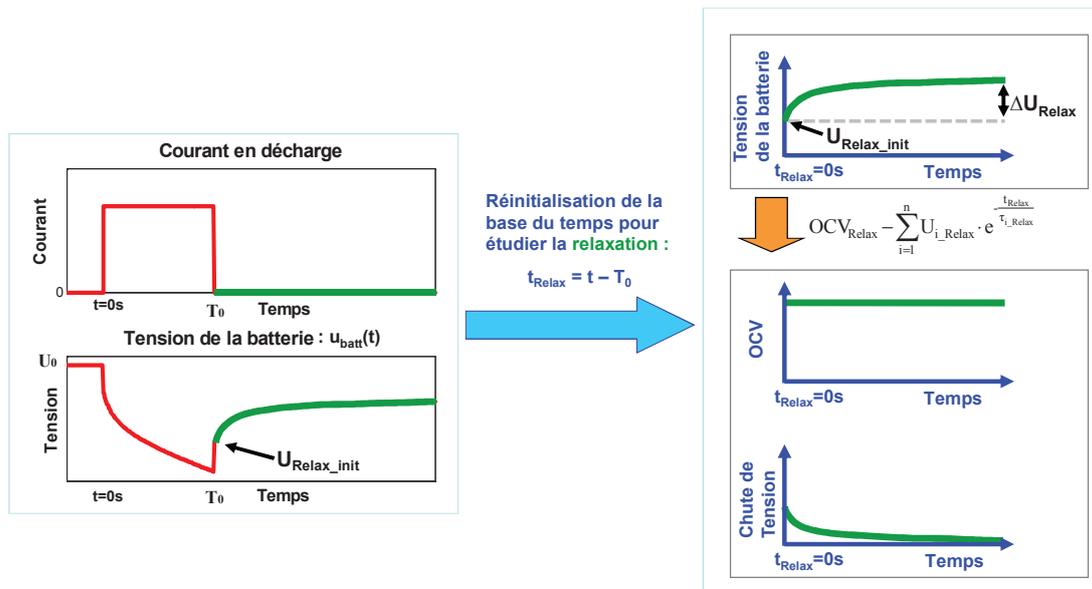


Figure 77 : Réinitialisation de la base du temps au travers d'un changement de variable

On peut encore simplifier l'équation (30) en remplaçant OCV_{Relax} par d'autres paramètres afin de diminuer le nombre de paramètres inconnus. En fait, quand $t_r = 0$ s, l'équation (30) devient :

$$u_{batt}(0) = U_{Relax_init} = OCV_{Relax} - \sum_{i=1}^n U_{i_relax} \quad (31)$$

avec :

U_{Relax_init} : tension initiale de la batterie au début de la relaxation (cf. Figure 77) que l'on peut mesurer directement.

A partir de l'équation (31), on obtient l'expression de l' OCV_{Relax} :

$$OCV_{Relax} = U_{Relax_init} + \sum_{i=1}^n U_{i_relax} \quad (32)$$

En remplaçant l' OCV_{Relax} de l'équation (30) par l'équation (32), on peut écrire la tension de la batterie pendant la relaxation par :

$$u_{batt}(t_{Relax}) = U_{Relax_init} + \sum_{i=1}^n U_{i_relax} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{Relax}}{\tau_{i_Relax}}} \right) \quad (33)$$

Finalement, les paramètres inconnus à identifier pour une relaxation sont :

- Le nombre de circuits R//C nécessaire : n ,
- Les chutes de tension sur chaque circuit R//C au début de la relaxation : U_{i_Relax} ,
- Les constantes de temps de chaque circuit R//C en relaxation : τ_{i_Relax} .

Deux problématiques sont à résoudre pendant l'identification des paramètres inconnus :

- La **première problématique** est de déterminer le nombre n de circuits R//C juste nécessaire sur la plage d'utilisation temporelle recherchée.

Dans la littérature, il n'existe pas encore une méthode pour déterminer le nombre de circuits R//C à utiliser. Différents nombres de circuits R//C ont été utilisés pour représenter le comportement dynamique de la batterie, par exemple, 1 R//C dans [58], 2 R//C dans [57], 3 R//C dans [84], 5 R//C dans [42] et même 20 R//C dans [41]. En fait, le nombre de circuits

R//C doit déterminer la précision et la plage de temps couverte par le modèle. Parce que si l'on change la période d'échantillonnage ou la durée de relaxation, la plage de temps que l'on peut observer va être différente et par conséquent le nombre approprié de circuit R//C à utiliser peut être différent. Ainsi, le nombre de circuit R//C à utiliser doit être fonction de la période d'échantillonnage et de la durée de relaxation.

- La **deuxième problématique** est d'identifier proprement les n constantes de temps inconnues.

Les constantes de temps identifiées dans la littérature dépassent rarement l'ordre du millier de secondes. Elles ne permettent pas de bien représenter les comportements de la phase de relaxation liés aux effets électrochimiques qui couvrent une grande plage du temps de quelques millisecondes à quelques dizaines d'heures (cf. Figure 24 du Chapitre 2). De plus, si l'on applique directement un algorithme d'optimisation (par exemple, algorithme de moindres carrés qui est souvent utilisé dans la littérature) pour identifier les constantes de temps sans bien définir leurs valeurs initiales et leurs conditions aux limites, les constantes de temps identifiées risquent de se superposer ou d'être très proches l'une à l'autre.

Afin de résoudre les deux problématiques, dans la section suivante sera proposée une méthode d'identification des paramètres de la relaxation qui permettra à la fois de déterminer le nombre de circuits R//C nécessaire et d'identifier les paramètres inconnus.

3.3. Méthode d'identification d'une relaxation

3.3.1. Démarche d'identification

Afin de trouver les valeurs des paramètres n , U_{i_Relax} et τ_{i_Relax} dans l'équation (33) pour une relaxation, il a été développée une méthode d'identification donc la démarche est résumée ci-dessous et illustrée par la Figure 78:

- **Etape 1**, un ré-échantillonnage est effectué sur la mesure expérimentale de la tension en relaxation afin de répartir ses échantillons de manière qu'ils facilitent l'identification des paramètres du modèle de batterie. Le détail du ré-échantillonnage sera présenté dans le paragraphe 3.3.2.
- **Etape 2**, à partir de la durée de relaxation et de la période d'échantillonnage, une méthode de division théorique est utilisée pour déterminer les nombres possibles de circuits R//C ($n = N1, N2, \dots$). La méthode de la division théorique est expliquée en détail dans le paragraphe 3.3.3.
- **Etape 3**, pour une valeur n donnée parmi les valeurs possibles définies dans l'étape 2, on peut identifier les valeurs des $2n$ paramètres inconnus ($n U_{i_Relax}$ et $n \tau_{i_Relax}$) du modèle de batterie par l'algorithme d'optimisation et calculer l'erreur entre la tension mesurée et l'estimation du modèle. Le détail d'identification pour un modèle avec n circuits R//C sera donné dans le paragraphe 3.3.4. En faisant varier le nombre n , on obtient les erreurs pour différentes valeurs de n .
- **Etape 4**, en fixant une erreur acceptable (par exemple, selon le cahier des charges, la précision de l'appareil de mesure), on arrive à déterminer un nombre optimal n juste nécessaire. Le détail du choix du nombre optimal sera discuté dans le paragraphe 3.3.5.

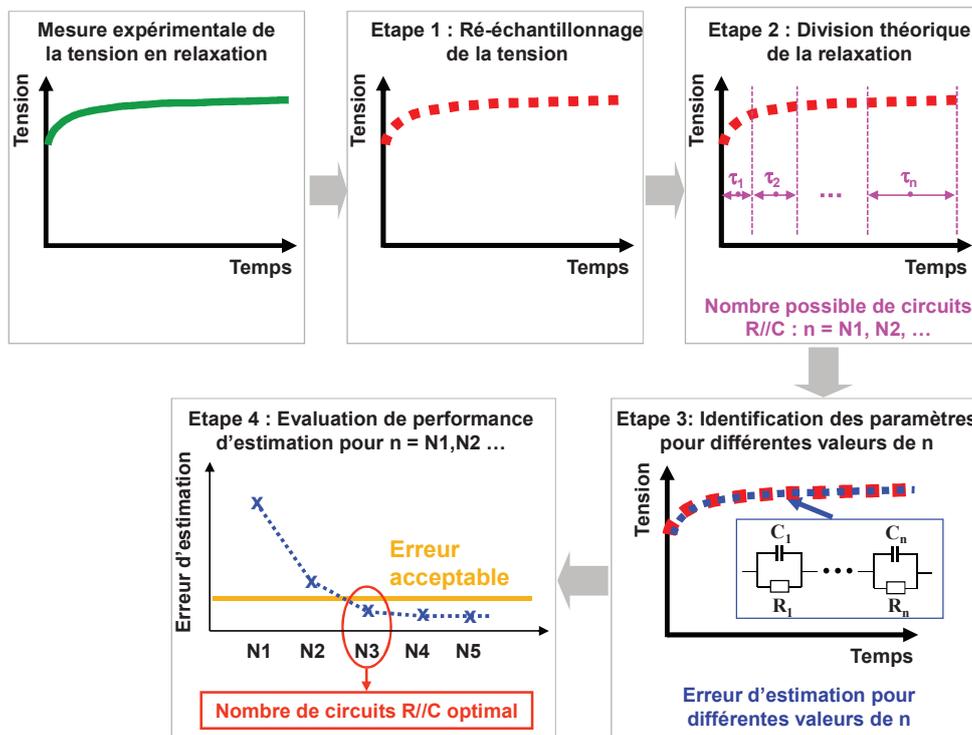


Figure 78 : Démarche d'identification d'une relaxation

Par rapport aux travaux similaires dans la littérature, l'originalité de la méthode proposée est qu'elle permet de :

- déterminer le nombre optimal de circuits R//C à utiliser non seulement selon la précision souhaitée comme dans [98], mais aussi selon la période d'échantillonnage et la durée de relaxation,
- générer les valeurs initiales et les conditions aux limites des paramètres pour l'identification sans besoin de recours à l'expérience a priori sur la batterie comme dans [102] .

Avec la méthode proposée, une étude a été menée sur des relaxations de différentes cellules. A l'issue de cette étude, une règle générale de détermination du nombre de circuits R//C indépendante de l'erreur acceptable sera proposée dans le paragraphe 3.5.3.

3.3.2. Ré-échantillonnage de la tension pendant la relaxation

La raison d'appliquer un ré-échantillonnage est liée aux exponentielles décroissantes contenues dans l'équation (33). Si l'on échantillonne une exponentielle à période constante comme sur la Figure 79 (a), et que l'on compare le nombre d'échantillons sur la même fenêtre de variation d'amplitude (cf. par exemple les fenêtres A et B sur la Figure 79 (a)), on va trouver qu'il y a plus d'échantillons sur la fenêtre B en aval que sur la fenêtre A en amont. Ainsi, si l'on applique un algorithme d'optimisation sur une relaxation échantillonnée à période constante, le poids numérique de la partie en aval sera plus grand par rapport à la partie en amont, ce qui réduira la précision d'identification des constantes de temps rapides situées dans la partie en amont.

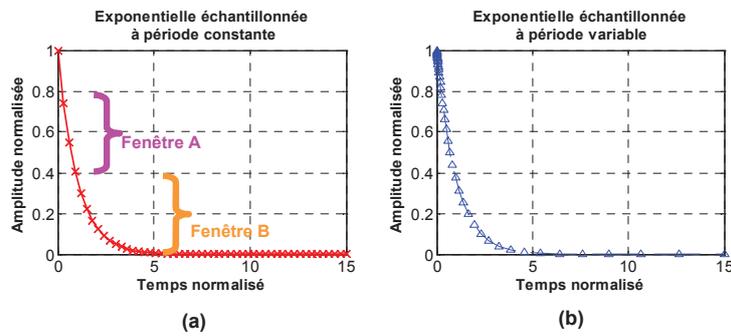


Figure 79 : (a) Exponentielle normalisée échantillonnée à période constante (b) Exponentielle normalisée échantillonnée à période variable (échantillonnage géométrique)

Afin d'augmenter la précision d'identification des constantes de temps rapides, un ré-échantillonnage géométrique comme dans le Tableau 16 est utilisé pour répartir les échantillons de manière qu'il y ait plus d'échantillons sur la partie en amont où la tension évolue plus vite. La Figure 79 (b) donne un exemple d'application du ré-échantillonnage géométrique sur une exponentielle normalisée de la Figure 79 (a). L'amplitude correspondant à chaque instant d'échantillonnage de la Figure 79 (b) est obtenue par interpolation à partir des données de la Figure 79 (a). Le résultat sur la Figure 79 (b) montre qu'il y a plus d'échantillons sur la partie où la vitesse de la variation de tension est plus grande.

N° d'échantillon	1	2	...	N
Instant d'échantillonnage avec échantillonnage à période constante T_e pour une mesure de durée Δt_{Relax}	T_e	$2 \cdot T_e$	...	$N \cdot T_e$
Instant d'échantillonnage après ré-échantillonnage géométrique	T_e	$q \cdot T_e$	...	$q^{N-1} \cdot T_e$

Tableau 16 : Ré-échantillonnage géométrique sur une mesure de durée Δt_{Relax} avec échantillonnage

à période constante T_e et contenant N échantillons (le facteur q est calculé par $q = \left(\frac{\Delta t_{Relax}}{T_e} \right)^{\frac{1}{N-1}}$)

En fait, on peut interpréter le ré-échantillonnage géométrique du Tableau 16 comme un ré-échantillonnage logarithmique. Parce que la distance entre deux échantillons adjacents quelconques est identique à l'échelle logarithmique comme démontré par l'équation (34) :

$$\text{Distance entre le } i^{\text{ème}} \text{ et le } (i-1)^{\text{ème}} \text{ échantillons} = \log(q^{i-1} \cdot T_e) - \log(q^{i-2} \cdot T_e) = \log(q) \quad (34)$$

Dans la pratique, les mesures expérimentales sont le plus souvent obtenues avec un temps d'échantillonnage constant. L'amplitude correspondant à chaque instant du nouvel échantillonnage peut être obtenue par interpolation à partir des données expérimentales.

3.3.3. Division théorique de la relaxation

La méthode de division théorique de la relaxation est élaborée d'une part pour éviter le risque de superposition des constantes de temps identifiées et d'autre part pour déterminer les nombres possibles de circuits R//C à utiliser. L'idée principale de la méthode est de diviser la phase

de la relaxation en n partitions pour n constantes de temps (cf. l'étape 2 de la Figure 78). Chaque constante de temps τ_{i_Relax} n'est autorisée à varier qu'à l'intérieur de la partition correspondante :

$$\tau_{i_Relax} \in [\tau_{i_Relax_Min}, \tau_{i_Relax_Max}] \quad (35)$$

avec :

$\tau_{i_Relax_Min}$ et $\tau_{i_Relax_Max}$: conditions aux limites correspondant aux valeurs minimale et maximale de la partition.

Le Tableau 17 présente la formule pour déterminer théoriquement les valeurs et les conditions aux limites de n constantes de temps contenues dans une relaxation dont la durée est Δt_{Relax} et la période d'échantillonnage minimale est T_e . Le tableau permet d'avoir une vision globale sur la répartition des constantes de temps sur la relaxation. Il est élaboré à partir des cinq hypothèses suivantes :

- **Hypothèse 1** : la borne inférieure des valeurs des constantes de temps τ_{min} est déterminée en fonction de la période d'échantillonnage :

$$\tau_{i_Relax} \geq \tau_{min} = \delta \cdot T_e \quad (36)$$

avec :

δ : une valeur entière.

Le seuil minimal de la condition aux limites de la première constante de temps τ_{1_Relax} vaut donc $\delta \cdot T_e$ (voir le Tableau 17).

- **Hypothèse 2** : la valeur initiale de la constante de temps la plus petite τ_{1_Relax} est fixée par :

$$\tau_{1_Relax} = \alpha \cdot T_e \quad (37)$$

avec :

α : une valeur entière.

Il est à noter que la valeur de α doit être supérieure à la valeur de δ afin que la valeur de τ_{1_Relax} soit plus grande que le seuil minimal de sa condition aux limites. Pour une valeur de α spécifique et selon l'équation (37), si l'on souhaite identifier des faibles constantes de temps intrinsèques à la batterie, on doit diminuer la période d'échantillonnage.

- **Hypothèse 3** : il y a un rapport fixe entre deux constantes de temps adjacentes :

$$\frac{\tau_{i+1_Relax}}{\tau_{i_Relax}} = \gamma \quad (38)$$

avec :

γ : une valeur supérieure à 1.

Avec l'hypothèse 2, l'expression de τ_{i_Relax} est donnée par :

$$\tau_{i_Relax} = \alpha \cdot T_e \cdot \gamma^{i-1} \quad (39)$$

- **Hypothèse 4** : toutes les constantes de temps doivent être inférieures à une limite maximale τ_{max} qui est déterminée par :

$$\tau_{i_Relax} \leq \tau_{max} = \frac{\Delta t_{Relax}}{\beta} \quad (40)$$

avec :

β : une valeur entière.

Le seuil maximal de la condition aux limites de la dernière constante de temps τ_{N_Relax} vaut donc $\Delta t_{Relax}/\beta$. Pour une valeur de β spécifique et selon l'équation (40), si l'on souhaite identifier des constantes de temps plus grandes, on doit augmenter la durée de mesure de la relaxation. A partir des équations (39) et (40), on peut déduire l'expression du nombre

maximal de constantes de temps N donné par l'équation (41). Le détail pour obtenir l'expression de N est donné en Annexe 1.

$$N = \text{Troncature de} \left(\frac{\log\left(\frac{\Delta t_{\text{Relax}}}{\alpha \cdot T_e \cdot \beta}\right)}{\log(\gamma)} \right) + 1 \quad (41)$$

Il est à noter que dans Matlab, cette fonction de troncature est réalisée par la commande floor(x0).

- **Hypothèse 5** : la condition aux limites des constantes de temps intermédiaires est fixée à mi-distance entre 2 valeurs consécutives :

$$\tau_{i_Relax} \in \left[\frac{\tau_{i-1_Relax} + \tau_{i_Relax}}{2}, \frac{\tau_{i_Relax} + \tau_{i+1_Relax}}{2} \right] \quad (42)$$

Constante de temps	τ_{1_Relax}	τ_{2_Relax}	...	τ_{N_Relax}
Valeur théorique	$\alpha \cdot T_e$	$\alpha \cdot T_e \cdot \gamma$	...	$\alpha \cdot T_e \cdot \gamma^{N-1}$
Condition aux limites	$[\delta \cdot T_e, \frac{\tau_{1_Relax} + \tau_{2_Relax}}{2}]$	$[\frac{\tau_{1_Relax} + \tau_{2_Relax}}{2}, \frac{\tau_{2_Relax} + \tau_{3_Relax}}{2}]$	...	$[\frac{\tau_{N-1_Relax} + \tau_{N_Relax}}{2}, \frac{\Delta t_{\text{Relax}}}{\beta}]$

Tableau 17 : Division théorique d'une relaxation dont la durée est Δt_{Relax} et la période d'échantillonnage minimale est T_e

Avant d'appliquer le tableau à une relaxation, on doit encore définir les valeurs de α , β , δ et γ . Dans la pratique, avec l'influence du bruit de mesure sur la tension, la détermination de leurs valeurs optimales n'est pas évidente. On propose donc de définir leurs valeurs selon l'expérience empirique comme ci-après :

- Pour α qui détermine la constante de temps la plus petite, une grande valeur est préférable afin de s'affranchir de l'impact du bruit.
- Pour β qui détermine le seuil maximal de la condition aux limites de la plus grande constante de temps, une petite valeur est préconisée pour permettre des constantes de temps de valeur élevée.
- Pour δ qui détermine le seuil minimal de la condition aux limites de la plus petite constante de temps, une petite valeur par rapport à α est recommandée afin de permettre des constantes de temps de valeur faible.
- Pour γ qui détermine le rapport entre deux constantes de temps consécutives, on prend l'hypothèse qu'il faut un rapport minimal de 3 entre deux constantes de temps consécutives afin de pouvoir les identifier.

Les valeurs par défaut de α , β , δ et γ sont résumées dans le Tableau 18.

	α	β	δ	γ
Valeur par défaut	10	2	2	≥ 3

Tableau 18 : Définition par défaut de α , β , δ et γ

Avec la formule du Tableau 17 et les valeurs du Tableau 18, on peut obtenir les divisions théoriques d'une relaxation pour différentes valeurs de γ . Ces divisions théoriques permettront de déterminer :

- **Les nombres possibles de circuits R//C à utiliser.**

Pour une relaxation de durée Δt_{Relax} avec une période d'échantillonnage T_e , le nombre minimal de circuits R//C est 1 et le nombre maximal de circuits R//C est obtenu quand $\gamma = 3$ selon l'équation (41). Ainsi, les nombres possibles de circuits R//C à utiliser sont comprises dans une plage $[N_{\text{min}}, N_{\text{max}}]$ exprimée par :

$$[N_{\text{min}}, N_{\text{max}}] = \left[1, \text{Troncature de} \left(\frac{\log\left(\frac{\Delta t_{\text{Relax}}}{20 \cdot T_e}\right)}{\log(3)} \right) + 1 \right] \quad (43)$$

Le Tableau 19 donne quelques exemples de N_{max} pour différentes durées de relaxation avec différentes périodes d'échantillonnage. Ce tableau montre que, quand la durée de relaxation augmente ou la période d'échantillonnage diminue, le nombre maximal de circuits R//C a tendance à augmenter.

Durée de relaxation	10 s	1 min	10 min	1 h	24 h
N_{max} avec $T_e = 0.1\text{s}$	2	4	6	7	10
N_{max} avec $T_e = 1\text{s}$	1	2	4	5	8

Tableau 19 : Exemple du nombre maximal de circuits R//C en fonction de la durée de relaxation avec différentes périodes d'échantillonnage T_e selon l'équation (43)

- **Les valeurs théoriques et les conditions aux limites des constantes de temps pour chaque nombre possible de circuits R//C.**

Par la suite, l'utilisation du Tableau 17 sera présentée plus en détail grâce à un exemple d'application considérant une relaxation de durée 24 h (86400 s) avec une période d'échantillonnage minimale $T_e = 0.1$ s. Le résultat de calcul des valeurs théoriques des constantes de temps selon le Tableau 17 pour différentes valeurs de γ est présenté sur la Figure 80. Les cellules correspondant aux constantes de temps supérieures au seuil maximal $\tau_{\text{max}} = \Delta t_{\text{Relax}}/\beta = 43200$ s sont surlignées en brun (cf. équation (40)). Cela permet de voir clairement le nombre de circuits R//C à utiliser pour chaque valeur de γ . Par exemple, pour $\gamma = 3$ qui est la valeur minimale de γ , le nombre de circuit R//C est 10. Quand la valeur de γ augmente, le nombre de circuit R//C a tendance à diminuer et tend vers 1. Ainsi, pour la relaxation de durée 24 h et avec la période d'échantillonnage minimale de 0.1 s, les nombres possibles de circuits R//C vont de 1 à 10 (1 R//C à 10 R//C).

	Rapport γ	τ_{1_Relax}	τ_{2_Relax}	τ_{3_Relax}	τ_{4_Relax}	τ_{5_Relax}	τ_{6_Relax}	τ_{7_Relax}	τ_{8_Relax}	τ_{9_Relax}	τ_{10_Relax}	τ_{11_Relax}
10 R//C	3	1	3	9	27	81	243	729	2187	6561	19683	59049
9 R//C	3.5	1	3.5	12.3	42.9	150.1	525.2	1838.3	6433.9	22518.8	78815.6	275854.7
8 R//C	4	1	4	16	64	256	1024	4096	16384	65536	262144	1048576
7 R//C	5	1	5	25	125	625	3125	15625	78125	390625	1953125	9765625
6 R//C	6	1	6	36	216	1296	7776	46656	279936	1679616	10077696	60466176
	7	1	7	49	343	2401	16807	117649	823543	5764801	40353607	282475249
	8	1	8	64	512	4096	32768	262144	2097152	16777216	134217728	1073741824
5 R//C	9	1	9	81	729	6561	59049	531441	4782969	43046721	387420489	3486784401
	10	1	10	100	1000	10000	100000	1000000	10000000	100000000	1000000000	1E+10
	11	1	11	121	1331	14641	161051	1771561	19487171	214358881	2357947691	2.5937E+10
	12	1	12	144	1728	20736	248832	2985984	35831808	429981696	5159780352	6.1917E+10
4 R//C	13	1	13	169	2197	28561	371293	4826809	62748517	815730721	1.0604E+10	1.3786E+11
	14	1	14	196	2744	38416	537824	7529536	105413504	1475789056	2.0661E+10	2.8925E+11
	15	1	15	225	3375	50625	759375	11390625	170859375	2562890625	3.8443E+10	5.7665E+11
	16	1	16	256	4096	65536	1048576	16777216	268435456	4294967296	6.8719E+10	1.0995E+12
	17	1	17	289	4913	83521	1419857	24137569	410338673	6975757441	1.1859E+11	2.016E+12
	18	1	18	324	5832	104976	1889568	34012224	612220032	1.102E+10	1.9836E+11	3.5705E+12
	19	1	19	361	6859	130321	2476099	47045881	893871739	1.6984E+10	3.2269E+11	6.1311E+12
1 R//C	43201	1	43201	1.9E+09	8.1E+13	3.5E+18	1.5E+23	6.5E+27	2.8E+32	1.2E+37	5.2E+41	2.3E+46

Figure 80 : Un exemple des valeurs de constantes de temps en fonction de la valeur de γ pour une relaxation de durée $\Delta t_{Relax} = 24$ h (86400 s) avec la période d'échantillonnage minimale $T_e = 0.1$ s

En fait, pour un γ donné, il y a une relation linéaire entre la valeur de τ_{i_Relax} et celle de i dans le plan logarithmique. Parce que l'expression de τ_{i_Relax} (cf. équation (39)) peut se traduire par :

$$\log(\tau_{i_Relax}) = (\log \gamma) \cdot i + \log\left(\frac{\alpha \cdot T_e}{\gamma}\right) \quad (44)$$

La Figure 81 présente les τ_{i_Relax} de la Figure 80 sur une échelle semi-logarithmique en fonction de i pour différentes valeurs de γ . Elle montre que quand la valeur de γ augmente, la pente de la courbe correspondante augmente.

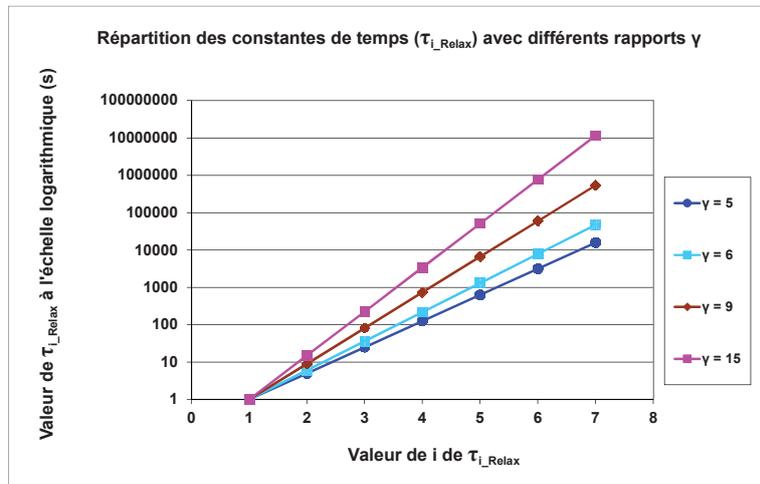


Figure 81 : Constantes de temps τ_{i_Relax} de la Figure 80 sur une échelle semi-logarithmique en fonction de i pour différentes valeurs de γ

Avec les valeurs de constantes de temps théoriques et en appliquant le Tableau 17, on peut obtenir les conditions aux limites des constantes de temps pour chaque nombre possible de circuit R//C. Il est à noter que, sur la Figure 80, plusieurs valeurs de γ peuvent donner un même nombre de circuits R//C. Dans ce cas, la valeur la plus faible est retenue pour le calcul des conditions aux limites de τ_{i_Relax} . Ce choix assure que la condition aux limites pour chaque τ_{i_Relax} inclue toutes les possibilités de valeur de ce τ_{i_Relax} de la Figure 80. Par exemple, pour le cas de 5 R//C, la Figure 80 indique que la plage des valeurs théoriques de τ_{3_Relax} peut varier de 81 s à 196 s. La condition aux

limites de τ_{3_Relax} pour $\gamma = 9$ de 45 s à 405 s (cf. Tableau 20) inclut donc les valeurs théoriques, alors que pour $\gamma = 14$ (cf. Tableau 21) la plage de 105 s à 1470 s ne les inclut pas. De la même manière, on prend $\gamma = 6$ pour 6 circuits R//C, $\gamma = 15$ pour 4 circuits R//C, etc.

Condition aux limites	$\tau_{i_Relax_Min}$ (s)	$\tau_{i_Relax_Max}$ (s)
τ_{1_Relax}	0.2	5
τ_{2_Relax}	5	45
τ_{3_Relax}	45	405
τ_{4_Relax}	405	3645
τ_{5_Relax}	3645	43200

Tableau 20 : Conditions aux limites de constantes de temps calculées avec $\gamma = 9$ pour le modèle avec 5 circuits R//C

Condition aux limites	$\tau_{i_Relax_Min}$ (s)	$\tau_{i_Relax_Max}$ (s)
τ_{1_Relax}	0.2	7.5
τ_{2_Relax}	7.5	105
τ_{3_Relax}	105	1470
τ_{4_Relax}	1470	20580
τ_{5_Relax}	20580	43200

Tableau 21 : Conditions aux limites de constantes de temps calculées avec $\gamma = 14$ pour le modèle avec 5 circuits R//C

La Figure 82 résume la division théorique à effectuer, avec comme données d'entrée la durée de relaxation et la période d'échantillonnage, et comme données de sortie les nombres possibles de circuits R//C à utiliser ainsi que les valeurs théoriques et les conditions aux limites des constantes de temps. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que les valeurs théoriques et les conditions aux limites des constantes de temps ne correspondent pas forcément à la réalité. Dans la pratique, il se peut que les constantes de temps qui représentent bien la tension de la relaxation ne se trouvent pas dans les conditions aux limites obtenues par la division théorique. Ainsi, pendant l'identification, un ajustement des conditions aux limites des constantes de temps doit être mis en place pour qu'à l'intérieur de chaque condition aux limites se trouve une seule constante de temps. Le détail de l'identification des paramètres d'une relaxation avec l'ajustement des conditions aux limites est présenté dans le paragraphe suivant.

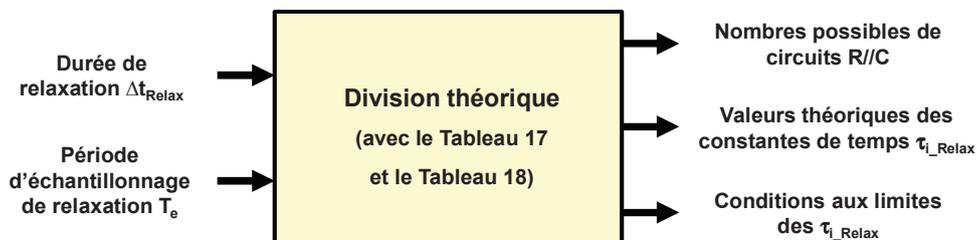


Figure 82 : Schéma résumant les données d'entrée et de sortie de la division théorique de la relaxation

3.3.4. Identification des paramètres

Pour une valeur spécifique n du nombre de circuits $R//C$, l'identification des paramètres inconnus (cf. n couples de U_{i_Relax} et τ_{i_Relax} de l'équation (33)) est résumée par les étapes ci-dessous et illustrée sur la Figure 83 :

- **Etape I** : on définit les conditions initiales aux limites des paramètres U_{i_Relax} et τ_{i_Relax} .

Pour les U_{i_Relax} : les conditions aux limites sont tous définies par $U_{RC_Relax_Min} \leq U_{i_Relax} \leq U_{RC_Relax_Max}$, avec les valeurs de limite par défaut $U_{RC_Relax_Min} = 0.0001$ V et $U_{RC_Relax_Max} = 1$ V. La valeur de 0.0001 V est choisie parce qu'elle est en général plus petite que le bruit de mesure de tension des bancs (ordre du millivolt à la dizaine de millivolt). La valeur de 1 V est choisie parce qu'elle est supérieure aux U_{i_Relax} d'une cellule qui sont de l'ordre du millivolt à la centaine de millivolts. Néanmoins, il faut garder en tête qu'en cas d'identification pour une batterie composée de plusieurs cellules connectées en série, il faut multiplier $U_{RC_Relax_Max}$ par le nombre de cellules.

Pour les τ_{i_Relax} : les conditions aux limites sont définies par la division théorique (cf. paragraphe 3.3.3).

- **Etape II** : les valeurs au milieu des conditions aux limites sont utilisées comme les valeurs initiales des paramètres.

Il est à noter que les valeurs théoriques des constantes de temps obtenues par la division théorique ne sont pas utilisées comme les valeurs initiales. Ceci est dû au fait que l'on utilisera une technique d'ajustement des conditions aux limites pendant l'itération de l'identification qui modifiera les conditions aux limites des constantes de temps. Il est donc avantageux d'utiliser les valeurs au milieu des conditions aux limites qui sont capables de s'adapter automatiquement aux nouvelles conditions aux limites.

- **Etape III** : avec les conditions aux limites et les valeurs initiales des paramètres, on identifie les valeurs des paramètres à partir de la mesure de tension en relaxation par l'optimisation numérique.

Dans le cadre de la thèse, la fonction « lsqcurvefit » de Matlab [104] est utilisée pour l'optimisation numérique. Basée sur la méthode de moindres carrés, cette fonction construit une courbe à partir de l'équation mathématique non-linéaire du modèle et ajuste les paramètres de l'équation au sens des moindres carrés pour se rapprocher de la courbe mesurée. Les principales entrées et sorties de la fonction « lsqcurvefit » sont présentées sur la Figure 84. Une limitation de la fonction « lsqcurvefit » est que, en cas d'identification pour une équation non-linéaire, la solution des paramètres identifiés peut être non unique. En fait, comme la tension pendant la relaxation est décrite par une équation non-linéaire (cf. l'équation (33)) et compte tenu de l'influence du bruit de mesure, il est délicat de trouver une solution unique des paramètres. Malgré cette limitation, on verra dans le paragraphe 3.4

que l'identification proposée de la Figure 83 permet d'aboutir à un modèle qui donne de bonnes estimations sur la tension pendant la relaxation.

- **Etape IV** : on vérifie si des constantes de temps identifiées à l'étape III atteignent les bornes des conditions aux limites.

Si une ou plusieurs constantes de temps identifiées atteignent les bornes des conditions aux limites, cela signifie que les bonnes constantes de temps se trouvent en dehors des conditions aux limites. Dans ce cas, les conditions aux limites sont ajustées comme présenté dans l'étape V.

Si aucune constante de temps ne touche les bornes des conditions aux limites, l'identification est terminée et on considère que les paramètres identifiés sont ceux qui représentent correctement la tension en relaxation (cf. l'étape VI de la Figure 83).

- **Etape V** : on effectue un ajustement de la condition aux limites pour certaines constantes de temps.

Si la valeur identifiée d'une constante de temps $\tau_{i_Relax_identifié}$ obtenue par l'étape III touche la limite supérieure ($\tau_{i_Relax_identifié} = \tau_{i_Relax_Max}$) et qu'elle n'est pas la dernière constante de temps ($i < n$), on va modifier la limite supérieure de la condition aux limites suivant l'expression (45) :

$$[\tau_{i_Relax_Min}, \tau_{i_Relax_Max}] = [\tau_{i_Relax_Min}, \frac{\tau_{i_Relax_identifié} + \tau_{i+1_Relax_identifié}}{2}] \quad (45)$$

La condition aux limites de la prochaine constante de temps τ_{i+1_Relax} sera aussi ajustée à :

$$[\tau_{i+1_Relax_Min}, \tau_{i+1_Relax_Max}] = [\frac{\tau_{i_Relax_identifié} + \tau_{i+1_Relax_identifié}}{2}, \tau_{i+1_Relax_Max}] \quad (46)$$

Au cas où la dernière constante de temps ($i = n$) touche la limite supérieure, sa condition aux limites sera repoussée de la façon suivante :

$$[\tau_{i_Relax_Min}, \tau_{i_Relax_Max}] = [\tau_{i_Relax_Min}, \tau_{i_Relax_identifié} + \frac{\tau_{i_Relax_identifié}}{2}] \quad (47)$$

Si la valeur identifiée d'une constante de temps $\tau_{i_Relax_identifié}$ atteint la limite inférieure ($\tau_{i_Relax_identifié} = \tau_{i_Relax_Min}$) et qu'elle n'est pas la première constante de temps ($i > 1$), on va modifier la limite inférieure de la condition aux limites suivant l'expression (48) :

$$[\tau_{i_Relax_Min}, \tau_{i_Relax_Max}] = [\frac{\tau_{i-1_Relax_identifié} + \tau_{i_Relax_identifié}}{2}, \tau_{i_Relax_Max}] \quad (48)$$

La condition aux limites de la constante de temps précédente τ_{i-1_Relax} sera aussi ajustée à :

$$[\tau_{i-1_Relax_Min}, \tau_{i-1_Relax_Max}] = [\tau_{i-1_Relax_Min}, \frac{\tau_{i_Relax_identifié} + \tau_{i+1_Relax_identifié}}{2}] \quad (49)$$

Au cas où la première constante de temps ($i = 1$) atteint la limite inférieure, sa condition aux limites sera modifiée de la manière suivante :

$$[\tau_{i_Relax_Min}, \tau_{i_Relax_Max}] = \left[\frac{\tau_{i_Relax_identifé}}{2}, \tau_{i_Relax_Max} \right] \quad (50)$$

Ensuite on relance les étapes II, III et IV avec les nouvelles valeurs initiales.

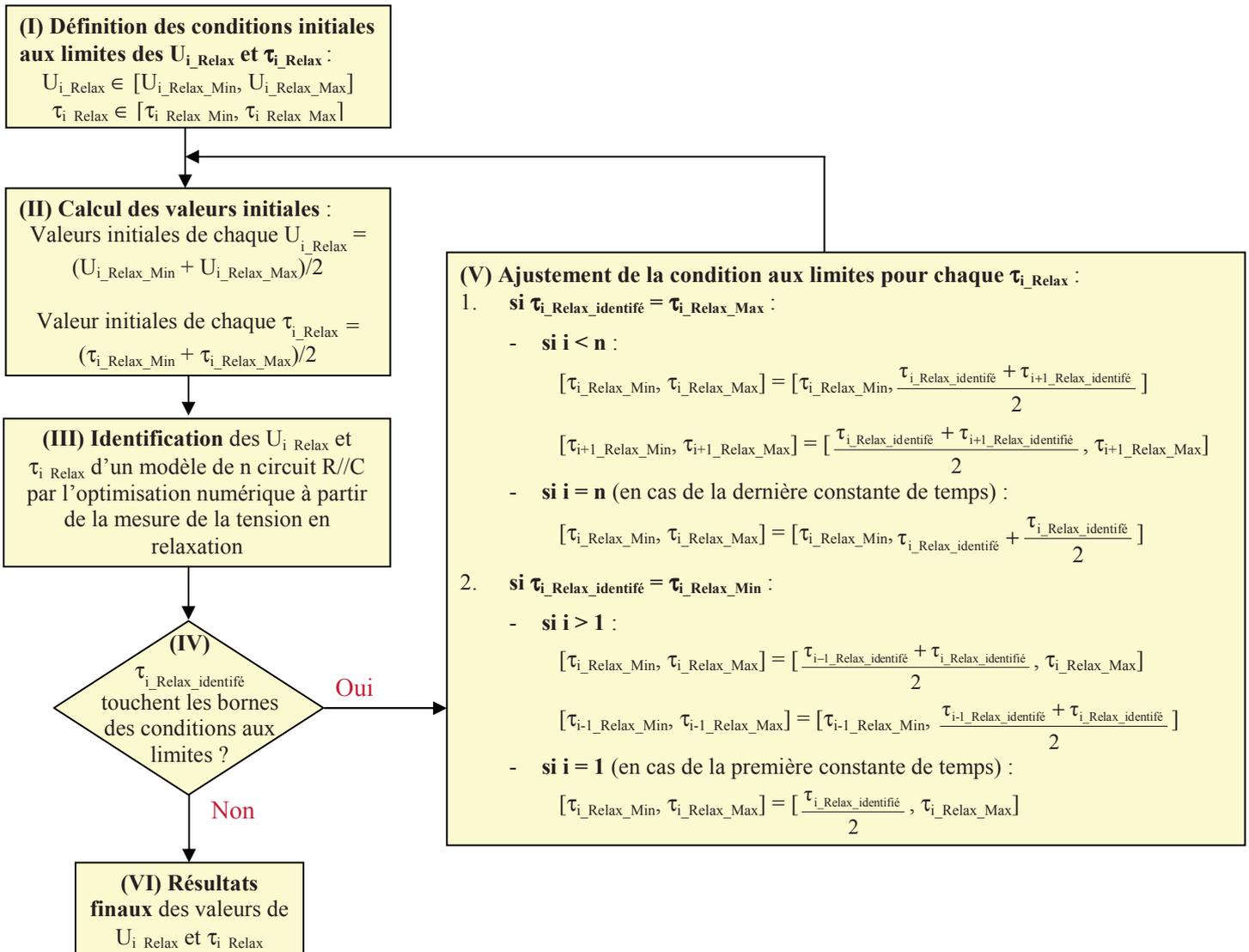


Figure 83 : Détail des itérations d'identification des paramètres pour un modèle avec n circuits R/C

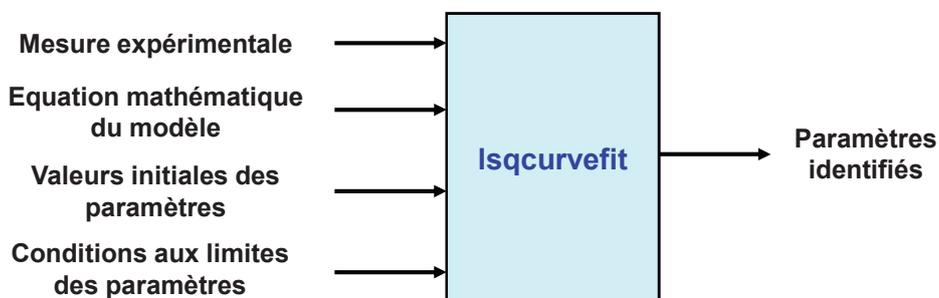


Figure 84 : Les principales entrées et sorties de la fonction « lsqcurvefit » de Matlab

En identifiant ainsi des modèles avec différents nombres possibles de circuits R/C définis par la division théorique (cf. Figure 82), on obtient les valeurs de paramètres de chaque modèle.

Afin de comparer les performances des modèles, on calcule ensuite les erreurs quadratiques moyennes (ou erreurs RMS pour « Root Mean Square Error ») pour chaque modèle :

$$\text{Erreur RMS} = \frac{1}{N_{\text{Ech}}} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{Ech}}} [u_{\text{batt}}(t_i) \text{ mesurée} - u_{\text{batt}}(t_i) \text{ estimée du modèle}]^2} \quad (51)$$

avec:

N_{Ech} : le nombre d'échantillons de la tension mesurée pendant la relaxation

Le paragraphe suivant va discuter comment choisir le nombre de circuits R//C optimal en fonction des erreurs.

3.3.5. Choix du nombre optimal de circuits R//C

Avec les erreurs RMS pour chacun des modèles avec différents nombres de circuits R//C, on peut facilement choisir un nombre optimal au juste nécessaire comme déjà illustré sur la Figure 78. Il est à noter que, en présence d'une erreur acceptable, il n'est pas nécessaire de tester tous les nombres de circuits R//C possibles pour en trouver un optimal. Une méthode de dichotomie que l'on va présenter ci-dessous permettra de réduire le nombre de circuits R//C à tester. L'idée principale de la méthode est expliquée par les 3 étapes suivantes :

- **Etape 1** : pour les nombres possibles des circuits R//C compris entre la plage $[N_{\text{min}}, N_{\text{max}}]$, on teste le nombre situant au milieu de la plage : $N_{\text{test}} = \text{Troncature de } ((N_{\text{min}} + N_{\text{max}})/2)$;
- **Etape 2** : si l'erreur RMS pour le modèle avec N_{test} circuits R//C est inférieure à l'erreur acceptable, le nombre optimal N_{optimal} se situe à l'intérieur de la moitié inférieure de la plage $[N_{\text{min}}, N_{\text{max}}]$, on réduit donc la plage à $[N_{\text{min}}, N_{\text{max}}] = [N_{\text{min}}, N_{\text{test}}]$, ce qui évite de tester les nombres dans l'autre moitié de la plage; sinon, on réduit la plage à $[N_{\text{min}}, N_{\text{max}}] = [N_{\text{test}}+1, N_{\text{max}}]$.
- **Etape 3** : on recommence l'étape 1 et l'étape 2 jusqu'à ce que l'on trouve le nombre optimal.

Il est possible qu'à la fin du calcul aucun nombre ne donne une erreur RMS inférieure à l'erreur acceptable. Cela signifie que l'erreur acceptable est trop petite et que l'on doit l'augmenter. Le détail d'itération de la méthode se trouve sur la Figure 85.

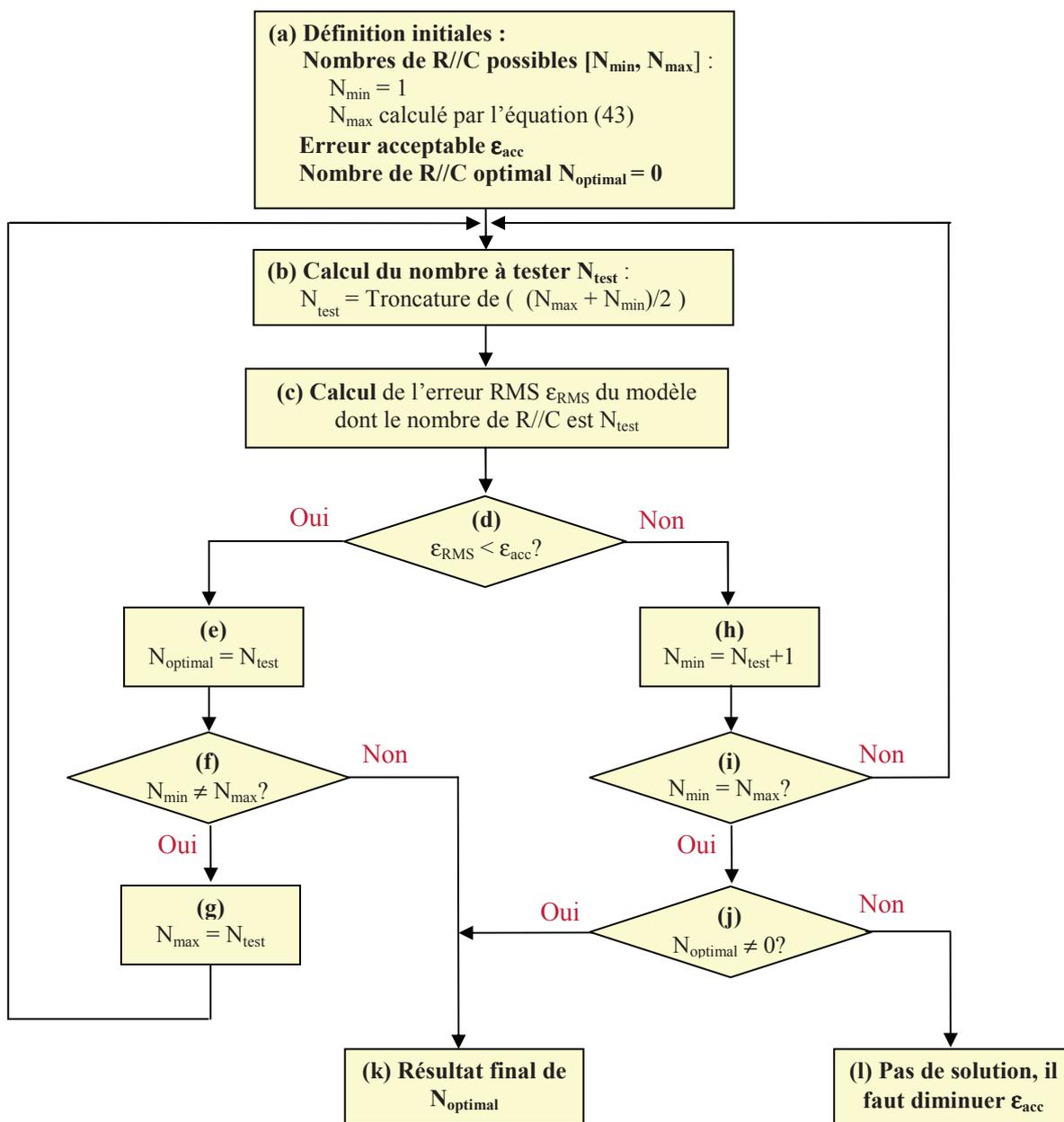


Figure 85 : Détail d'itération de la méthode de dichotomie pour chercher le nombre optimal de circuit R//C

Pour illustrer la méthode de dichotomie, prenons un exemple où les nombres possibles de circuits R//C sont de 1 à 10 et le nombre optimal est de 5. Au lieu de tester chacun des 10 nombres possibles, la méthode de dichotomie ne teste que 3 nombres ($N_{\text{test}} = 5, 3$ et 4) pour trouver l'optimal comme présenté sur le Tableau 22.

N° de test	N _{Min}	N _{Max}	N _{test}	N _{optimal}
1 ^e	1	10	5	0
2 ^e	1	5	3	5
3 ^e	4	5	4	5

Tableau 22 : Illustration de la méthode de dichotomie pour un exemple où les nombres possibles de circuits R//C sont de 1 à 10 et le nombre optimal est de 5

3.4. Exemple d'identification d'une relaxation

Dans le but de valider la méthode d'identification proposée, on présente dans ce paragraphe un exemple d'identification d'une relaxation.

3.4.1. Mesure expérimentale

La Figure 86 présente une mesure expérimentale de la tension pendant une relaxation de durée 24 h à 45% de SoC d'une cellule A123 de capacité nominale de 2.3 Ah. L'essai pour obtenir la mesure est fait avec un banc Biologic (VSP + ampli 20 A). La cellule est mise dans une enceinte avec la température ambiante réglée à 25 °C. Avant l'essai de la Figure 86, la cellule a été chargée à 100% de SoC, remise à 55% de SoC par une décharge à un courant constant de 2.3 A (1C), puis laissée au repos pendant une heure. Une sollicitation avec un motif en escalier est alors appliquée pour ramener le SoC à 45%. Ce motif, dont la durée est de 136 s, est utilisé pour la caractérisation des paramètres en régime forcé qui sera présenté dans le chapitre prochain. Ce qui nous intéresse ici est la tension pendant la relaxation qui suit le régime forcé.

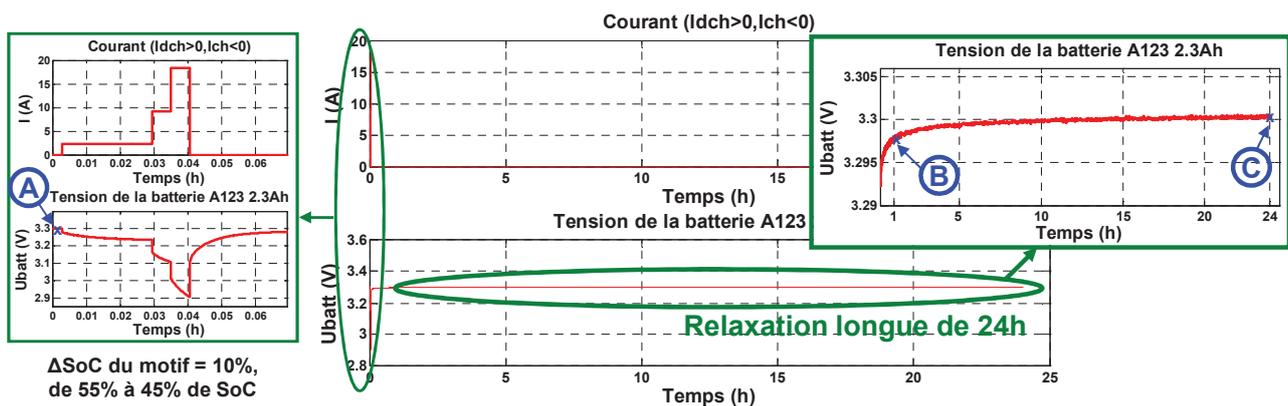


Figure 86 : Essai permettant d'avoir la mesure de la tension pendant une relaxation de durée 24 h à 45% de SoC d'une cellule A123

La Figure 86 montre que la tension pendant la relaxation évolue sur plusieurs heures. La variation de tension de relaxation au-delà de 1 h semble négligeable par rapport à la tension de la batterie. En effet, la variation de tension pendant la relaxation entre 1 h et 24 h est de l'ordre de 2 mV (entre les points B et C sur la Figure 86). Malgré cette faible variation, sa détermination est importante pour les batteries dont les courbes OCV(SoC) présentent des plateaux variant seulement de quelques millivolts car sa non prise en compte risque de provoquer une erreur non négligeable d'estimation du SoC. Ceci est le cas de la cellule testée car la courbe OCV(SoC) d'une cellule A123 de technologie $LiFePO_4$ a une partie pratiquement horizontale entre 40% et 60% de SoC. La Figure 87 précise l'erreur d'estimation du SoC introduite par un écart de 2 mV. Les points A, B et C sur la Figure 87 correspondent à ceux de la Figure 86. Les points A et B correspondent respectivement aux OCVs à 55% et 45% de SoC mesurées 1h après la décharge, le point C correspond à l'OCV à 45% de SoC mesurée 24 h après la décharge. Si l'on utilise la courbe OCV(SoC) mesurée après 1 h comme la référence pour estimer le SoC à partir d'une mesure de tension, l'évolution de la tension

pendant la relaxation entre 1 h et 24 h à 45% de SoC (du point B au point C) introduira une erreur d'estimation d'environ 4% du SoC.

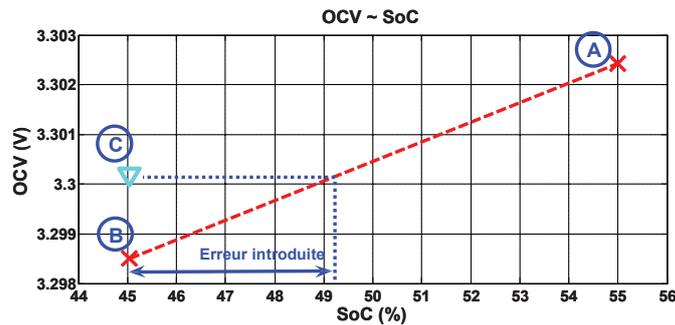


Figure 87 : Erreur d'estimation du SoC introduite par l'évolution de la tension pendant la relaxation sur la cellule A123 de la Figure 86

3.4.2. Résultat d'identification

En appliquant la méthode d'identification du paragraphe précédent (cf. § 3.3) à la tension pendant la relaxation de la Figure 86, on obtient les résultats présentés sur la Figure 88. Avec la courbe de l'évolution de l'erreur RMS en fonction de nombre de circuits R//C, si l'on définit une erreur acceptable en fonction du cahier des charges ou de la précision de l'appareil de mesure, on arrive à déterminer un nombre optimal de circuits R//C. Afin de mettre en évidence l'influence de la durée de relaxation, la méthode d'identification est appliquée sur deux durées différentes :

- **Pour la première heure de relaxation** : en identifiant les paramètres U_{i_Relax} et τ_{i_Relax} pour des modèles de 1 à 7 circuits R//C (cf. 7 circuits R//C selon l'équation (43)), on peut calculer l'erreur RMS pour chaque modèle (tracé bleu). Le résultat montre que l'erreur RMS a tendance à diminuer quand le nombre de circuits R//C augmente et que la diminution de l'erreur est mineure (< 1 mV) à partir de $n = 4$ circuits R//C.
- **Pour la relaxation de 24 h** : en faisant la même démarche, on peut obtenir l'évolution de l'erreur RMS en fonction du nombre de circuits R//C (tracé vert). Le résultat montre aussi que l'erreur a tendance à diminuer quand le nombre de circuits R//C augmente et que la diminution de l'erreur est mineure (< 1 mV) à partir de $n = 5$.

Donc, si l'erreur acceptable est de 1 mV comme indiqué sur la Figure 88, le nombre optimal n est 4 pour la première heure de relaxation et 5 pour la relaxation de 24 h. Les résultats d'identification des paramètres respectivement avec la première heure et avec 24 h de relaxation sont présentés sur la partie droite de la Figure 88. Dans ce document, seulement 2 chiffres significatifs sont indiqués pour les τ_{i_Relax} .

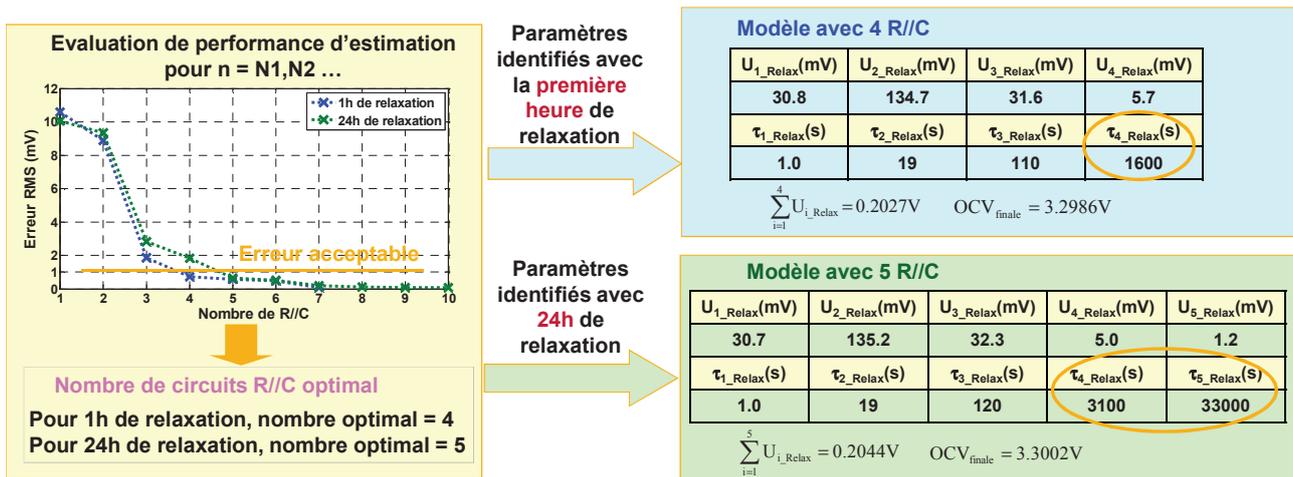


Figure 88 : Résultats d'identifications en utilisant la tension pendant la relaxation de la Figure 86

La Figure 89 présente des comparaisons sur les paramètres identifiés des deux modèles de la Figure 88 :

- **Pour les τ_{i_Relax}** , la différence se trouve principalement sur les dernières constantes de temps. Les 3 premières constantes de temps des deux modèles sont du même ordre de grandeur. Ainsi quand la durée de relaxation est plus longue, il faut ajouter des constantes de temps plus grandes pour mieux représenter la dynamique lente de la relaxation. Sur la Figure 89 (a) qui présente une comparaison des τ_{i_Relax} sur une échelle semi-logarithmique, la relation entre des τ_{i_Relax} semble linéaire, ce qui indique que la distribution des τ_{i_Relax} est proche d'une distribution logarithmique. Cela justifie donc l'utilisation du ré-échantillonnage géométrique (cf. Paragraphe 3.3.2).
- **Pour les U_{i_Relax}** , leurs valeurs sont liées étroitement au régime forcé selon l'expression (26). Sur la Figure 89 (b), les U_{4_Relax} et U_{5_Relax} sont beaucoup plus faibles par rapport aux autres U_{i_Relax} , cela est dû au fait que τ_{4_Relax} et τ_{5_Relax} sont beaucoup plus grandes par rapport à la durée du régime forcé (136 s, cf. Figure 86). En comparant les valeurs des U_{i_Relax} des deux modèles comme dans le Tableau 23, on remarque qu'il y a une différence de 1.7 mV entre les sommes des U_{i_Relax} , ce qui conduit à une différence de 1.7 mV dans les estimations de l'OCV des deux modèles selon l'expression de l'OCV donnée par l'équation (32). Cette différence provient non seulement de l'écart associé à U_{5_Relax} , mais aussi de ceux associés aux autres U_{i_Relax} . De façon similaire aux τ_{i_Relax} , on trouve aussi une tendance assez linéaire pour les U_{i_Relax} avec $i > 1$ lorsque ces tensions sont présentées sur une échelle semi-logarithmique comme sur la Figure 89 (b).

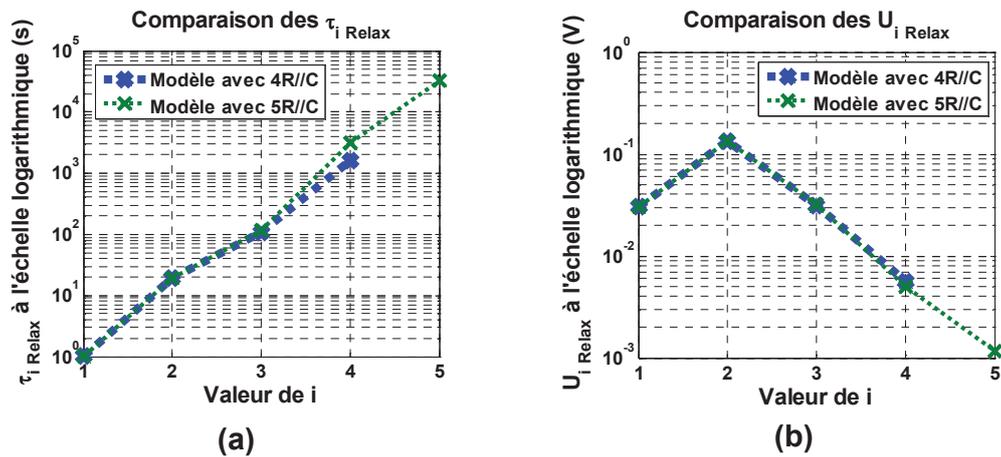


Figure 89 : Comparaison des résultats d'identification des deux modèles de la Figure 88
 (a) Comparaison des τ_{i_Relax} (b) Comparaison des U_{i_Relax}

	U_{1_Relax} (mV)	U_{2_Relax} (mV)	U_{3_Relax} (mV)	U_{4_Relax} (mV)	U_{5_Relax} (mV)	$\sum_{i=1}^5 U_{i_Relax}$ (mV)
Modèle avec 4R//C	30.8	134.7	31.6	5.7	0	202.7
Modèle avec 5R//C	30.7	135.2	32.3	5.0	1.2	204.4
Ecart entre deux modèles (mV)	-0.1	0.5	0.7	-0.7	1.2	1.7

Tableau 23 : Comparaison des U_{i_Relax} des deux modèles

Pour évaluer la performance des modèles identifiés, la Figure 90 présente les résultats de simulation de la tension pendant la relaxation de 24 h avec respectivement les paramètres des deux modèles de la Figure 88. Les résultats de simulation montrent que le modèle avec 4 R//C n'arrive pas à bien représenter la totalité de la relaxation à cause du manque d'une constante de temps de forte valeur. La divergence des estimations entre les deux modèles à la fin des 24 h correspond à la différence de 1.7 mV sur l'estimation de l'OCV mentionnée précédemment.

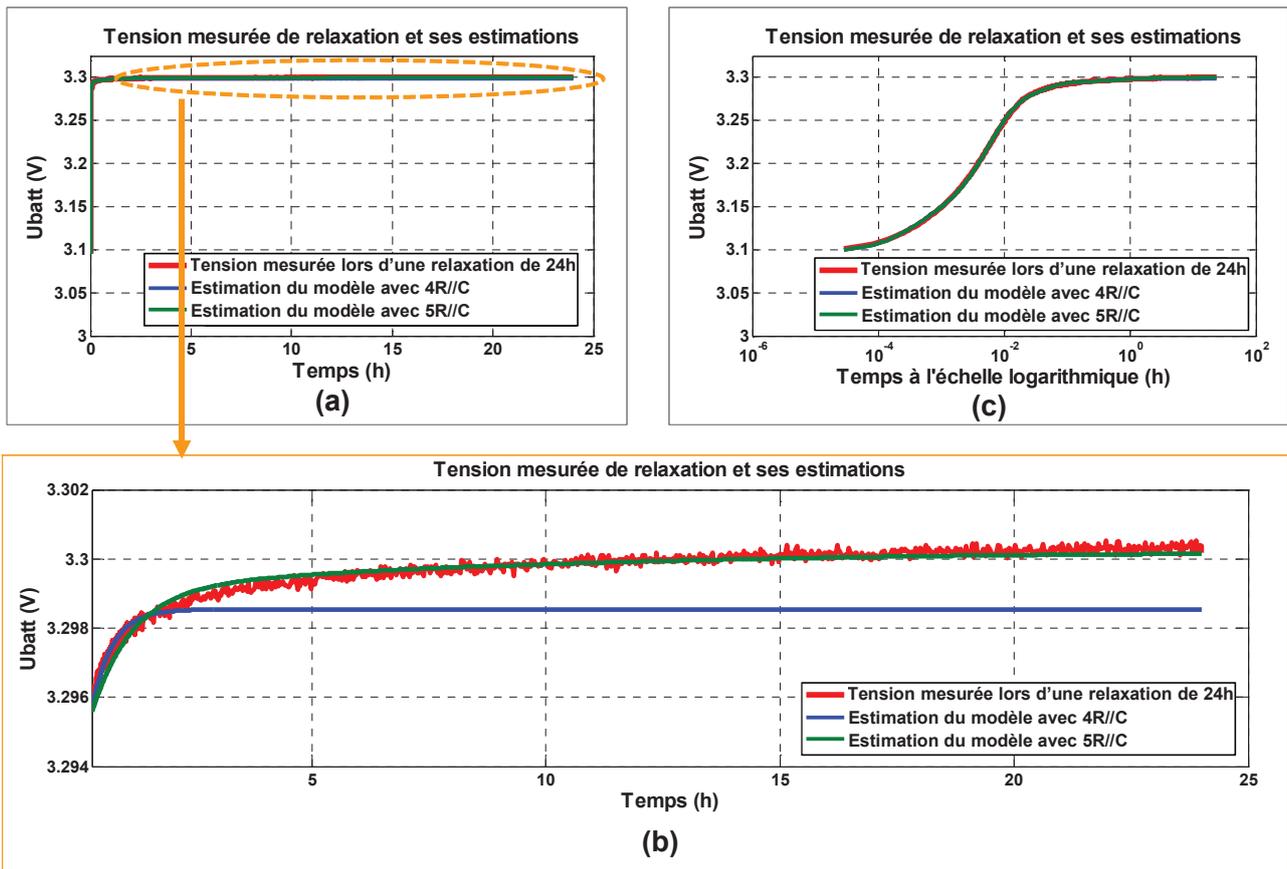


Figure 90 : Simulation de la tension pendant la relaxation de 24 h avec les paramètres identifiés des deux modèles de la Figure 88

(a). Simulation de la tension pendant la relaxation (b). Simulation de la tension pendant la relaxation avec une échelle semi-logarithmique (c). Zoom sur une partie de la simulation de (a)

En résumé, la méthode d'identification proposée a été vérifiée à travers de l'exemple d'identification de la relaxation à 45% de SoC d'une cellule d'A123. On a constaté que les constantes de temps τ_{i_Relax} et les dernières chutes de tensions U_{i_Relax} semblent suivre une distribution linéaire sur une échelle semi-logarithmique. Comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, pour vérifier si cette distribution est valable pour les autres cellules, nous avons effectué une étude sur les relaxations de différentes cellules.

3.5. Etude des relaxations de différentes cellules

Le but de l'étude des relaxations de différentes cellules est d'une part de valider la méthode proposée dans le paragraphe 3.3, et d'autre part d'identifier un nombre de circuits R//C optimal en considérant différentes cellules.

3.5.1. Mesures expérimentales

Les essais de relaxations de 24 h ont été réalisés sur trois cellules de technologies différentes à 25 °C : une cellule Li-ion de technologie LiFePO₄ d'A123, une cellule Li-ion de technologie NMC de Kokam et une cellule NiMH de Saft. Ces essais permettent d'obtenir les mesures de tension de relaxation à différents SoCs après décharge et après charge. Les SoCs choisis sont 85%, 55% et 25%, qui représentent respectivement les SoCs élevé, intermédiaire et bas de la cellule. Les 6 mesures de tensions de relaxations pour chaque cellule sont résumées dans le Tableau 24. La procédure des essais est similaire à celle de la Figure 86. Chaque mesure de tension de relaxation est obtenue après une sollicitation d'un motif qui fait varier 10% de SoC de la batterie. Avant l'application de chaque sollicitation, la cellule est préalablement mise au SoC voulu par décharge ou charge à 1C et puis est laissée reposée pendant 1h. Les résultats des essais des trois cellules se trouvent respectivement sur la Figure 91, la Figure 92 et la Figure 93. Afin de mieux visualiser la tension de la cellule en régime forcé et en relaxation, les résultats des essais sur les 3 figures sont affichés en fonction du temps à l'aide d'une échelle logarithmique. Les motifs de sollicitation sont configurés en fonction des caractéristiques de chaque cellule comme la capacité réelle, le courant maximal en décharge et le courant maximal en charge. La justification des motifs de sollicitation sera effectuée dans le prochain chapitre, on ne s'intéresse ici qu'à la tension de relaxation.

Tension de relaxation mesurée	SoC de relaxation
Après décharge	85%
	55%
	25%
Après charge	85%
	55%
	25%

Tableau 24 : Tableau récapitulatif des 6 essais effectués sur chacune des 3 technologies de cellules testées à 25 °C avec le banc Biologic

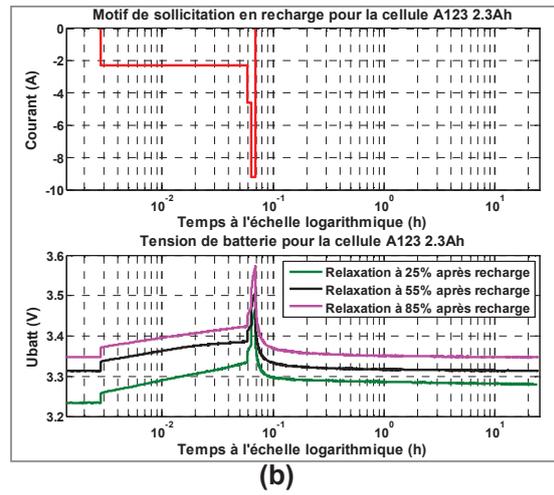
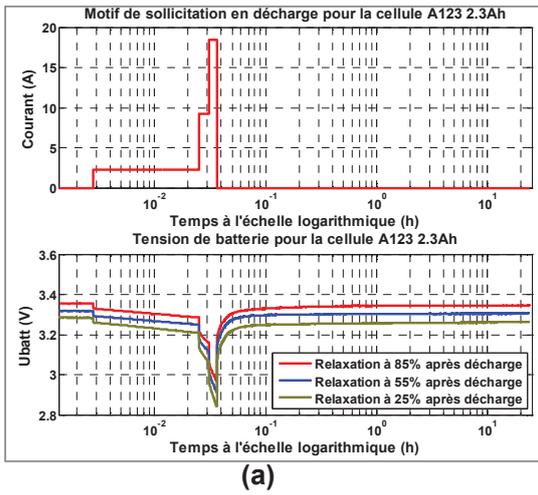


Figure 91 : Essais sur la cellule LiFePO₄ d'A123 pour obtenir à différents SoCs les mesures de la tension de relaxation 24 h (a) après décharge et (b) après charge

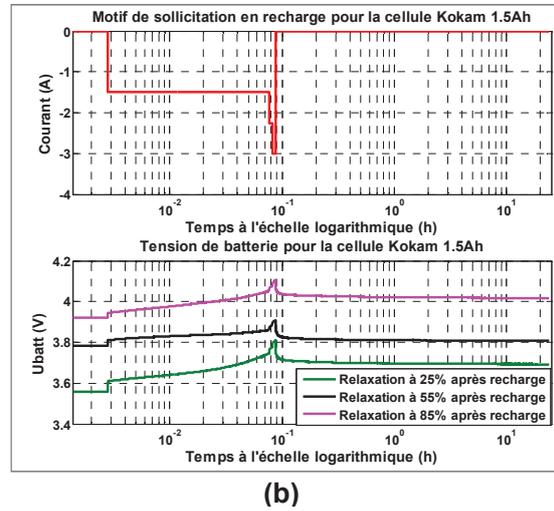
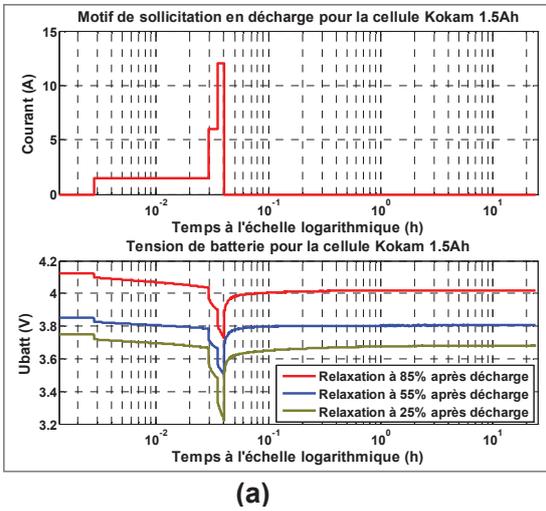


Figure 92 : Essais sur la cellule NMC de Kokam pour obtenir à différents SoCs les mesures de la tension de relaxation 24 h (a) après décharge et (b) après charge

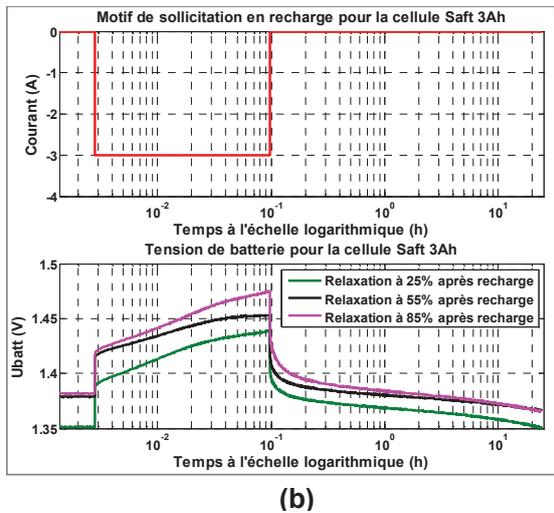
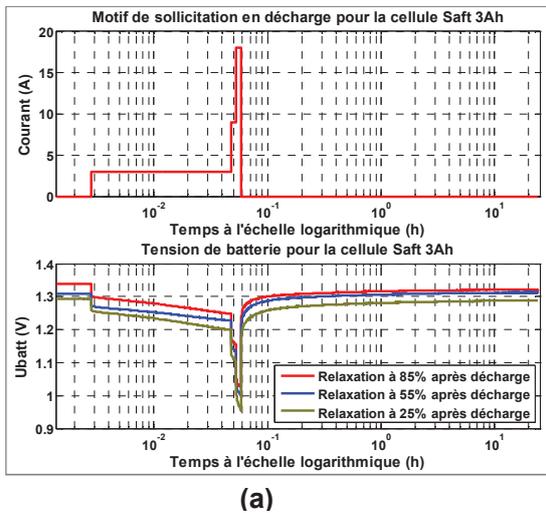


Figure 93 : Essais sur la cellule NiMH de Saft pour obtenir à différents SoCs les mesures de la tension de relaxation 24 h (a) après décharge et (b) après charge

A partir des résultats d'essais sur la Figure 91, la Figure 92 et la Figure 93, on peut obtenir les mesures de l'OCV 1 h et 24 h après la décharge ou la charge, ce qui permet d'évaluer l'erreur d'estimation du SoC introduite par l'évolution de la tension pendant la relaxation de 24 h. Les mesures de l'OCV pour chaque cellule sont illustrées respectivement par la Figure 94, la Figure 95 et la Figure 96. Ces figures montrent que les OCVs mesurées 24 h après la décharge sont plus élevées que celles mesurées 1h après la décharge. On obtient le phénomène inverse pour les OCVs mesurées après la charge. Cela est dû au fait que la tension de la cellule pendant la relaxation augmente après décharge ou diminue après charge et qu'elle tend vers une tension d'équilibre. Si l'on utilise la courbe OCV(SoC) mesurée après 1h comme la référence pour estimer le SoC à partir d'une mesure de tension, on obtiendra une surestimation du SoC après une décharge et une sous-estimation après une charge.

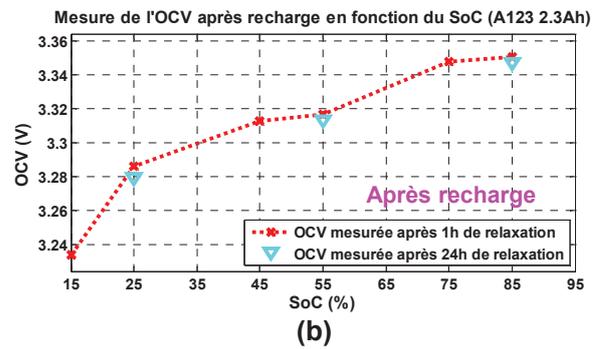
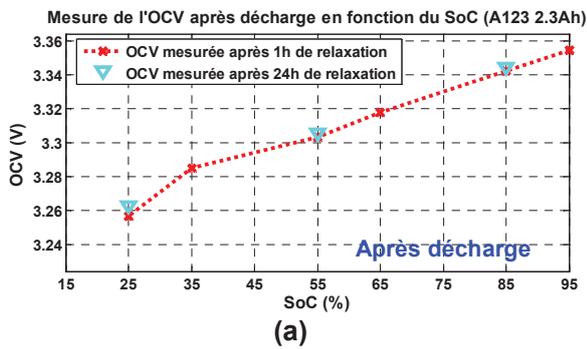


Figure 94 : Mesure de l'OCV de la cellule A123 1 h et 24 h (a) après décharge et (b) après charge

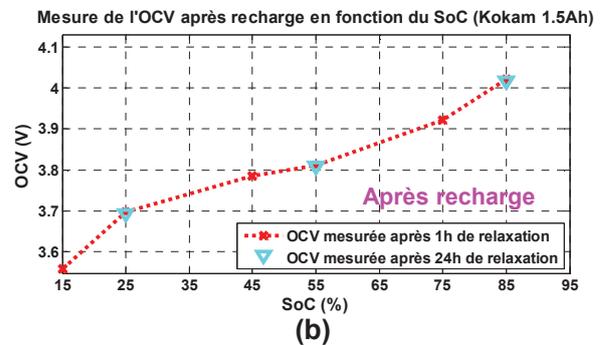
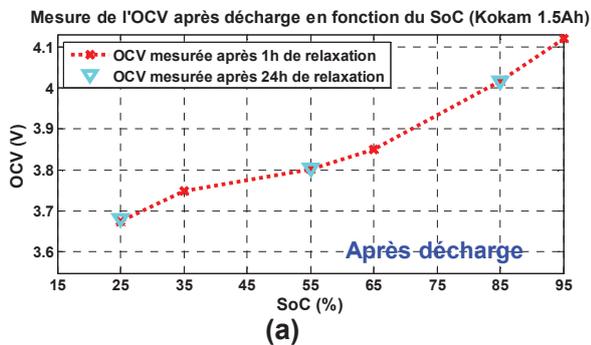


Figure 95 : Mesure de l'OCV de la cellule Kokam 1 h et 24 h (a) après décharge et (b) après charge

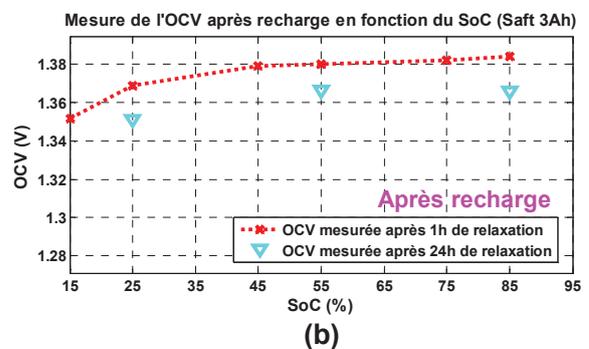
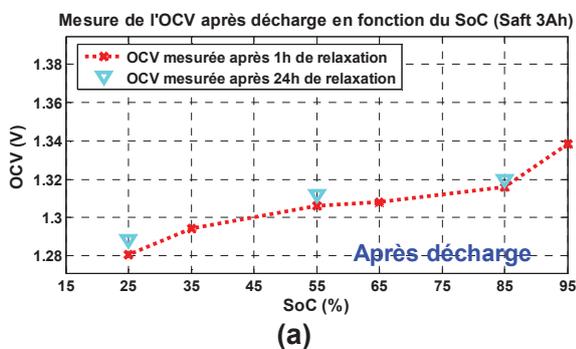


Figure 96 : Mesure de l'OCV de la cellule Saft 1 h et 24 h (a) après décharge et (b) après charge

De même manière que sur la Figure 87, en utilisant la courbe OCV(SoC) mesurée après 1 h comme la référence pour estimer le SoC, on peut évaluer l'erreur d'estimation du SoC introduite par la variation de la tension de la cellule pendant la relaxation entre 1 h et 24 h. Les erreurs d'estimation du SoC pour chaque cellule sont présentées sur la Figure 97. Les résultats montrent que :

- Parmi les trois cellules, la variation de la tension pendant la relaxation a une influence la plus faible sur la cellule NMC de Kokam (< 1.2% d'erreur) et a une influence la plus importante sur la cellule NiMH de Saft (jusqu'à 62% d'erreur).
- L'erreur d'estimation du SoC est en général plus grande après charge qu'après décharge.

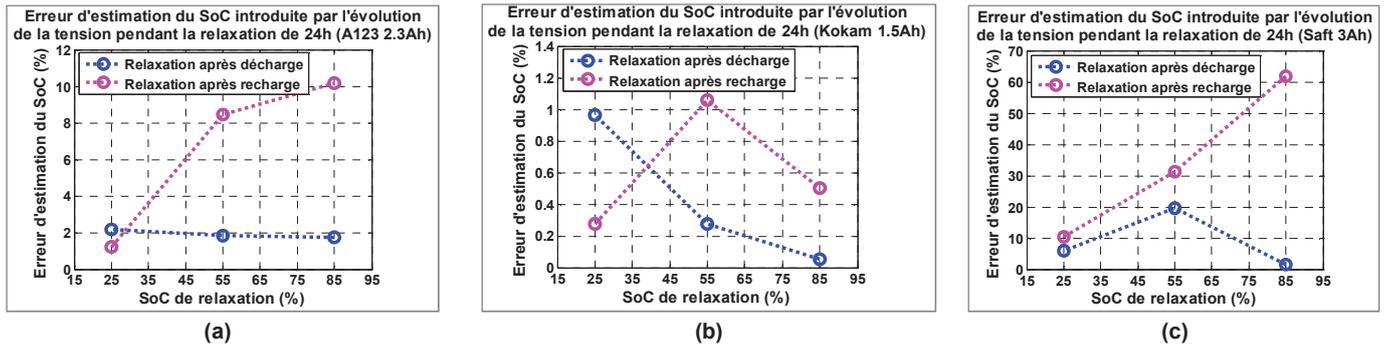


Figure 97 : Erreur d'estimation du SoC en pourcent introduite par l'évolution de la tension pendant la relaxation entre 1 h et 24 h pour (a) cellule A123, (b) cellule Kokam et (c) cellule Saft

Il est à noter que pendant la relaxation longue de 24 h intervient aussi l'autodécharge qui fait varier le SoC de la cellule. Cependant, l'erreur d'estimation du SoC introduite par la relaxation longue est prépondérante par rapport à celle introduite par l'autodécharge. Comme indiqué dans le Chapitre 1, l'autodécharge contribue à une diminution du SoC d'environ 5% par mois pour les batteries Li-ion et d'environ 30% par mois pour les batteries NiMH selon [7][8] (confirmées par des mesures en interne non présentées dans ce document). Cela revient à une perte de SoC par jour d'environ 0.2% pour les batteries Li-ion et d'environ 1% pour les batteries NiMH, ce qui est négligeable par rapport aux erreurs d'estimation de SoC introduite par la relaxation présentées sur la Figure 97.

3.5.2. Résultats d'identification

En identifiant les relaxations de 24 h à différents SoCs à l'aide de la Figure 91, la Figure 92 et la Figure 93 en considérant l'équation (33) selon la méthode du paragraphe 3.3, on peut obtenir les erreurs RMS d'estimation en fonction du nombre de circuits R//C pour chaque cellule. Les tensions de relaxation des 3 cellules sont obtenues suite aux sollicitations de différentes amplitudes en régime forcé. Afin de s'affranchir de l'influence de l'amplitude de sollicitation et de faciliter la comparaison entre différentes cellules, on calcule des erreurs RMS relatives en pourcentage à partir des erreurs RMS dont l'expression est donnée par :

$$\text{Erreur RMS relative} = \frac{\text{Erreur RMS}}{\Delta U_{\text{Relax}}} \times 100\% \quad (52)$$

Avec ΔU_{Relax} : variation de la tension pendant la phase de relaxation (cf. Figure 77).

Les résultats des erreurs RMS relatives sont présentés sur la Figure 98.

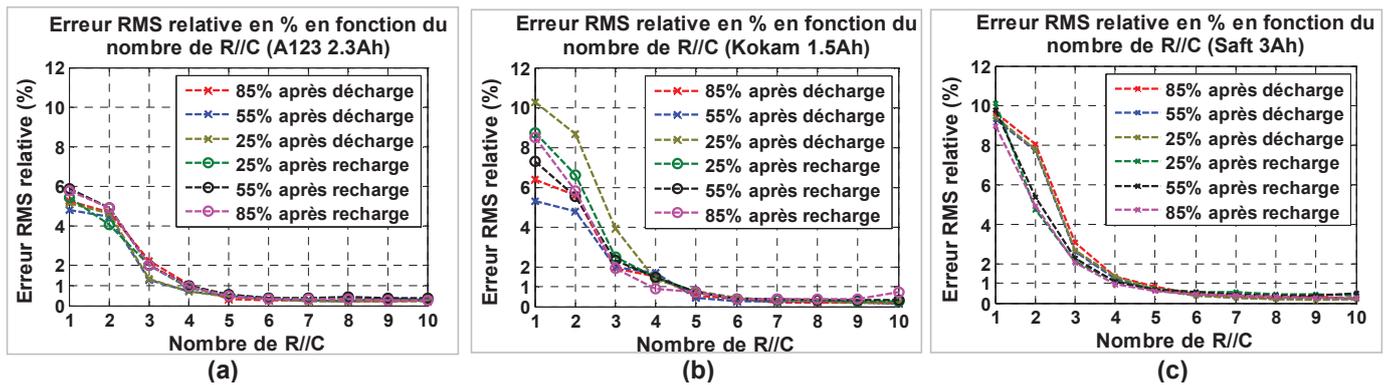


Figure 98 : Erreur RMS relative en pourcentage en fonction du nombre de R//C pour les relaxations à différents SoCs des cellules (a) A123, (b) Kokam et (c) Saft

Pour faciliter la comparaison des erreurs de différentes cellules en vue d'identifier un modèle générique avec un nombre de R//C optimal, on a effectué une synthèse des erreurs comme illustrée sur la Figure 99. Dans cette dernière, pour chaque nombre de circuits R//C, la valeur de l'erreur RMS relative pour une cellule correspond à la valeur maximale des erreurs RMS relative à différents SoCs de la Figure 98. La Figure 99 montre qu'à partir de 5 R//C :

- la diminution des erreurs est mineure,
- les erreurs sur les différentes cellules sont proches et sont inférieures à 1%.

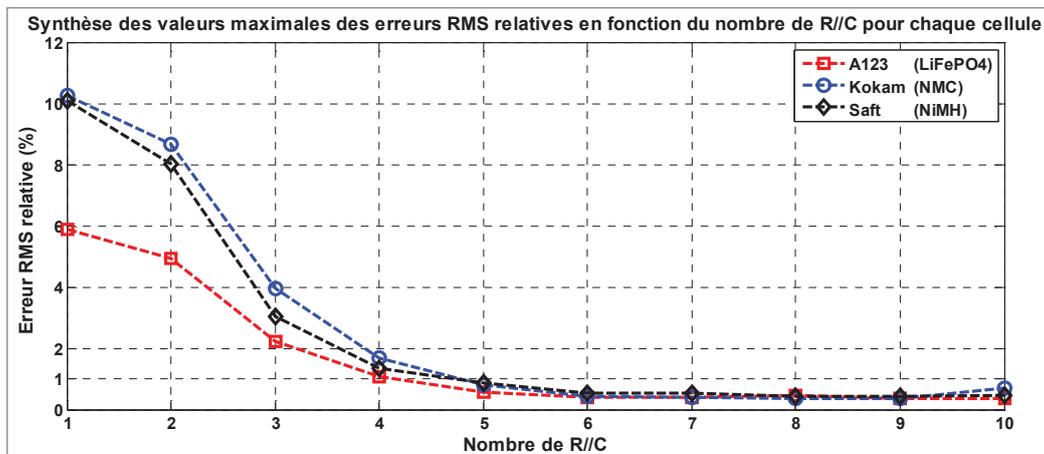


Figure 99 : Synthèse des valeurs maximales des erreurs RMS relatives en fonction du nombre de R//C pour chaque cellule de la Figure 98

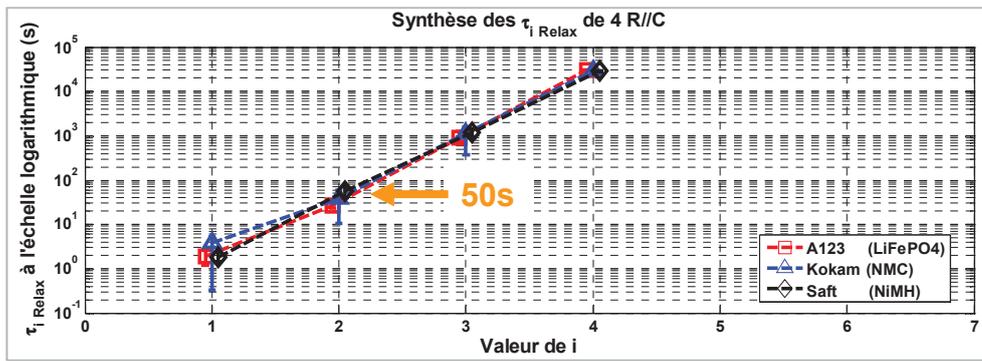
3.5.3. Elaboration d'une règle générale de détermination du nombre de R//C à utiliser

Jusqu'à présent, la démarche d'identification de la relaxation de la Figure 78 a été utilisée pour étudier les relaxations de 3 cellules différentes. Pour déterminer le nombre optimal de circuits R//C à utiliser, elle demande une erreur acceptable et des mesures expérimentales de la tension lors de la relaxation. Le critère du choix du nombre optimal de circuits R//C basé sur l'erreur est très dépendant de l'équipement d'essai (par exemple du bruit de mesure). De plus, l'évaluation des relaxations à différents SoCs nécessite des mesures expérimentales de durée importante. Ainsi, il est intéressant de réfléchir à une règle de détermination du nombre de circuits R//C qui n'a besoin ni de définir une erreur acceptable ni d'effectuer les mesures expérimentales. Ce paragraphe porte sur l'élaboration d'une telle règle à partir des analyses sur les résultats d'identification des relaxations des 3 cellules différentes.

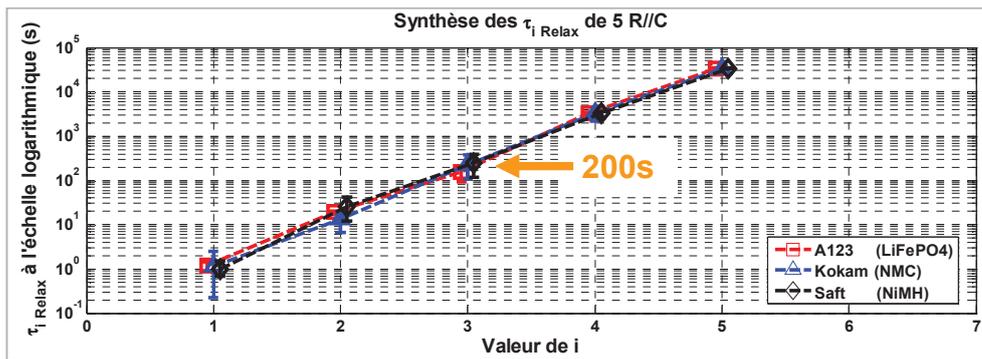
(a) Considération liée au régime forcé

En considérant les résultats de la Figure 99 et en l'absence d'une contrainte particulière sur l'erreur acceptable, le choix du nombre optimal se restreint à 4, 5 ou 6 circuits de R//C parce qu'il présente le meilleur compromis précision/simplicité par rapport aux autres nombres de R//C. Par la suite on propose donc de s'intéresser aux valeurs des paramètres identifiés pour chacun des 4, 5 et 6 circuits R//C.

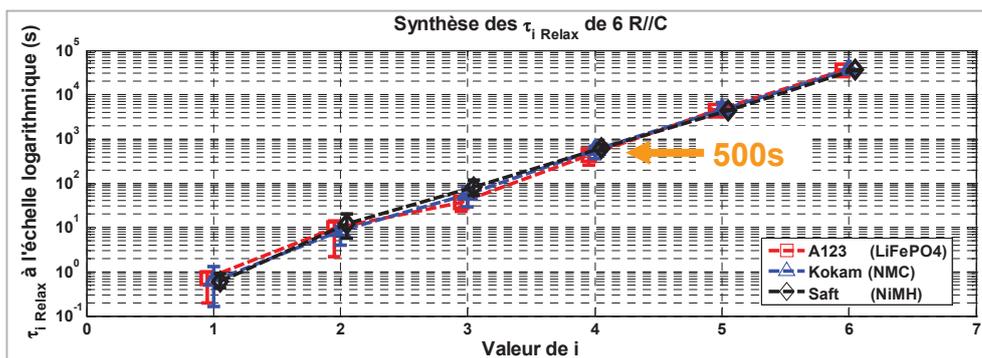
Comme les chutes de tension U_{i_Relax} sont dépendantes de la sollicitation en régime forcé, on s'intéresse donc seulement aux constantes de temps τ_{i_Relax} . La Figure 100 présente une synthèse des constantes de temps identifiées respectivement avec 4, 5 et 6 circuits de R//C pour les trois cellules. Sur la figure se trouvent les valeurs moyennes des constantes de temps identifiées pour chaque nombre de circuits R//C. Les valeurs minimales et maximales des constantes de temps sont aussi indiquées sous forme de barre d'erreur. La Figure 100 montre que, pour une relaxation de durée 24 h avec une période d'échantillonnage minimale de 0.1 s, les constantes de temps identifiées avec 4, 5 et 6 R//C pour les trois technologies différentes se répartissent toutes sur une plage de l'ordre de 1 à 30 000 secondes. Quand le nombre de circuits R//C augmente, la distance entre deux constantes de temps diminue, il y a donc plus de constantes de temps à l'intérieur de la plage pour représenter la dynamique de la cellule.



(a)



(b)



(c)

Figure 100 : Synthèse des constantes de temps τ_{i_Relax} identifiées en relaxation avec (a) 4 R//C, (b) 5 R//C et (c) 6 R//C (chaque graphique indique la valeur de la plus grande constante de temps identifiable en régime forcé)

En fait, le choix d'un nombre optimal de circuits R//C du modèle ne dépend pas seulement de la relaxation mais aussi du régime forcé. En effet, le modèle est identifié séparément pour la relaxation et le régime forcé afin de pouvoir intégrer l'influence du niveau du courant sur les paramètres du modèle. On peut prolonger facilement la durée de relaxation pour observer les comportements lents liés aux grandes constantes de temps, par contre la durée de régime forcé est limitée à cause de la présence de la sollicitation qui fait varier le SoC de la cellule. Cela limite la précision d'identification des grandes constantes de temps en régime forcé.

Dans notre cas, avec un régime forcé variant entre 100 s et 300 s comme on le présentera au chapitre suivant, on peut faire l'hypothèse que la plus grande constante de temps identifiable en régime forcé est de l'ordre de 200 s à 600 s (2 fois plus importante que la durée dudit régime forcé).

De plus, le chapitre suivant montrera que les constantes de temps identifiées en régime forcé et en relaxation sont du même ordre de grandeur. On constate donc sur la Figure 100 que la plus grande constante de temps identifiable en régime forcé est de l'ordre de 50 s pour le modèle avec 4 R//C, 200 s pour 5 R//C et 500 s pour 6 R//C. Si l'on définit un facteur cinq pour la plage de validité de la constante de temps (un temps égale à 5 fois la constante de temps permet d'identifier le signal considéré avec une précision de $(1-e^{-5}) = 99.3\%$), la plage de validité des constantes de temps identifiables en régime forcé est 250 s pour 4 R//C et 1000 s pour 5 R//C. Le modèle à 5 R//C permet donc d'avoir une plage de dynamique plus importante en régime forcé que celui à 4 R//C. Le modèle avec 6 R//C est lui plus complexe à identifier en régime forcé sans apporter beaucoup plus de précision. Ainsi, le modèle de 5 R//C peut finalement être considéré comme celui apportant le meilleur compromis précision/simplicité et est donc retenu pour la suite de l'étude.

(b) Caractéristiques des paramètres identifiés avec le modèle comportant 5 R//C

Les constantes de temps τ_{i_Relax} et chutes de tension U_{i_Relax} identifiées avec le modèle comportant 5 R//C à partir des relaxations de la Figure 91, la Figure 92 et la Figure 93 sont présentées respectivement sur la Figure 101 et la Figure 102. Les résultats montrent que :

- **pour les τ_{i_Relax}** , leurs valeurs pour les différentes cellules sont du même ordre de grandeur pour une même valeur de i . Les distributions des τ_{i_Relax} sur une échelle semi-logarithmique de différentes cellules sont pratiquement linéaires comme évoqué précédemment sur la Figure 89 (a).
- **pour les U_{i_Relax}** , leurs distributions sur une échelle semi-logarithmique ne sont pas identiques pour différentes cellules. Pour la cellule A123, les tensions U_{i_Relax} identifiées à différents SoCs ne présentent pas toutes la même distribution que la Figure 89 (c) où les U_{i_Relax} avec $i > 1$ sont proches d'une tendance linéaire.

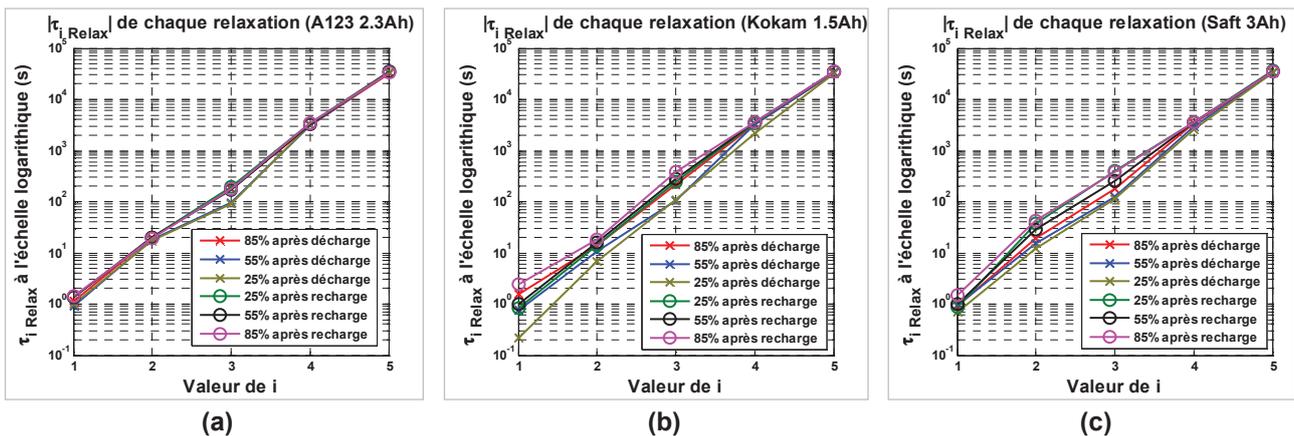


Figure 101 : Constantes de temps τ_{i_Relax} identifiées avec le modèle constitué de 5 R//C à partir des relaxations à différents SoCs des cellules (a) A123, (b) Kokam et (c) Saft

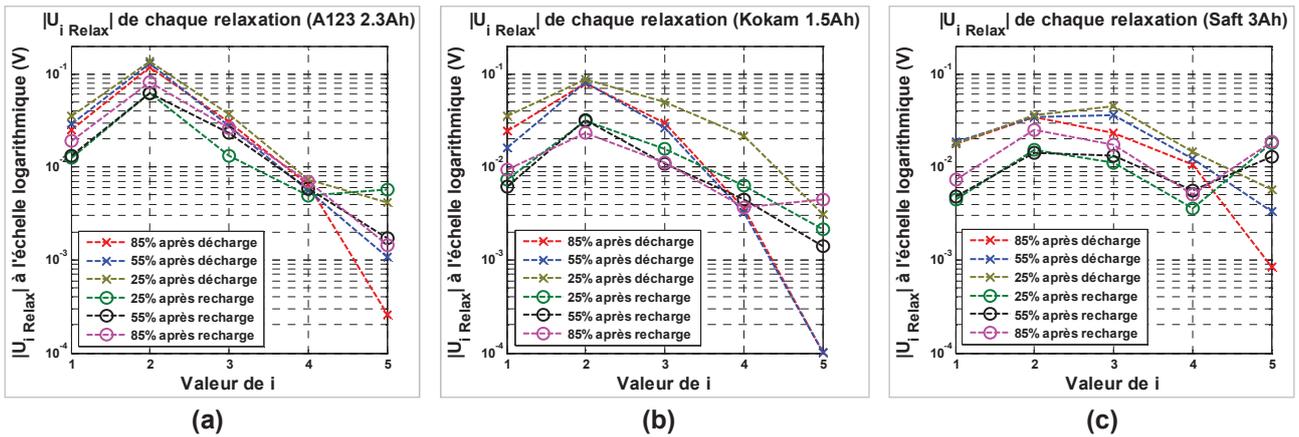


Figure 102 : Chutes de tensions $U_{i \text{ Relax}}$ identifiées avec le modèle constitué de 5 R//C à partir des relaxations à différents SoCs des cellules (a) A123, (b) Kokam et (c) Saft

(c) Règle générale pour déterminer le nombre de circuit R//C à utiliser

Le fait que la distribution des constantes de temps sur une échelle semi-logarithmique est pratiquement linéaire pour différentes cellules permet d'élaborer une règle générale pour déterminer le nombre de circuits R//C à utiliser en fonction de la période d'échantillonnage et de la durée de relaxation. La règle est basée sur l'exploitation des constantes de temps reconstruites à partir des constantes de temps des 3 cellules de la Figure 101. Les constantes de temps reconstruites, illustrées par la courbe droite en rouge sur la Figure 103, sont obtenues par une régression linéaire sur les valeurs moyennes des constantes de temps des 3 cellules de la Figure 101. Le rapport entre deux constantes de temps reconstruites est identique et égal à 13.2.

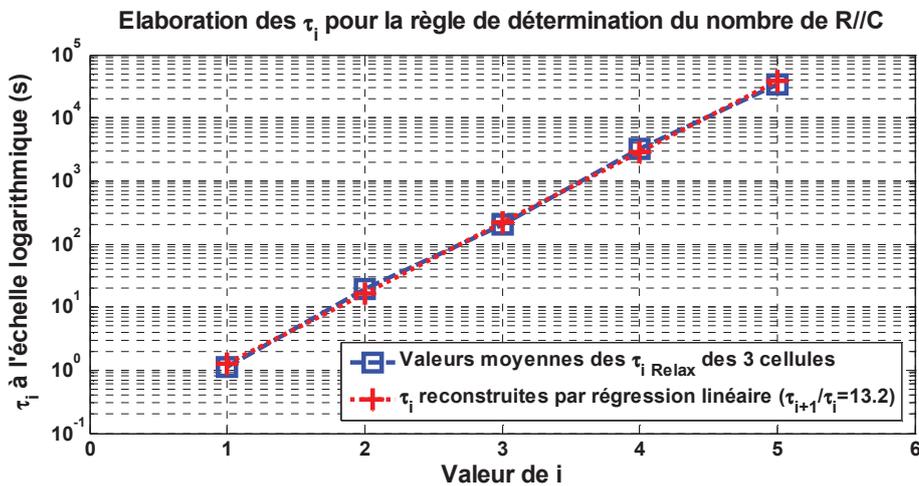


Figure 103 : Constantes de temps reconstruites pour la règle générale de détermination du nombre de circuit R//C du modèle

Les valeurs des constantes de temps reconstruites (τ_1 à τ_5) de la Figure 103 et leur durée de validité sont données dans le Tableau 25. Comme le rapport entre deux constantes de temps est identique, les constantes de temps reconstruites peuvent être exprimées par :

$$\tau_m = \tau_1 \cdot (\gamma_{rec})^{m-1} \quad (53)$$

avec :

γ_{Rec} : rapport entre deux constantes de temps reconstruites ($\gamma_{Rec} = 13.2$),

τ_1 : valeur de la 1^{ère} constante de temps reconstruite de la Figure 103 ($\tau_1 = 1.3$ s),

m : une valeur entière représentant l'ordre de la constante de temps.

On remarque que les constantes de temps reconstruites de la Figure 103 sont obtenues avec des relaxations de durée 24 h et une période d'échantillonnage minimale de 0.1 s. Si l'on diminue la période d'échantillonnage, on pourra trouver des constantes de temps plus petites. Et si l'on augmente la durée de relaxation, on pourra trouver des constantes de temps plus importantes. Comme les constantes de temps reconstruites de la Figure 103 suivent la tendance d'une droite, il est légitime de faire l'hypothèse que les constantes de temps plus petites ou plus grandes suivent aussi cette même tendance. Ainsi, en diminuant ou augmentant la valeur de m de l'équation (53), on peut facilement extrapoler les constantes de temps comme par exemple dans le Tableau 25. Dans ce tableau, les constantes de temps extrapolées inférieures à τ_1 peuvent correspondre à des valeurs de m négatives.

	...	τ_{-1}	τ_0	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6	...
Valeur (s)	...	0.0072	0.095	1.3	17	220	2900	38000 (≈ 11 h)	500000 (≈ 140 h)	...
Durée de validité (s) ($5 \cdot \tau_m$)	...	0.036	0.48	6.5	85	1100	14500 (≈ 4 h)	190000 (≈ 53 h)	2500000 (≈ 690 h)	...

Tableau 25 : Constantes de temps reconstruites et leur durée de validité pour la règle de détermination du nombre de circuits R//C du modèle

En utilisant les constantes de temps reconstruites du Tableau 25, la détermination du nombre de circuits R//C à utiliser pour une relaxation de durée Δt_{Relax} avec une période d'échantillonnage minimale de T_e consiste à effectuer les trois étapes suivantes :

- **Etape 1** : déterminer la valeur de $m = M_{max}$ pour la plus grande constante de temps identifiable $\tau_{M_{max}}$ avec la durée Δt_{Relax} .

Pour que la dynamique la plus lente de la batterie pendant la relaxation de la durée Δt_{Relax} puisse être représentée avec précision, la validité de la plus grande constante de temps identifiable doit être supérieure ou égale à la durée de relaxation :

$$5 \cdot \tau_{M_{max}} = 5 \cdot \tau_1 \cdot (\gamma_{rec})^{M_{max}-1} \geq \Delta t_{Relax} \quad (54)$$

A partir de l'équation (54), on peut déduire l'expression de M_{max} par l'équation (55). Le détail pour obtenir l'équation (55) se trouve en Annexe 2.

$$M_{max} = \text{ceil} \left(\frac{\log(\Delta t_{Relax}) - \log(5 \cdot \tau_1)}{\log(\gamma_{rec})} \right) + 1 \quad (55)$$

Avec :

$\text{ceil}(X0)$: fonction qui renvoie l'arrondi à l'entier supérieur de $X0$.

- **Etape 2** : déterminer la valeur de $m = M_{\min}$ pour la plus petite constante de temps identifiable $\tau_{M_{\min}}$ avec la période d'échantillonnage T_e .

Pour une période d'échantillonnage donnée, il existe une valeur $m = M_0$ telle que la période d'échantillonnage est comprise entre deux constantes de temps consécutives ($\tau_{M_0-1} \leq T_e \leq \tau_{M_0}$) comme illustré sur la Figure 104. La valeur de M_0 peut être calculée par l'équation (56). Le détail pour obtenir l'équation (56) se trouve en Annexe 3.

$$M_0 = \text{ceil} \left(\frac{\log(T_e) - \log(\tau_1)}{\log(\gamma_{\text{rec}})} \right) + 1 \quad (56)$$

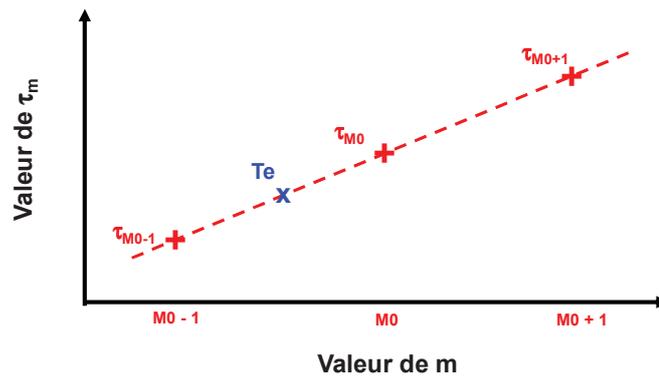


Figure 104 : Démonstration de la position de la période d'échantillonnage entre deux constantes de temps reconstruites

La plus petite constante de temps identifiable doit être supérieure à la période d'échantillonnage T_e . Cependant, si la valeur de T_e est très proche de celle de la constante de temps τ_{M_0} , il peut être difficile d'identifier précisément la valeur de τ_{M_0} . Dans ce cas, on propose de choisir τ_{M_0+1} comme la plus petite constante de temps identifiable. Par contre, si la valeur de τ_{M_0} est 2 fois supérieure à T_e (2 fois correspondant à l'hypothèse de δ dans le Tableau 18), τ_{M_0} peut être choisie comme la plus petite constante de temps identifiable. Si T_e est trop proche de τ_{M_0} , τ_{M_0+1} sera donc choisie comme la plus petite constante de temps identifiable. La valeur de M_{\min} est donc exprimée par :

$$M_{\min} = \begin{cases} M_0, & \text{si } \tau_{M_0} > 2 \cdot T_e \\ M_0 + 1, & \text{si } \tau_{M_0} \leq 2 \cdot T_e \end{cases} \quad (57)$$

- **Etape 3** : le nombre de circuit R//C à utiliser est finalement donné par :

$$n = M_{\max} - M_{\min} + 1 \quad (58)$$

Le Tableau 26 donne quelques exemples du nombre de circuit R//C à utiliser pour différentes durées de relaxations avec différentes périodes d'échantillonnage. Ce tableau montre que, quand la durée de relaxation augmente ou la période d'échantillonnage diminue, le nombre de R//C à utiliser a tendance à augmenter.

Durée de relaxation	10 s	1 min	10 min	1 h	10 h
Nombre de R//C avec $T_e = 0.1$ s	2	2	3	4	5
Nombre de R//C avec $T_e = 1$ s	1	1	2	3	4

Tableau 26 : Exemple du nombre de circuits R//C à utiliser en fonction de la durée de relaxation avec différentes périodes d'échantillonnages T_e

Finalement, pour identifier les paramètres inconnus de l'équation (33) d'une relaxation, il suffit de :

- utiliser la règle générale (cf. Tableau 25) pour déterminer le nombre de circuits n optimal,
- obtenir les conditions aux limites des n constantes de temps τ_{i_Relax} par la division théorique (cf. paragraphe 3.3.3),
- identifier les n constantes de temps τ_{i_Relax} et n chutes de tensions U_{i_Relax} par l'algorithme de la Figure 83.

Il est à noter que cette règle, valide pour les 3 technologies étudiées, nécessite d'être vérifiée sur d'autres technologies.

3.6. Etude de l'influence de la sollicitation avant la relaxation

Selon l'équation (33), la tension en relaxation peut être décrite par les chutes de tension U_{i_Relax} sur chaque circuit R//C au début de la relaxation et les constantes de temps τ_{i_Relax} de chaque circuit R//C. Les U_{i_Relax} , selon l'équation (26), sont liées fortement à la sollicitation en régime forcé. Cependant, les τ_{i_Relax} sont considérées indépendantes de la sollicitation précédente en régime forcé dans l'équation (33). Afin de vérifier l'hypothèse que les τ_{i_Relax} peuvent être considérées comme indépendantes de la sollicitation précédente en régime forcé, une étude a été effectuée sur l'influence de la sollicitation avant la relaxation.

L'étude de vérification est organisée en deux étapes :

- **Etape 1** : Obtenir par l'expérimentation des mesures de tension en relaxation à même SoC mais précédées des sollicitations à différents courants (1C, 5C, 10C).
- **Etape 2** : Avec les mêmes constantes de temps identifiées à partir des tensions en relaxation suite à la sollicitation à 1C avec l'équation (33), représenter les tensions en relaxation pour d'autres niveaux de courants en adaptant le niveau de chute de tension U_{i_Relax} sur chaque circuit R//C. Si les constantes de temps arrivent à bien représenter les relaxations après différentes sollicitations, il sera considéré que ces dernières n'influencent pas les constantes de temps lors de la relaxation.

Les deux étapes ont été déroulées sur une cellule d'A123, le détail est présenté ci-dessous.

Etape 1: Expérimentation

Les essais décrits sur la Figure 105 ont été effectués sur la cellule Li-ion d'A123 à 25 °C de température ambiante. Chaque créneau de décharge à un courant donné sur la Figure 105 enlève 10% de SoC. En appliquant ce créneau à chaque 10% de SoC entre 100% et 0% de SoC et en imposant 1 h de repos entre deux créneaux, on peut obtenir des relaxations d'une heure à différents SoCs. La période d'échantillonnage pendant la relaxation est de 0.1 s. En répétant la même procédure avec un créneau de différentes amplitudes (1C, 5C, 10C et 20C), on obtient des relaxations d'une heure après différents niveaux de sollicitation à différents SoCs. Pour des niveaux de courant supérieurs à 1C, il n'y a pas de relaxation à bas SoCs du fait que la tension de limite en décharge de la cellule est atteinte pendant la décharge. Donc, les relaxations aux mêmes SoCs pour les 4 niveaux de courants sont observées entre 90% et 40% de SoC. Les relaxations aux deux SoCs extrêmes (90% et 40%) sont ainsi utilisées pour la démonstration de l'étape 2.

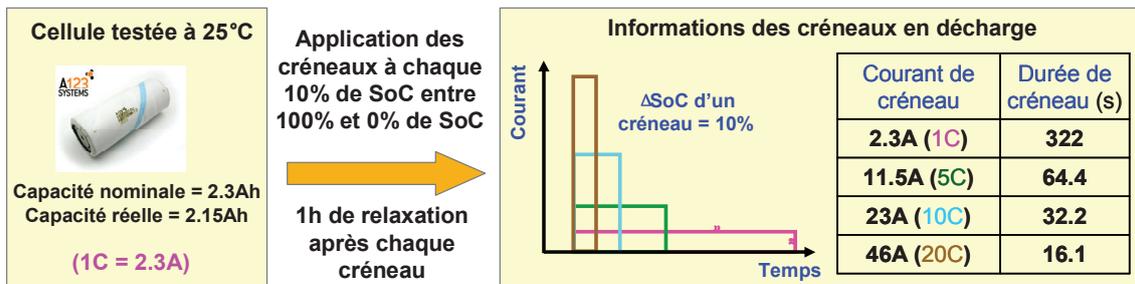


Figure 105 : Description des essais sur une cellule Li-ion d'A123 pour obtenir des relaxations d'1h après différents niveaux de sollicitation en décharge

Etape 2: Représentation des relaxations

Selon le Tableau 26, on utilise 4 circuits R//C pour la relaxation de durée 1 h échantillonnée à 0.1 s. En identifiant les constantes de temps des relaxations après la sollicitation à 1C avec le modèle comportant 4 R//C, on obtient les résultats présentés sur la Figure 106.

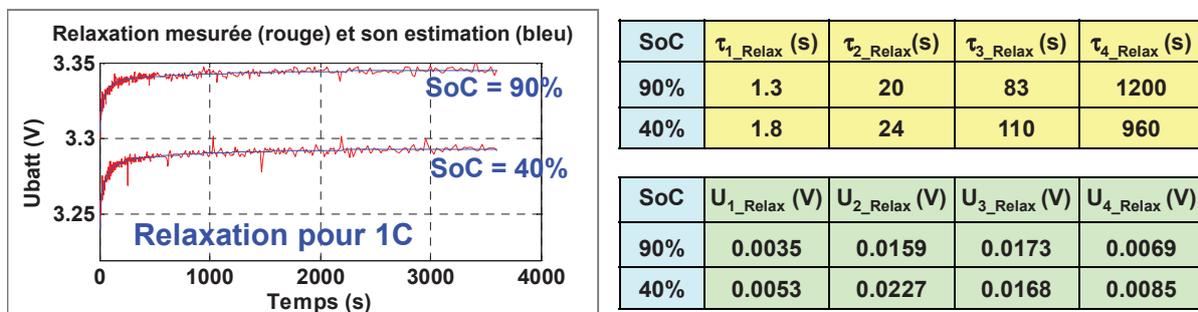


Figure 106 : Résultats d'identification des constantes de temps pour les relaxations après la sollicitation à 1C

En fixant les τ_{i_Relax} de l'équation (33) par celles identifiées avec les relaxations après la sollicitation à 1C, on identifie les relaxations après les sollicitations à 5C, 10C et 20C en adaptant les U_{i_Relax} . Les résultats sont présentés sur la Figure 107. La Figure 108 présente les résultats de la Figure 107 avec le temps à l'échelle logarithmique pour donner plus de détail sur le début de la relaxation. Les deux figures montrent que les relaxations après les sollicitations à 5C, 10C et 20C sont bien représentées avec les constantes de temps τ_{i_Relax} identifiées par les relaxations après la sollicitation à 1C.

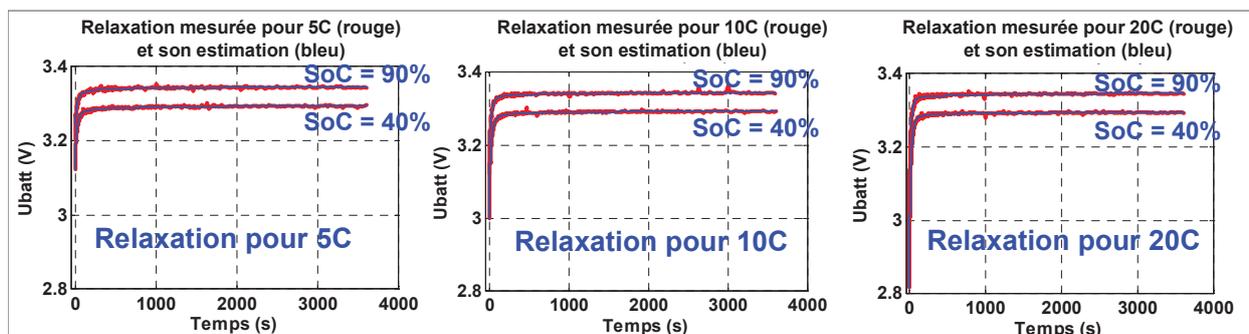


Figure 107 : Résultats des représentations des relaxations après les sollicitations à 5C, 10C et 20C avec les constantes de temps identifiées par les relaxations après la sollicitation à 1C

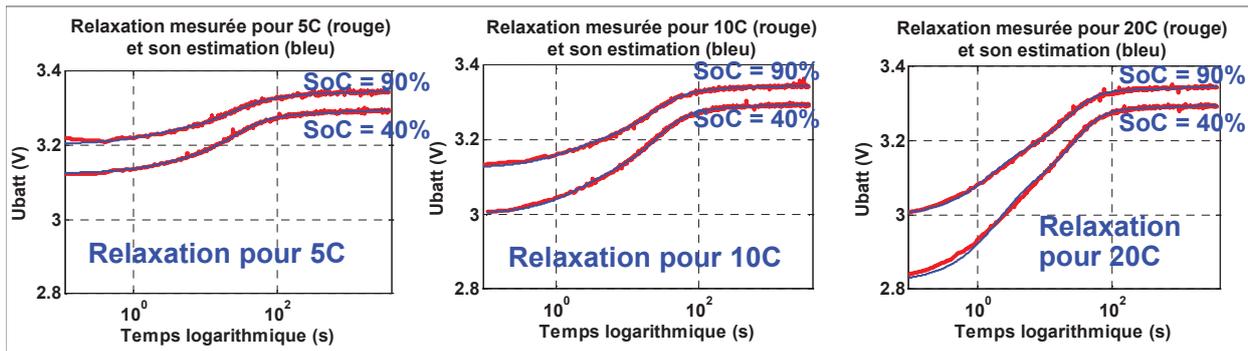


Figure 108 : Résultats de la Figure 107 avec le temps à l'échelle logarithmique

La Figure 109 présente des comparaisons des U_{i_Relax} identifiées pour des relaxations après les sollicitations à différents courants de la Figure 106 et la Figure 107. Elle montre que :

- les chutes de tensions U_{1_Relax} et U_{2_Relax} , correspondant aux faibles constantes de temps, présentent une dépendance au courant. Elles augmentent quand le niveau de courant croît.
- les chutes de tension U_{3_Relax} et U_{4_Relax} , correspondant aux constantes de temps les plus grandes, ne présentent pas une dépendance remarquable au courant. Cela s'explique par analogie avec une réponse exponentielle d'un circuit R//C à une impulsion de courant (cf. Annexe 9).

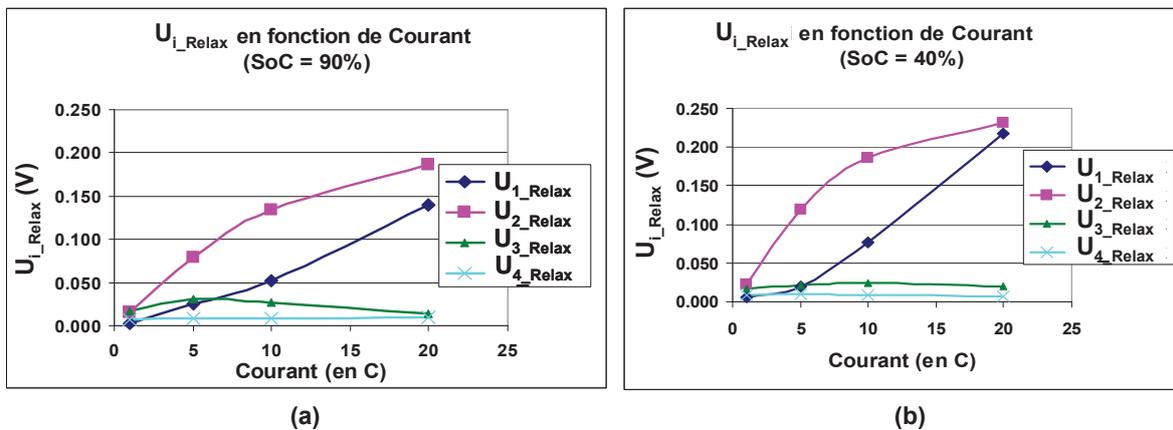


Figure 109 : Comparaisons des U_{i_Relax} pour différentes relaxations après décharge (a) à 90% de SoC et (b) à 40% de SoC

Des essais similaires ont aussi été effectués sur la même cellule pour le cas des sollicitations en charge, les résultats sont résumés sur la Figure 110 et la Figure 111. On obtient les mêmes observations que dans le cas des sollicitations en décharge. On a donc bien vérifié l'hypothèse que les constantes de temps décrivant la tension de la cellule pendant la phase de relaxation sont indépendantes de la sollicitation précédente en régime forcé.

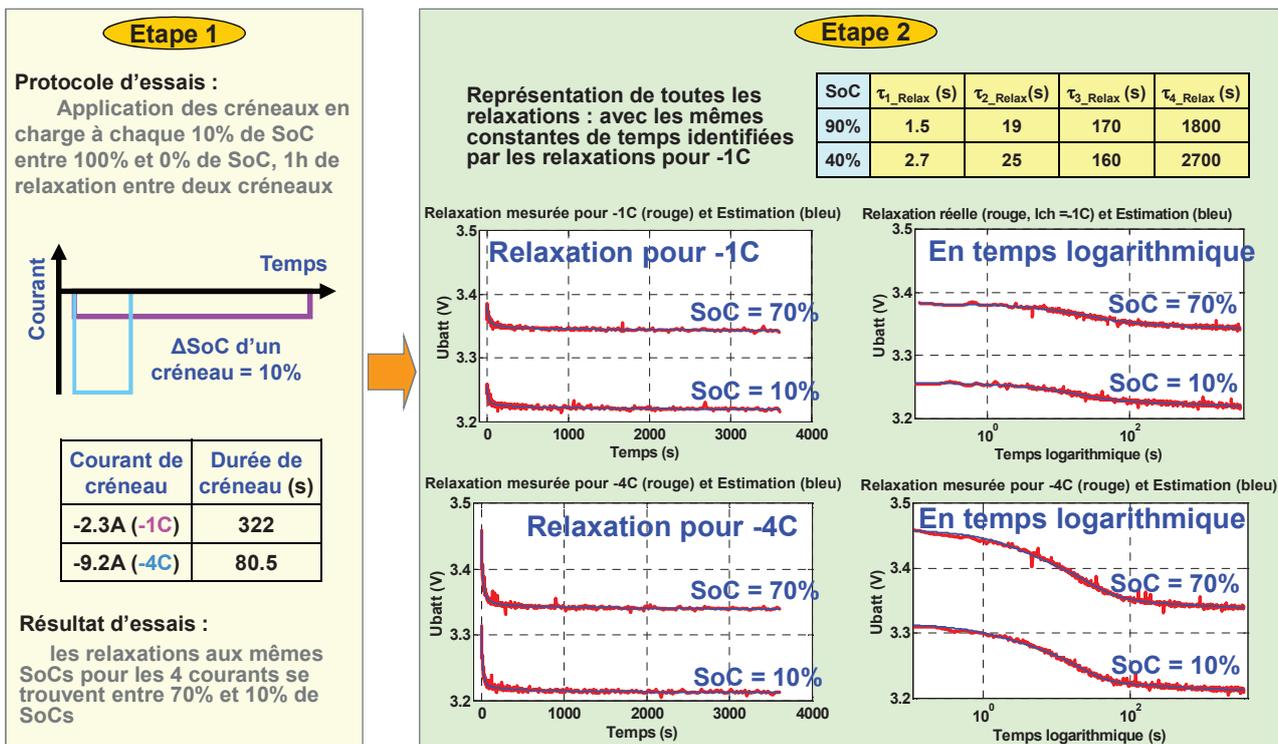


Figure 110 : Résultats des représentations des relaxations après la sollicitation à -4C avec les constantes de temps identifiées par les relaxations après la sollicitation à -1C

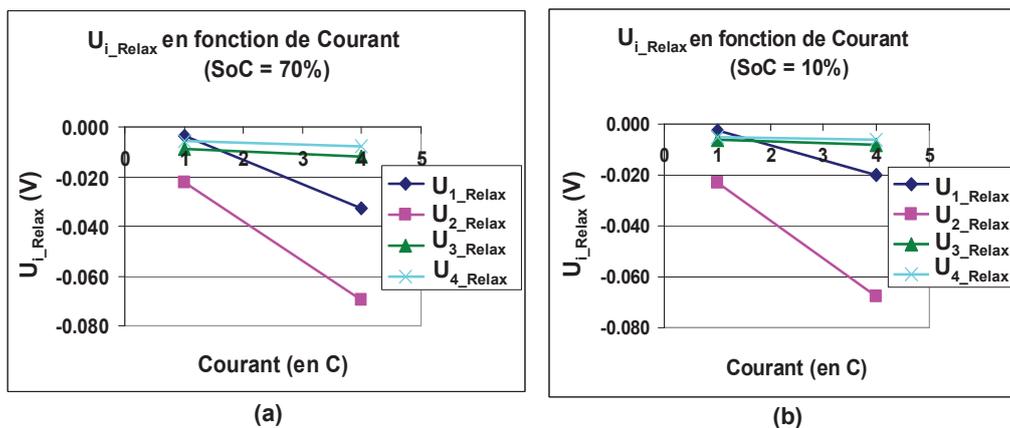


Figure 111 : Comparaisons des U_{i_Relax} pour différentes relaxations après charge (a) à 70% de SoC et (b) à 10% de SoC

3.7. Extrapolation de la relaxation longue à partir d'une mesure de courte durée

La caractérisation de la relaxation longue demande une longue durée d'essai, d'où l'intérêt de réduire la durée de mesure. Or, quand la durée de mesure est diminuée, l'évolution lente de la tension attachée à la dernière constante de temps ne peut plus être observée. La solution proposée est d'extrapoler le comportement de la relaxation longue à partir d'une courte durée de mesure. L'évolution de la tension pendant la relaxation est décrite par les chutes de tension U_{i_Relax} et les constantes de temps τ_{i_Relax} des circuits R//C (cf. équation (33)). L'idée d'extrapolation de la relaxation longue, illustrée sur la Figure 112, est d'estimer la plus grande constante de temps (τ_{5_Relax}) et la chute de tension associée (U_{5_Relax}) à partir des autres τ_{i_Relax} et U_{i_Relax} identifiées avec une mesure de relaxation de courte durée (par exemple sur 1 h).

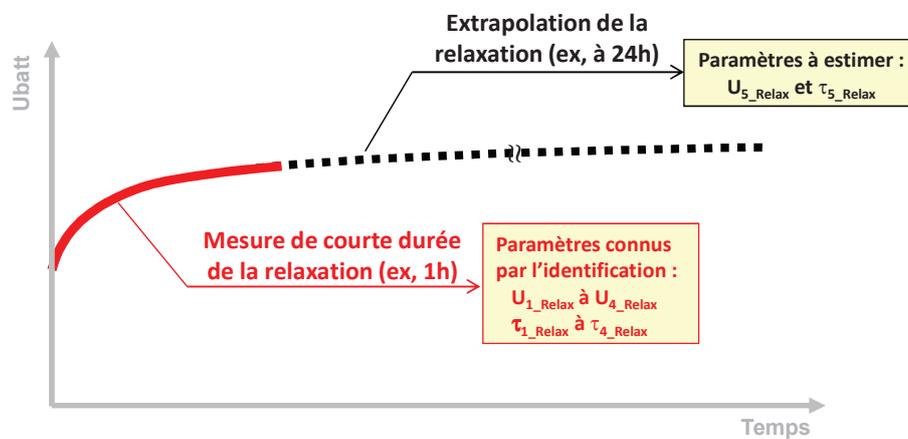


Figure 112 : Illustration de l'idée d'extrapolation de la relaxation longue

La valeur de τ_{5_Relax} peut être fixée à la valeur représentative de la 5^{ème} constante de temps qui est égale à 38000 s selon la règle générale (cf. Tableau 25). Donc, le problème à résoudre pour l'extrapolation de la relaxation longue est d'estimer la chute de tension U_{5_Relax} . Deux méthodes d'estimation de U_{5_Relax} ont été investiguées et sont présentées dans les deux paragraphes suivants.

3.7.1. Méthode d'estimation de U_{5_Relax} par extrapolation des mesures sur une heure

Dans un premier temps, la possibilité d'extrapolation de U_{5_Relax} à 24 h a été investiguée à partir de la mesure sur 1 h de relaxation. Comme ceci a été montré par la Figure 89 (b) et la Figure 102, la distribution à l'échelle logarithmique des U_{i_Relax} avec $i > 1$ a une tendance linéaire pour certaines relaxations des cellules Li-ion (A123 et Kokam). Il est donc possible d'extrapoler la valeur de U_{5_Relax} à partir des valeurs de U_{2_Relax} , U_{3_Relax} et U_{4_Relax} identifiées avec 1h de relaxation. Avec cette méthode d'estimation de U_{5_Relax} , une démarche d'extrapolation de la relaxation longue a été élaborée et est résumée par les 5 étapes suivantes :

- Etape 1 : effectuer une mesure de relaxation de 1 h,

- Etape 2 : identifier les 4 couples de $(\tau_{i_Relax}, U_{i_Relax})$ pour un modèle avec 4 circuits R//C à partir de la mesure de relaxation de 1 h,
- Etape 3 : extrapoler U_{5_Relax} avec les valeurs de U_{2_Relax} , U_{3_Relax} et U_{4_Relax} identifiées,
- Etape 4 : fixer la valeur de τ_{5_Relax} à 38000 s,
- Etape 5 : extrapoler la tension de la relaxation à 24 h avec les 5 couples de $(\tau_{i_Relax}, U_{i_Relax})$ obtenues dans les étapes 2 à 4 selon l'équation (33) du Chapitre 3. Les 5 couples de $(\tau_{i_Relax}, U_{i_Relax})$ reconstruisent en fait un modèle avec 5 circuits R//C.

Pour illustrer la démarche, un exemple d'extrapolation de la relaxation longue est donné par la suite en utilisant la mesure de la première heure de la relaxation présentée sur la Figure 86. Avec la mesure de la première heure de relaxation, les 4 couples de $(\tau_{i_Relax}, U_{i_Relax})$ pour le modèle avec 4 circuits R//C sont identifiés. Leurs valeurs sont celles présentées sur la Figure 88. En utilisant les U_{i_Relax} identifiées avec 1h de relaxation, la valeur de U_{5_Relax} peut être extrapolée comme illustré sur la Figure 113 : elle est égale à 1.2 mV.

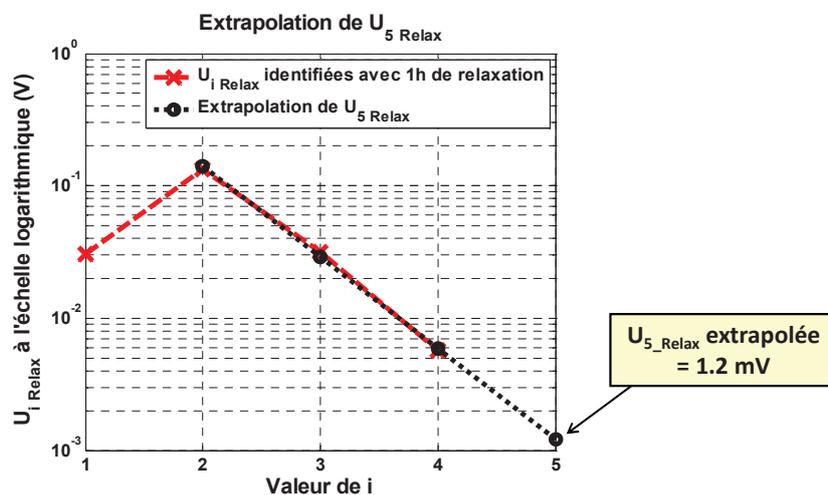


Figure 113 : Exemple d'extrapolation de la valeur de U_{5_Relax} à partir des valeurs de U_{2_Relax} , U_{3_Relax} et U_{4_Relax} identifiées avec la relaxation d'1h à 45% de SoC de la cellule A123

En utilisant les 4 couples de $(\tau_{i_Relax}, U_{i_Relax})$ du modèle avec 4 circuits R//C ainsi que les valeurs de τ_{5_Relax} et U_{i_Relax} , un modèle avec 5 R//C peut être reconstruit et sa performance d'estimation de la relaxation longue est présentée sur la Figure 114. En comparaison avec l'estimation du modèle comportant 4 circuits R//C identifié avec 1h de relaxation, le modèle avec 5 circuits R//C reconstruit améliore l'estimation de la relaxation longue. Cette amélioration se voit plus clairement sur le Tableau 27 en comparant les erreurs d'estimation des deux modèles.

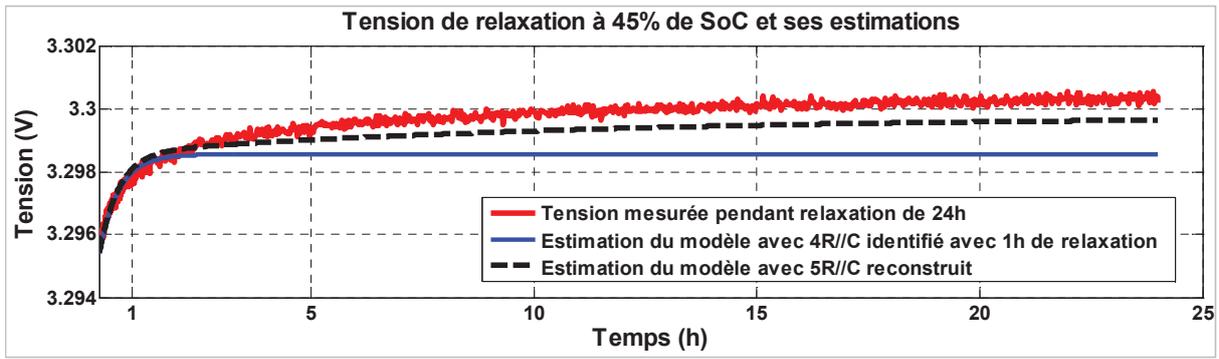


Figure 114 : Performance du modèle avec 5 circuits R//C reconstruit pour extrapoler la relaxation longue de 1h à 24h à 45% de SoC de la cellule A123

Modèle	Comparaison de l'erreur statique à la fin de 24 h entre l'estimation et la mesure (mV)
Modèle avec 4 R//C identifié avec 1 h de relaxation	1.7
Modèle avec 5 R//C reconstruit	0.7

Tableau 27 : Comparaison des erreurs d'estimation des deux modèles sur la Figure 114

La démarche d'extrapolation a aussi été appliquée aux relaxations à 85% et 25% de SoC de la Figure 91 (a). La performance des modèles reconstruits pour les deux relaxations est présentée sur la Figure 115. Les erreurs d'estimation associées sont détaillées dans le Tableau 28. Quand le modèle reconstruit pour la relaxation à 25% de SoC améliore l'estimation de la relaxation longue par rapport au modèle avec 4 circuits R//C, le modèle reconstruit pour la relaxation à 85% de SoC donne une estimation dégradée.

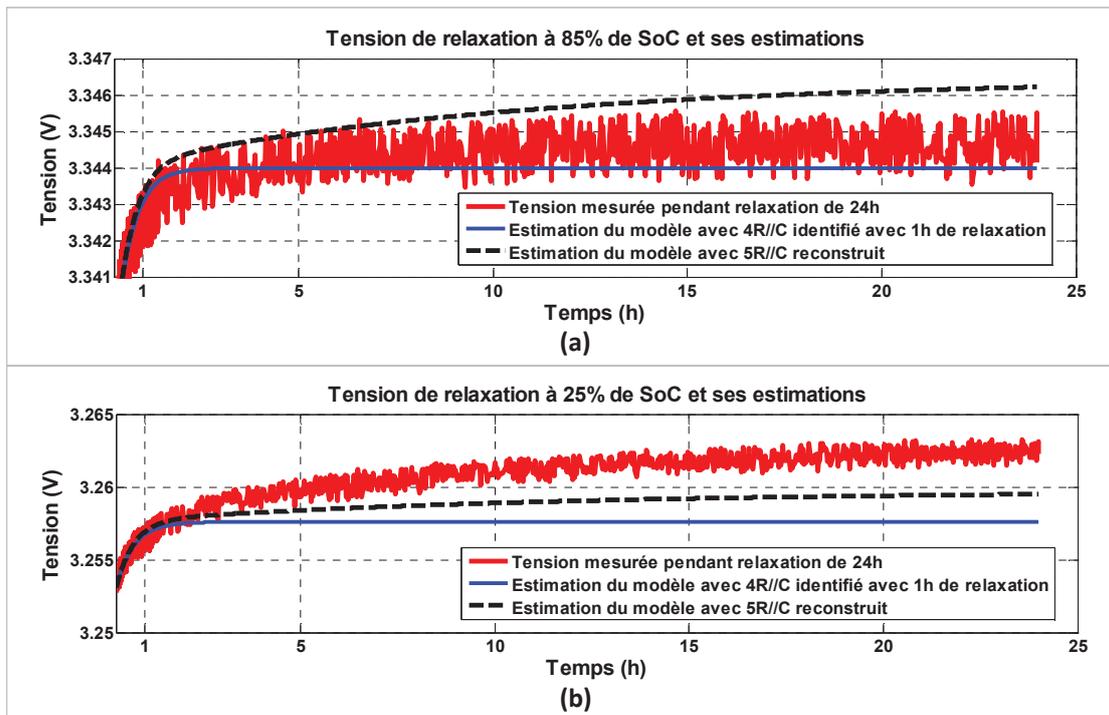


Figure 115 : Performance du modèle avec 5 circuits R//C reconstruit pour extrapoler la relaxation longue de 1 h à 24 h (a) à 85% et (b) à 25% de SoC de la cellule A123

SoC de la relaxation	Modèle	Comparaison de l'erreur statique à la fin de 24 h entre l'estimation et la mesure (mV)
85%	Modèle avec 4 R//C identifié avec 1 h de relaxation	0.5
	Modèle avec 5 R//C reconstruit	-1.7
25%	Modèle avec 4 R//C identifié avec 1 h de relaxation	5.0
	Modèle avec 5 R//C reconstruit	3.1

Tableau 28 : Comparaison des erreurs d'estimation des deux modèles sur la Figure 115

En résumé, la démarche d'extrapolation proposée permet d'améliorer l'estimation de la relaxation longue sauf dans certains cas (par exemple le cas de la relaxation à 85% de SoC de la cellule A123). L'existence de l'écart entre l'estimation du modèle reconstruit et la mesure de la relaxation à 24 h peut être lié au fait que la durée de mesure d'1 h utilisée pour reconstruire le modèle est trop courte et ne permet pas d'inclure assez d'information sur la dynamique lente de la relaxation. L'extrapolation d'une relaxation de 24 h à partir d'une mesure de 1 h n'est donc pas fiable systématiquement. Il est ainsi nécessaire de prolonger la durée de mesure afin d'avoir un modèle reconstruit plus précis. Dans le prochain sous paragraphe sera investiguée l'utilisation d'une durée de mesure plus longue qu'une heure pour reconstruire le modèle.

3.7.2. Méthode d'estimation de U_{5_Relax} avec la tension de relaxation tracée à l'aide d'une échelle logarithmique du temps

La méthode d'estimation de U_{5_Relax} présentée dans ce paragraphe est basée sur l'exploitation de la tension de relaxation tracée à l'aide d'une échelle logarithmique du temps. Comme illustrée sur la Figure 116 (a), en comparant la mesure de la relaxation à 45% de SoC de la Figure 114 à l'estimation du modèle avec 4 circuits R//C, une divergence peut se voir à partir de 2.2 h qui correspond à la fin de validité du modèle avec 4 circuits R//C pour la cellule considérée ($5 \cdot \tau_{4_Relax}$ comme indiqué dans le paragraphe 3.5.3). La différence en tension ΔU_{Diff} à la fin de 24 h de relaxation est due à la non prise en compte du 5^{ème} circuit R//C dont la constante de temps τ_{5_Relax} peut être estimée à 38000 s selon la règle générale (cf. Tableau 25) :

$$\Delta U_{Diff} = U_{5_Relax} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_{Relax}}{\tau_{5_Relax}}} \right) \quad (59)$$

Avec :

Δt_{Relax} : durée de relaxation qui est égale à 24 h.

Ainsi, si l'on peut estimer la valeur de ΔU_{Diff} , la valeur de U_{5_Relax} peut être obtenue par :

$$U_{5_Relax} = \frac{\Delta U_{Diff}}{\left(1 - e^{-\frac{\Delta t_{Relax}}{\tau_{5_Relax}}} \right)} \quad (60)$$

L'estimation de ΔU_{Diff} peut se faire à l'aide d'une transformation de l'échelle linéaire du temps en échelle logarithmique. Ainsi sur la Figure 116 (b), la tension de relaxation au-delà de 2.2 h est proche d'une droite (cf. ligne droite pointillée en noir). La différence de tension à la fin de 24 h entre la ligne droite et l'estimation du modèle avec 4 circuits R//C peut ainsi être utilisée pour estimer ΔU_{Diff} . Pour identifier la pente de la droite, il suffit d'effectuer une régression linéaire (par exemple, polyfit de Matlab) en utilisant seulement une petite durée de mesure ajoutée au-delà de 2.2 h (par exemple, de 2.2 h à 5 h comme sur la Figure 116 (b)). Cela permet donc de réduire la durée de mesure de la relaxation de 24 h à une durée juste nécessaire pour identifier la pente. Le problème à résoudre est finalement de déterminer la durée juste nécessaire pour identifier cette pente.

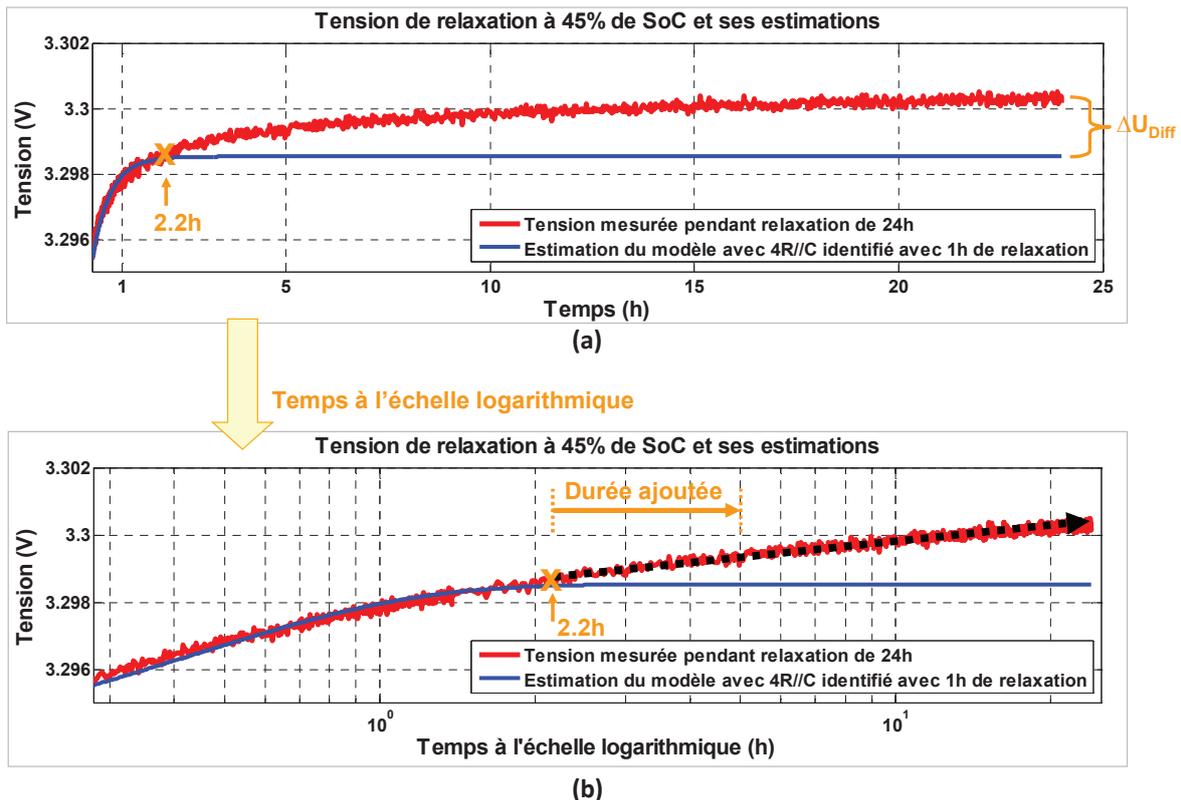


Figure 116 : Relaxation longue de 1 h à 24 h à 45% de SoC de la cellule A123 avec l'axe du temps (a) à l'échelle linéaire et (b) à l'échelle logarithmique (*la tension de relaxation au-delà de 2.2 h est proche d'une droite - cf. ligne droite pointillée en noir*)

Afin de déterminer la durée de mesure juste nécessaire pour identifier la pente, a été effectuée une étude sur la relation entre la durée de mesure ajoutée au-delà de 2.2 h et la précision d'identification de la pente de la ligne droite. L'étude s'est déroulée en plusieurs étapes comme illustrées sur la Figure 117 :

- Etape 1 : pour s'affranchir de l'influence du bruit de mesure, au lieu d'utiliser directement la mesure de tension qui est bruitée, l'estimation du modèle avec 5 circuits R//C identifié avec 24 h de relaxation a été utilisée. Cette estimation est déjà présentée sur la Figure 90.
- Etape 2 : sur l'échelle logarithmique du temps, une durée de mesure ajoutée au-delà de 2.2 h est utilisée pour identifier la pente de la droite. L'écart ΔU_{Ecart} à la fin de 24 h entre la droite identifiée et l'estimation du modèle avec 5 circuits R//C est utilisé pour évaluer la précision d'identification de la pente de la droite.

- Etape 3 : en répétant l'étape 2 avec différentes durées de mesure ajoutée, l'évolution de l'écart en fonction de la durée de mesure ajoutée peut être obtenue.

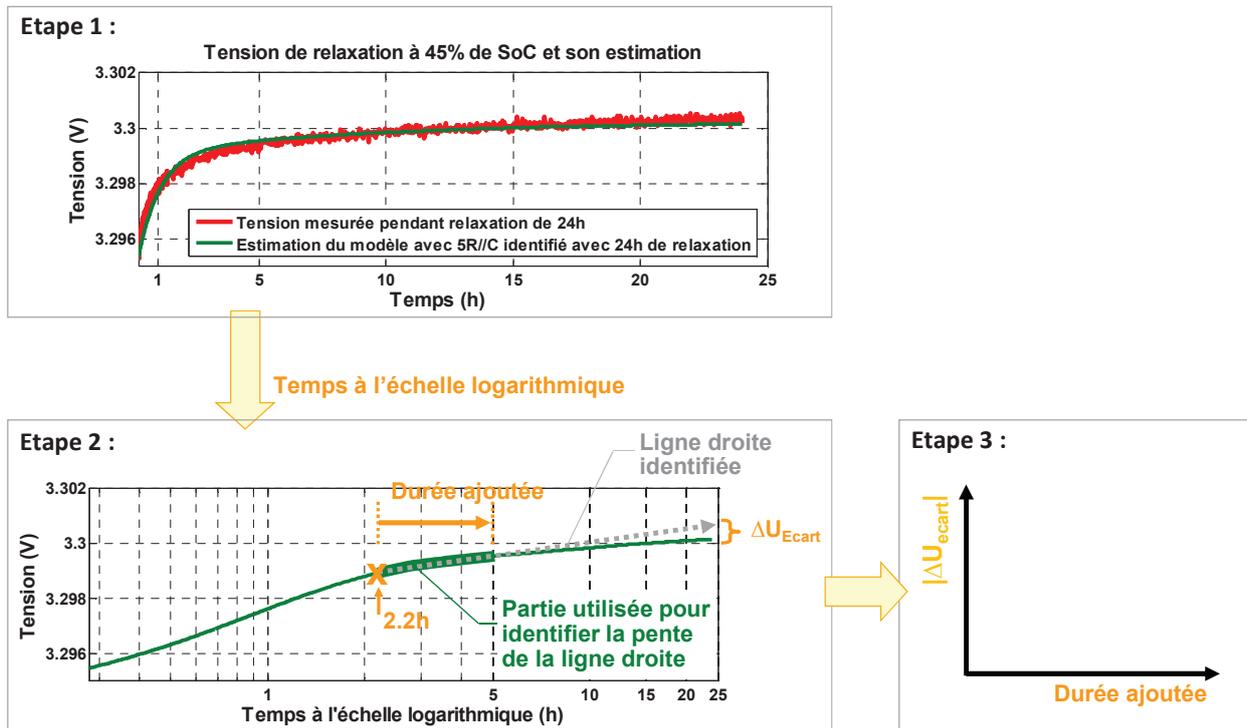


Figure 117 : Illustration des étapes pour étudier la relation entre la durée de mesure ajoutée au-delà de 2.2 h et la précision d'identification de la pente de la ligne droite

Le résultat à l'issue de l'étape 3, présenté sur la Figure 118, montre que l'écart ΔU_{Ecart} diminue quand la durée ajoutée augmente. En choisissant une valeur de l'écart en fonction de la précision voulue, la durée ajoutée au juste nécessaire peut être déterminée. Par exemple, pour atteindre un niveau de précision égale à 0.5 mV, la durée ajoutée au-delà de 2.2 h est égale à 3h. Dans ce cas, il faut au total 5.2 h (2.2 h + 3 h) de mesure de la tension de relaxation afin de pouvoir reconstruire la tension de relaxation de 5.5 h à 24 h.

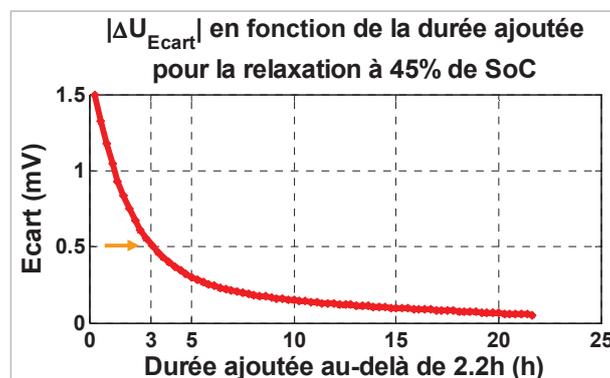


Figure 118 : Ecart absolu de ΔU_{Ecart} en fonction de la durée ajoutée

Basée sur les études précédentes, une démarche d'extrapolation de la relaxation longue a été élaborée. Cette démarche contient 2 phases. La phase n°1 consiste à déterminer la durée de mesure

nécessaire pour reconstruire la tension de relaxation longue. La phase n°1 contient les 3 étapes suivantes :

- **Etape 1-1** : effectuer une mesure de relaxation de 24 h à un SoC intermédiaire (par exemple, à 45% de SoC).
- **Etape 1-2** : identifier le modèle avec 5 circuits R//C en utilisant 24 h de relaxation et le modèle avec 4 circuits R//C en utilisant la première heure de relaxation.
- **Etape 1-3** : en utilisant l'estimation du modèle avec 5 circuits R//C et en choisissant une précision voulue, déterminer la durée de mesure juste nécessaire pour identifier la pente de la ligne droite selon la méthode présentée sur la Figure 117.

La phase n°2 consiste à reconstruire la relaxation longue pour les relaxations aux autres SoCs de la batterie. Elle comprend les 4 étapes suivantes :

- **Etape 2-1** : effectuer des mesures de relaxation aux autres SoCs avec la durée de mesure limitée à celle déterminée par l'étape 1-3.
- **Etape 2-2** : pour chacune des relaxations aux autres SoCs, identifier respectivement son modèle avec 4 circuits R//C en utilisant 1h de relaxation et la droite en utilisant la mesure de relaxation au-delà de la fin de la validité de la 4^{ème} constante de temps du modèle avec 4 circuits R//C identifié par l'étape 1-2 (dans notre exemple, 2.2 h).
- **Etape 2-3** : la différence en tension à la fin de 24 h entre l'estimation du modèle avec 4 circuits R//C et la droite est utilisée pour estimer la valeur de ΔU_{Diff} . Avec l'équation (60), la valeur de U_{5_Relax} du 5^{ème} circuit R//C peut être obtenue.
- **Etape 2-4** : reconstruire un modèle avec 5 R//C en utilisant le modèle avec 4 circuits R//C et le 5^{ème} circuit R//C identifié par l'étape 2-3. Ce modèle reconstruit permet donc d'extrapoler la relaxation à 24 h.

Une évaluation de la performance de la démarche proposée a été effectuée en utilisant les mesures de 3 relaxations de 24 h de la cellule A123. Premièrement, avec la mesure de relaxation de 24 h à 45% de SoC (cf. Figure 116) et en choisissant 0.5 mV (grandeur du bruit de mesure de tension) comme la précision voulue, la durée nécessaire de mesure est déterminée à 5.2 h (cf. Figure 118) à l'issue de la phase n°1. Deuxièmement, avec les mesures de premières 5.2 h de relaxation à 85%, 45% et à 25% de SoC, trois modèles avec 5 circuits R//C ont été reconstruits à l'issue de la phase n°2. La performance des modèles reconstruits pour estimer les relaxations de 24 h est présentée sur la Figure 119. Les erreurs statiques à la fin de 24 h entre l'estimation du modèle reconstruit et la mesure sont aussi données dans le Tableau 29. Le résultat montre que les modèles reconstruits sont tous capables d'estimer précisément la relaxation longue à 24 h. La démarche proposée d'extrapolation de la relaxation longue est donc validée.

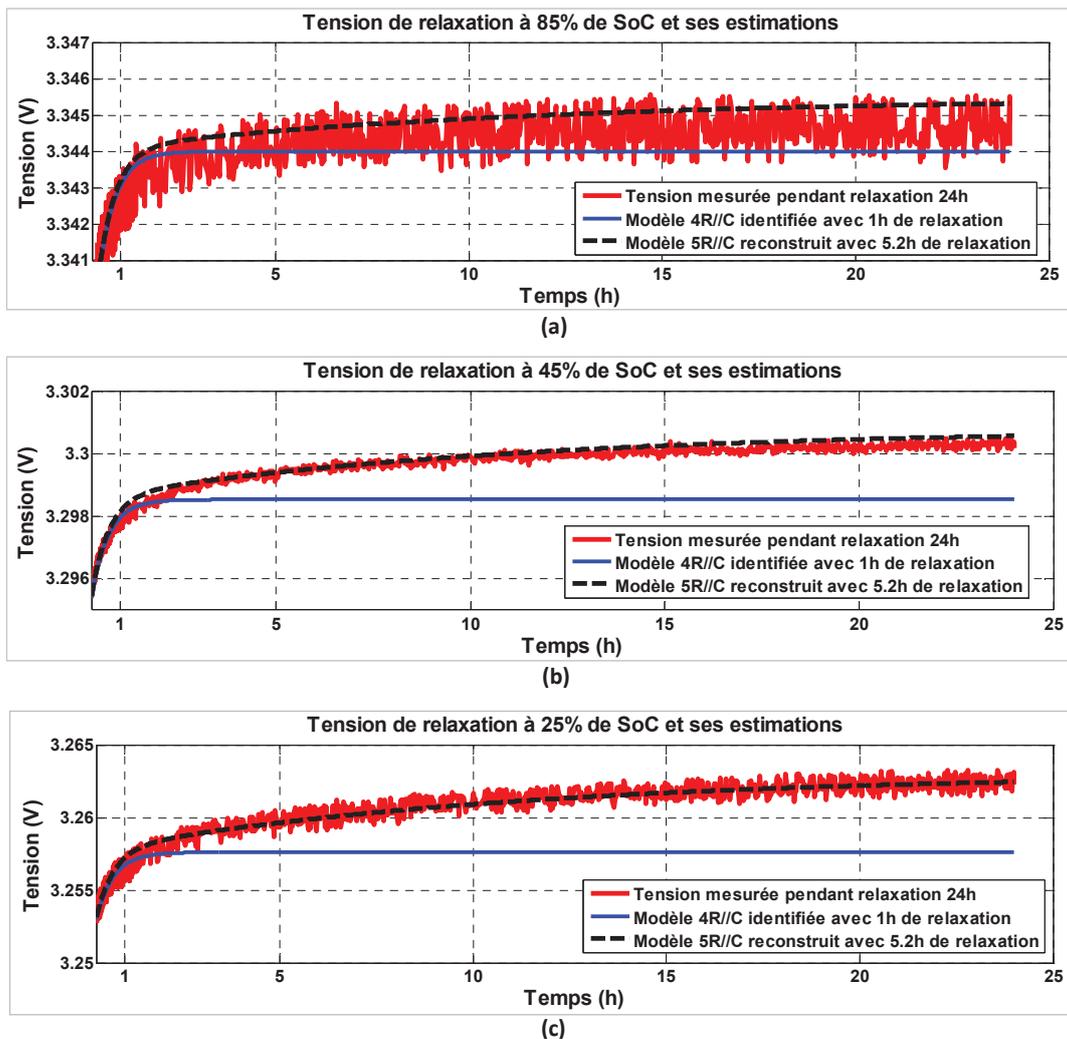


Figure 119 : Performance du modèle avec 5 circuits R//C reconstruit avec la mesure de 5.2 h pour extrapoler la relaxation longue de 5.2 h à 24 h (a) à 85%, (b) à 45% et (c) à 25% de SoC de la cellule A123

SoC de la relaxation	Comparaison de l'erreur statique à la fin de 24 h entre l'estimation du modèle reconstruit et la mesure (mV)
85%	-0.8
45%	-0.2
25%	0.1

Tableau 29 : Comparaison des erreurs d'estimation pour les relaxations à différents SoCs

3.8. Conclusion

A l'issue de ce chapitre qui étudie les relaxations de différentes cellules, on dispose de deux outils applicables pour différentes cellules : une règle générale pour déterminer le nombre optimal de circuits R//C à utiliser dans le modèle de batterie en fonction de la durée de relaxation et de la période d'échantillonnage, ainsi qu'une méthode d'identification des paramètres du modèle en relaxation. Les deux outils élaborés permettent de construire par la suite une procédure générique de caractérisation de cellule que l'on va présenter dans le prochain chapitre. De plus, on a vérifié que les constantes de temps du modèle en relaxation peuvent être considérées indépendantes de la sollicitation précédente. Finalement, plusieurs méthodes d'extrapolation de la relaxation longue ont aussi été investiguées afin de réduire la durée de mesure de relaxation.

Chapitre 4 : Procédure de caractérisation expérimentale d'une cellule

4.1. Introduction

Les cellules pour les véhicules électrifiés présentent des caractéristiques très diversifiées comme cela a été montré au Chapitre 1. Ainsi, il est particulièrement intéressant pour les constructeurs automobiles de disposer d'une méthodologie de caractérisation du comportement dynamique des cellules afin de pouvoir évaluer les performances des cellules proposées par les différents fournisseurs. Dans ce chapitre, est présentée une nouvelle procédure de caractérisation expérimentale de la cellule avec un modèle de type circuit électrique équivalent, qui s'applique facilement à différentes technologies de cellule. Ce chapitre commence par une introduction sur la démarche générale de la procédure de caractérisation proposée. Deuxièmement, la méthode d'identification des paramètres du modèle électrique est exposée. Troisièmement, les essais nécessaires pour caractériser une cellule sont détaillés. Quatrièmement, la validation de la procédure de caractérisation avec plusieurs cellules de technologies différentes est présentée. Enfin, les possibilités de réduire la durée des essais de caractérisation sont discutées.

4.2. Démarche générale de caractérisation d'une cellule

Pour caractériser une cellule à une température donnée avec le modèle générique de la Figure 120 (présenté au Chapitre 2 Figure 73), les paramètres inconnus à identifier sont listés dans le Tableau 30 et sont présentés ci-dessous :

- $C_{\text{Batt_Réal}}$: la capacité réelle de la cellule pour un courant spécifié,
- η_r : le rendement faradique pendant la charge,
- $\text{OCV} \sim f_{\text{OCV}}(\text{SoC})$: la relation de la tension de circuit ouvert OCV en fonction du SoC,
- $R_s \sim f_{R_s}(\text{SoC}, I)$: la cartographie de la résistance série R_s en fonction du SoC et du courant,
- n : le nombre de circuits R//C à utiliser,
- $R_i \sim f_{R_i}(\text{SoC}, I)$: la résistance R_i de chaque circuit R//C en fonction du SoC et du courant,
- $\tau_i \sim f_{\tau_i}(\text{SoC}, I)$: la constante de temps τ_i de chaque circuit R//C en fonction du SoC et du courant.

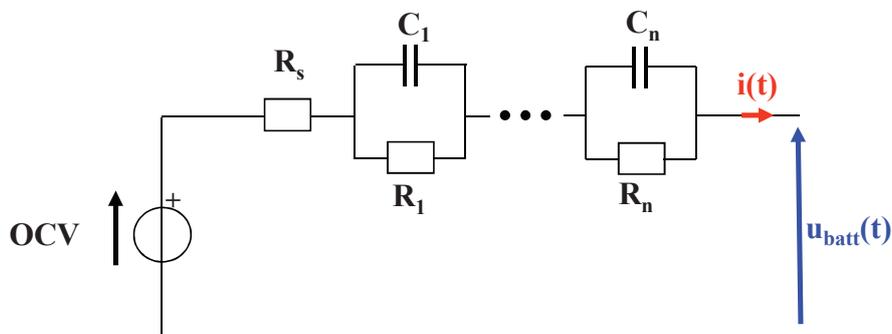


Figure 120 : Structure de modèle retenue pour l'étude de la thèse

Dépendance\Paramètre	$C_{\text{Batt_R\u00e9el}}$	η_r	OCV	R_s	n	R_i	τ_i
SoC			x	x		x	x
Courant				x		x	x

Tableau 30 : Liste des paramètres inconnus à identifier pour le modèle d'une cellule à une température donnée

Pour identifier ces paramètres inconnus, on a élaboré une méthode de caractérisation dont la démarche est résumée ci-dessous et illustrée sur la Figure 121 :

- **Etape 1**, un cycle de charge/décharge est utilisé pour obtenir la capacité réelle $C_{\text{Batt_R\u00e9el}}$ et le rendement faradique η_r . Le cycle de charge/décharge est similaire à la procédure de test de capacité souvent utilisée dans la littérature (cf. paragraphe 2.3.2 du Chapitre 2).
- **Etape 2** : deux profils de courant contenant des motifs en escalier respectivement en décharge et en charge sont utilisés pour déterminer tous les autres paramètres inconnus. Chaque profil contient plusieurs motifs identiques afin de tester la cellule à différents SoCs. Les motifs en décharge peuvent être différents de ceux en charge. Entre deux motifs, est imposée une phase de relaxation de durée identique qui permet de déterminer le nombre n de circuits R//C à utiliser avec la règle générale élaborée dans le Chapitre 3 (cf. paragraphe 3.5.3) et d'identifier la tension de circuit ouvert OCV à différents SoCs. Chaque motif contient plusieurs paliers pour provoquer les régimes forcés à différents courants. Ensemble avec les régimes forcés des motifs et les relaxations associées, les résistances R_s , R_i , et les constantes de temps τ_i peuvent être identifiées à différents courants et SoCs. Pour que la procédure de caractérisation puisse être appliquée facilement à différentes cellules, une méthode de configuration des motifs a été élaborée afin de personnaliser les amplitudes et les durées des motifs en fonction de la cellule testée. La méthode de configuration des motifs et le détail d'identification des paramètres avec les motifs en escaliers seront présentés dans le paragraphe 4.3.
- **Etape 3** : des séquences d'impulsions de courant en décharge et en charge, définissant des « peignes », sont appliquées à différents SoCs afin de compléter la cartographie de R_s pour des forts courants ou d'obtenir une résolution plus fine de R_s en fonction de courants. La valeur de R_s à un SoC donné et à un courant donné est le rapport entre le saut de tension provoqué par le courant et l'amplitude du courant (cf. équation (23) du Chapitre 2).

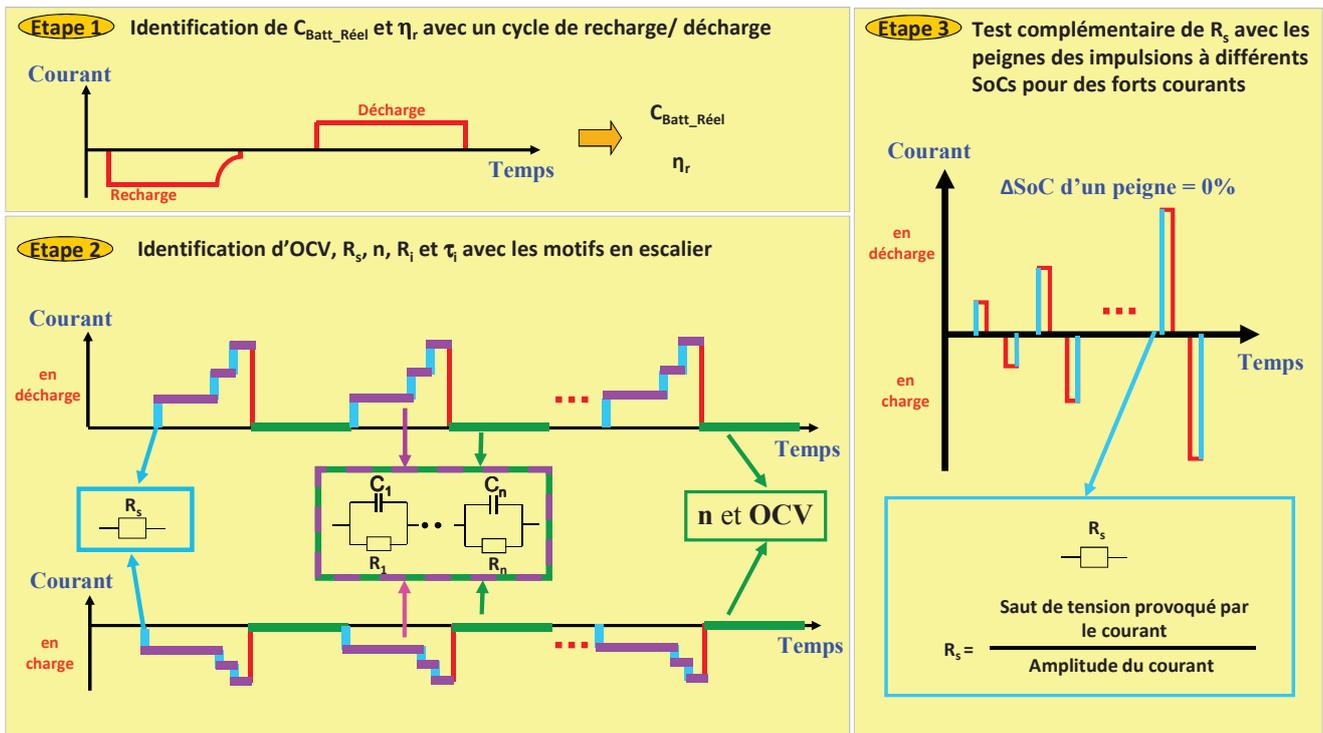


Figure 121 : Démarche d'identification des paramètres du modèle de la cellule

Par rapport aux travaux similaires dans la littérature, l'originalité de la méthode proposée est qu'elle permet de :

- déterminer le nombre optimal de circuits R//C à utiliser en fonction de la durée et de la période d'échantillonnage de la relaxation,
- prendre en compte non seulement le régime forcé mais aussi la relaxation dans le modèle,
- s'appliquer facilement à différentes cellules.

La méthode développée à partir d'une cellule est ensuite étendue à différentes cellules au paragraphe 4.5.

4.3. Identification des paramètres avec les motifs en escalier

4.3.1. Justification de l'utilisation du motif en escalier

Par rapport aux créneaux simples et créneaux composés utilisés pour caractériser le comportement dynamique de la cellule dans la littérature (cf. paragraphe 2.3.4 du Chapitre 2), l'utilisation du motif en escalier est intéressante parce qu'elle présente les deux avantages suivants :

- **Premièrement**, elle permet de réduire la durée de relaxation donc la durée d'essai par rapport à la caractérisation avec les créneaux simples. La Figure 122 présente un exemple qui montre que l'utilisation d'un motif en escalier réduit le nombre de relaxations de 3 à 1 par rapport à l'utilisation des créneaux simples. La réduction du nombre de relaxations est basée sur l'hypothèse que les constantes de temps, qui décrivent la tension de la cellule pendant la phase de relaxation, sont indépendantes de la sollicitation précédente en régime forcé. Cette hypothèse a été vérifiée dans le paragraphe 3.6 du Chapitre 3.
- **Deuxièmement**, elle permet d'identifier les paramètres (R_s , R_i , et τ_i) à plusieurs niveaux de courant par rapport à la caractérisation avec les créneaux composés (cf. Figure 59 du Chapitre 2).

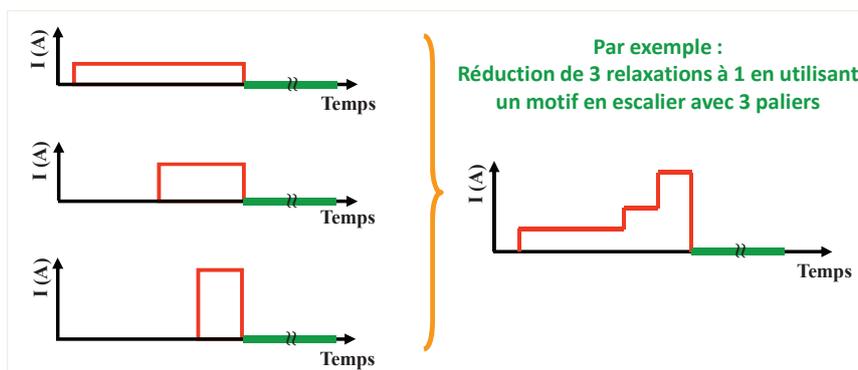


Figure 122 : Exemple de réduction du nombre de relaxation avec l'utilisation d'un motif en escalier

Pour que les motifs en escalier puissent être appliqués à différentes cellules, les amplitudes et les durées des paliers du motif en escalier doivent être personnalisées en fonction des caractéristiques (par exemple, capacité, courant maximal) de la cellule testée. Une méthode de construction des motifs en escalier en fonction des caractéristiques de la cellule testée a été élaborée et est expliquée dans le paragraphe 4.3.2.

4.3.2. Construction du motif en escalier en fonction des caractéristiques de la cellule testée

On préconise d'utiliser les motifs, dont chacun fait varier 10% de SoC et contient 3 paliers, pour caractériser le comportement dynamique de la cellule. Ce choix se justifie de la manière suivante :

- **Premièrement**, la définition de 10% de SoC pour un motif est un compromis entre la résolution des paramètres en fonction du SoC et la précision d'identification des τ_i . Par exemple, pour un motif qui enlève 10% de SoC, 10 motifs peuvent être appliqués pour identifier les paramètres à chaque 10% de SoC de 100% à 0% de SoC. Or, si un motif enlève moins de SoC (par exemple, 5% de SoC), les paramètres seront renseignés pour plus de valeurs de SoC, mais la durée de chaque palier deviendra plus courte, ce qui réduira la précision d'identification des constantes de temps τ_i .
- **Deuxièmement**, l'utilisation de 3 paliers est un compromis entre la précision d'identification des R_i et la précision d'identification des τ_i des circuits R//C du modèle. Pour un motif qui fait varier un SoC donné (par exemple, 10% de SoC), quand il y a plus de paliers dans le motif, il y a plus de points caractéristiques de R_i , ce qui permet d'obtenir plus d'informations sur R_i en fonction du courant. Or, quand le nombre de paliers augmente, la durée de chaque palier devient plus courte, ce qui réduit la précision d'identification des constantes de temps τ_i .

Les durées des 3 paliers du motif ne sont pas identiques. Cela est lié à la stratégie d'identification des constantes de temps qui est illustrée sur la Figure 123 et est expliquée ci-dessous :

- **En relaxation** suite au motif en escalier, toutes les constantes de temps peuvent être identifiées selon la méthode du Chapitre 3. Les grandeurs représentatives des constantes de temps sont celles indiquées dans le Tableau 25 du Chapitre 3. Etant donné que la période d'échantillonnage des bancs de test pour la simulation avec des profils d'utilisation réels appliqués aux automobiles est de l'ordre de 0.1 s, les constantes de temps considérées dans le cadre de la thèse sont supérieures à cette valeur. De plus, le comportement dynamique de la cellule, lié principalement à l'effet de transfert de matière, couvre une plage de temps pouvant aller jusqu'à quelques dizaines d'heures. Ainsi, seulement 5 constantes de temps (τ_1 à τ_5 du Tableau 25 du Chapitre 3) de l'ordre de la seconde ($\times 1$ s) à l'ordre de dix mille secondes ($\times 10^4$ s) sont considérées et présentées sur la Figure 123.
- **En régime forcé**, à cause de la présence de la sollicitation qui fait varier le SoC de la cellule, il est difficile d'identifier précisément les grandes constantes de temps égales ou supérieures au millier de secondes ($\times 10^3$ s). Ainsi, les valeurs des grandes constantes de temps en régime forcé sont fixées égales à leurs valeurs en relaxation. Donc en régime forcé, seules les constantes de temps égales ou inférieures à quelques centaines de secondes ($\times 10^2$ s) peuvent être identifiées. De plus, les constantes de temps à identifier pour chacun des paliers sont différentes en fonction de leur durée :
 - **Pour le 1^{er} palier** dont le courant est le plus faible, sa durée est rallongée par rapport aux deux autres paliers afin de pouvoir identifier toutes les constantes de temps (τ_1 , τ_2 et τ_3) qui sont égales ou inférieures à l'ordre de cent secondes.

- Pour les 2^{ème} et 3^{ème} paliers dont les durées sont plus courtes et les courants sont plus forts, ils sont seulement utilisés pour identifier la constante de temps rapide de l'ordre de la seconde (τ_1). Les valeurs des autres constantes de temps (τ_2 et τ_3) sont fixées à celles identifiées sur le 1^{er} palier.

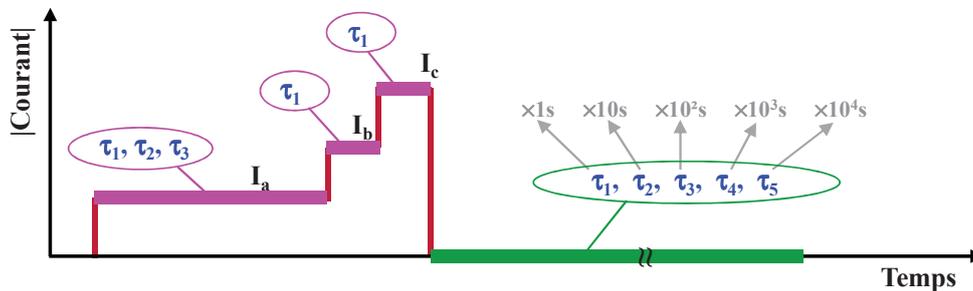


Figure 123 : Illustration de la stratégie d'identification des constantes de temps avec le motif en escalier

Le Tableau 31 résume l'identification des constantes de temps selon la stratégie de la Figure 123. Les valeurs des constantes de temps identifiées en relaxations sont notées τ_{i_Relax} . Les valeurs des constantes de temps identifiées en régime forcé à différents courants sont notées respectivement τ_{i_RFa} , τ_{i_RFb} et τ_{i_RFc} . On remarque que le nombre de constantes de temps à identifier dépend de la durée de la relaxation et la période d'échantillonnage (cf. Tableau 26 du Chapitre 3). Par exemple, pour une heure de relaxation avec une période d'échantillonnage à 0.1 s, on n'identifie que les 4 premières constantes de temps (τ_1 à τ_4).

Phase	Courant	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5
Relaxation	0	τ_{1_Relax}	τ_{2_Relax}	τ_{3_Relax}	τ_{4_Relax}	τ_{5_Relax}
Régime forcé	I_a	τ_{1_RFa}	τ_{2_RFa}	τ_{3_RFa}	τ_{4_Relax}	τ_{5_Relax}
	I_b	τ_{1_RFb}	τ_{2_RFa}	τ_{3_RFa}	τ_{4_Relax}	τ_{5_Relax}
	I_c	τ_{1_RFc}	τ_{2_RFa}	τ_{3_RFa}	τ_{4_Relax}	τ_{5_Relax}

Tableau 31 : Résumé d'identifications des constantes de temps selon la stratégie de la Figure 123

Suivant la stratégie d'identification des constantes de temps, une méthode de construction du motif est élaborée en distinguant trois cas en fonction de l'amplitude du courant maximale (I_{max}) de la cellule testée :

- **Cas 1 : Quand $2C \leq I_{max} \leq 8C$.**

Dans ce cas, l'amplitude de courant pour chaque palier est déterminée par le tableau sur la partie gauche de la Figure 124. Chaque ligne du tableau correspond à une combinaison possible des amplitudes des paliers. Le courant du 1^{er} palier I_a est le plus faible parmi les 3 paliers et sa valeur est choisie à 1C. Le courant du 3^{ème} palier (I_c) est le plus élevé et sa valeur est déterminée en fonction du courant maximal de la cellule :

$$I_c = \text{Troncature de}(I_{max}), \quad \text{pour } I_{max} \leq 8C \quad (61)$$

avec :

Troncature de (X0) : fonction qui renvoie la troncature de X0.

La valeur du courant du 2^{ème} palier I_b est choisie à une valeur intermédiaire entre I_a et I_c donnée par l'équation (62) :

$$I_b = \text{Troncature de} \left(\frac{I_a + I_c}{2} \right) \quad (62)$$

Par exemple, si $I_{\max} = 5.5C$, la valeur de I_c est égale à $5C$ selon l'équation (61) et la valeur de I_b est égale à $3C$ selon l'équation (62). La 4^{ème} combinaison est donc choisie pour ce motif en escalier. Il est à noter que cette règle générale ne s'applique pas si les valeurs de courants sont trop faibles et inférieures à $3C$. Dans ce cas, on choisit respectivement pour les valeurs de I_a , I_b et I_c , $1C$, $1.5C$ et $2C$ comme indiqué pour la 7^{ème} combinaison de la Figure 124.

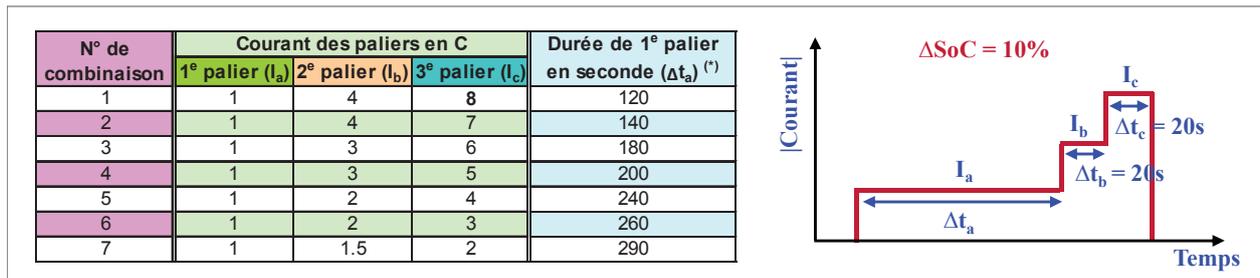


Figure 124 : Tableau de spécification des amplitudes du motif en escalier quand le courant maximal de la cellule $I_{\max} \leq 8C$

(* : Les durées du 1^{er} palier sont données à titre d'exemple pour le cas où la capacité réelle de la cellule est égale à sa capacité nominale)

Sur la Figure 124, la définition des durées des 2^{ème} et 3^{ème} paliers à 20 s (partie droite de la figure) et la limitation du courant de I_c à $8C$ (partie gauche de la figure) permettent de bien identifier les constantes de temps concernées :

- Les durées des 2^{ème} et 3^{ème} paliers sont fixées à 20 secondes pour n'observer que les τ_i rapides de l'ordre de quelques secondes.
- La durée du 1^{er} palier est adaptée en fonction des courants de deux autres paliers (I_b et I_c) pour qu'un motif enlève 10% de SoC. La durée du 1^{er} palier est calculée par :

$$\Delta t_a = 3600 \cdot \Delta \text{SoC}_{\text{Motif}} \cdot \frac{C_{\text{Batt_Réal}}}{C_{\text{Batt_Nom}}} - \Delta t_b \cdot \frac{I_b}{I_a} - \Delta t_c \cdot \frac{I_c}{I_a} \quad (63)$$

Avec :

$\Delta \text{SoC}_{\text{Motif}}$: variation du SoC provoquée par un motif qui est égale à 10%,

$C_{\text{Batt_Nom}}$: capacité nominale de la cellule,

Δt_b et Δt_c : Durées des 2^{ème} et 3^{ème} paliers qui sont égales à 20 s.

La durée du 1^{er} palier doit être suffisamment longue afin de permettre d'identifier les constantes de temps de l'ordre de 100 s. Le seuil minimal de la durée du 1^{er} palier est fixé à 85 s qui correspond à la durée de validité de la constante de temps de l'ordre de 10 s (cf. τ_2 du Tableau 25 du Chapitre 3). Cette contrainte de 85 s amène à limiter le courant du 3^{ème} palier à $8C$ (pour un $\Delta \text{SoC}_{\text{Motif}} = 10\%$ et $\Delta t_b = \Delta t_c = 20$ s). Des exemples des durées du 1^{er} palier sont donnés sur la Figure 124 pour le cas où la capacité réelle de la cellule est égale à sa capacité nominale.

- **Cas 2 : Quand $I_{max} > 8C$.**

Dans ce cas, le motif avec les paliers 1C-4C-8C du tableau de la Figure 124 est utilisé. Les peignes des impulsions de courant comme l'étape 3 sur la Figure 121 sont ensuite utilisées à différents SoCs afin de compléter la cartographie de R_s pour des courants supérieurs à 8C.

- **Cas 3 : Quand $I_{max} < 2C$.**

Dans ce cas, un motif en créneau à courant I_{max} est utilisé.

En résumé, la méthode de construction du motif de caractérisation, a comme données d'entrée la capacité nominale, la capacité réelle et le courant maximal en décharge ou en charge, et permet de déterminer le type de motif à utiliser ainsi que la durée et l'amplitude du courant de chaque palier du motif pour une cellule quelconque. La Figure 125 représente symboliquement cette méthode.

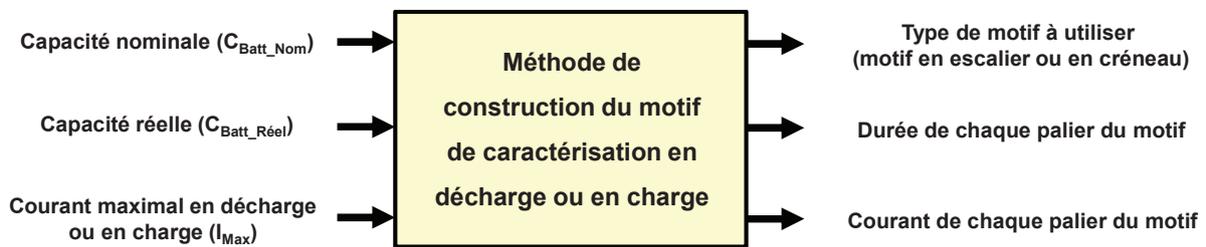


Figure 125 : Résumé de la méthode de construction du motif de caractérisation en décharge ou en charge

4.3.3. Documentation des paramètres à identifier avec un motif en escalier

Ce paragraphe présente les équations essentielles pour décrire la réponse temporelle d'une cellule à un motif en escalier ainsi que les paramètres inconnus à identifier en vue du modèle de Thévenin sur la Figure 120. La Figure 126 illustre la réponse d'une cellule à un motif en escalier. On distingue la réponse de tension en 4 phases :

- Régime forcé « a » (RF_a) : phase correspondant à la sollicitation du courant I_a ,
- Régime forcé « b » (RF_b) : phase correspondant à la sollicitation du courant I_b ,
- Régime forcé « c » (RF_c) : phase correspondant à la sollicitation du courant I_c ,
- Relaxation : phase de repos après la sollicitation du motif.

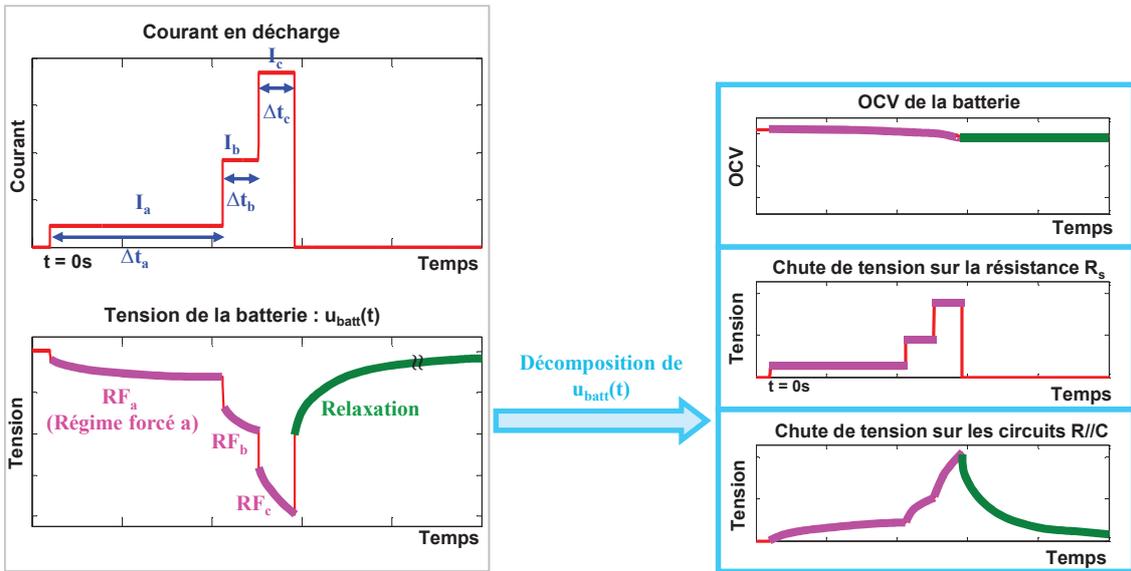


Figure 126 : Illustration de la réponse d'une cellule à un motif en escalier

Les équations essentielles pour décrire la réponse temporelle d'une cellule à un motif en escalier sont présentées ci-dessous pour chacune des 4 phases en régime forcé et en relaxation :

- **A la fin du régime forcé « a »**, la tension de la cellule est exprimée par l'équation (64) :

$$U_{\text{batt_RFa}} = \text{OCV}(\text{SoC}_{\text{RFa}}) - U_{s_RFa} - \sum_{i=1}^n U_{i_RFa} \quad (64)$$

où :

$$U_{s_RFa} = I_a \cdot R_{s_RFa} \quad (65)$$

$$U_{i_RFa} = I_a \cdot R_{i_RFa} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_a}{\tau_{i_RFa}}} \right) \quad (66)$$

avec :

- SoC_{RFa} : SoC à la fin du RF_a ,
- $\text{OCV}(\text{SoC}_{\text{RFa}})$: OCV à la fin du RF_a ,
- U_{s_RFa} : Chute de tension sur R_s à la fin du RF_a ,
- U_{i_RFa} : Chute de tension sur le $i^{\text{ème}}$ circuit R/C à la fin du RF_a ,
- R_{s_RFa} : R_s pour le courant I_a ,
- R_{i_RFa} : R_i pour le courant I_a ,
- τ_{i_RFa} : τ_i pour le courant I_a .

- **A la fin du régime forcé « b »**, la tension de la cellule est exprimée par :

$$U_{\text{batt_RFb}} = \text{OCV}(\text{SoC}_{\text{RFb}}) - U_{s_RFb} - \sum_{i=1}^n U_{i_RFb} \quad (67)$$

où :

$$U_{s_RFb} = I_b \cdot R_{s_RFb} \quad (68)$$

$$U_{i_RFb} = U_{i_RFa} \cdot e^{-\frac{\Delta t_b}{\tau_{i_RFb}}} + I_b \cdot R_{i_RFb} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_b}{\tau_{i_RFb}}} \right) \quad (69)$$

avec :

- SoC_{RFb} : SoC à la fin du RF_b,
- OCV(SoC_{RFb}) : OCV à la fin du RF_b,
- U_{s_RFb} : Chute de tension sur R_s à la fin du RF_b,
- U_{i_RFb} : Chute de tension sur le i^{ème} circuit R//C à la fin du RF_b,
- R_{s_RFb} : R_s pour le courant I_b,
- R_{i_RFb} : R_i pour le courant I_b,
- τ_{i_RFb} : τ_i pour le courant I_b.

- **A la fin du régime forcé « c »**, la tension de la cellule est exprimée par :

$$U_{batt_RFc} = OCV(SoC_{RFc}) - U_{s_RFc} - \sum_{i=1}^n U_{i_RFc} \quad (70)$$

Où :

$$U_{s_RFc} = I_c \cdot R_{s_RFc} \quad (71)$$

$$U_{i_RFc} = U_{i_RFb} \cdot e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{i_RFc}}} + I_c \cdot R_{i_RFc} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{i_RFc}}} \right) \quad (72)$$

Avec :

- SoC_{RFc} : SoC à la fin du RF_c,
- OCV(SoC_{RFc}) : OCV à la fin du RF_c,
- U_{s_RFc} : Chute de tension sur R_s à la fin du RF_c,
- U_{i_RFc} : Chute de tension sur le i^{ème} circuit R//C à la fin du RF_c,
- R_{s_RFc} : R_s pour le courant I_c,
- R_{i_RFc} : R_i pour le courant I_c,
- τ_{i_RFc} : τ_i pour le courant I_c.

- **Pendant la relaxation**, la tension de la cellule est donnée par l'équation (73) :

$$u_{batt}(t) = OCV(SoC_{Relax}) - \sum_{i=1}^n U_{i_Relax} \cdot e^{-\frac{t_{Relax}}{\tau_{i_Relax}}} \quad (73)$$

avec :

- SoC_{Relax} : SoC pendant la relaxation,
- OCV(SoC_{Relax}) : OCV pendant la relaxation,
- U_{i_Relax} : Chute de tension sur i^{ème} circuit R//C au début de la relaxation,
- τ_{i_Relax} : τ_i pour le courant nul (0A),
- t_{Relax} : Temps avec t_{Relax} = 0 s au début de la relaxation.

En faisant le lien avec le régime forcé « c » (RF_c), on peut trouver que :

- l'OCV pendant la relaxation est égale à l'OCV à la fin du régime forcé c :
OCV(SoC_{Relax}) = OCV(SoC_{RFc}) (74)
- la chute de tension sur le i^{ème} circuit R//C au début de la relaxation est égale à celle à la fin du RF_c :

$$U_{i_Relax} = U_{i_RFc} \quad (75)$$

En résumé, selon les équations (64) à (75) et pour un motif en escalier, les paramètres inconnus sont :

- Le nombre « n » de circuits R//C,
- L'évolution de l'OCV en fonction du SoC pendant le motif en escalier,
- Les valeurs des résistances et des constantes de temps à différents courants.

Le nombre « n » de circuits R//C peut être connu par la durée et la période d'échantillonnage de la relaxation (cf. Chapitre 3). L'évolution de l'OCV peut être calculée si les valeurs de l'OCV avant et après l'application du motif sont connues : la valeur de l'OCV avant l'application du motif est déterminée soit par une mesure de tension de la cellule, soit par l'identification de la relaxation provoquée par le motif précédent ; l'OCV après l'application du motif correspond à l'OCV pendant la relaxation $OCV(SoC_{Relax})$. Finalement, pour un motif en escalier, les paramètres inconnus à identifier sont ceux listés dans le Tableau 32. Dans ce tableau, aucune résistance n'est identifiée pendant la phase de relaxation où le courant est nul. Comme la chute de tension sur la résistance série est nulle pendant la relaxation, la détermination de R_s est inutile pour la représentation de la tension de la cellule. De même, la connaissance des résistances des circuits R//C n'est pas nécessaire non plus parce qu'elles n'interviennent pas pour représenter la tension de la cellule lors de la relaxation selon l'équation (73).

Phase	Courant	R_s	R_1	τ_1	...	R_n	τ_n	OCV
Relaxation	0	-	-	τ_{1_Relax}	...	-	τ_{n_Relax}	$OCV(SoC_{Relax})$
RF _a	I _a	R_{s_RFa}	R_{1_RFa}	τ_{1_RFa}	...	R_{n_RFa}	τ_{n_RFa}	-
RF _b	I _b	R_{s_RFb}	R_{1_RFb}	τ_{1_RFb}	...	R_{n_RFb}	τ_{n_RFb}	-
RF _c	I _c	R_{s_RFc}	R_{1_RFc}	τ_{1_RFc}	...	R_{n_RFc}	τ_{n_RFc}	-

Tableau 32 : Liste des paramètres à identifier avec un motif en escalier pour un modèle avec n R//C

4.3.4. Méthode d'identification des paramètres

Le détail d'identification des paramètres sera expliqué à l'aide d'un essai de décharge avec un motif en escalier effectué sur une cellule d'A123. Les caractéristiques de la cellule permettant de configurer le motif en escalier en décharge sont présentées dans le Tableau 33.

	Nom de la cellule	Capacité nominale (C_{Batt_Nom})	Capacité réelle testée à 1C ($C_{Batt_Réal}$)	Courant de décharge maximal en continu (I_{Max})
	A123 26650	2.30 Ah	2.15 Ah	70 A (30.4C)

Tableau 33 : Caractéristiques de la cellule d'A123 pour configurer le motif en escalier en décharge

A partir des caractéristiques de la cellule d'A123 et selon le paragraphe 4.3.2, peut être déterminé le motif en escalier à utiliser en décharge (cf. Figure 127).

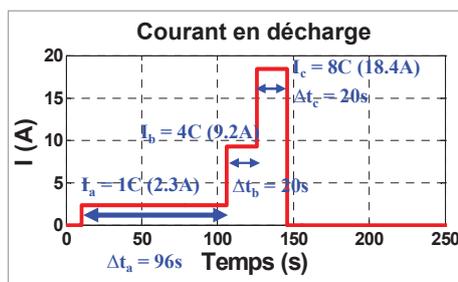


Figure 127 : Motif en escalier en décharge pour la cellule d'A123

L'essai avec le motif en escalier est celui déjà présenté sur la Figure 86 du Chapitre 3. Comme suite à la sollicitation du motif en escalier se trouve une relaxation de durée de 24 h avec une période d'échantillonnage minimale de 0.1 s, 5 circuits R//C sont à utiliser pour le modèle de la cellule selon la règle générale de détermination du nombre de circuits R//C (cf. paragraphe 3.5.3 du Chapitre 3). Elaborée suivant la stratégie d'identification des constantes de temps de la Figure 123, la démarche d'identification des paramètres, illustrée sur la Figure 128, est constituée de 6 étapes. Les 6 étapes seront expliquées en détail par la suite.

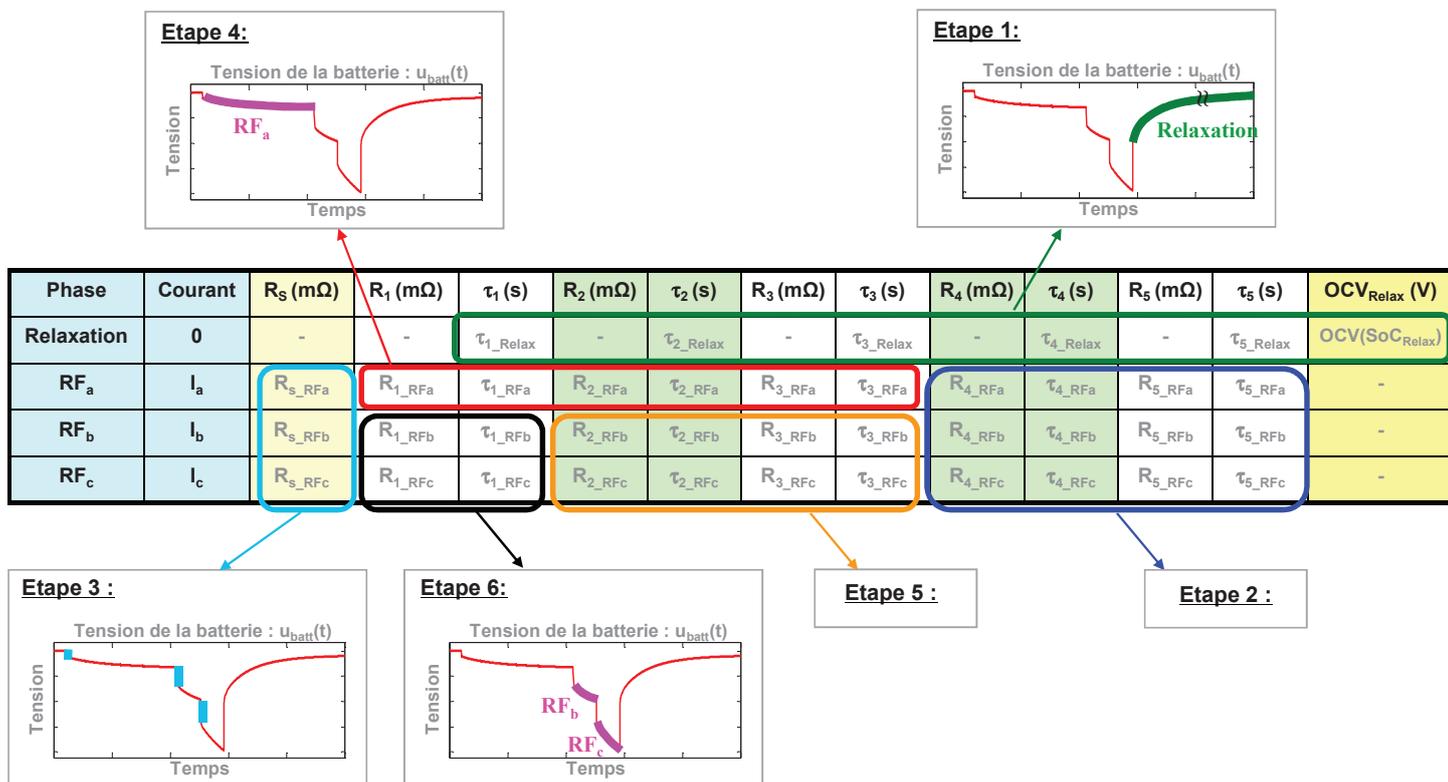


Figure 128 : Démarche d'identification des paramètres avec un motif en escalier

(I) Etape 1 : Détermination de l'OCV et les τ_i des circuits R//C en relaxation

Avec la mesure de la tension en relaxation de 24 h, on peut identifier les chutes de tension U_{i_Relax} et les constantes de temps τ_{i_Relax} pour les 5 circuits R//C ainsi que l'OCV en relaxation selon la méthode d'identification présentée dans le Chapitre 3. Les résultats d'identification sont déjà présentés sur la Figure 88 du Chapitre 3. Cela permet de remplir le tableau des paramètres (cf.

Figure 128) comme indiqué dans le Tableau 34. Les chutes de tension U_{i_Relax} , qui ne sont pas présentées dans le tableau, seront utilisées dans les étapes suivantes pour identifier les autres paramètres du modèle.

Phase	Courant	R_s (m Ω)	R_1 (m Ω)	τ_1 (s)	R_2 (m Ω)	τ_2 (s)	R_3 (m Ω)	τ_3 (s)	R_4 (m Ω)	τ_4 (s)	R_5 (m Ω)	τ_5 (s)	OCV _{Relax} (V)
Relaxation	0	-	-	1.0	-	19	-	120	-	3100	-	33000	3.3002
RF _a	I_a												-
RF _b	I_b												-
RF _c	I_c												-

Tableau 34 : Tableau des paramètres à l'issue de l'étape 1

Avec l'OCV en relaxation du Tableau 34 et l'OCV avant l'application du motif connue par une mesure de tension de la cellule (point A de la Figure 86 du Chapitre 3), l'évolution de l'OCV pendant la sollicitation du motif en escalier peut être calculée comme illustré sur la Figure 129.

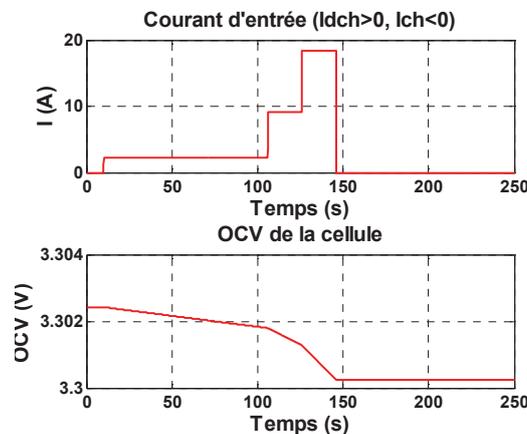


Figure 129 : Evolution de l'OCV pendant le motif en escalier

(II) Etape 2 : Calcul des R_i et τ_i des 4^{ème} et 5^{ème} circuits R//C en régime forcé

A partir des U_{i_Relax} et τ_{i_Relax} obtenues dans l'étape 1, l'étape 2 permet de calculer les valeurs des paramètres des 4^{ème} et 5^{ème} circuits R//C en régime forcé. Le détail du calcul, illustré par les 3 passages (a, b et c) dans le Tableau 35, est expliqué ci-dessous :

- (a). Selon la stratégie d'identification des constantes de temps (cf. paragraphe 4.3.2), comme la constante de temps τ_4 a une valeur en relaxation (3100 s) supérieure à l'ordre du millier de secondes, ses valeurs en régime forcé à différents courants sont prises égales à sa valeur en relaxation (cf. passage (a) dans le Tableau 35) :

$$\tau_{4_RFa} = \tau_{4_RFb} = \tau_{4_RFc} = \tau_{4_Relax} \quad (76)$$

En effet, par rapport à la valeur de constante de temps τ_4 , la durée du régime forcé ($\Delta t_a + \Delta t_b + \Delta t_c = 136$ s, cf. Figure 127) est trop petite pour identifier précisément R_4 et τ_4 en régime forcé à différents courants. On considère donc aussi la résistance R_4 indépendante du courant :

$$R_4 = R_{4_RFa} = R_{4_RFb} = R_{4_RFc} \quad (77)$$

(b). La valeur de la résistance R_4 est calculée à l'aide de la chute de tension U_{4_Relax} obtenue dans l'étape 1 et des équations (66), (69) et (72). Selon les équations (66), (69) et (72), on peut déduire :

$$U_{4_RFa} = I_a \cdot R_4 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_a}{\tau_{4_Relax}}} \right) \quad (78)$$

$$U_{4_RFb} = U_{4_RFa} \cdot e^{-\frac{\Delta t_b}{\tau_{4_Relax}}} + I_b \cdot R_4 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_b}{\tau_{4_Relax}}} \right) \quad (79)$$

$$U_{4_RFc} = U_{4_RFb} \cdot e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{4_Relax}}} + I_c \cdot R_4 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{4_Relax}}} \right) \quad (80)$$

Comme U_{4_RFc} est égale à U_{4_Relax} selon l'équation (75), on peut déduire à partir de l'équation (80) :

$$U_{4_Relax} = U_{4_RFb} \cdot e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{4_Relax}}} + I_c \cdot R_4 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{4_Relax}}} \right) \quad (81)$$

En remplaçant U_{4_RFb} de l'équation (81) par l'équation (79) et ensuite U_{4_RFa} de l'équation (79) par l'équation (78), on peut obtenir :

$$U_{4_Relax} = \left[I_a \cdot R_4 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_a}{\tau_{4_Relax}}} \right) \cdot e^{-\frac{\Delta t_b}{\tau_{4_Relax}}} + I_b \cdot R_4 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_b}{\tau_{4_Relax}}} \right) \right] \cdot e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{4_Relax}}} + I_c \cdot R_4 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{4_Relax}}} \right) \quad (82)$$

Finalement, comme R_4 est le seul paramètre inconnu dans l'équation (82), elle peut être calculée par :

$$R_4 = \frac{U_{4_Relax}}{\left[I_a \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_a}{\tau_{4_Relax}}} \right) \cdot e^{-\frac{\Delta t_b}{\tau_{4_Relax}}} + I_b \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_b}{\tau_{4_Relax}}} \right) \right] \cdot e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{4_Relax}}} + I_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{4_Relax}}} \right)} \quad (83)$$

- (c). En faisant la même démarche qu'en (a) et (b) pour le 5^{ème} circuit R//C, les valeurs de R_5 et τ_5 peuvent être obtenues (cf. passage (c) dans le Tableau 35).
- (d). Les mêmes calculs sont aussi effectués pour R_1 , R_2 et R_3 . Leurs valeurs seront utilisées comme valeurs initiales dans l'étape 4.

Phase	Courant	R_5 (mΩ)	R_1 (mΩ)	τ_1 (s)	R_2 (mΩ)	τ_2 (s)	R_3 (mΩ)	τ_3 (s)	R_4 (mΩ)	τ_4 (s)	R_5 (mΩ)	τ_5 (s)	OCV _{Relax} (V)
Relaxation	0	-	-	1.0	-	19	-	120	-	3100	-	33000	3.3002
RF _a	I_a								20.2	3100	49.6	33000	(c) -
RF _b	I_b								20.2	3100	49.6	33000	-
RF _c	I_c								20.2	3100	49.6	33000	-

Tableau 35 : Tableau des paramètres à l'issue de l'étape 2

Avec les valeurs des paramètres des 4^{ème} et 5^{ème} circuits R//C du Tableau 35, l'évolution des chutes de tension sur les 4^{ème} et 5^{ème} circuits R//C ($u_4(t)$ et $u_5(t)$) pendant la sollicitation du motif en escalier peut être calculée comme sur la Figure 130.

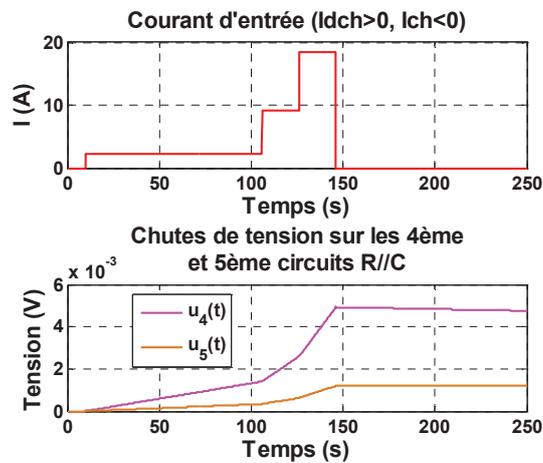


Figure 130 : Evolution des chutes de tension sur les 4^{ème} et 5^{ème} circuits R//C pendant le motif en escalier

(III) Etape 3 : Identification de R_s par les sauts de tension en régime forcé

Les résistances série R_s à différents courants sont identifiées en utilisant les sauts de tension ΔU_{STa} , ΔU_{STb} et ΔU_{STc} présentés sur la Figure 131.

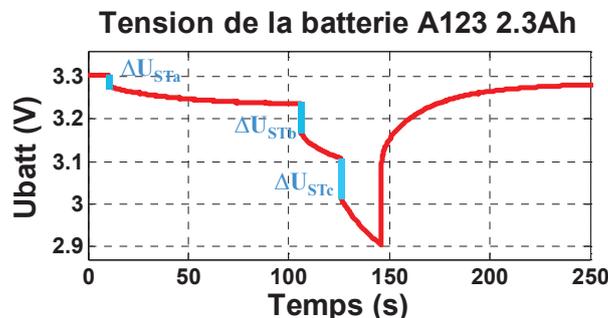


Figure 131 : Sauts de tension provoqués par le motif en escalier

On propose de calculer la résistance série R_s correspondant à chacun des 3 courants (I_a , I_b et I_c) par les équations (84), (85) et (86) :

$$R_{s_RFa} = \frac{\Delta U_{STa}}{I_a} \quad (84)$$

$$R_{s_RFb} = \frac{\Delta U_{STa} + \Delta U_{STb}}{I_b} \quad (85)$$

$$R_{s_RFc} = \frac{\Delta U_{STa} + \Delta U_{STb} + \Delta U_{STc}}{I_c} \quad (86)$$

avec :

R_{s_RFx} : R_s pour le courant $I = I_x$ ($x = a, b$ ou c).

Remarque sur le calcul des résistances :

Les calculs de R_{s_RFb} et R_{s_RFc} dans les équations (85) et (86) ne correspondent pas à la formule usuellement donnée dans la littérature (cf. équation (23) du Chapitre 2) qui calcule la résistance série en divisant le saut de tension par la variation de courant. Par exemple, selon la formule dans la littérature, le calcul de R_{s_RFb} est :

$$R_{s_RFb} = \frac{\Delta U_{STb}}{I_b - I_a} \tag{87}$$

En effet, la résistance série de la cellule varie en fonction du courant pour une caractérisation temporelle selon la littérature (cf. paragraphe 2.3.4 du Chapitre 2). Quand il existe une relation non-linéaire de la résistance série en fonction du courant, l'équation (87) ne donne pas de bonne estimation sur R_{s_RFb} dans le cas où la sollicitation est un motif en escalier. Pour démontrer l'influence de la non-linéarité de la résistance série, la valeur de R_{s_RFb} est exprimée par rapport à R_{s_RFa} par l'équation (88) et illustrée sur la Figure 132 (a).

$$R_{s_RFb} = R_{s_RFa} + \frac{dR_s}{dI_s} \cdot \Delta I_s \tag{88}$$

Quand une sollicitation en escalier comme sur la Figure 132 (b) est appliquée à la résistance série, on peut écrire les équations par la loi d'Ohm :

$$U_{s_RFa} = I_a \cdot R_{s_RFa} \tag{89}$$

$$U_{s_RFb} = I_b \cdot R_{s_RFb} = I_b \cdot \left(R_{s_RFa} + \frac{dR_s}{dI_s} \cdot \Delta I_s \right) \tag{90}$$

$$\Delta U_{STb} = U_{s_RFb} - U_{s_RFa} \tag{91}$$

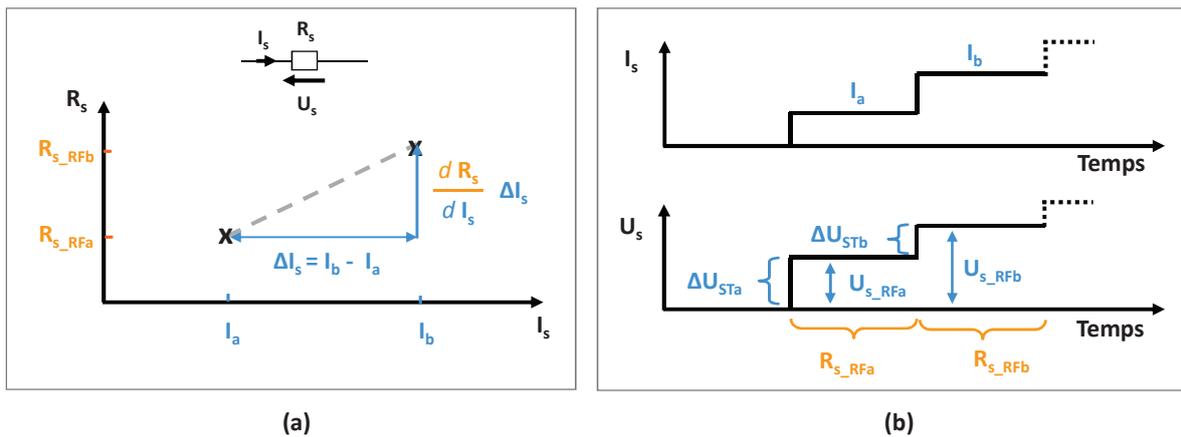


Figure 132 : (a) un exemple de la non-linéarité de résistance série (b) Réponse de la résistance série à une sollicitation en escalier

Si la résistance série R_s est calculée avec l'équation (87), une valeur erronée est obtenue comme ce qui est démontré par l'équation (92). Cette valeur erronée correspond à la marque « B » sur la Figure 133.

$$\frac{\Delta U_{STb}}{I_b - I_a} = \frac{U_{s_RFb} - U_{s_RFa}}{I_b - I_a} = \frac{I_b \cdot R_{s_RFb} - I_a \cdot R_{s_RFa}}{\Delta I_s} = \frac{I_b \cdot \left(R_{s_RFa} + \frac{dR_s}{dI_s} \cdot \Delta I_s \right) - I_a \cdot R_{s_RFa}}{\Delta I_s}$$

$$= \frac{(I_b - I_a) \cdot R_{s_RFa} + \frac{dR_s}{dI_s} \cdot \Delta I_s \cdot I_b}{\Delta I_s} = R_{s_RFa} + \frac{dR_s}{dI_s} \cdot I_b \neq R_{s_RFb} \quad (92)$$

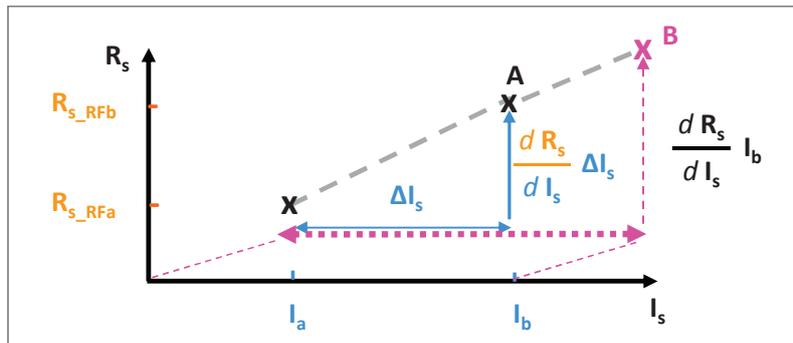


Figure 133 : Démonstration du résultat erroné du calcul de R_s par l'équation (87)

Ainsi, les équations (84), (85) et (86) sont utilisées pour calculer les valeurs de la résistance série R_s à différents courants et les résultats sont présentés dans le Tableau 36. Les valeurs identifiées de R_s à différents courants sont quasiment identiques. Cela signifie que, pour la cellule testée, l'influence du courant est faible sur la résistance série pour un niveau de courant jusqu'à 18.4 A (cf. $I_c = 18.4$ A sur la Figure 127).

Phase	Courant	R_s (mΩ)	R_1 (mΩ)	τ_1 (s)	R_2 (mΩ)	τ_2 (s)	R_3 (mΩ)	τ_3 (s)	R_4 (mΩ)	τ_4 (s)	R_5 (mΩ)	τ_5 (s)	OCV _{Relax} (V)
Relaxation	0	-	-	1.0	-	19	-	120	-	3100	-	33000	3.3002
RF _a	I_a	9.6							20.2	3100	49.6	33000	-
RF _b	I_b	9.7							20.2	3100	49.6	33000	-
RF _c	I_c	9.8							20.2	3100	49.6	33000	-

Tableau 36 : Tableau des paramètres à l'issue de l'étape 3

Avec les valeurs de la résistance série R_s du Tableau 36, l'évolution de la chute de tension sur la résistance série R_s pendant la sollicitation du motif en escalier peut être calculée comme sur la Figure 134.

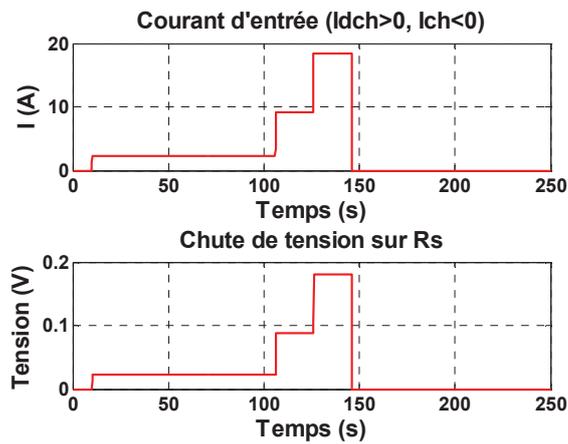


Figure 134 : Evolution de la chute de tension sur R_s pendant le motif en escalier

(IV) Etape 4 : Identification des R_i et τ_i des 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} circuits R//C en régime forcé
 « a »

Afin de faciliter l'identification des 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} circuits R//C durant les régimes forcés, les contributions de l'OCV (cf. Figure 129), de la résistance série R_s (cf. Figure 134) et des 4^{ème} et 5^{ème} circuits R//C (cf. Figure 130) vont être enlevées de la tension de la cellule comme illustré sur la Figure 135. Après l'enlèvement, il ne reste que les chutes de tensions sur les 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} circuits R//C (cf. partie droite de la Figure 135), dont la somme est nommée $u_{residu}(t)$.

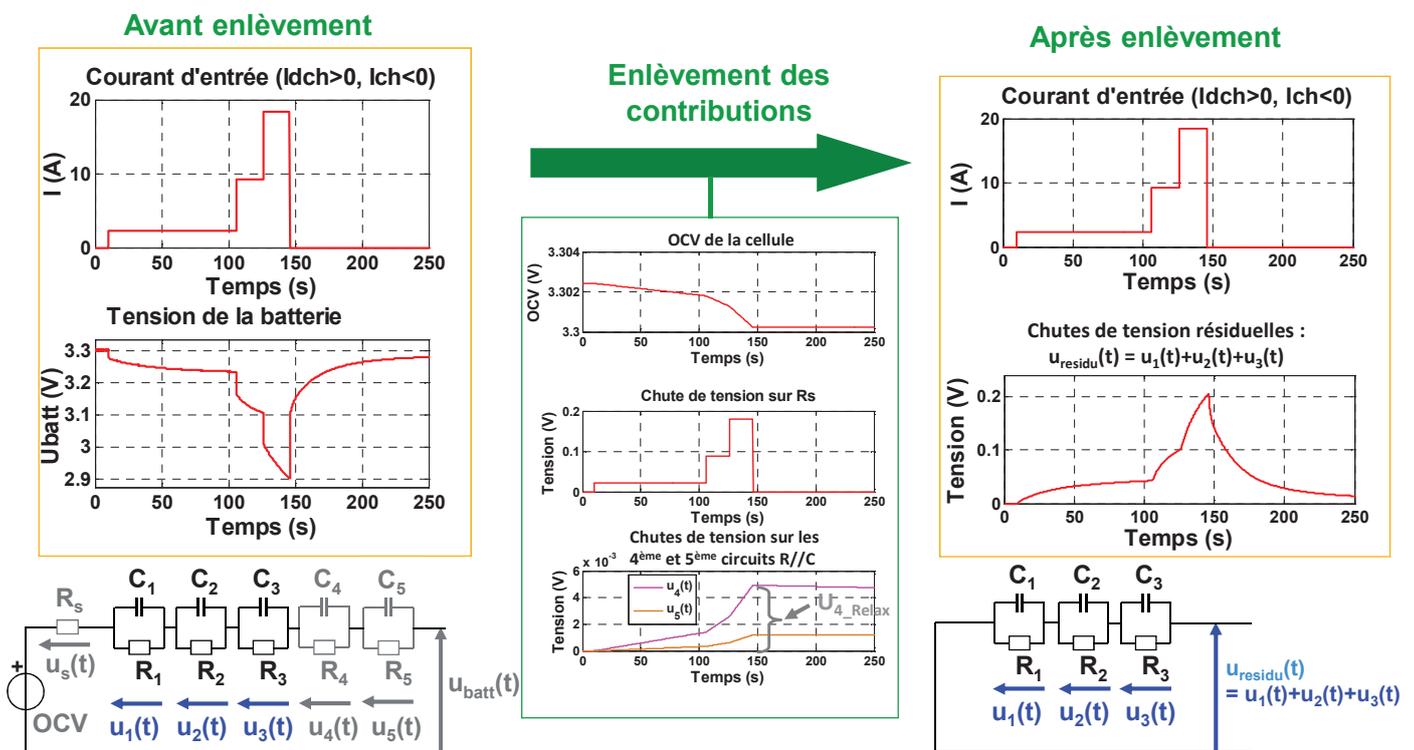


Figure 135 : Enlèvement des contributions de l'OCV, de la résistance série R_s et des 4^{ème} et 5^{ème} circuits R//C

Après une réinitialisation de la base du temps de $u_{\text{residu}}(t)$ comme illustré sur la Figure 136, la tension du régime forcé « a » (RF_a) de $u_{\text{residu}}(t)$ peut être exprimée par l'équation (93) :

$$u_{\text{Residu}}(t_{RFa}) = I_a \cdot R_{1_RFa} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{RFa}}{\tau_{1_RFa}}} \right) + I_a \cdot R_{2_RFa} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{RFa}}{\tau_{2_RFa}}} \right) + I_a \cdot R_{3_RFa} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{RFa}}{\tau_{3_RFa}}} \right) \quad (93)$$

avec :

t_{RFa} : Temps avec $t_{RFa} = 0$ s au début du régime forcé « a ».

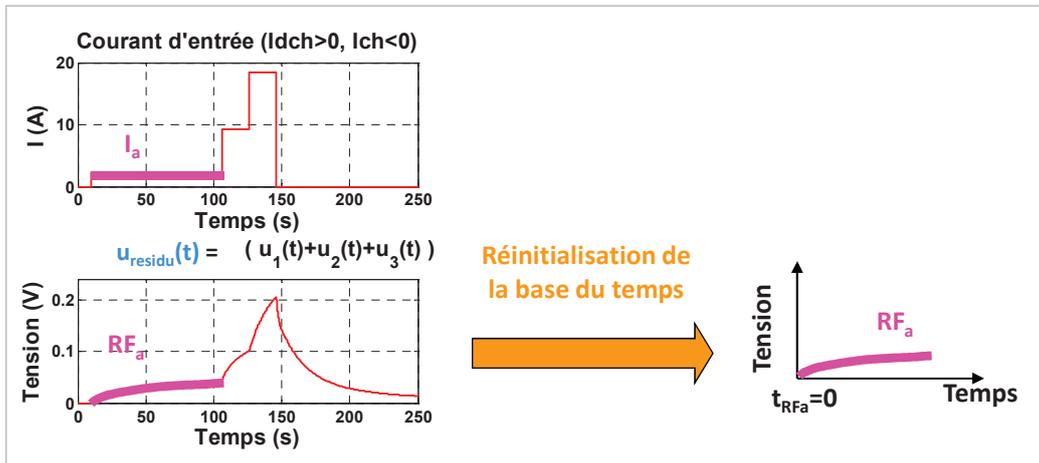


Figure 136 : Réinitialisation de la base du temps pour le régime forcé a (RF_a) de $u_{\text{residu}}(t)$

Avec la tension du régime forcé « a » (RF_a) de $u_{\text{residu}}(t)$ et l'équation (93), les valeurs de R_{i_RFa} et τ_{i_RFa} des 3 premiers circuits R/C peuvent être identifiées par l'optimisation numérique à l'aide de la fonction « lsqcurvefit » de Matlab qui est déjà présentée dans le paragraphe 3.3.4 du Chapitre 3. Pour améliorer la précision d'identification des constantes de temps, les τ_{1_Relax} , τ_{2_Relax} et τ_{3_Relax} obtenues par l'étape 1 en phase de relaxation sont utilisées comme conditions initiales dans la fonction « lsqcurvefit » afin de trouver les constantes de temps de même grandeur en régime forcé. Les conditions initiales pour les R_1 , R_2 et R_3 sont celles calculées dans l'étape 2 (d). Les résultats d'identification avec la tension du régime forcé a (RF_a) de $u_{\text{residu}}(t)$ sont donnés dans le Tableau 37. Les 3 constantes de temps identifiées en RF_a sont quasiment identiques à leur valeur en relaxation. Cependant, ce n'est pas toujours le cas pour les motifs en escalier aux autres SoCs comme on le verra dans le paragraphe 4.4.3.

Phase	Courant	R_s (mΩ)	R_1 (mΩ)	τ_1 (s)	R_2 (mΩ)	τ_2 (s)	R_3 (mΩ)	τ_3 (s)	R_4 (mΩ)	τ_4 (s)	R_5 (mΩ)	τ_5 (s)	OCV_{Relax} (V)
Relaxation	0	-	-	1.0	-	19	-	120	-	3100	-	33000	3.3002
RF_a	I_a	9.6	1.0	0.8	10.5	20	13	120	20.2	3100	49.6	33000	-
RF_b	I_b	9.7							20.2	3100	49.6	33000	-
RF_c	I_c	9.8							20.2	3100	49.6	33000	-

Tableau 37 : Tableau des paramètres à l'issue de l'étape 4

Avec ces paramètres identifiés, les chutes de tension à la fin des 3 premiers circuits R/C U_{1_RFa} , U_{2_RFa} et U_{3_RFa} peuvent être calculées selon l'équation (66). Elles seront utilisées dans les deux étapes suivantes.

(V) Etape 5 : Calcul des R_i et τ_i des 2^{ème} et 3^{ème} circuits R//C en régimes forcés « b » et « c »

A partir des U_{i_RFa} et τ_{i_RFa} des 3 premiers circuits R//C obtenues dans l'étape 4, l'étape 5 permet de calculer les valeurs des paramètres des 2^{ème} et 3^{ème} circuits R//C en régimes forcés « b » et « c » (RF_b et RF_c). Le détail des calculs, illustré par les 3 passages (a, b et c) dans le Tableau 38, est expliqué ci-dessous :

- (a). Selon la stratégie d'identification des constantes de temps (cf. Tableau 31), les valeurs de τ_3 en régimes forcés « a » et « b » (RF_a et RF_b) sont égales à sa valeur en régime forcé « a » (cf. passage (a) dans le Tableau 38) :

$$\tau_{3_RFb} = \tau_{3_RFc} = \tau_{3_RFa} \quad (94)$$

- (b). Afin que la chute de tension sur le 3^{ème} circuit R//C $u_3(t)$ puisse évoluer de U_{3_RFa} à U_{3_Relax} durant les régimes forcés « b » et « c » comme sur la Figure 137, la valeur de R_3 sera considérée identique en régimes forcés « b » et « c » :

$$R_{3_RFb} = R_{3_RFc} \quad (95)$$

Les équations (69) et (72) deviennent donc :

$$U_{3_RFb} = U_{3_RFa} \cdot e^{-\frac{\Delta t_b}{\tau_{3_RFa}}} + I_b \cdot R_{3_RFb} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_b}{\tau_{3_RFa}}}\right) \quad (96)$$

$$U_{3_RFc} = U_{3_RFb} \cdot e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{3_RFa}}} + I_c \cdot R_{3_RFb} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{3_RFa}}}\right) \quad (97)$$

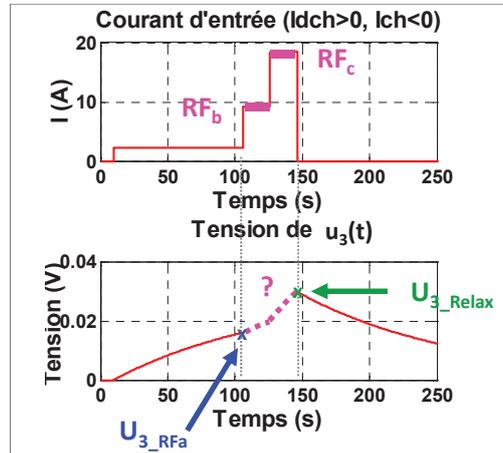


Figure 137 : Evolution de chute de tension sur le 3^{ème} circuit R//C $u_3(t)$ pendant les régimes forcés « b » et « c » (RF_b et RF_c)

Pour l'équation (97), comme U_{3_RFc} est égale à U_{3_Relax} (cf. équation (75)), en remplaçant U_{3_RFb} de l'équation (97) par l'équation (96), la chute de tension U_{3_Relax} peut s'exprimer par :

$$U_{3_Relax} = \left[U_{3_RFa} \cdot e^{-\frac{\Delta t_b}{\tau_{3_RFa}}} + I_b \cdot R_{3_RFb} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_b}{\tau_{3_RFa}}}\right) \right] \cdot e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{3_RFa}}} + I_c \cdot R_{3_RFb} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{3_RFa}}}\right) \quad (98)$$

Dans cette équation, comme U_{3_Relax} est connue à l'issue de l'étape 1, R_{3_RFb} est la seule valeur inconnue et peut donc être calculée par :

$$R_{3_RFb} = \frac{U_{3_Relax} - U_{3_RFa} \cdot e^{-\frac{\Delta t_b}{\tau_{3_RFa}}} \cdot e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{3_RFa}}}}{I_b \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_b}{\tau_{3_RFa}}}\right) \cdot e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{3_RFa}}} + I_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_c}{\tau_{3_RFa}}}\right)} \quad (99)$$

- (c). En faisant la même démarche de (a) et (b) pour le 2^{ème} circuit R//C, les valeurs de R_2 et τ_2 pour les régimes forcés « b » et « c » peuvent être obtenues (cf. passage (c) dans le Tableau 38).

Phase	Courant	R_s (mΩ)	R_1 (mΩ)	τ_1 (s)	R_2 (mΩ)	τ_2 (s)	R_3 (mΩ)	τ_3 (s)	R_4 (mΩ)	τ_4 (s)	R_5 (mΩ)	τ_5 (s)	OCV _{Relax} (V)
Relaxation	0	-	-	1.0	-	19	-	120	-	3100	-	33000	3.3002
RF _a	I _a	9.6	1.0	0.8	10.5	20	13	120	20.2	3100	49.6	33000	-
RF _b	I _b	9.7			9.5	20	4.9	120	20.2	3100	49.6	33000	-
RF _c	I _c	9.8			9.5	20	4.9	120	20.2	3100	49.6	33000	-

Tableau 38 : Tableau des paramètres à l'issue de l'étape 5

Avec les valeurs identifiées dans cette étape, les valeurs de U_{3_RFb} et U_{2_RFb} peuvent être calculées selon l'équation (69). Elles seront utilisées dans l'étape 6.

(VI) Etape 6 : Identification des R_1 et τ_1 du 1^{er} circuit R//C en régimes forcés « b » et « c »

Les identifications des valeurs de R_1 et τ_1 du 1^{er} circuit R//C aux courants I_a et I_b se font à l'aide de l'optimisation numérique en utilisant respectivement les tensions des régimes forcés « b » et « c » (RF_b et RF_c) de $u_{residu}(t)$:

- Après une réinitialisation de la base du temps comme illustré sur la Figure 138 et selon l'équation (69), la tension du régime forcé « b » (RF_b) de $u_{residu}(t)$ peut s'exprimer par :

$$u_{Residu}(t_{RFb}) = U_{1_RFa} \cdot e^{-\frac{t_{RFb}}{\tau_{1_RFb}}} + I_b \cdot R_{1_RFb} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{RFb}}{\tau_{1_RFb}}}\right) + U_{2_RFa} \cdot e^{-\frac{t_{RFb}}{\tau_{2_RFb}}} + I_b \cdot R_{2_RFb} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{RFb}}{\tau_{2_RFb}}}\right) + U_{3_RFa} \cdot e^{-\frac{t_{RFb}}{\tau_{3_RFb}}} + I_b \cdot R_{3_RFb} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{RFb}}{\tau_{3_RFb}}}\right) \quad (100)$$

avec :

t_{RFb} : Temps avec $t_{RFb} = 0$ s au début du régime forcé « b ».

Dans l'équation (100), les U_{1_RFa} , U_{2_RFa} et U_{3_RFa} ont été calculés dans l'étape 4. Les τ_{2_RFb} , R_{2_RFb} , τ_{3_RFb} et R_{3_RFb} sont connues grâce à l'étape 5. Ainsi, les τ_{1_RFb} et R_{1_RFb} , qui sont les seules valeurs inconnues, peuvent être identifiées à l'aide de la fonction « lsqcurvefit » en utilisant la tension du régime forcé « b » (RF_b) de $u_{residu}(t)$. Les valeurs de τ_1 et R_1 en régime forcé « a » (RF_a) du Tableau 38 sont utilisées comme conditions initiales dans la fonction

d'identification. Avec les τ_{1_RFb} et R_{1_RFb} identifiées, la valeur de U_{1_RFb} peut être calculée selon l'équation (69). Elle sera utilisée pour l'identification de R_1 et τ_1 en régime forcé « c » (RF_c).

- Pour la tension du régime forcé « c » (RF_c) de $u_{residu}(t)$, après une réinitialisation du temps comme la Figure 138 et selon l'équation (72), elle peut s'exprimer par :

$$u_{Residu}(t_{RFc}) = U_{1_RFb} \cdot e^{-\frac{t_{RFc}}{\tau_{1_RFc}}} + I_c \cdot R_{1_RFc} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{RFc}}{\tau_{1_RFc}}}\right) + U_{2_RFb} \cdot e^{-\frac{t_{RFc}}{\tau_{2_RFc}}} + I_c \cdot R_{2_RFc} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{RFc}}{\tau_{2_RFc}}}\right) + U_{3_RFb} \cdot e^{-\frac{t_{RFc}}{\tau_{3_RFc}}} + I_c \cdot R_{3_RFc} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{RFc}}{\tau_{3_RFc}}}\right) \quad (101)$$

avec :

t_{RFc} : Temps avec $t_{RFc} = 0$ s au début du régime forcé « c ».

Dans l'équation (101), les seules valeurs inconnues sont τ_{1_RFc} et R_{1_RFc} . Elles peuvent donc être identifiées à l'aide de la fonction « lsqcurvefit » en utilisant la tension du régime forcé « c » (RF_c) de $u_{residu}(t)$. Les valeurs de τ_1 et R_1 identifiées en régime forcé « b » (RF_b) sont utilisées comme conditions initiales dans la fonction d'identification.

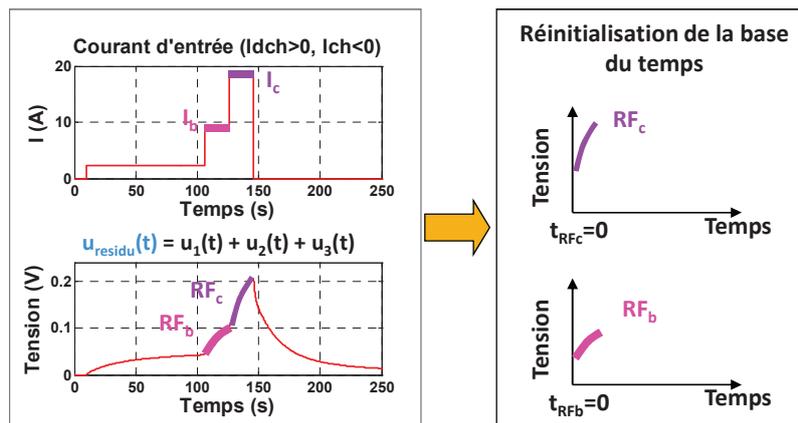


Figure 138 : Régimes forcés b et c (RF_b et RF_c) de $u_{residu}(t)$ avec réinitialisation de la base du temps

Les résultats d'identification du 1^{er} circuit R//C aux régimes forcés « b » et « c » à l'issue de cette étape sont présentés dans le Tableau 39. On remarque que les valeurs des R_i et τ_i en régime forcé varient en fonction du courant. Cela est lié à la non-linéarité de l'impédance de transfert de matière de la cellule qui a été mentionnée dans le Chapitre 2.

Phase	Courant	R_s (mΩ)	R_1 (mΩ)	τ_1 (s)	R_2 (mΩ)	τ_2 (s)	R_3 (mΩ)	τ_3 (s)	R_4 (mΩ)	τ_4 (s)	R_5 (mΩ)	τ_5 (s)	OCV _{Relax} (V)
Relaxation	0	-	-	1.0	-	19	-	120	-	3100	-	33000	3.3002
RF_a	I_a	9.6	1.0	0.8	10.5	20	13	120	20.2	3100	49.6	33000	-
RF_b	I_b	9.7	1.5	2.0	9.5	20	4.9	120	20.2	3100	49.6	33000	-
RF_c	I_c	9.8	1.8	2.3	9.5	20	4.9	120	20.2	3100	49.6	33000	-

Tableau 39 : Tableau des paramètres à l'issue de l'étape 6

En résumé, à partir d'un essai de décharge en escalier et avec 24 h de relaxation, les 6 étapes de la Figure 128 ont permis d'identifier les paramètres du modèle avec 5 circuits R//C aux différents courants. Afin de mettre en évidence l'influence de la durée de relaxation sur la performance du modèle, a aussi été effectuée une identification avec le même essai de décharge en escalier mais avec seulement 1 h de relaxation. Dans ce cas, un modèle avec 4 circuits R//C est utilisé (cf. Tableau 26 du Chapitre 3). La démarche d'identification du modèle est presque identique à celle sur la Figure 128, sauf que tous les calculs pour le 5^{ème} circuit R//C ne sont pas nécessaires. Les valeurs des paramètres identifiées pour le modèle avec 4 circuits R//C, présentées dans le Tableau 40, sont similaires à ceux identifiées pour le modèle avec 5 circuits R//C. L'évaluation de la performance des deux modèles sera présentée dans le paragraphe prochain.

Phase	Courant	R _S (mΩ)	R ₁ (mΩ)	τ ₁ (s)	R ₂ (mΩ)	τ ₂ (s)	R ₃ (mΩ)	τ ₃ (s)	R ₄ (mΩ)	τ ₄ (s)	OCV _{Relax} (V)
Relaxation	0	-	-	1.0	-	19	-	110	-	1600	3.2986
RF _a	I _a	9.6	1.0	0.8	10.4	20	12.3	110	11.8	1600	-
RF _b	I _b	9.7	1.5	2.0	9.4	20	4.6	110	11.8	1600	-
RF _c	I _c	9.8	1.8	2.3	9.4	20	4.6	110	11.8	1600	-

Tableau 40 : Tableau des paramètres pour le modèle avec 4 circuits R//C

4.3.5. Validation de la méthode d'identification des paramètres

Afin de valider la méthode d'identification, des mesures expérimentales de deux essais sont comparées aux simulations des deux modèles identifiées dans le paragraphe 4.3.4 :

- La Figure 139 présente la première comparaison entre l'essai de décharge avec le motif en escalier utilisé pour l'identification des paramètres et les simulations des deux modèles.
- La Figure 140 illustre la deuxième comparaison entre un essai de validation en décharge et les simulations des deux modèles. L'essai de validation a été effectué pour vérifier si les modèles identifiés peuvent bien représenter la dynamique de la cellule. Il comporte un motif de sollicitation différent de celui utilisé pour l'identification des paramètres des modèles. La plage du SoC de l'essai de validation est identique à celle de l'essai de décharge avec le motif en escalier utilisé pour l'identification des paramètres des modèles (55% à 45% de SoC).

Les erreurs RMS entre les mesures des essais et les simulations des modèles sont résumées dans le Tableau 41. Les résultats montrent que :

- Le modèle avec 5 circuits R//C est capable de représenter précisément la dynamique de la cellule.
- Le modèle avec 4 circuits R//C est aussi capable de représenter précisément la dynamique de la cellule en régime forcé. Les erreurs RMS du modèle avec 4 circuits R//C en régime forcé sont identiques à celles du modèle avec 5 circuits R//C (cf. Tableau 41). Cependant, le modèle avec 4 circuits R//C n'arrive pas à représenter la totalité de la relaxation. Cela est dû

au fait que le modèle avec 4 circuits R//C est identifié avec seulement 1 h de relaxation, il ne contient pas de grande constante de temps par rapport au modèle avec 5 circuits R//C. Comme la plus grande constante de temps du modèle avec 4 circuits R//C est de 1600 s (cf. Tableau 40), la plage de validité du modèle est limitée à 8000 s (2.2 h) qui correspond à la plage de validité de la plus grande constante de temps (5×1600 s, cf. paragraphe 3.5.3 du Chapitre 3). Ainsi, à partir de 2.2 h pendant la relaxation sur la Figure 139 et la Figure 140, une divergence peut être observée entre la tension mesurée et l'estimation du modèle avec 4 circuits R//C.

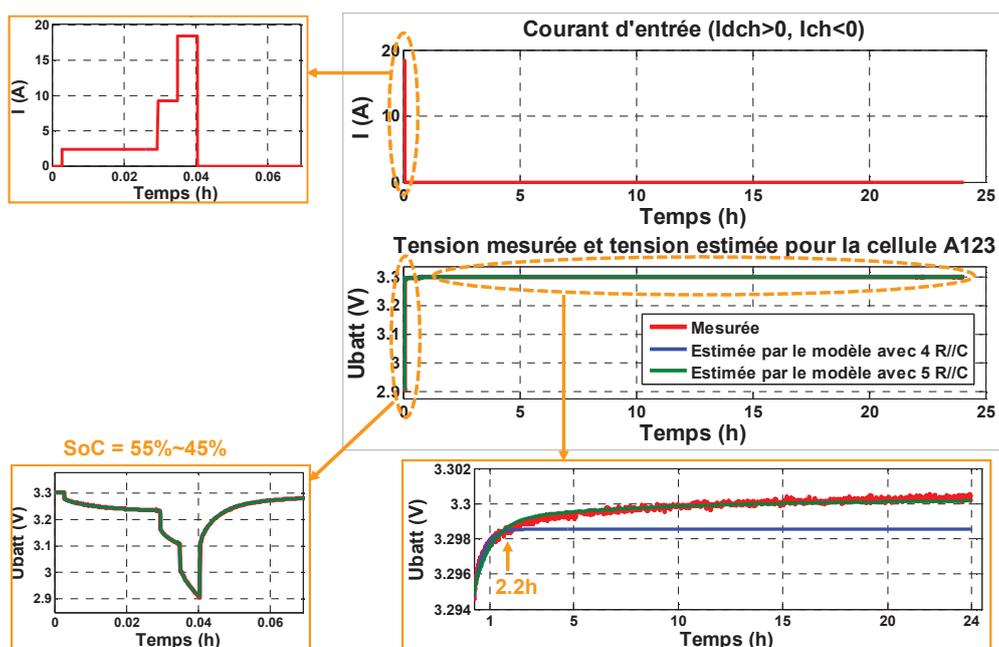


Figure 139 : Comparaison entre la mesure expérimentale de l'essai de décharge avec le motif en escalier et les résultats de simulations avec les deux modèles identifiés

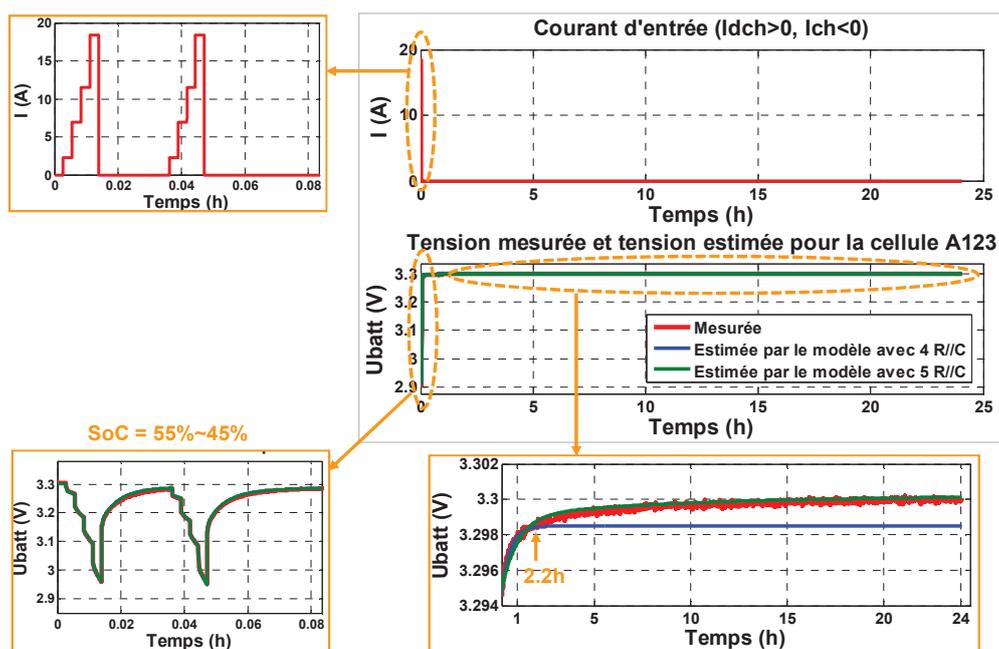


Figure 140 : Comparaison entre la mesure expérimentale d'un essai de validation et les résultats de simulations avec les deux modèles identifiés

Essai	Modèle avec 5 circuits R//C			Modèle avec 4 circuits R//C		
	Tout profil (mV)	En régime forcé (mV)	En relaxation (mV)	Tout profil (mV)	En régime forcé (mV)	En relaxation (mV)
Essai de décharge avec le motif en escalier (Figure 139)	0.2	1.5	0.2	1.3	1.5	1.3
Essai de validation (Figure 140)	0.3	1.9	0.3	1.2	1.9	1.2

Tableau 41 : Erreurs RMS entre les mesures des essais et les simulations des modèles

4.4. Conception d'une procédure de caractérisation expérimentale d'une cellule

4.4.1. Principe de la procédure de caractérisation expérimentale d'une cellule

Suivant la démarche d'identification des paramètres du modèle de la Figure 121, une procédure générique de caractérisation expérimentale d'une cellule quelconque a été élaborée. La description détaillée de la procédure est donnée dans l'Annexe 4. Ce paragraphe ne présente que le principe de la procédure qui contient deux étapes.

La première étape de la procédure consiste à renseigner des informations sur la cellule testée en fonction de sa spécification comme illustré dans le Tableau 42. Parfois, les informations liées à la décharge ou charge en impulsion ne sont pas indiquées dans la spécification. Dans ce cas, leurs valeurs sont égales à celles liées à la décharge ou charge en continu.

Catégorie	Description	Unité
Capacité	Capacité nominale (C_{Batt_Nom})	Ah
Courant	Courant de décharge maximal en continu ($I_{max_Dch_Con}$)	A
	Courant de décharge maximal en impulsion ($I_{max_Dch_Imp}$)	A
	Courant de charge maximal en continu ($I_{max_Cha_Con}$)	A
	Courant de charge maximal en impulsion ($I_{max_Cha_Imp}$)	A
Tension	Tension minimale pour la décharge en continu (U_{min_Con})	V
	Tension maximale pour la charge en continu (U_{max_Con})	V
	Tension minimale pour la décharge en impulsion (U_{min_Imp})	V
	Tension maximale pour la charge en impulsion (U_{max_Imp})	V
Température	Température d'opération maximale (T_{max})	°C
	Température d'opération minimale (T_{min})	°C

Tableau 42 : Informations nécessaires sur les spécifications de la cellule

La deuxième étape de la procédure consiste à effectuer les 4 essais dont les principes sont résumés ci-dessous :

- **L'essai 1** consiste à tester la capacité réelle de la cellule. Illustré sur la Figure 141, cet essai est composé de deux phases. La première phase, qui est constituée des cycles de charge/décharge, permet d'activer la cellule afin de stabiliser ses performances. La deuxième phase, qui est constituée d'un cycle de charge/décharge, permet d'obtenir les valeurs de la capacité réelle ($C_{\text{Batt_R el}}$) et du rendement faradique (η_r). La durée de l'essai 1 est proche de 10 heures.

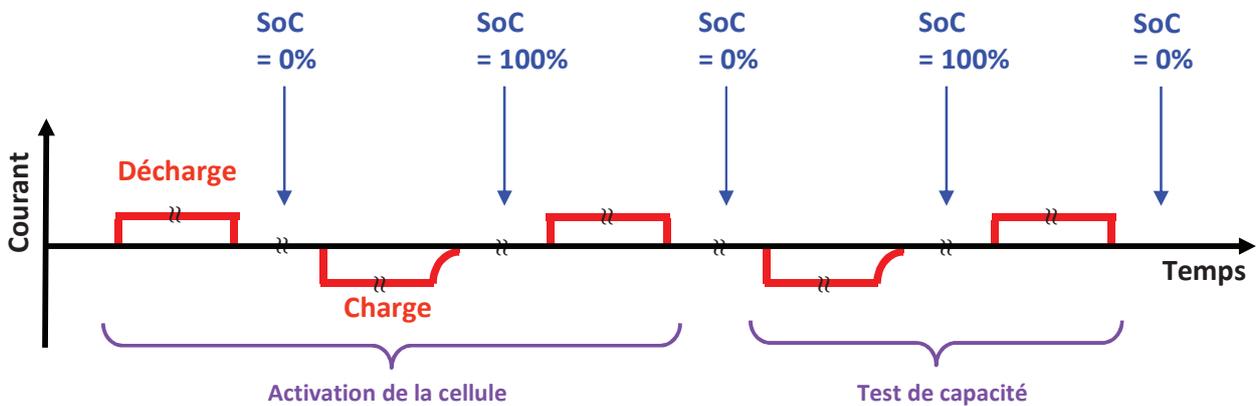


Figure 141 : Principe de l'essai 1 pour tester la capacité réelle de la cellule

- **L'essai 2** a pour vocation de déterminer le nombre des motifs en escalier à appliquer respectivement en décharge et en charge. Les motifs en décharge et en charge à utiliser, illustrés sur la Figure 142, sont déterminés en fonction des courants maximaux ($I_{\text{max_Dch_Con}}$ et $I_{\text{max_Cha_Con}}$) de la cellule selon la méthode pr esent e dans le paragraphe 4.3.2. Le motif A en décharge (cf. Figure 142) est conçu pour s'appliquer entre 95% et 5% de SoC et le motif B en charge entre 5% et 85% de SoC :
 - o Le choix de 95% de SoC au lieu de 100% de SoC comme point de départ du motif A permet d'obtenir un point de mesure de l'OCV supplémentaire à 95% de SoC. Cela est avantageux pour avoir une courbe de l'OCV(SoC) en décharge plus précise aux SoCs  lev s (OCV mesurée à 100%, 95% et 85%), surtout pour les cellules dont la courbe de l'OCV(SoC) en décharge évolue plus rapidement entre 100% et 95% de SoC qu'entre 95% et 90% de SoC (cf. Figure 48 (b)).
 - o La plage entre 5% et 0% de SoC n'est pas testée par les motifs en escalier. En effet le comportement de la cellule devient fortement non-linéaire dans cette plage et des créneaux simples seront utilisés dans l'essai 3 pour tester cette plage afin de faciliter l'identification des paramètres du modèle.
 - o Le choix de 85% de SoC comme limite d'application du motif B est pour que la tension de la cellule ne dépasse pas la limite de tension en charge ($U_{\text{max_Con}}$). De plus certaines cellules peuvent avoir la courbe de l'OCV(SoC) en charge qui évolue rapidement entre 90% et 95% de SoC (cf. Figure 48 (b)). Pour avoir une mesure de la courbe de l'OCV(SoC) plus d etaill e dans cette plage de SoC, on utilise donc deux créneaux de charge simples dont chacun ajoute 5% de SoC.

Ainsi, à priori 9 motifs A en décharge et 8 motifs B en charge seront utilisés par défaut pour caractériser le comportement dynamique de la cellule. 23/04/2013

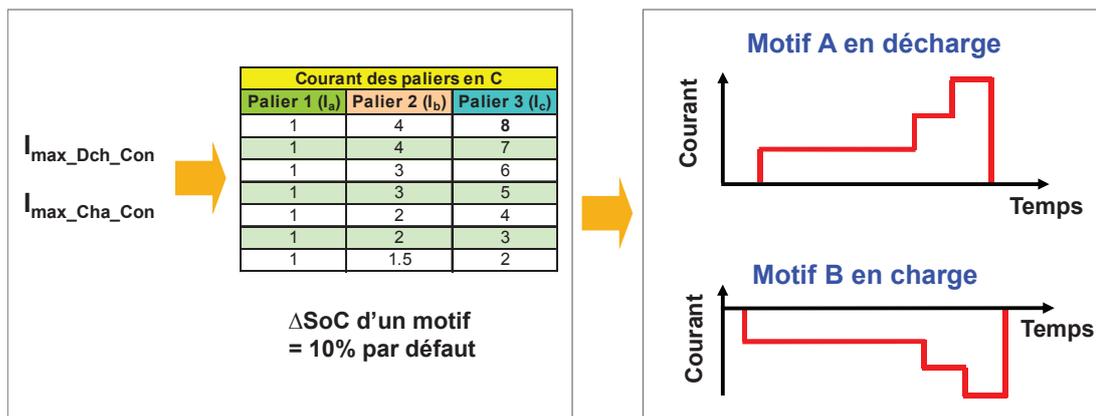


Figure 142 : Détermination des motifs en escalier en décharge et en charge

Afin de vérifier les limites d'application de ces motifs, l'essai 2 comprend essentiellement des motifs appliqués aux extrémités du SoC (entre 25% et 5% pour les motifs en décharge et entre 65% et 85% pour les motifs en charge) comme illustré sur la Figure 143. Par exemple, si la tension de la cellule lors des motifs en décharge est toujours supérieure à la tension de limite U_{\min_con} , cela signifie que les motifs en décharge peuvent être appliqués jusqu'à 5% de SoC. Si la tension lors du motif en décharge entre 15% et 5% de SoC atteint la tension de limite, les motifs en décharge peuvent être appliqués jusqu'à 15% de SoC. Dans ce cas, un créneau simple remplace le motif entre 15% et 5% de SoC. La durée de l'essai 2 est proche de 6 heures.

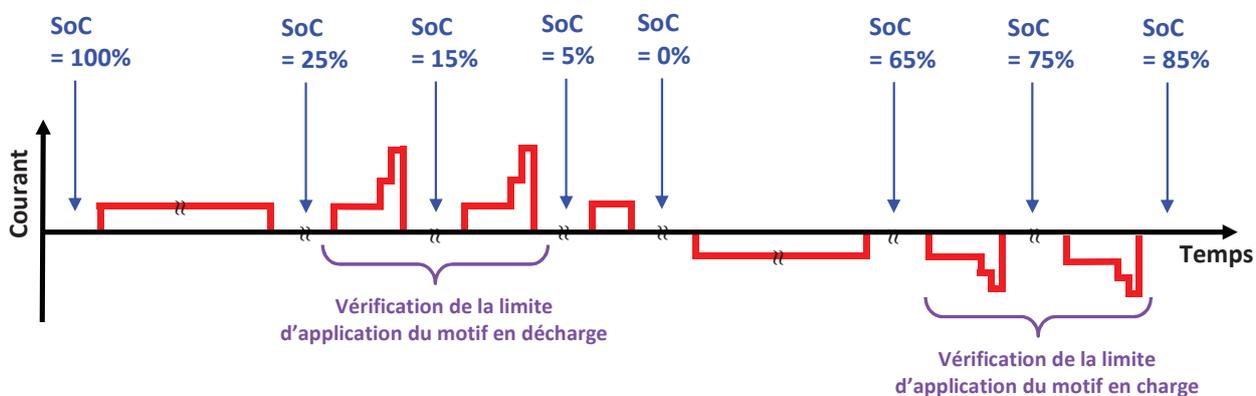


Figure 143 : Principe de l'essai 2 pour déterminer les nombres des motifs en escalier à utiliser en décharge et en charge

- **L'essai 3** permet de récupérer les mesures (courant et tension) des motifs en escaliers en décharge et en charge pour identifier les paramètres des modèles à différents SoCs (cf. l'étape 2 de la Figure 121). Le déroulement de l'essai 3 est illustré sur la Figure 144. La durée de repos entre deux motifs en escalier est égale à 1 heure par défaut afin de limiter la durée de l'essai 3 à une durée raisonnable (environ 26 h). La durée de 1 heure de repos permet d'identifier des constantes de temps jusqu'à l'ordre de 1000 s (cf. Tableau 40). Si l'on rallonge la durée de repos à une durée plus grande, par exemple à 24 h pour identifier la constante de temps de l'ordre de 10^4 s (cf. Tableau 39), la durée totale de l'essai 3 sera alors d'environ 23 jours, ce qui est difficilement acceptable dans la pratique.

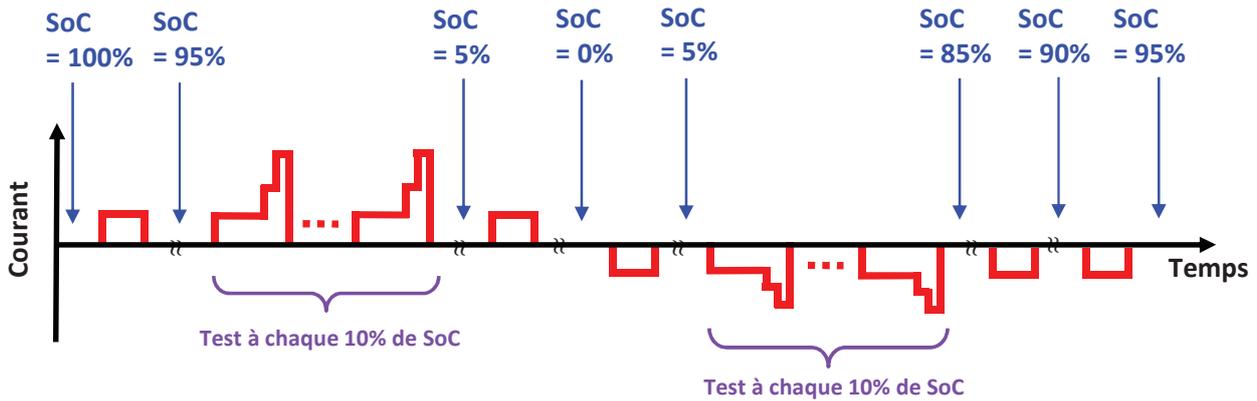


Figure 144 : Principe de l'essai 3 pour caractériser la cellule avec les motifs en escalier en décharge et en charge

- L'essai 4, qui est optionnel en cas de besoin de compléter la cartographie de la résistance pour les courants forts, consiste à appliquer à la cellule des peignes d'impulsions de courant en décharge et en charge à différents SoC comme l'étape 3 de la Figure 121. Le peigne d'impulsions à utiliser est déterminé en fonction des courants maximaux en impulsion de la cellule (cf. $I_{\max_Dch_Imp}$ et $I_{\max_Cha_Imp}$ du Tableau 42). Le détail de la détermination du peigne d'impulsions est donné dans l'Annexe 4 (cf. Tableau 56 dans l'Annexe 4). La durée de l'essai 4 est proche de 8 heures.

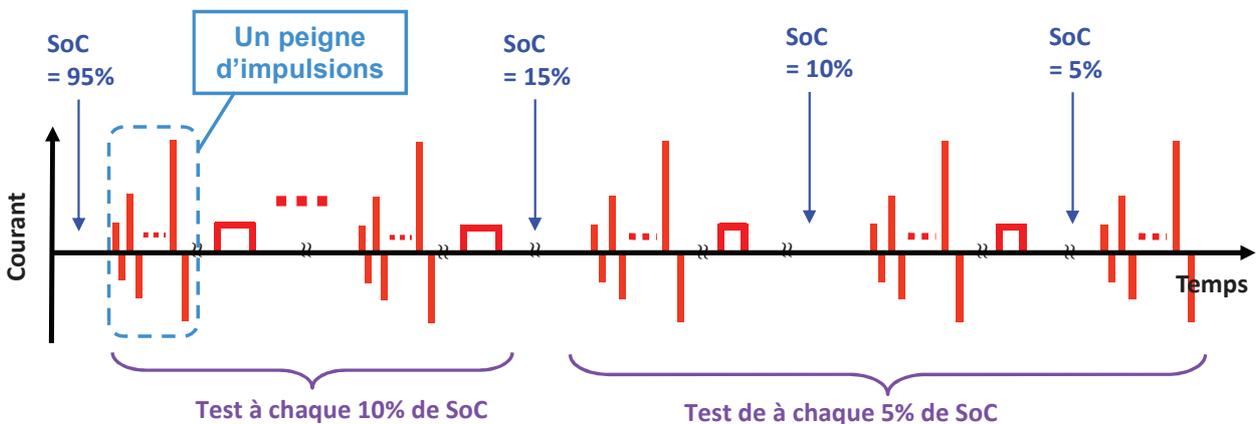


Figure 145 : Principe de l'essai 4 pour tester la résistance série R_s aux forts courants

4.4.2. Logiciel de caractérisation de cellule

Afin de faciliter le dépouillement des mesures expérimentales, un logiciel de caractérisation de la cellule, développé sous Matlab et illustré sur la Figure 146, a été mis en place selon la procédure de caractérisation présentée dans le paragraphe précédent. Ce logiciel, conçu pour caractériser les cellules Li-ion et NiMH, permet de :

- générer les cahiers des charges des essais à effectuer à partir des informations sur la cellule (cf. Tableau 42),
- importer des mesures expérimentales,

- identifier les paramètres du modèle de la cellule à partir des mesures expérimentales,
- générer un fichier contenant les cartographies des paramètres du modèle.

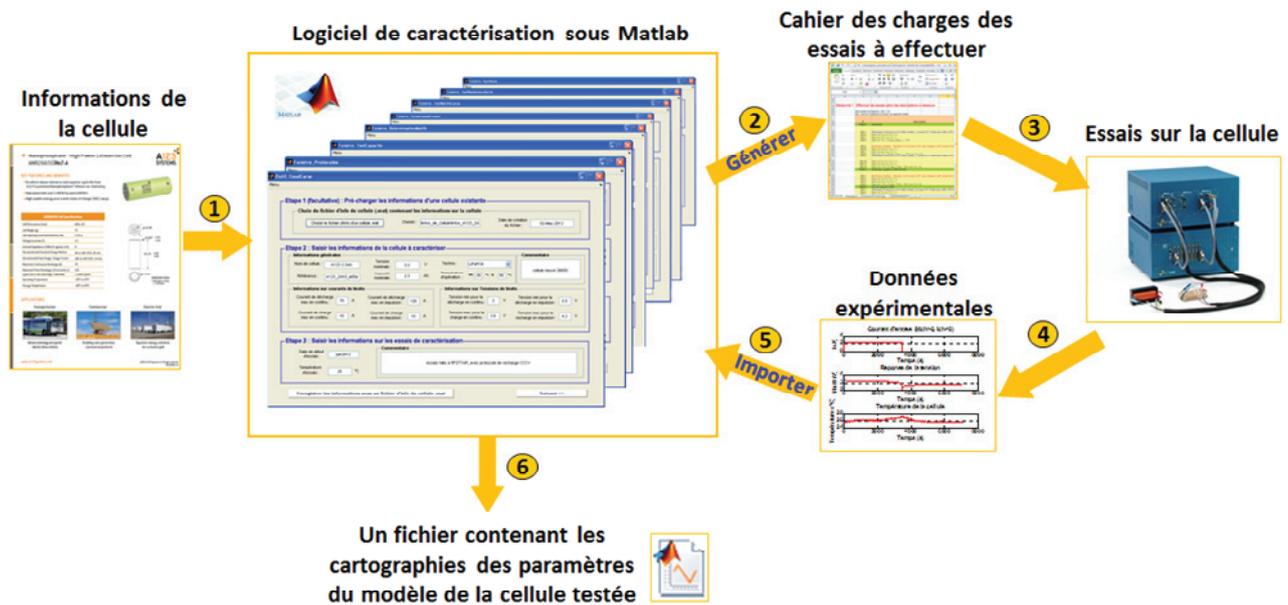


Figure 146 : Logiciel de caractérisation de cellule

Un simulateur du comportement dynamique de la cellule, illustré sur la Figure 147, a aussi été développé. En utilisant le fichier contenant les cartographies des paramètres du modèle généré par le logiciel de caractérisation, le simulateur permet d'estimer les évolutions de la tension et du SoC de la cellule en fonction d'un profil de courant.

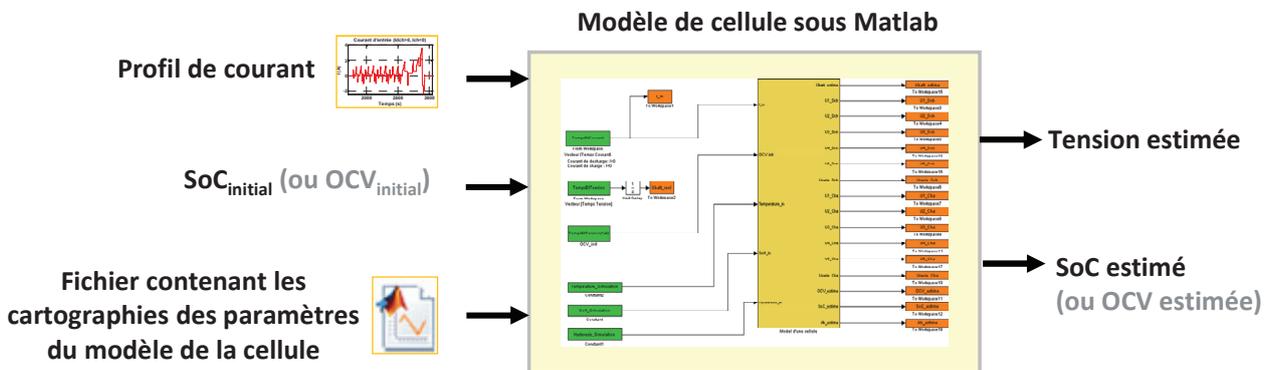


Figure 147 : Simulateur du comportement dynamique de la cellule

4.4.3. Exemple des mesures obtenues avec la procédure de caractérisation expérimentale

Un exemple des mesures obtenues avec la procédure de caractérisation pour une cellule d'A123 est présenté dans ce paragraphe. Le Tableau 43 présente les informations renseignées de la cellule d'A123 selon le Tableau 42.

Catégorie	Description	Valeur	Unité
Capacité	Capacité nominale (C_{Batt_Nom})	2.3	Ah
Courant	Courant de décharge maximal en continu ($I_{max_Dch_Con}$)	70	A
	Courant de décharge maximal en impulsion ($I_{max_Dch_Imp}$)	120	A
	Courant de charge maximal en continu ($I_{max_Cha_Con}$)	10	A
	Courant de charge maximal en impulsion ($I_{max_Cha_Imp}$)	-	A
Tension	Tension minimale pour la décharge en continu (U_{min_Con})	2.0	V
	Tension maximale pour la charge en continu (U_{max_Con})	3.6	V
	Tension minimale pour la décharge en impulsion (U_{min_Imp})	0.5	V
	Tension maximale pour la charge en impulsion (U_{max_Imp})	4.2	V
Température	Température d'opération maximale (T_{max})	60	°C
	Température d'opération minimale (T_{min})	-30	°C
Photo de la cellule*		-	-

Tableau 43 : Informations de la cellule d'A123 renseignées selon sa spécification donnée par le constructeur

(* La cellule considérée dans ce tableau est différente de celle du Tableau 33)

Deux bancs ont été utilisés pour tester la cellule mise dans une enceinte thermique avec la température régulée à 25 °C. Les caractéristiques des bancs sont présentées dans le Tableau 44. Le banc Delta/H&H est utilisé seulement quand il est nécessaire de solliciter la cellule avec un courant dont l'amplitude est supérieure à 20 A (l'amplitude maximale du banc Biologic).

Nom du banc	Courant Max		Tension Max	Période d'acquisition
	En décharge	En charge		
Biologic	20 A	-20 A	20 V	≥ 2 ms
Delta/H&H	250 A	-200 A	30 V	≥ 100 ms

Tableau 44 : Caractéristiques des bancs utilisés

Le protocole de charge complète CCCV consiste à charger d'abord avec 10 A jusqu'à 3.6 V, puis de charger avec une tension constante de 3.6 V jusqu'à ce que le courant diminue et atteigne 0.2 A. Pendant les essais, les signaux mesurés sont la tension, le courant et la température de la surface de la cellule. Les principaux résultats d'essais sont présentés ci-suit :

- Essai 1 : Activation et test de capacité réelle

Le résultat de l'essai 1 est présenté sur la Figure 148. Grâce à l'essai 1, la capacité réelle de la cellule et son rendement faradique peuvent être calculés. Ils sont égaux respectivement à

2.225 Ah et 1. La valeur du rendement faradique est même légèrement supérieure à 1 (1.005) à cause de l'influence du bruit de mesure du courant. Il est à noter que le rendement faradique ne correspond pas au rendement énergétique qui est le rapport entre l'énergie échangée (en Wh) pendant la décharge et celle pendant la charge. Le rendement énergétique est égal à 0.956 pour la phase du test de capacité sur la Figure 148.

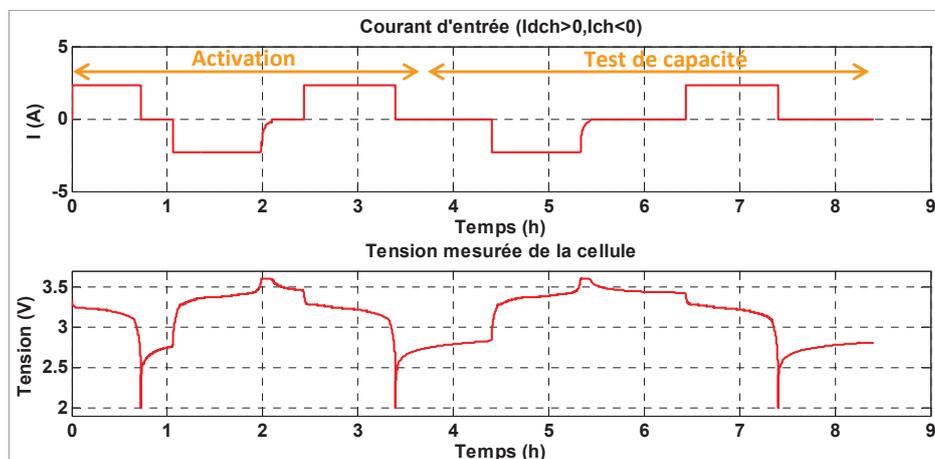


Figure 148 : Résultat de l'essai 1 pour activer la cellule et tester sa capacité réelle

- **Essai 2 : Détermination du nombre des motifs en escalier**

Les motifs en escalier en décharge et en charge, déterminés avec la capacité réelle et les courants maximaux selon le paragraphe 4.3.2, sont illustrés sur la Figure 149. Le résultat de l'essai 2 selon la Figure 143 est présenté sur la Figure 150. Les zooms sur les motifs en escalier en décharge et en charge sur la Figure 150 montrent que la tension provoquée par les motifs reste toujours à l'inférieur de la plage de tension limite entre 2.0 V et 3.6 V (cf. $[U_{\min_Con}, U_{\max_Con}]$ du Tableau 43). Ainsi, les nombres des motifs en escalier en décharge et en charge à utiliser dans l'essai 3 sont respectivement 9 et 8 (cf. paragraphe 4.4.1).

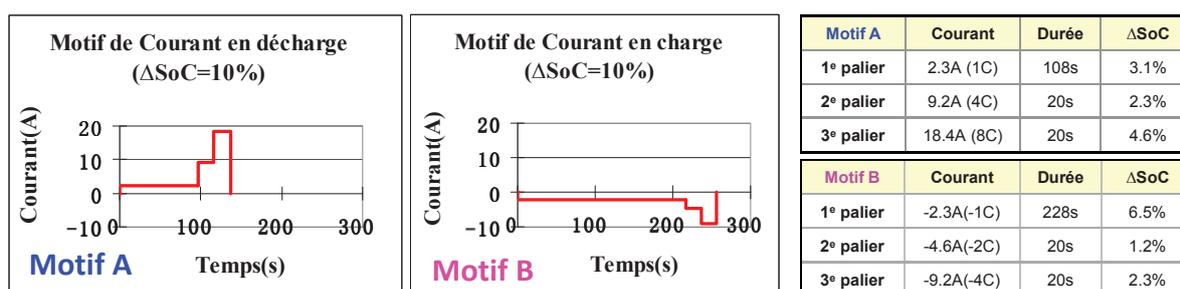


Figure 149 : Motifs en escalier utilisés

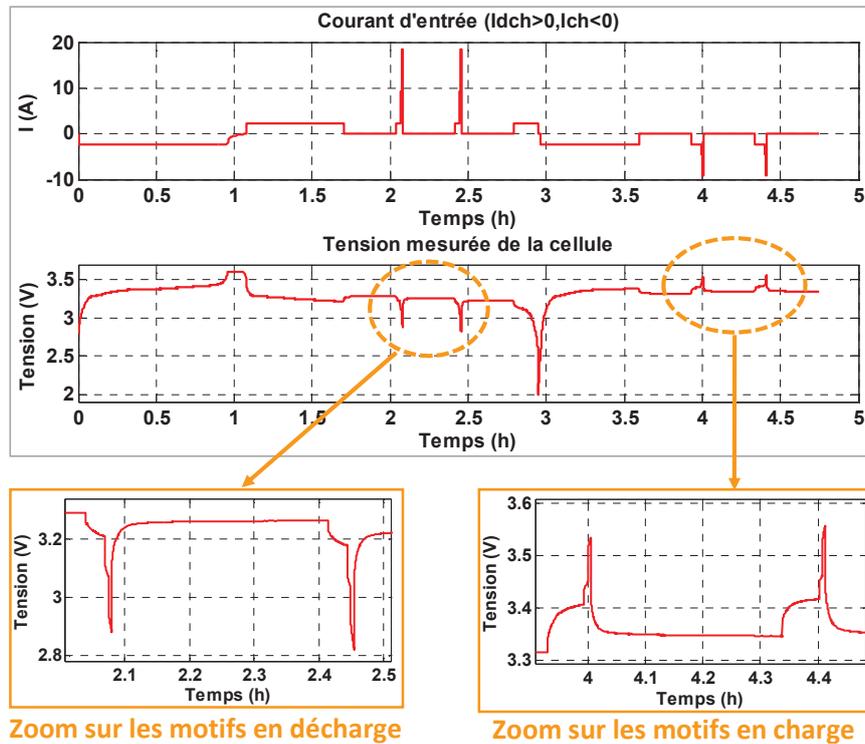


Figure 150 : Résultat de l'essai 2 pour déterminer le nombre des motifs en escalier à utiliser

- **Essai 3 : Test du comportement dynamique avec les motifs en escalier**

Le principal résultat de l'essai 3, qui correspond à la Figure 144, est présenté sur la Figure 151. Entre deux sollicitations, une heure de repos est imposée. Ainsi, un modèle avec 4 circuits R//C est utilisé (cf. Tableau 26). A partir des mesures de l'essai 3, les paramètres du modèle de la cellule peuvent être identifiés à différents SoCs et courants. Les paramètres identifiés sont présentés dans l'Annexe 6. Sur la Figure 151, l'estimation de la tension du modèle identifié est aussi présentée. La comparaison entre la mesure et l'estimation sur la Figure 151 montre que le modèle identifié est capable de représenter fidèlement la tension de la cellule. Le Tableau 45 résume les erreurs RMS entre les tensions mesurées et estimées du modèle. Dans le Tableau 45, les erreurs RMS pour le profil en charge sont plus faibles que celles pour le profil en décharge. Cela est dû au fait que l'amplitude du courant du profil en charge est plus faible que celle du profil en décharge.

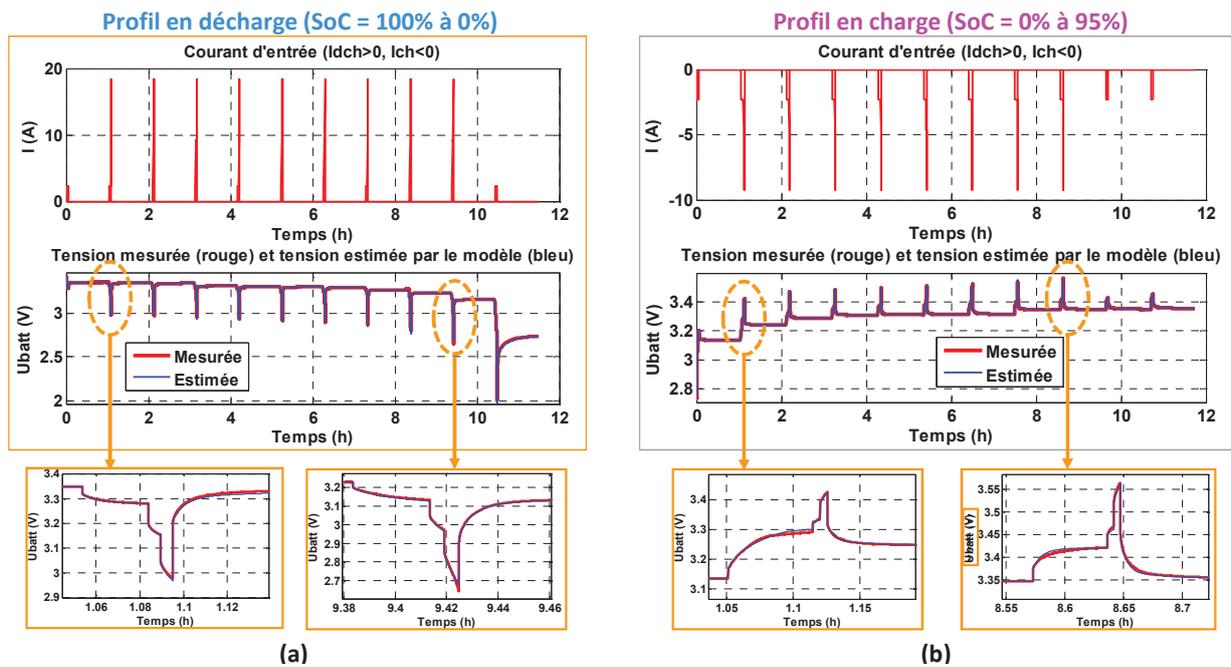


Figure 151 : Principal résultat de l'essai 3 pour tester le comportement dynamique de la cellule : (a) profil en décharge (b) profil en charge

	Modèle avec 4 circuits R/C		
	Tout profil (mV)	En régime forcé (mV)	En relaxation (mV)
Profil en décharge de la Figure 151 (a)	3.9	12.7	2.9
Profil en charge de la Figure 151 (a)	1.6	4.5	1.1

Tableau 45 : Résumé des erreurs RMS entre les tensions mesurées et les tensions estimées du modèle de la Figure 151

- **Essai 4 : Test de la résistance série avec les impulsions de courant**

Le peigne d'impulsions utilisé, qui est déterminé en fonction des courants maximaux de la cellule (cf. Tableau 56 dans l'Annexe 4), est illustré sur la Figure 152. Le principal résultat de l'essai 4 selon la Figure 145 est présenté sur la Figure 153. Grâce à l'essai 4, les valeurs de la résistance série R_s aux forts courants et à différents SoCs peuvent être identifiées. Le résultat des valeurs identifiées est présenté dans l'Annexe 7.

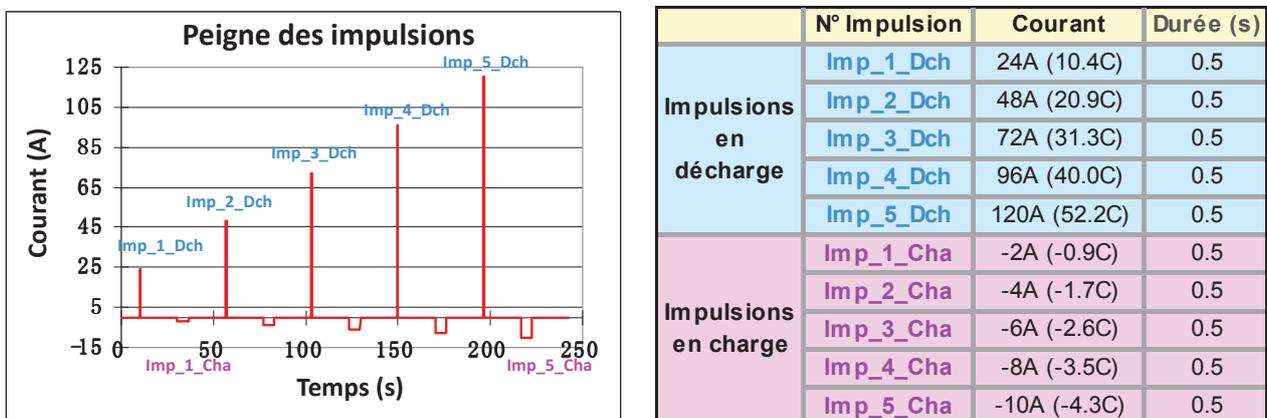


Figure 152 : Peigne d'impulsions utilisé pour la cellule A123

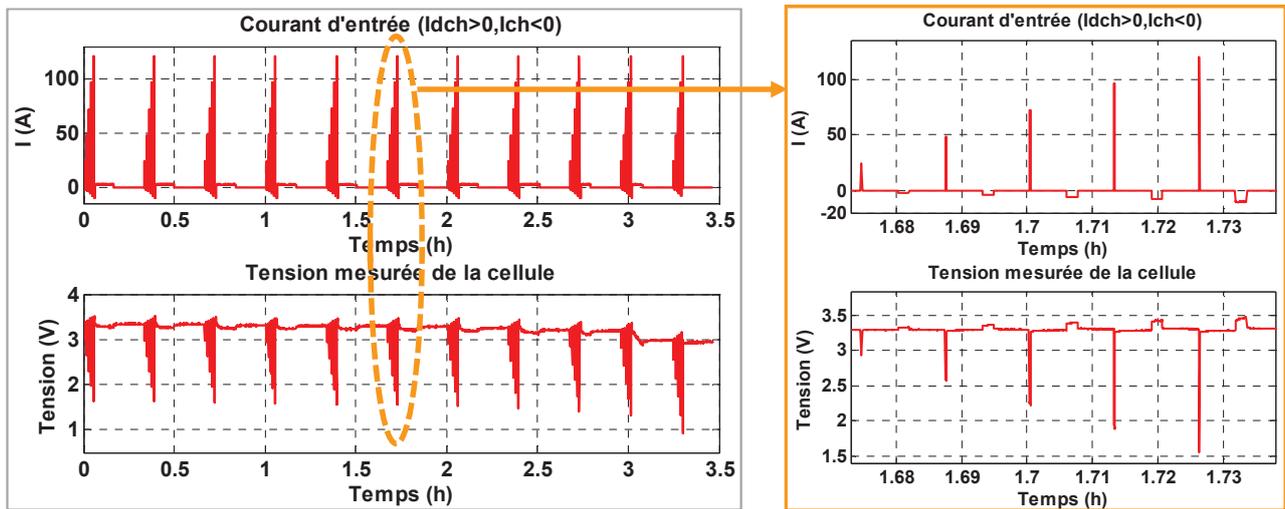


Figure 153 : Principal résultat de l'essai 4 pour tester la résistance série aux forts courants entre 95% et 5% de SoC selon la Figure 145

4.5. Validation de la procédure de caractérisation sur différentes cellules

En plus de la cellule A123 du Tableau 43, 3 autres cellules de technologies différentes ont aussi été caractérisées à 25 °C afin d'évaluer la performance de la procédure de caractérisation. Illustrées sur la Figure 154, les trois cellules sont : une cellule Li-ion de technologie NMC de Kokam, une cellule Li-ion de technologie LMO de NEC et une cellule NiMH de Saft. Leurs spécifications sont détaillées dans l'Annexe 8. Les essais sur la cellule Kokam ont été effectués avec le banc Delta/H&H. Les essais sur les cellules NEC et Saft ont été effectués avec le banc Biologic.

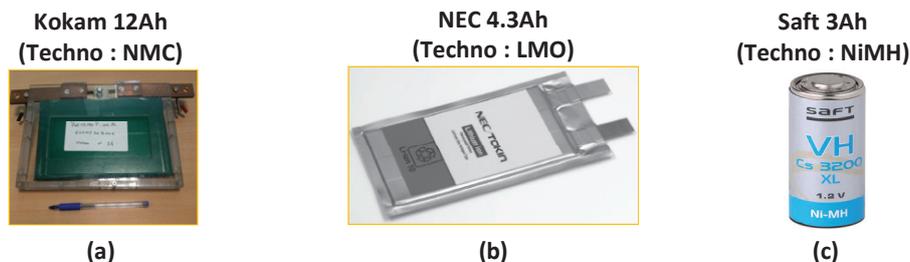


Figure 154 : 3 autres cellules caractérisées avec la procédure de caractérisation : (a) Kokam 12Ah, (b) NEC 4.3Ah et (c) Saft 3Ah

Pour valider les modèles identifiés des cellules, des essais de validation ont été effectués avec le profil du courant sur la Figure 155. Le profil du courant est généré par un simulateur de véhicule électrique de Renault pour un cycle de roulage NEDC (New European Driving Cycle). Il est normalisé par rapport à la capacité nominale du pack de batteries afin de pouvoir s'appliquer facilement à une cellule. L'essai de validation consiste à appliquer répétitivement le profil de la Figure 155 à une cellule pour la décharger de 100% de SoC jusqu'à un faible SoC. Pour les cellules A123, NEC et Saft qui sont testées avec le banc Biologic, le SoC final de l'essai de validation est toujours supérieur à 0% afin d'éviter la sur-décharge de la cellule qui provoque l'arrêt du banc.

Pour la cellule Kokam qui est testée avec le banc Delta/H&H, le SoC final est 0%. Pour chaque cellule, le modèle identifié est utilisé pour estimer la tension de la cellule. Puis la tension estimée est comparée à la tension mesurée. Comme le profil utilisé est un profil en décharge qui fait décroître le SoC de la cellule, la courbe de l'OCV(SoC) après décharge est utilisée pendant la simulation du modèle.

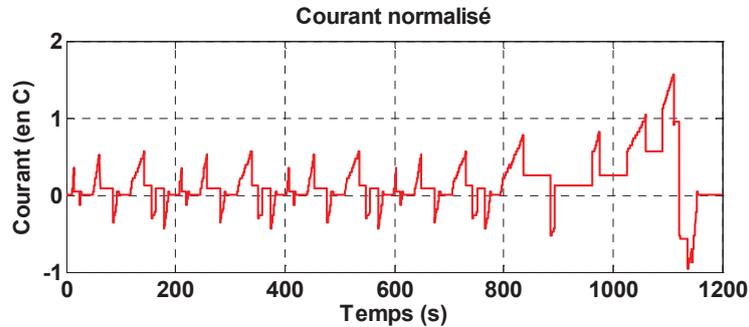


Figure 155 : Un cycle du profil de courant NEDC

Les comparaisons entre la tension mesurée de l'essai de validation et l'estimation du modèle pour les 4 cellules sont présentées respectivement sur la Figure 156, la Figure 157, la Figure 158 et la Figure 159. Elles montrent que les modèles identifiés sont capables d'estimer précisément les comportements dynamiques des cellules. Les erreurs RMS entre les tensions mesurées et les tensions estimées des modèles des 4 cellules sont résumées dans le Tableau 46. L'erreur pour la cellule Kokam est plus grande que celles pour les autres cellules. Cela est dû aux bruits de mesure de tension du banc Delta/H&H (de l'ordre de 10 mV) qui intervient dans le calcul de l'erreur RMS.

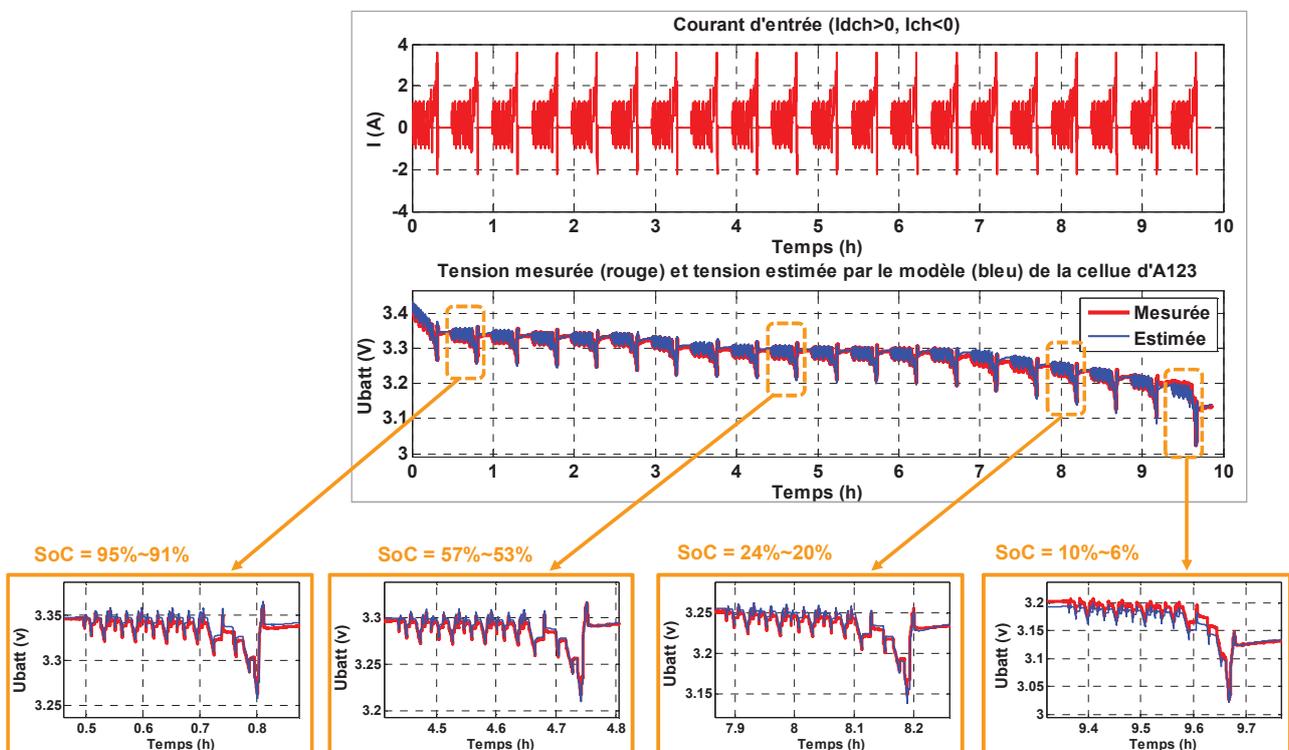


Figure 156 : Comparaison entre la mesure de l'essai de validation et l'estimation du modèle identifié de la cellule A123

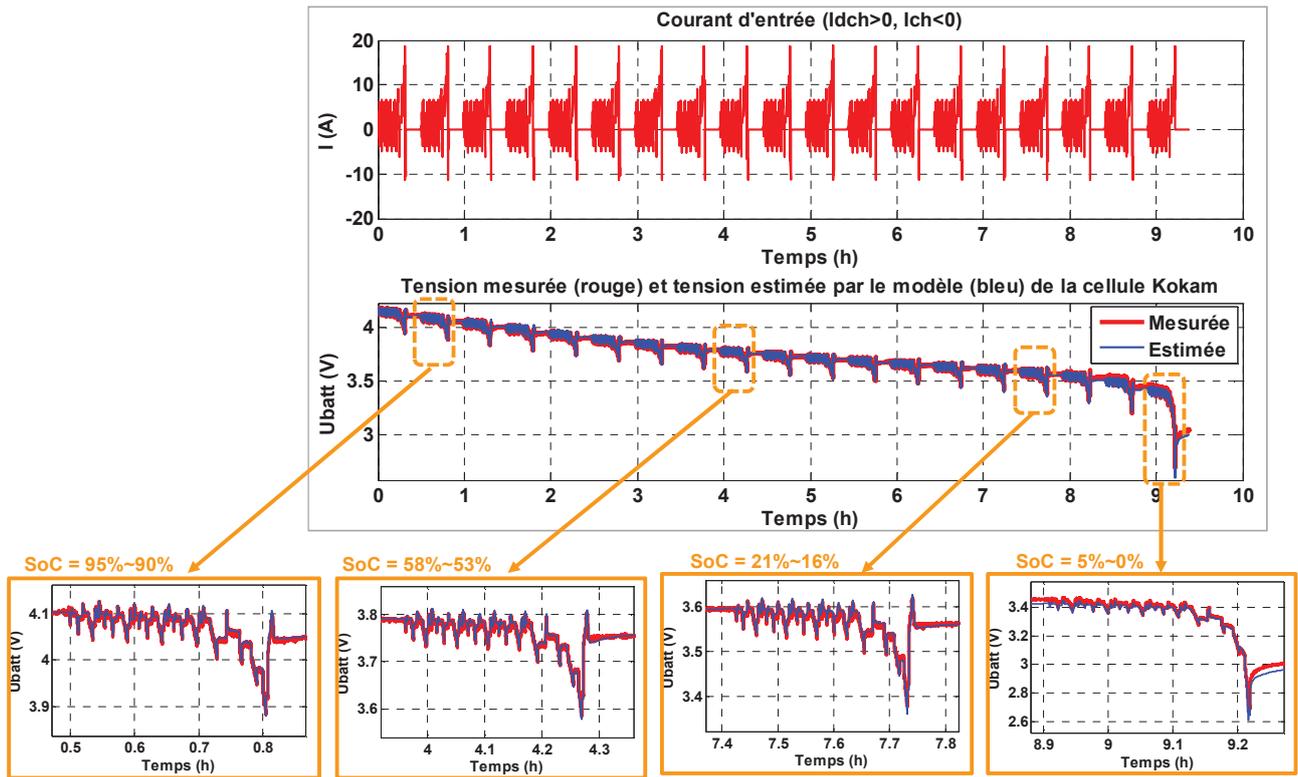


Figure 157 : Comparaison entre la mesure de l'essai de validation et l'estimation du modèle identifié de la cellule Kokam

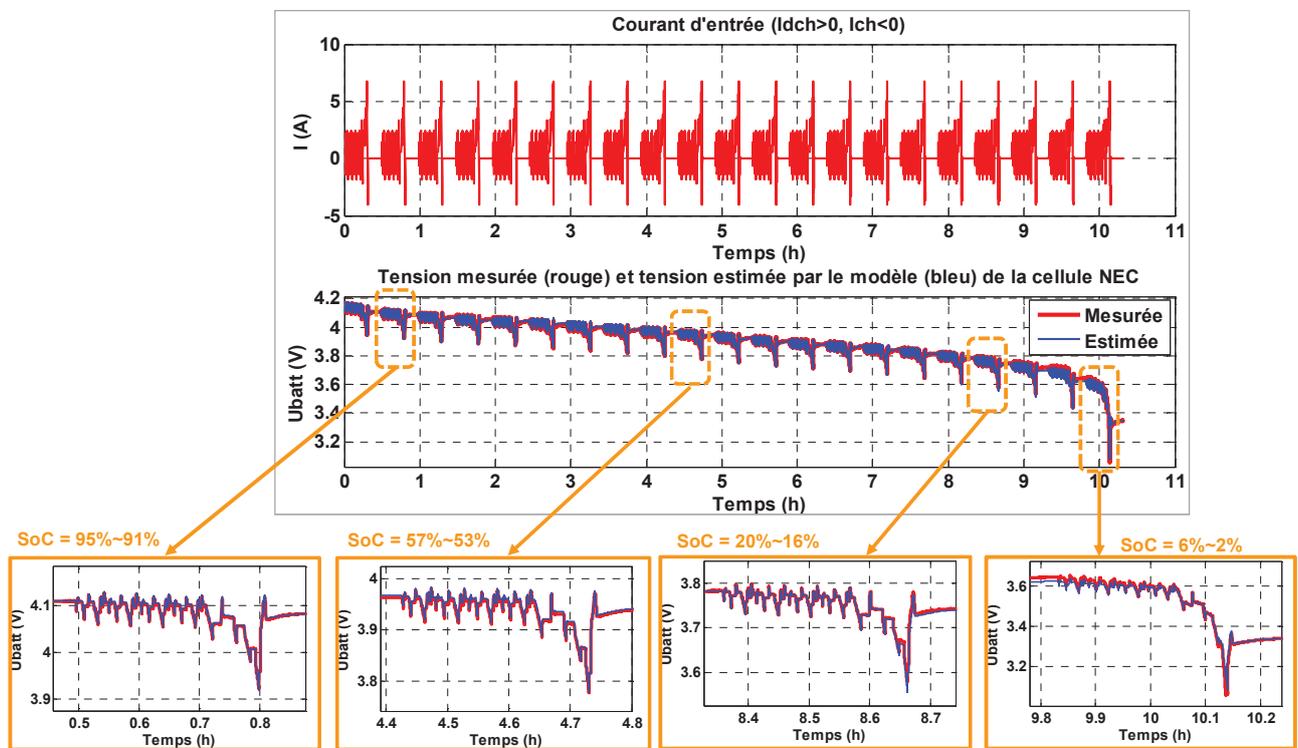


Figure 158 : Comparaison entre la mesure de l'essai de validation et l'estimation du modèle identifié de la cellule NEC

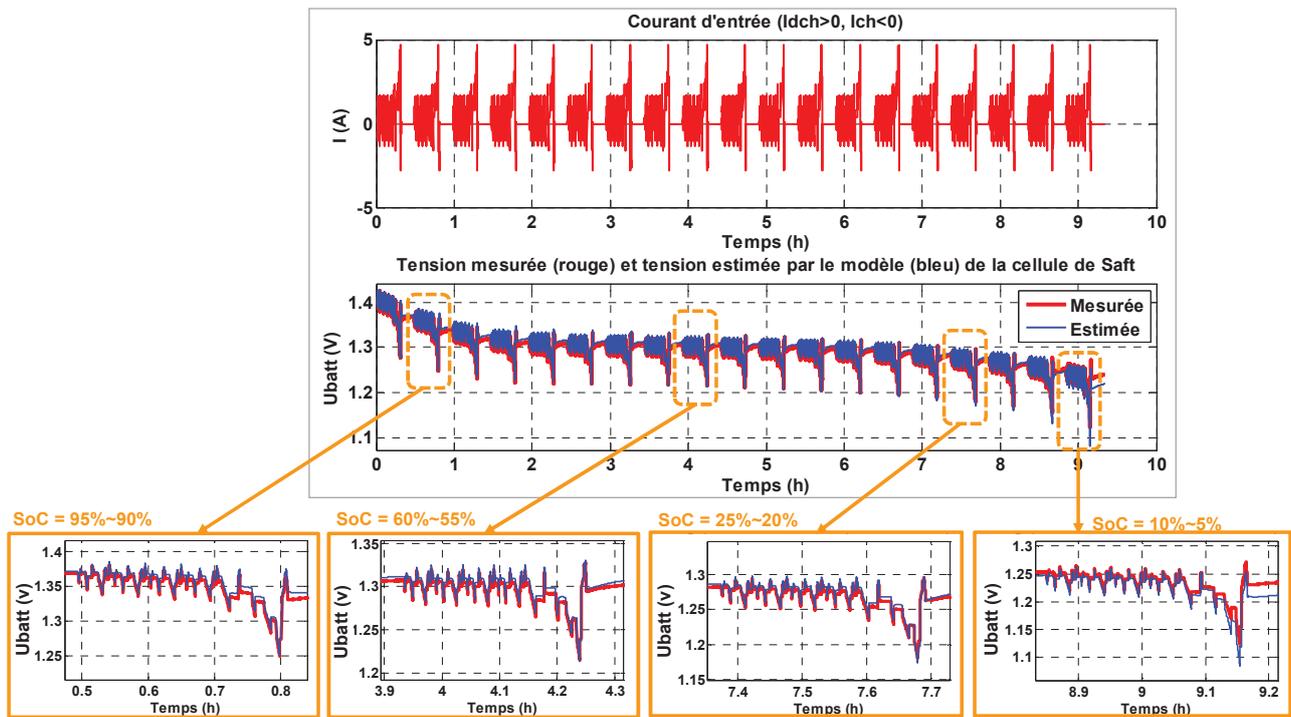


Figure 159 : Comparaison entre la mesure de l'essai de validation et l'estimation du modèle identifié de la cellule Saft

Cellule	Erreur RMS du modèle avec 4 circuits R/C		
	Tout profil (mV)	En régime forcé (mV)	En relaxation (mV)
A123 de la Figure 156	5.1	5.3	4.9
Kokam de la Figure 157	11.2	9.2	12.8
NEC de la Figure 158	6.8	6.8	6.8
Saft de la Figure 159	6.5	6.1	6.9

Tableau 46 : Résumé des erreurs RMS entre les tensions mesurées et les tensions estimées des modèles de 4 cellules (A123, Kokam, NEC et Saft)

4.6. Etude de la problématique « Précision/Coût » du modèle

4.6.1. Problématique « Précision/Coût »

Illustrés sur la Figure 160, les 4 essais de caractérisation (cf. paragraphe 4.4.1) peuvent se faire en 3 jours à condition que la durée de relaxation entre deux motifs en escalier de l'essai 3 soit d'une heure. En cas de besoin d'un modèle plus précis pour estimer la relaxation plus longue (par exemple, sur 24 h), il est nécessaire de prolonger la durée de relaxation de l'essai 3. Cela conduit à une augmentation de la durée des essais de caractérisation, qui engendre une augmentation du coût d'essai (lié à l'utilisation du banc et à la main œuvre). Nous avons donc réfléchi sur la problématique « Précision du modèle / Coût d'essais ». Afin de réduire le coût d'essai et augmenter la précision du modèle, deux solutions ont été étudiées :

- La **première solution** est d'extrapoler le comportement de la relaxation longue à partir d'une mesure de courte durée (par exemple d'une heure). Cela permet de réduire la durée de mesure pendant la relaxation tout en préservant la précision du modèle. Cette solution a déjà été détaillée dans le paragraphe 3.7.
- La **deuxième solution** consiste à optimiser les essais de caractérisation de manière qu'une voie de test du banc permette de tester plusieurs batteries dans la même période. Cela permet d'augmenter l'efficacité du test du banc et donc de réduire le coût de test de chaque batterie. Le détail de cette solution est présenté dans le paragraphe 4.6.2.



Figure 160 : Exemple du déroulement des 4 essais de caractérisation

4.6.2. Optimisation des essais de caractérisation [105]

Lorsqu'il y a plusieurs batteries à caractériser, une première solution consiste à tester les batteries séquentiellement avec une seule voie de puissance du banc. Cela augmente la durée totale de la campagne d'essais. Une deuxième solution consiste à utiliser plusieurs voies de puissance ou plusieurs bancs afin de tester simultanément les batteries. Cela réduit la durée totale de la campagne d'essais, mais augmente le coût d'équipement et de maintenance. Dans ce paragraphe est présenté le résultat de nos réflexions sur comment réaliser la caractérisation de plusieurs batteries, avec un coût d'équipement réduit et de façon rapide.

Dans le cadre de la caractérisation de batterie, certaines séquences de tests pour une batterie comportent des phases de repos plus longues que la période de sollicitation précédente. Les phases de repos sont utilisées pour stabiliser la tension ou laisser refroidir les batteries. Durant ces phases de repos, la voie de puissance n'est pas sollicitée en permanence. La solution proposée vise à exploiter les séquences de repos pour solliciter la voie de puissance sur les autres batteries dans le même temps. Cela réduit ainsi à la fois la durée totale des campagnes d'essais et les investissements d'équipement, par rapport aux solutions de tests séquentiels ou distribués sur plusieurs voies ou plusieurs bancs. Le principe de la solution proposée est illustré sur la Figure 161. Dans cet exemple, les tests des autres batteries sont insérés séquentiellement pendant les phases de repos de la première batterie, ce qui permet d'augmenter le nombre de batteries testées avec presque la même durée d'essai et avec la même voie de puissance du banc.

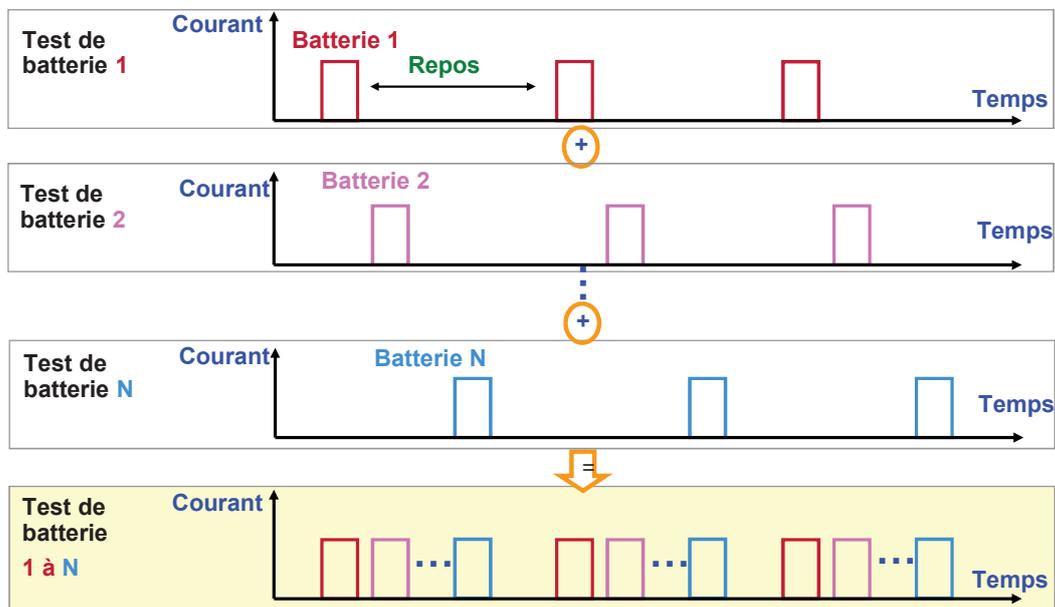


Figure 161 : Illustration du principe de la solution proposée pour tester plusieurs batteries

Pour réaliser la fonctionnalité de la Figure 161, a été conçu un système de démultiplexeur dont le principe est illustré sur la Figure 162. Ce système permet de :

- basculer la connexion du banc d'une batterie à une autre à l'aide de relais de puissance,
- choisir le bon relais de puissance grâce à la commande numérique du banc,
- mesurer en continu les signaux de chaque batterie.

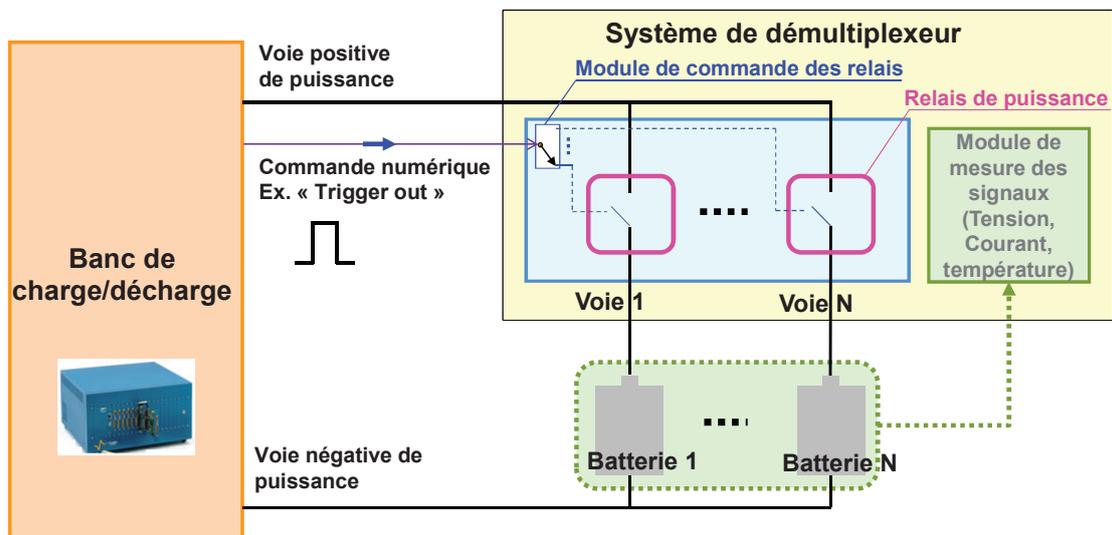


Figure 162 : Principe du système de démultiplexeur

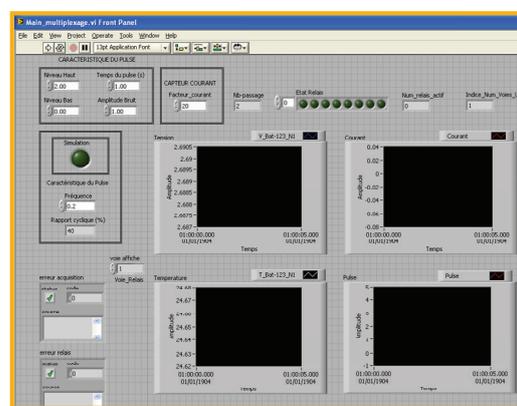
Pour valider la conception du système de démultiplexeur de la Figure 162, un prototype a été réalisé et est présenté sur la Figure 163. Le prototype contient une partie matérielle (cf. Figure 163 (a)) et une partie logicielle développée sous Labview (cf. Figure 163 (b)) pour piloter la partie matérielle. Le coût du prototype est environ de 5000 €. Il est de beaucoup inférieur au coût d'un banc qui est de l'ordre de 30 000 à 100 000 €. Ainsi, l'utilisation d'un tel équipement pour augmenter l'efficacité du test de batteries dans le contexte industriel est tout à fait envisageable.

Système de démultiplexeur avec 8 voies



(a)

Logiciel de pilotage développé sous Labview



(b)

Figure 163 : Prototype du système de démultiplexeur avec 8 voies de test : (a) partie matérielle et (b) partie logicielle

4.7. Conclusion

Dans ce chapitre, une nouvelle procédure de caractérisation expérimentale a été présentée pour identifier les paramètres du modèle de la cellule à partir des mesures expérimentales. La procédure permet de calibrer la complexité du modèle en fonction de la durée de la relaxation et de s'appliquer facilement aux différentes technologies de cellule. Les modèles identifiés permettent de donner de bonnes estimations sur les comportements dynamiques des cellules, et ont été confirmés par les tests de validation avec 4 différentes cellules de Li-ion et de NiMH. Afin de résoudre la problématique « Précision/Coût » du modèle identifié, plusieurs solutions pour réduire la durée des essais de caractérisation ont aussi été investiguées.

Enfin, plusieurs phénomènes restent à appréhender. Premièrement, la dynamique liée au phénomène de l'hystérésis doit être caractérisée. La procédure de caractérisation proposée permet de distinguer les courbes de l'OCV(SoC) après décharge et après charge. Cependant, pour un profil de courant composé des sollicitations en décharge et en charge, l'OCV réel de la cellule pourrait se trouver entre deux courbes de l'OCV(SoC) après décharge et après charge. La prise en compte de la dynamique de l'hystérésis permettra une meilleure estimation de l'OCV du modèle. Deuxièmement, l'influence de la température reste à analyser et à prendre en compte dans le modèle. Pour cela, la cellule doit être testée avec la procédure de caractérisation à différentes températures pour identifier l'évolution des paramètres du modèle en fonction de la température. Un couplage entre le modèle électrique identifié et un modèle thermique sera nécessaire pour estimer le comportement dynamique de la cellule pendant un changement de la température.

Chapitre 5 : Etude de l'assemblage des cellules en série

5.1. Introduction

5.1.1. Contexte

Pour les véhicules électrifiés, le pack de batteries est un assemblage de nombreuses cellules. Les cellules peuvent être organisées sous formes de module et de stacks à l'intérieur d'un pack comme illustré sur la Figure 164.

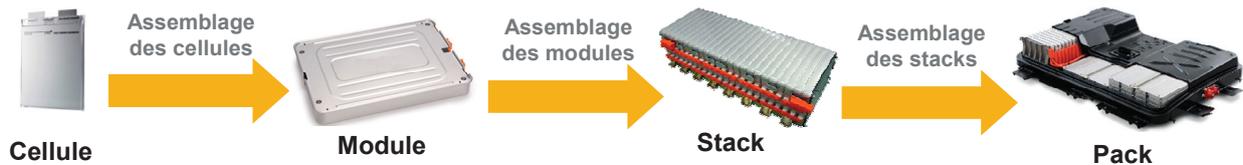


Figure 164 : Organisation des cellules à l'intérieur d'un pack

Les cellules ont des caractéristiques dispersées à cause de l'impact de plusieurs facteurs comme la tolérance de fabrication, les différences de température en cours de fonctionnement, de vieillissement et de charges initiales au moment de l'assemblage. Cette dispersion a une influence sur le comportement du pack de batteries, d'où la nécessité d'étudier l'assemblage des cellules. Deux structures élémentaires illustrées sur la Figure 165 représentent l'assemblage des cellules. Dans la première les cellules sont en série pour d'augmenter la tension de l'assemblage. Dans la deuxième structure les cellules sont montées en parallèle, ce qui permet d'une part d'augmenter la capacité de l'assemblage et d'autre part de diminuer le courant de cellule afin de baisser la température et réduire les pertes ohmiques. La tension unitaire des cellules Li-ion est comprise entre 2 V et 4.2 V, et la tension requise du pack de batteries pour les véhicules électrifiés est de 60 à 400 V. Ainsi, la structure des cellules en série est indispensable pour atteindre la tension nécessaire du pack. Elle est donc choisie comme la structure à étudier dans un premier temps. Il a été volontairement choisi de ne pas considérer de circuit d'équilibrage des tensions aux bornes de chaque cellule afin que le raisonnement adopté soit indépendant de ces circuits et soit donc le plus général possible.

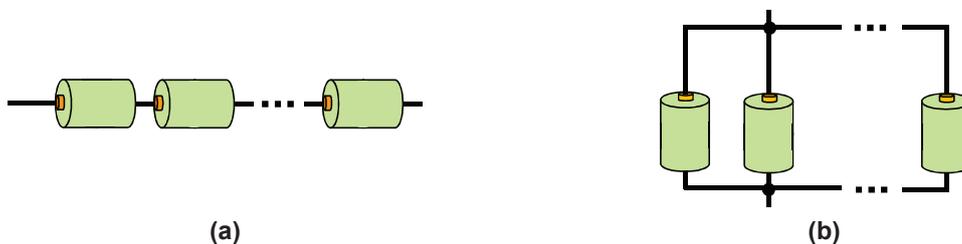


Figure 165 : Structures élémentaires de l'assemblage : (a) structure des cellules en série et (b) structure des cellules en parallèle

5.1.2. Problématiques de l'assemblage des cellules en série

Dans le cadre de l'assemblage des cellules en série, deux problématiques méritent être étudiées :

- **Premièrement**, les définitions de la capacité réelle et du SoC de l'assemblage sont rarement discutées dans la littérature. Dans [106], l'auteur propose de définir le SoC de l'assemblage des cellules en série par le SoC minimal des cellules :

$$\text{SoC}_{\text{Ass}} = \min_{i=1}^N (\text{SoC}_i) \quad (102)$$

avec :

SoC_{Ass} : SoC de l'assemblage de N cellules en série,

SoC_i : SoC de la $i^{\text{ème}}$ cellule.

Cependant, cette définition ne décrit pas l'état réel de la charge de l'assemblage. La Figure 166 présente un exemple simplifié qui montre l'insuffisance de la définition. L'assemblage sur la Figure 166 est constitué de deux cellules de capacité réelle identique. La 1^{ère} cellule est à 100% de SoC et la 2^{ème} cellule à 50% de SoC. Selon l'équation (102) proposée par [106], le SoC de l'assemblage est égal à 50%, ce qui signifie que l'assemblage peut encore être rechargé pour atteindre un niveau de SoC plus élevé à 50%. Cependant, comme la première cellule est à 100% de SoC, l'assemblage ne peut plus être rechargé. Ainsi, le SoC de l'assemblage doit être égal à 100% au lieu de 50%. Dans ce cas, l'assemblage est équivalent à une cellule dont la charge maximale utilisable correspond à la charge disponible dans la 2^{ème} cellule.

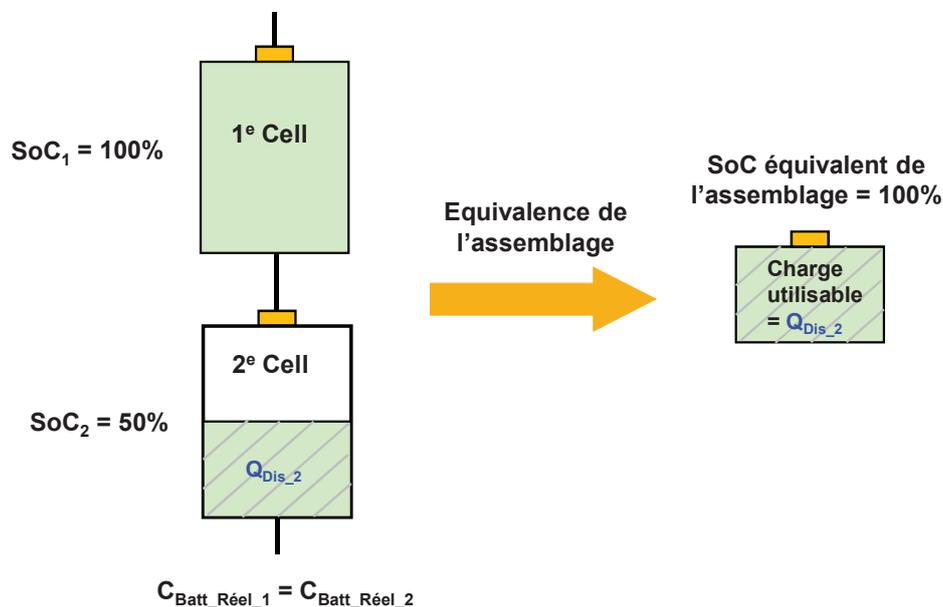


Figure 166 : Exemple montrant l'insuffisance de la définition du SoC de l'assemblage proposée dans [106]

- **Deuxièmement**, la gestion de SoC de chaque cellule est une problématique pour l'assemblage des cellules. La Figure 167 illustre cette problématique à travers un exemple simplifié où l'assemblage est constitué de deux cellules en série, les paramètres de chaque

cellule varient seulement en fonction de leur SoC. Dans le cadre de l'assemblage des cellules en série, le courant traversant chaque cellule est identique. Pour une même sollicitation de courant, l'échange de charge de chaque cellule est donc identique. Cependant, comme les capacités de deux cellules ne sont pas identiques à cause de la dispersion des caractéristiques, les évolutions de leurs SoCs sont différentes. Ainsi, même si elles ont les mêmes SoCs initiaux, leurs SoCs finaux ne sont pas identiques après la sollicitation.

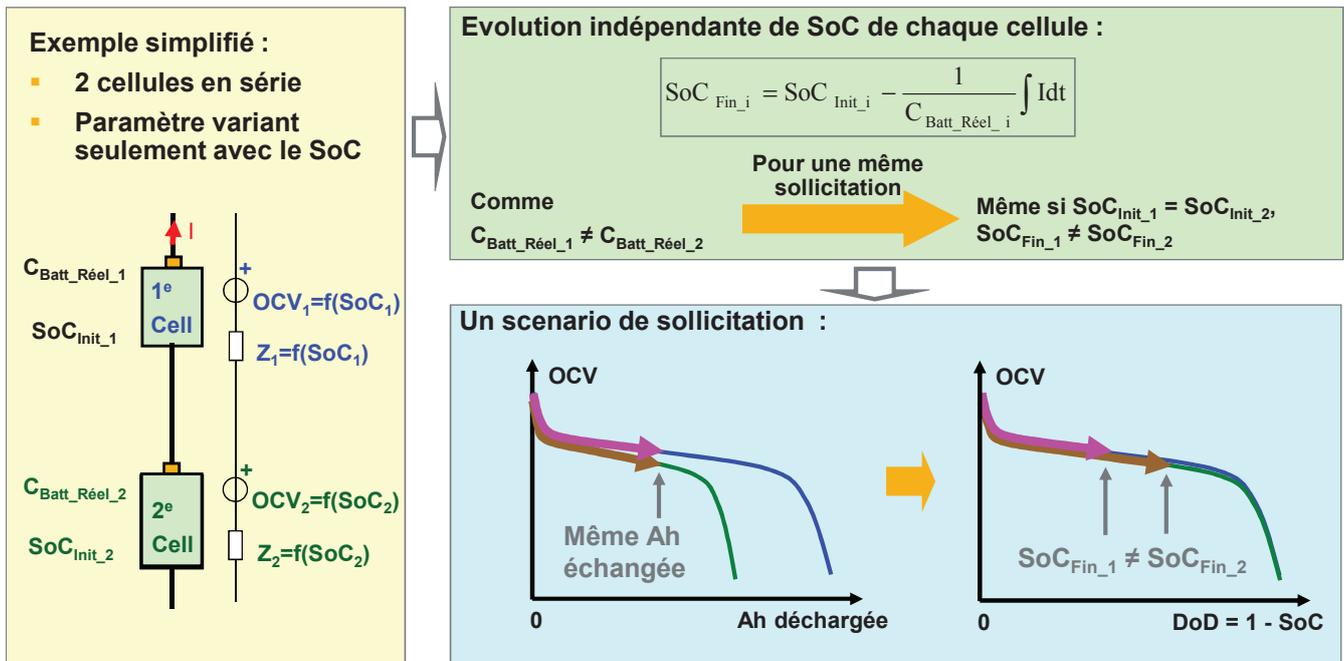


Figure 167 : Illustration de la problématique de la gestion du SoC de chaque cellule pour l'assemblage des cellules en série

Pour bien gérer l'assemblage des cellules en série, il est donc nécessaire de :

- formaliser la définition de la capacité de l'assemblage en prenant en compte la dispersion de caractéristiques des cellules,
- établir le modèle de l'assemblage à partir des caractéristiques individuelles des cellules, afin de pouvoir estimer le comportement dynamique de l'assemblage et maîtriser l'évolution de SoC de chaque cellule.

Ces deux sujets seront abordés successivement dans les deux paragraphes suivants.

5.2. Définition de la capacité réelle de l'assemblage

5.2.1. Définition proposée

Dans ce paragraphe, une définition de la capacité réelle de l'assemblage des cellules en série est proposée et est illustrée par la Figure 168. Les explications de cette définition sont données dans la suite du paragraphe.

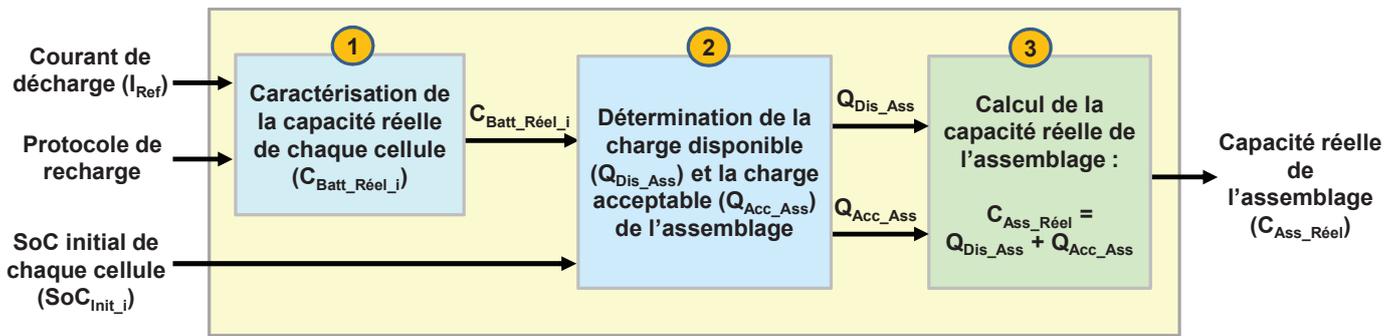


Figure 168 : Illustration de la définition de la capacité réelle de l'assemblage des cellules en série

Premièrement, comme ceci a été présenté dans le Chapitre 2 (cf. paragraphe 2.3.2), la capacité réelle d'une cellule est caractérisée avec un courant de décharge constant après un protocole de recharge donné. Dans la même logique, la capacité réelle d'un assemblage de cellules doit être aussi référencée par rapport à un courant de référence en décharge (I_{Ref}) après un protocole de recharge défini. Ainsi, avant de définir la capacité réelle d'un assemblage, il est nécessaire de définir d'abord un courant de référence en décharge (I_{Ref}) et un protocole de recharge. La capacité réelle de chaque cellule doit être aussi testée avec le courant de référence (I_{Ref}) et le protocole de recharge définis pour l'assemblage. Il est à souligner que comme la capacité réelle de la cellule est sensible au courant de décharge (cf. paragraphe 2.3.2 du Chapitre 2), la capacité réelle de l'assemblage sera aussi sensible au courant de de référence en décharge (I_{Ref}). D'ailleurs, la recharge conventionnelle de type « CC/CV » pour les cellules Li-ion s'applique difficilement à l'assemblage des cellules en série à cause du fait que certaines cellules peuvent être surchargées pendant la phase de la recharge à tension constante « CV ». La Figure 169 présente un exemple de l'évolution des tensions de 12 batteries Li-ion en série pendant une recharge « CC/CV » [107]. Pendant la phase « CV » (tension constante), les tensions de certaines batteries dépassent la tension de « CV » voulue pour chaque cellule (3.65 V). Ainsi, en l'absence d'un système d'équilibrage des cellules dans l'assemblage, la recharge à courant constant « CC » est préférable et préconisée pour charger l'assemblage des cellules en série dans la pratique.

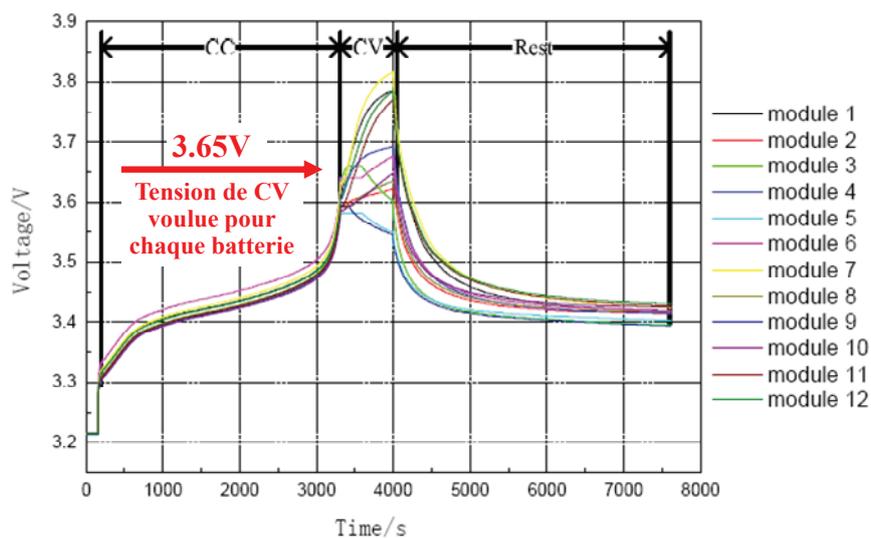


Figure 169 : Evolutions des tensions des 12 batteries Li-ion en série pendant une recharge de « CC/CV » [107]

Deuxièmement, dans le cadre d'un assemblage de cellules en série, la décharge de l'assemblage est limitée par la cellule qui atteint en premier la tension minimale. La recharge est limitée par la cellule qui atteint en premier la tension maximale. Ainsi, pour définir la capacité réelle de l'assemblage des cellules en série, il est nécessaire de connaître la cellule qui limite la décharge et celle qui limite la recharge. Pour ce faire, les définitions de la charge disponible et de la charge acceptable pour une cellule sont proposées et sont illustrées sur la Figure 170. Pour une cellule dont la capacité réelle est $C_{\text{Batt_R\u00e9el}_i}$ et le SoC initial est $\text{SoC}_{\text{Init}_i}$, la charge disponible en d\u00e9charge est exprim\u00e9e par :

$$Q_{\text{Dis}_i} = C_{\text{Batt_R\u00e9el}_i} \cdot \text{SoC}_{\text{Init}_i} \quad (103)$$

La charge acceptable en recharge est calcul\u00e9e par :

$$Q_{\text{Acc}_i} = C_{\text{Batt_R\u00e9el}_i} \cdot (100\% - \text{SoC}_{\text{Init}_i}) \quad (104)$$

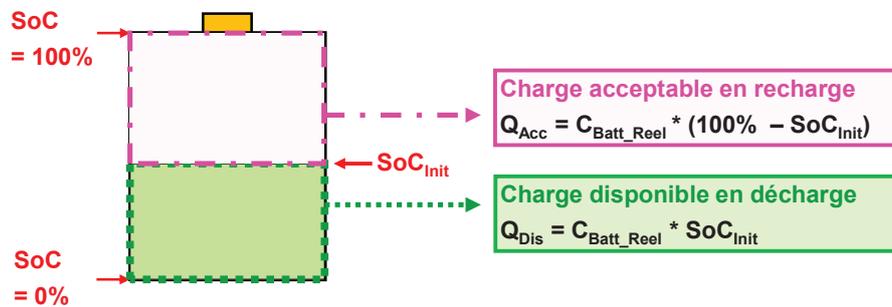


Figure 170 : D\u00e9finitions de charge disponible et de charge acceptable pour une cellule

Ainsi, pour un assemblage avec N cellules en s\u00e9rie, la charge disponible de l'assemblage ($Q_{\text{Dis_Ass}}$) est limit\u00e9e par la cellule dont la charge disponible est la minimale :

$$Q_{\text{Dis_Ass}} = \min_{i=1}^N (Q_{\text{Dis}_i}) \quad (105)$$

La charge acceptable de l'assemblage ($Q_{\text{Acc_Ass}}$) est limit\u00e9e par la cellule dont la charge acceptable est la minimale :

$$Q_{\text{Acc_Ass}} = \min_{i=1}^N (Q_{\text{Acc}_i}) \quad (106)$$

Finalement, la capacit\u00e9 r\u00e9elle de l'assemblage est \u00e9gale \u00e0 la somme de la charge disponible pour l'assemblage ($Q_{\text{Dis_Ass}}$) et de la charge acceptable pour l'assemblage ($Q_{\text{Acc_Ass}}$) :

$$C_{\text{Ass_R\u00e9el}} = Q_{\text{Dis_Ass}} + Q_{\text{Acc_Ass}} = \min_{i=1}^N (Q_{\text{Dis}_i}) + \min_{i=1}^N (Q_{\text{Acc}_i}) \quad (107)$$

Gr\u00e2ce \u00e0 la d\u00e9finition de la capacit\u00e9 r\u00e9elle de l'assemblage, le SoC de l'assemblage peut aussi \u00eatre d\u00e9fini comme l'\u00e9quation (108) :

$$\text{SoC}_{\text{Ass}} = \frac{Q_{\text{Dis_Ass}}}{C_{\text{Ass_R\u00e9el}}} \quad (108)$$

Les d\u00e9finitions de la capacit\u00e9 r\u00e9elle et du SoC de l'assemblage permettent donc d'avoir facilement un indicateur de la jauge de charge disponible de l'assemblage. La Figure 171 pr\u00e9sente un exemple de calcul de la capacit\u00e9 r\u00e9elle et le SoC pour un assemblage de 3 cellules en s\u00e9rie. Comme la 1^{re} cellule a une charge acceptable la plus petite (Q_{Acc_1}) et la 2^{me} cellule a une charge disponible la plus faible (Q_{Dis_2}), la capacit\u00e9 r\u00e9elle de l'assemblage est \u00e9gale \u00e0 la somme de Q_{Acc_1} et Q_{Dis_2} selon

l'équation (107). La charge disponible de l'assemblage est égale à celle de la 2^{ème} cellule. Le SoC de l'assemblage peut donc être facilement calculé avec l'équation (108).

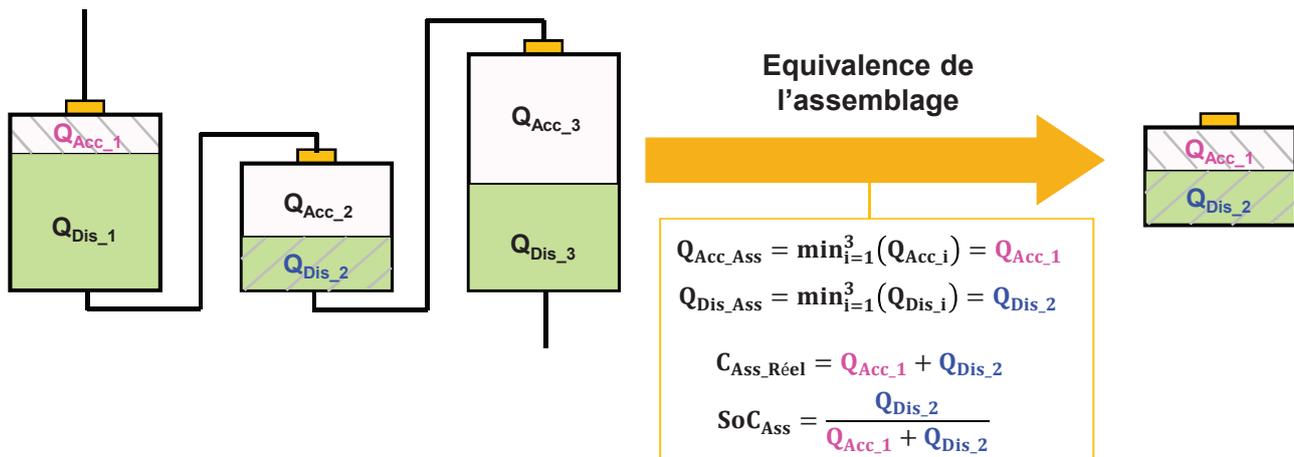


Figure 171 : Exemple illustrant le calcul de la capacité réelle et du SoC de l'assemblage

5.2.2. Exemples d'application de la définition

Des exemples d'applications de la définition de la capacité réelle de l'assemblage sont présentés pour les deux assemblages sur la Figure 172. L'assemblage de la configuration A (Config A) est constitué de deux cellules dont les SoCs sont à 100%. L'assemblage de la configuration B (Config B) contient deux cellules qui sont toutes les deux à 0% de SoC.

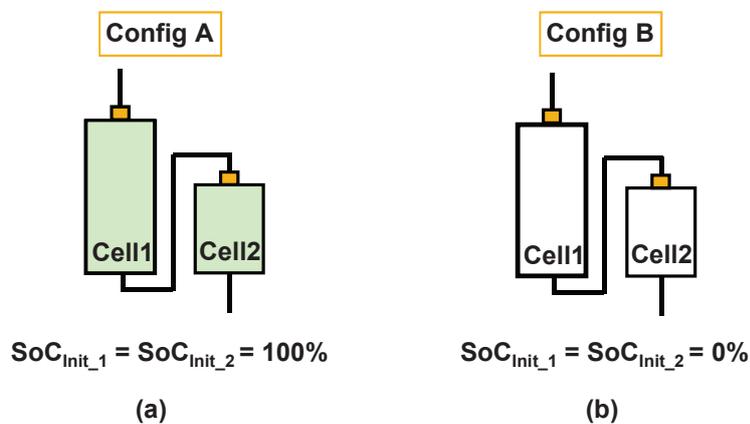


Figure 172 : Deux assemblages pour illustrer la définition de la capacité réelle de l'assemblage

Deux cellules Li-ion de technologie LiFePO₄ d'A123 sont utilisées pour constituer les deux assemblages. Les détails des cellules se trouvent dans le Tableau 47. Les capacités nominales des cellules sont différentes afin d'amplifier la dispersion de leurs caractéristiques. Le courant de référence en décharge (I_{Ref}) est fixé à 1C de la cellule 1. La recharge à courant constant « CC » est utilisée comme protocole de recharge. Les différences entre les capacités nominales et réelles de chaque cellule sont importantes. Celles-ci sont dues au protocole de recharge proposé (qui n'inclut pas de phase « CV ») et au fait que les cellules utilisées ne soient pas saines.

Cellule	Cell1	Cell2
Capacité nominale (Ah)	2.3	1.1
Capacité réelle (Ah) testée au courant de référence $I_{Ref} = 2.3 \text{ A}$	1.895	0.833
Protocole de recharge	Charger la cellule à courant constant à 2.3 A jusqu'à ce que sa tension atteigne la tension maximale 3.6 V	
Plage de tension pour l'utilisation dans l'assemblage (V)	3.6 ~ 2.0	
Photo de cellule		

Tableau 47 : Informations détaillées sur les 2 cellules Li-ion de technologie LiFePO₄ d'A123 utilisées pour constituer les 2 assemblages

Pour l'assemblage de la configuration A (Config A) sur la Figure 172, comme les SoCs initiaux de ses cellules sont de à 100%, la charge disponible de chaque cellule (Q_{Dis_i}) est égale à sa capacité réelle selon l'équation (103) et les charges acceptables des cellules (Q_{Acc_i}) sont toutes à 0Ah selon l'équation (104). La charge disponible de l'assemblage (Q_{Dis_Ass}) est alors égale à la capacité réelle de la petite cellule (Cell2 de 0.833 Ah) selon l'équation (105) et la charge acceptable de l'assemblage (Q_{Acc_Ass}) est nulle selon l'équation (106). Ainsi, la capacité réelle de l'assemblage est égale à la capacité réelle de la cellule 2 qui limitera l'assemblage en décharge. Le SoC initial de l'assemblage est égal à 100%. La Figure 173 présente le résultat d'une décharge de l'assemblage au courant de référence (I_{Ref}). Le courant, la tension de l'assemblage et les tensions des cellules sont les mesures expérimentales. Avec la mesure du courant, l'évolution du SoC de chaque cellule et celle de l'assemblage peuvent être calculées. La Figure 173 indique que la cellule 2 atteint la première la tension minimale, et qu'elle vient bien de limiter l'assemblage en décharge. A cause de la différence en capacité réelle de deux cellules, le SoC de la cellule 2 (Cell2) évolue plus rapidement que celui de la cellule 1 (Cell1). Ainsi, même si les SoCs des cellules sont identiques à 100% au départ, le SoC final de la cellule 2 est inférieur à celui de la cellule 1. Le SoC de l'assemblage est égal au SoC de la cellule 2 dans cet exemple.

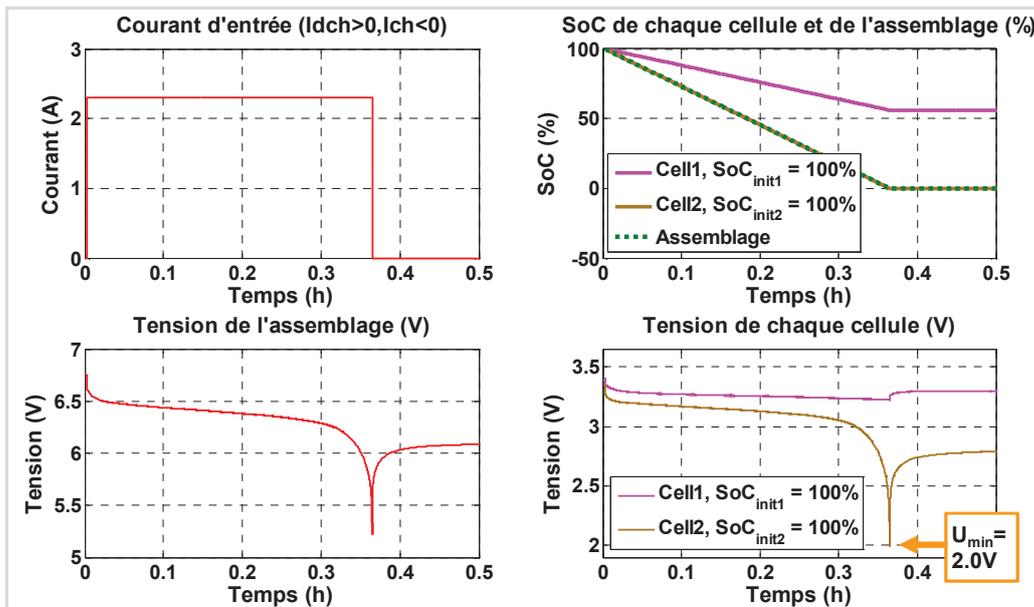


Figure 173 : Décharge de l'assemblage de la configuration A

En faisant le même raisonnement que pour l'assemblage de la configuration A, la capacité réelle de l'assemblage de la configuration B sur la Figure 172 peut être déterminée et elle égale aussi à la capacité réelle de la cellule 2. Pendant la recharge de l'assemblage, ce sera alors la cellule 2 qui atteindra en premier la limite de tension. La Figure 174 illustre le résultat d'une recharge de l'assemblage avec le protocole de recharge du Tableau 47. La Figure 174 montre que la cellule 2 est la première qui atteint la tension maximale et donc elle est bien le limiteur en recharge de l'assemblage. Là aussi, le SoC de l'assemblage est égal au SoC de la cellule 2.

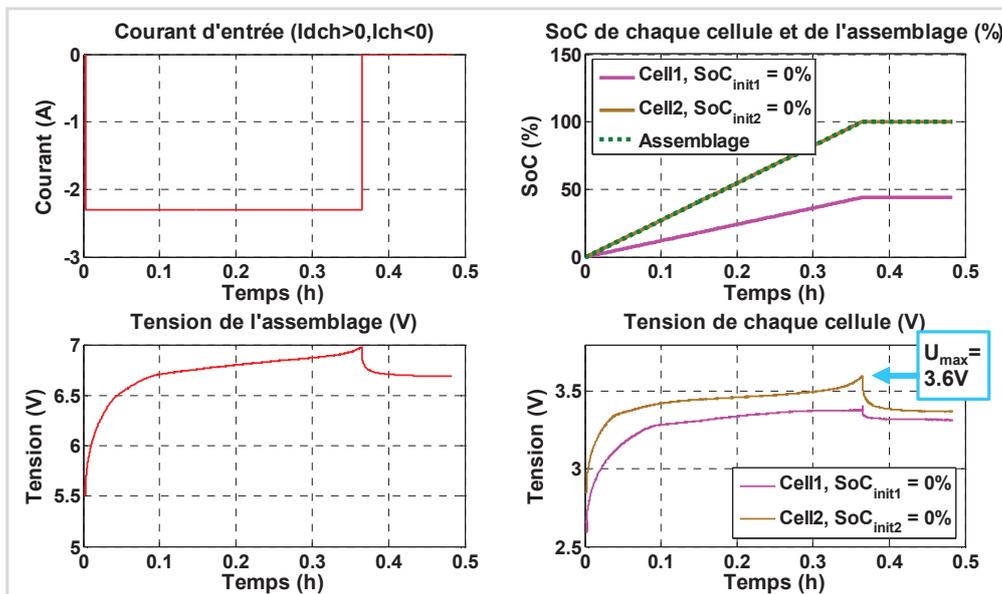


Figure 174 : Recharge de l'assemblage de la configuration B

5.3. Modélisation de l'assemblage

5.3.1. Représentation de l'assemblage

Un assemblage est constitué non seulement de ses cellules, mais aussi du câblage entre les cellules qui peut être représenté par une résistance. Afin de mettre en évidence l'influence du câblage sur la tension de l'assemblage, des mesures illustrées sur la Figure 175 ont été effectuées pour un assemblage de deux cellules en série sollicité par un motif en escalier. Les mesures effectuées sont le courant, la tension de l'assemblage et la tension de chaque cellule. En comparant la tension mesurée de l'assemblage et la somme des tensions mesurées des cellules comme illustré par la Figure 175, des écarts de tension apparaissent lors du régime forcé où le courant de sollicitation n'est pas nul. Ces écarts sont dus à la chute de tension sur la résistance de câblage. Ainsi, la résistance de câblage peut être calculée selon la loi d'Ohm en divisant l'écart entre la tension mesurée de l'assemblage et la somme des tensions mesurées des cellules par l'amplitude du courant. Afin de limiter l'influence du bruit de mesure sur le calcul de la résistance de câblage, le plus grand écart de tension (ΔU), qui est apparu pour le moment où le courant change de 6.45 A à 0 A (ΔI), est utilisé. La résistance de câblage peut être calculée comme l'équation ci-dessous :

$$R_{\text{câb}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{53 \text{ mV}}{6.45 \text{ A}} = 8.2 \text{ m}\Omega \quad (109)$$

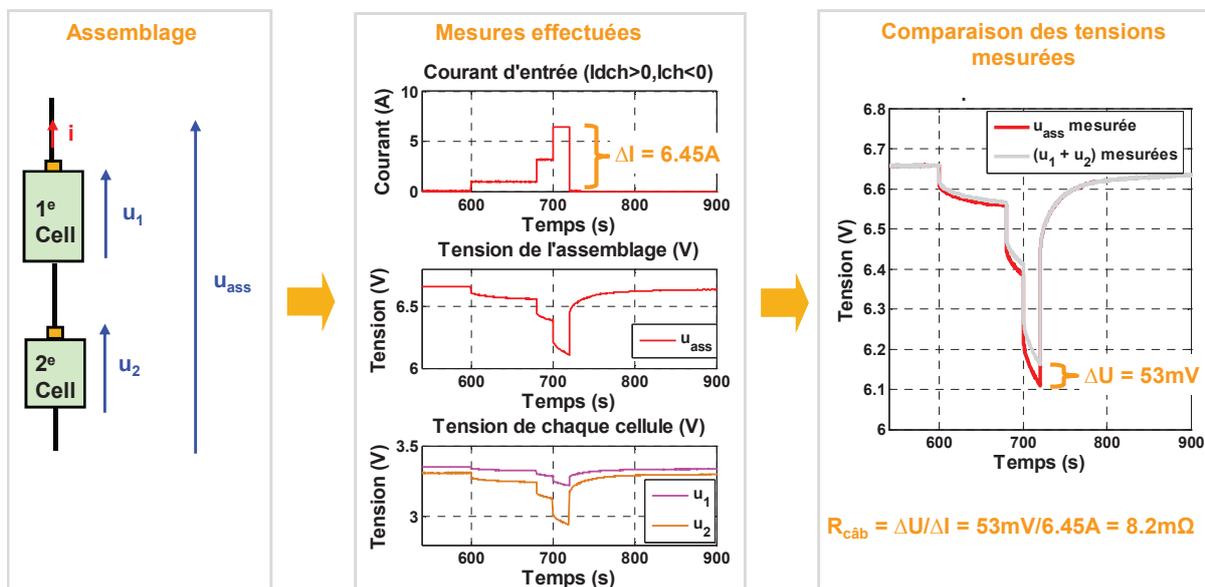


Figure 175 : Mesures de la tension de l'assemblage de deux cellules en série et les tensions de chaque cellule

Cette résistance de câblage a été calculée à un certain niveau de courant. Pour vérifier qu'elle ne dépend pas de la valeur du courant, une comparaison a été effectuée entre les tensions simulée et mesurée sur l'ensemble du motif. La simulation de la chute de tension aux bornes de la résistance de câblage calculée ($u_{R_{\text{câb}}}$) est comparée à l'écart entre la tension mesurée de l'assemblage et la somme des tensions mesurées des cellules ($(u_1 + u_2) - u_{\text{ass}}$). Le résultat de

comparaison, présenté sur la Figure 176, montre que la résistance de câblage calculée représente précisément la chute de tension sur le câblage. Ainsi, la résistance de câblage peut être considérée indépendante du niveau de courant.

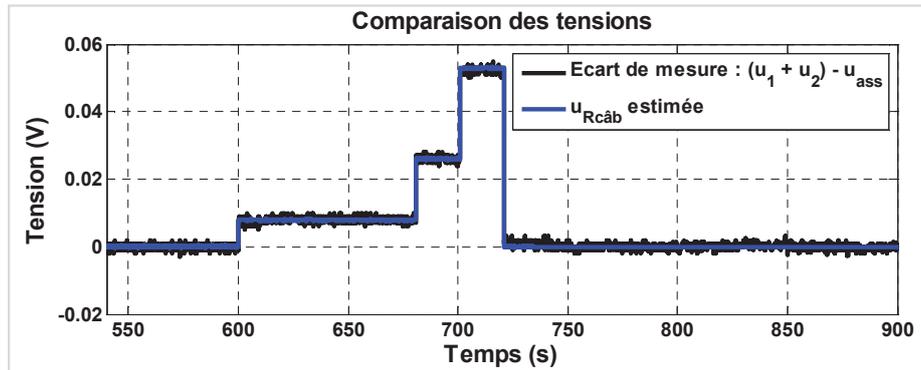


Figure 176 : Comparaison entre la tension simulée de la chute de tension avec la résistance de câblage calculée ($u_{R_{c\grave{a}b}}$) et l'écart entre la tension mesurée de l'assemblage et la somme des tensions mesurées des cellules ($(u_1+u_2) - u_{ass}$)

Finalement, le modèle pour un assemblage de N cellules en série peut être représenté comme illustré sur la Figure 177. Chaque cellule est représentée par un modèle de type circuit électrique dont le détail se trouve sur la Figure 73 du Chapitre 2. Le modèle de chaque cellule peut être obtenu individuellement grâce à la méthode de caractérisation présentée dans le Chapitre 4. Une résistance $R_{C\grave{a}b}$ est utilisée pour représenter la résistance de contact et la résistance liée au câblage entre des cellules. La tension de l'assemblage est donc égale à la somme des tensions des cellules et de la chute de tension sur la résistance de câblage :

$$u_{Ass}(t) = \sum_{i=1}^N u_i(t) + u_{C\grave{a}b}(t) \quad (110)$$

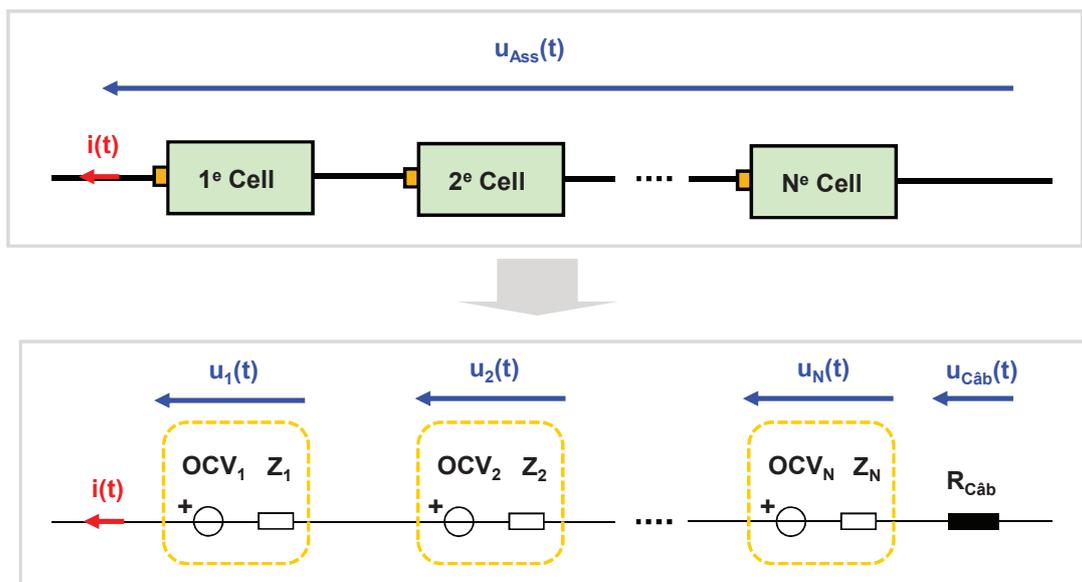


Figure 177 : Modèle de l'assemblage de N cellules en série

5.3.2. Démarche d'évaluation de la performance du modèle de l'assemblage

Afin d'évaluer la performance du modèle de l'assemblage sur la Figure 177, une démarche composée de 4 étapes a été conçue et est illustrée sur la Figure 178 :

- L'étape 1 consiste à caractériser chaque cellule individuellement avec la méthode de caractérisation présentée dans le Chapitre 4. Elle permet d'obtenir les paramètres du modèle de chaque cellule. La capacité et le SoC de chaque cellule considérés sont ceux définis suite à un protocole de recharge à courant constant (CC)
- L'étape 2 consiste à mettre chaque cellule à un SoC voulu et puis assembler les cellules en série. Cela permet de connaître le SoC initial de chaque cellule et d'initialiser les paramètres du modèle de l'assemblage.
- L'étape 3 consiste à appliquer un profil dynamique de courant à l'assemblage afin d'obtenir les mesures des tensions de l'assemblage et de chaque cellule. Les mesures permettent aussi d'identifier la résistance de câblage.
- L'étape 4 consiste à simuler le comportement dynamique du modèle de l'assemblage. Cela permet d'évaluer la performance du modèle en comparant la tension estimée à la tension mesurée de l'assemblage.

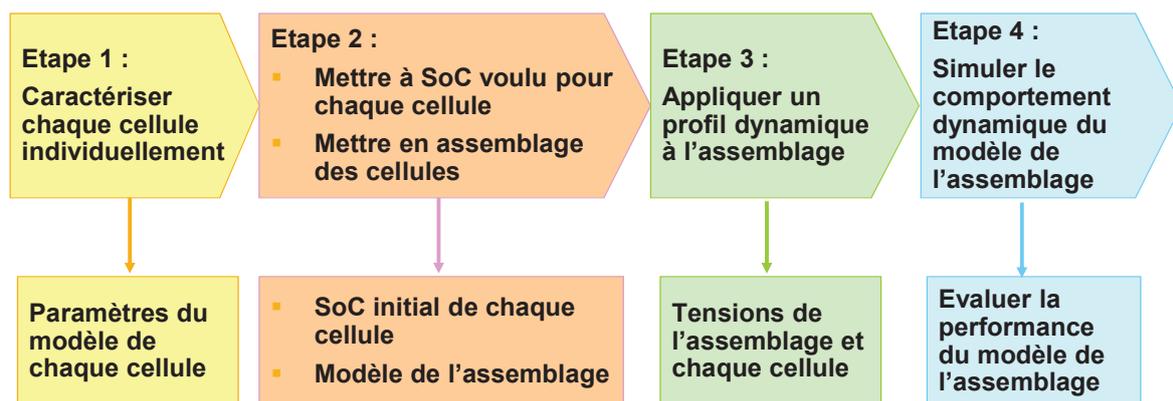


Figure 178 : Illustration de la démarche d'évaluation de la performance du modèle de l'assemblage

5.3.3. Résultats expérimentaux

La démarche de la Figure 178 a été appliquée à 3 différents assemblages constitués par les deux cellules déjà présentées dans le Tableau 47. La configuration de chaque assemblage est présentée sur la Figure 179.

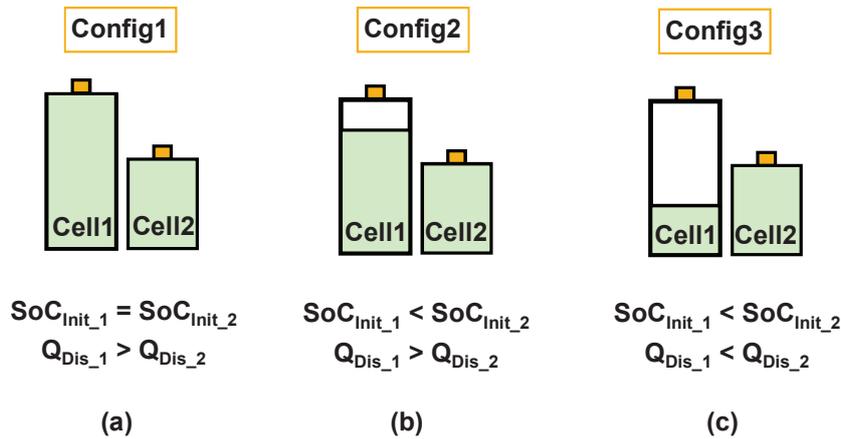


Figure 179 : 3 assemblages avec configurations différentes

Les états de charge initiaux des cellules pour chaque configuration des assemblages sont résumés dans le Tableau 48. Avant la mise en assemblage, les deux cellules sont caractérisées individuellement avec la méthode de caractérisation présentée dans le Chapitre 4. Le Tableau 48 donne aussi les états initiaux de chaque assemblage (Q_{Acc_Ass} , Q_{Dis_Ass} , $C_{Ass_Réal}$ et SoC_{Ass} initial) selon les définitions du paragraphe 5.2.1.

Configuration de l'assemblage	Etats de charge initiaux des cellules		Etats initiaux de l'assemblage			
	SoC_{Init_1}	SoC_{Init_2}	Q_{Acc_Ass} (Ah)	Q_{Dis_Ass} (Ah)	$C_{Ass_Réal}$ (Ah)	SoC_{Ass} initial
Config 1	100%	100%	0	0.833	0.833	100%
Config 2	75%	100%	0	0.833	0.833	100%
Config 3	25%	100%	0	0.474	0.474	100%

Tableau 48 : Etats initiaux des cellules et des assemblages

Les résultats expérimentaux correspondant à l'étape 3 de la Figure 178 pour l'assemblage de la configuration 1 (Config1) sont illustrés sur la Figure 180. Les mesures expérimentales sont le courant du profil dynamique (une partie du profil NEDC), la tension de l'assemblage et les tensions des cellules. Le SoC de la cellule 2 (Cell2) évolue plus rapidement que celui de la cellule 1 (Cell1) à cause du fait que la capacité réelle de la cellule 2 est plus faible que celle de la cellule 1. Ainsi, même si les SoCs des cellules sont identiques à 100% au départ, le SoC final de la cellule 2 est inférieur à celui de la cellule 1 (58.0% pour Cell1 et 4.5% pour Cell2). Comme la cellule 2 a une charge disponible (Q_{Dis_2}) au départ inférieure à celle de la cellule 1 (cf. Config1 de la Figure 179), la cellule 2 est le limiteur en décharge pour l'assemblage de configuration 1. Afin d'éviter de sur-décharger la cellule 2, la décharge a été arrêtée pour une valeur de SoC légèrement supérieure à 0%. Le SoC de l'assemblage est égal au SoC de la cellule 2 dans cette configuration.

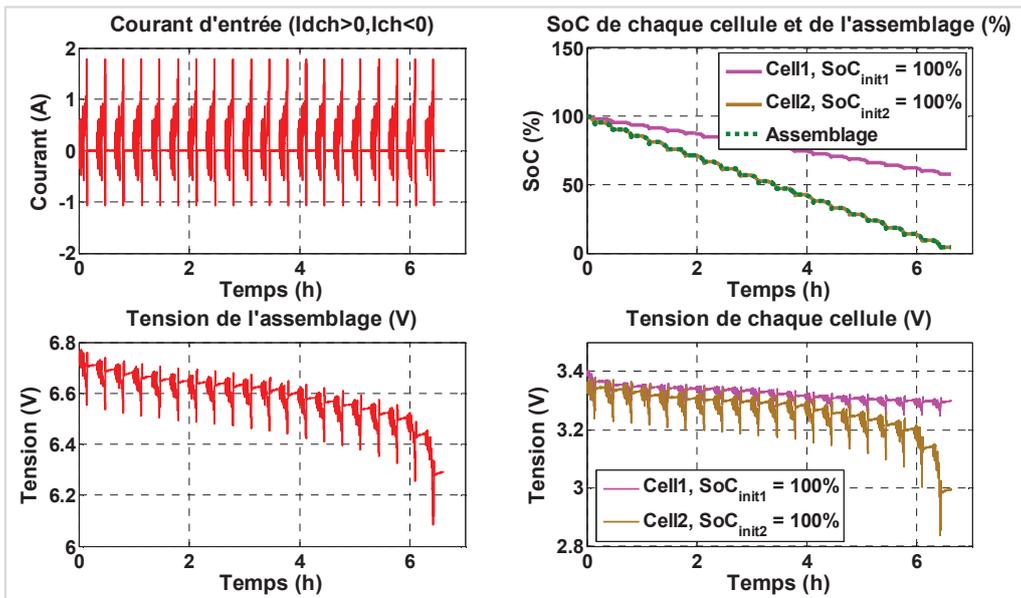


Figure 180 : Résultats expérimentaux pour la décharge de l'assemblage de la configuration 1 (Config1)

Les résultats expérimentaux pour l'assemblage de la configuration 2 (Config2) sont présentés sur la Figure 181. Le limiteur en décharge pour l'assemblage de configuration 2 est aussi la cellule 2 comme elle a initialement une charge disponible (Q_{Dis_2}) inférieure à celle de la cellule 1. Pendant l'application du profil dynamique, les SoCs de deux cellules se croissent. Les SoCs finaux des cellules sont respectivement à 33.2% pour la cellule 1 et à 4.5% pour la cellule 2. Pour cette configuration, le SoC de l'assemblage est égal au SoC de la cellule 1.

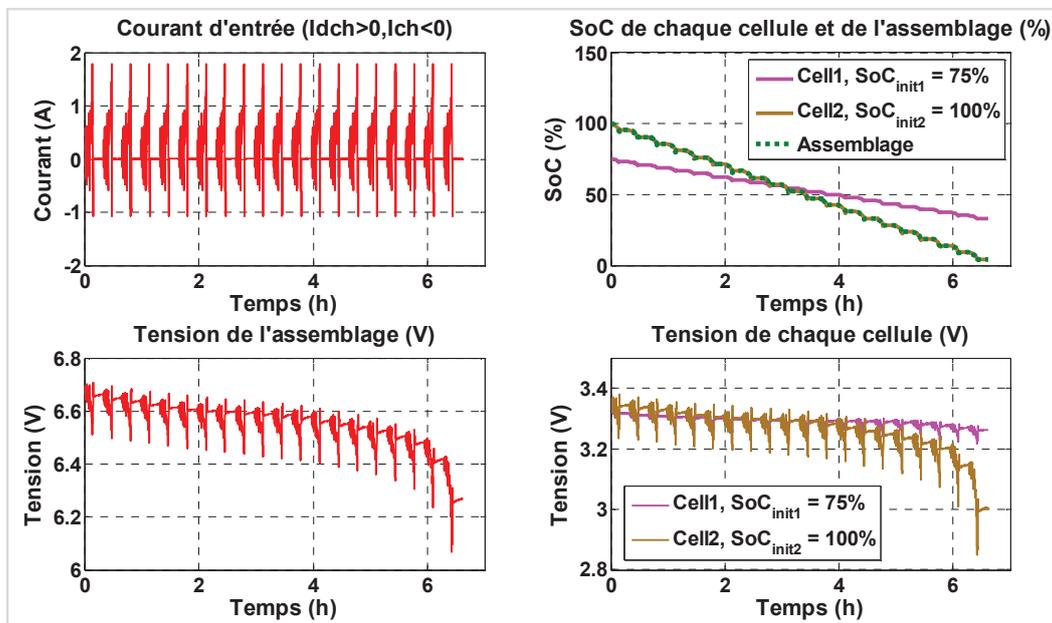


Figure 181 : Résultats expérimentaux pour la décharge de l'assemblage de la configuration 2 (Config2)

Les résultats expérimentaux pour l'assemblage de la configuration 3 (Config3) sont présentés sur la Figure 182. Comme la cellule 1 a initialement une charge disponible (Q_{Dis_1})

inférieure à celle de la cellule 2, le limiteur en décharge est la cellule 1. Après l'application du profil dynamique, les SoCs finaux des cellules sont respectivement à 2.3% pour la cellule 1 et à 47.5% pour la cellule 2. Pour cette configuration, le SoC de l'assemblage n'est égal ni au SoC de la cellule 1 ni au celui de la cellule 2.

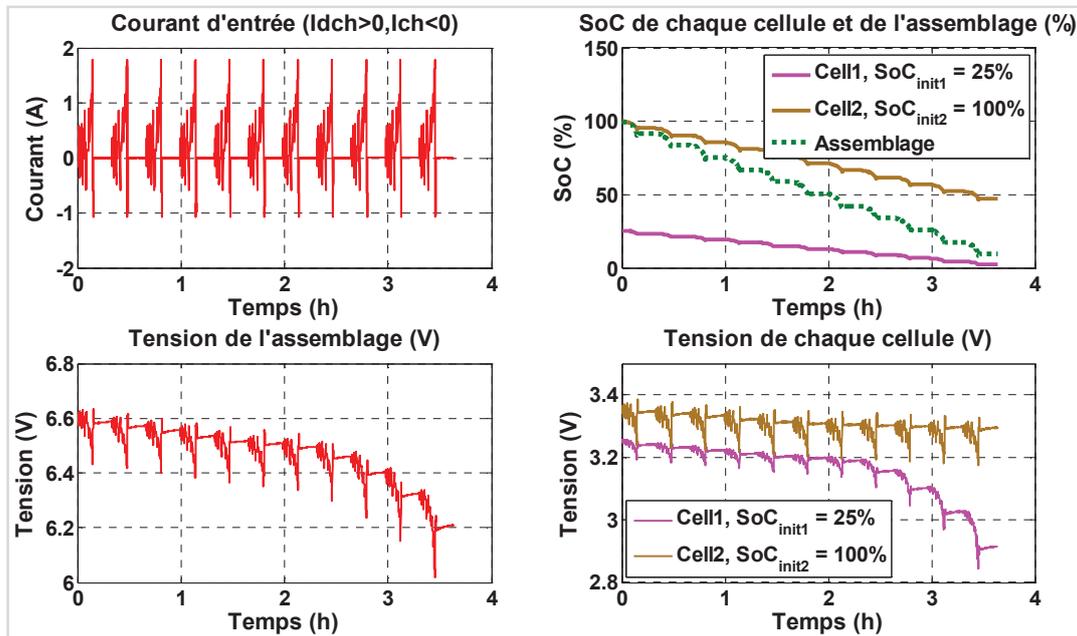


Figure 182 : Résultats expérimentaux pour la décharge de l'assemblage de la configuration 3 (Config3)

5.3.4. Simulation de l'assemblage

Les résultats des simulations des modèles de différents assemblages correspondant à l'étape 4 de la démarche (cf. Figure 178) sont présentés respectivement sur la Figure 183, la Figure 184 et la Figure 185. Les comparaisons entre les tensions mesurées de l'assemblage et les tensions estimées par les modèles montrent que les modèles élaborés sont capables de donner de bonnes estimations sur les comportements dynamiques des assemblages. Les erreurs RMS entre les tensions mesurées et les tensions estimées de l'assemblage sont aussi résumées dans le Tableau 49. Dans ce tableau, l'erreur pour l'assemblage de configuration 3 (Config 3) est plus grande par rapport aux deux autres assemblages. Cette augmentation d'erreur provient principalement de l'écart entre la tension mesurée et la tension estimée pour la fin de décharge (cf. Figure 185) où le SoC de la cellule 1 devient très faible (entre 4.5% et 2.3% selon la Figure 182). Comme le comportement de la cellule devient très non-linéaire aux faibles SoCs (5% ~ 0%), le modèle de la cellule a du mal à représenter la dynamique de la cellule. L'erreur d'estimation devient donc plus grande (cf. 16.1 mV dans le Tableau 49). En effet, en enlevant le dernier motif à la fin de décharge (cf. Figure 185), l'erreur d'estimation devient plus faible et n'est égale qu'à 8.8 mV.

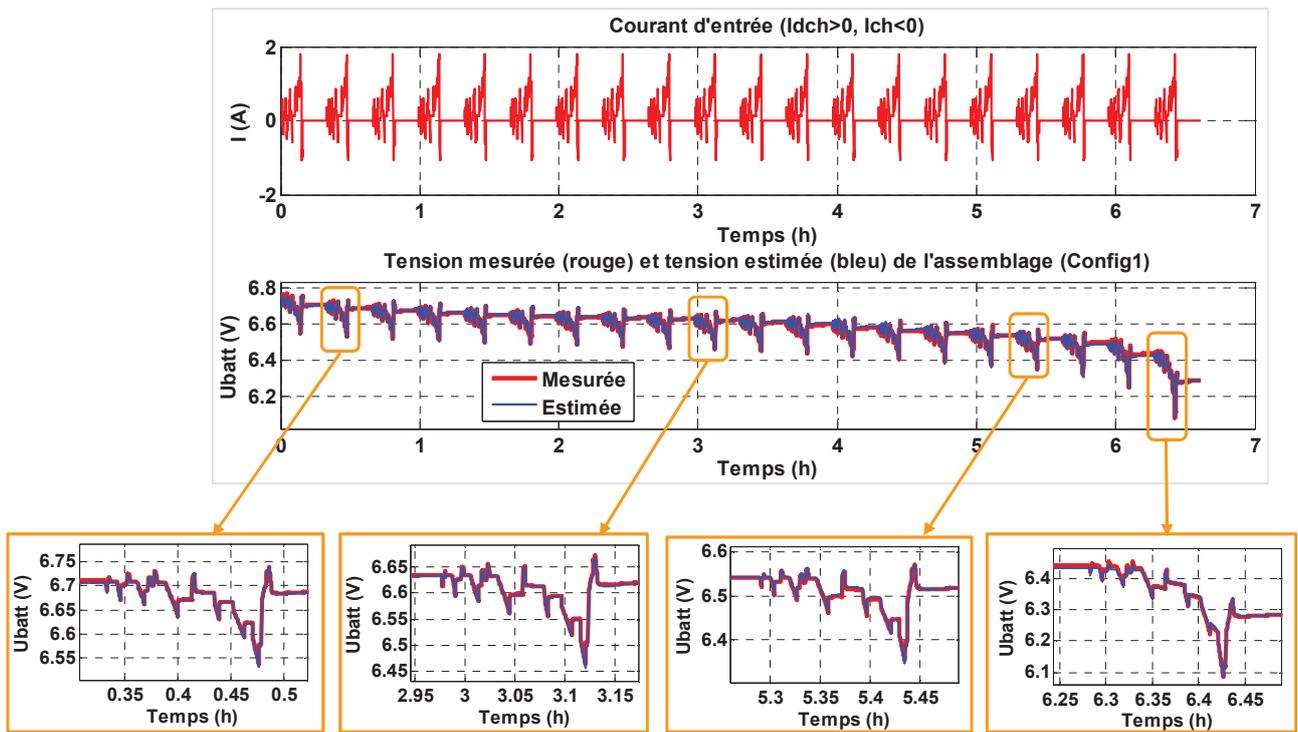


Figure 183 : Comparaison entre la mesure et l'estimation du modèle de l'assemblage de la configuration 1 (Config1)

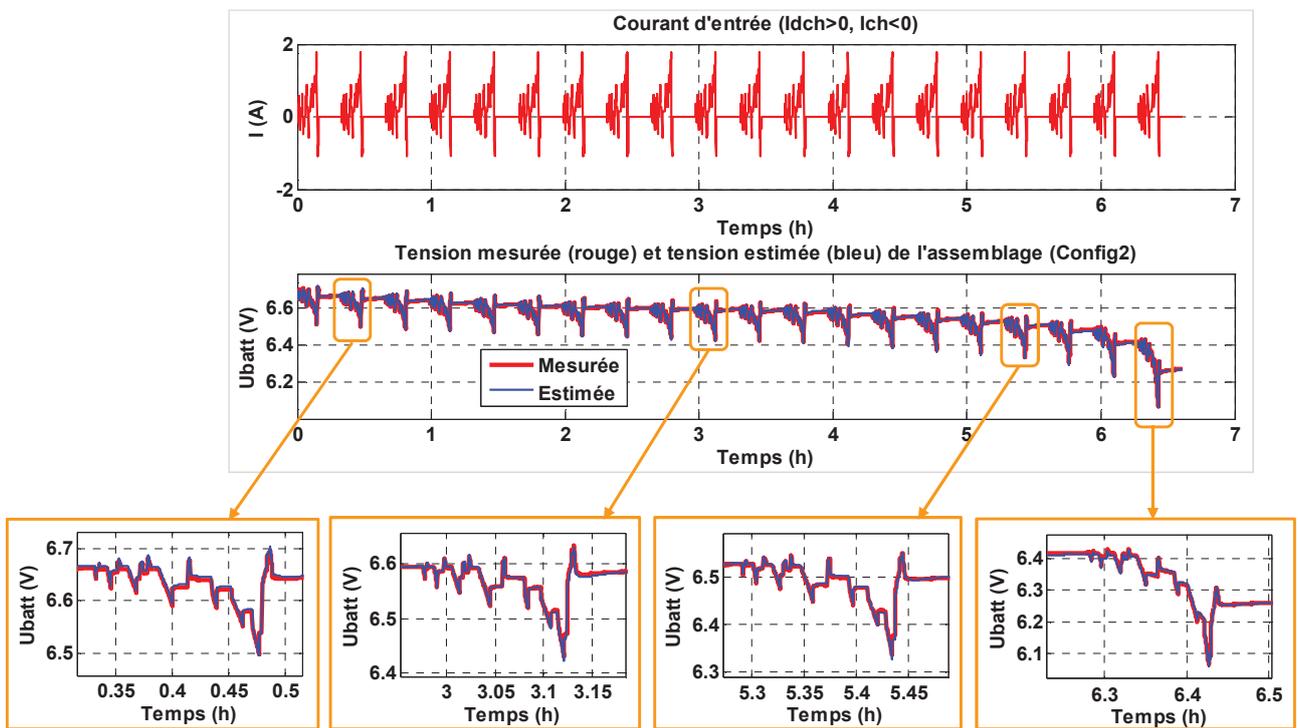


Figure 184 : Comparaison entre la mesure et l'estimation du modèle de l'assemblage de la configuration 2 (Config2)

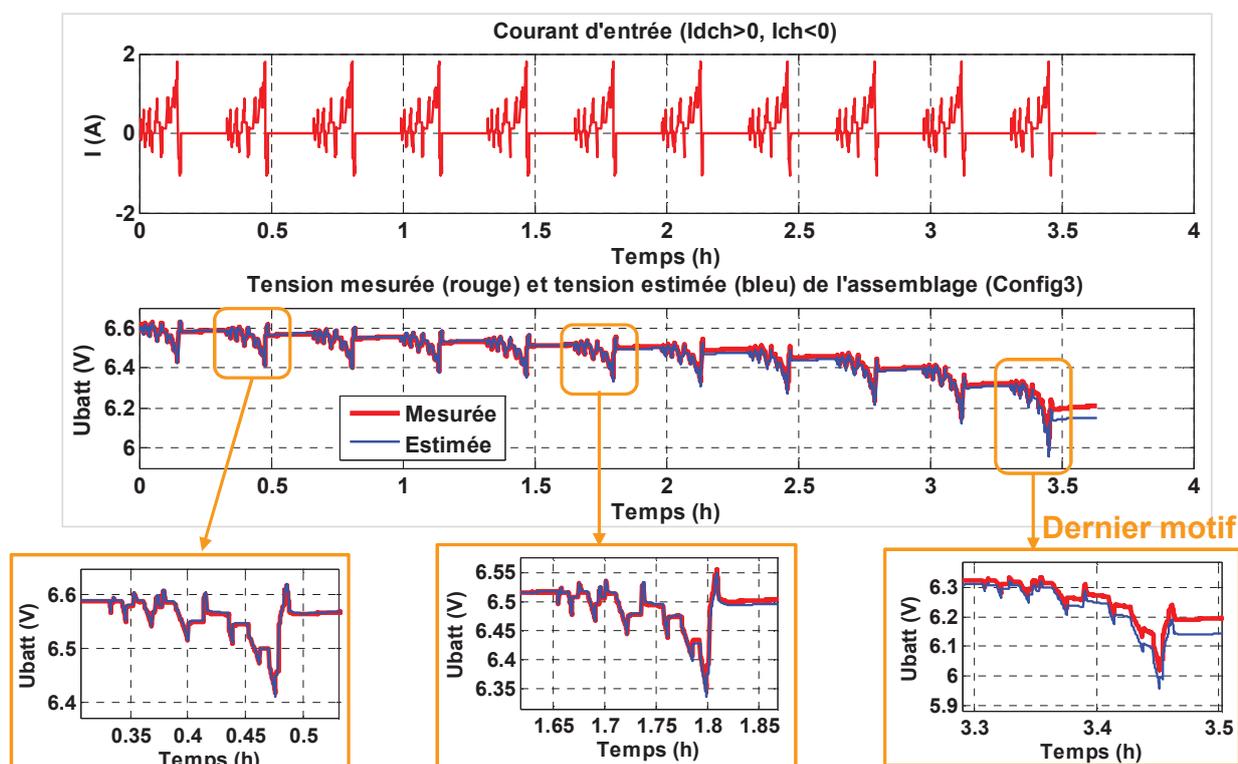


Figure 185 : Comparaison entre la mesure et l'estimation du modèle de l'assemblage de la configuration 3 (Config3)

Assemblage	Erreur RMS du modèle avec 4 circuits R//C		
	Tout profil (mV)	En régime forcé (mV)	En relaxation (mV)
Config 1	5.3	5.5	5.2
Config 2	3.8	4.2	3.6
Config 3	16.1	13.0	17.9

Tableau 49 : Résumé des erreurs RMS entre les tensions mesurées et les tensions estimées des modèles des assemblages

Il est à rappeler que les SoCs des cellules pour les trois assemblages ne sont pas descendus à 0% pendant les essais afin d'éviter la sur-décharge (cf. paragraphe 5.3.3). Or, avec les modèles de différents assemblages, il est possible d'estimer les évolutions de tension de chaque cellule jusqu'à ce qu'une des cellules atteigne sa tension de limite basse ou bien son 0% de SoC. Pour ce faire, il suffit d'effectuer les simulations en ajoutant un motif de sollicitation en plus à la fin de chaque profil du courant de la Figure 183, de la Figure 184 et de la Figure 185. Les résultats de simulations pour les cellules des trois configurations d'assemblage sont présentés respectivement sur la Figure 186, la Figure 187 et la Figure 188. Les résultats de simulation pour les configurations 1 et 2 (cf. Figure 186 et Figure 187) montrent que la cellule 2 (Cell2) atteint la première sa tension de limite (2.0 V). Le SoC calculé à la fin de décharge est alors pratiquement 0% (0.044%). Pour la configuration 3 (cf. Figure 188), la limite en SoC de la cellule 1 (Cell1) est atteinte avant sa limite de tension. Sa tension estimée à la fin de décharge est alors de 2.154 V. Il existe donc une incertitude sur la fin de décharge liée à l'imprécision du modèle dans cette plage de fonctionnement.

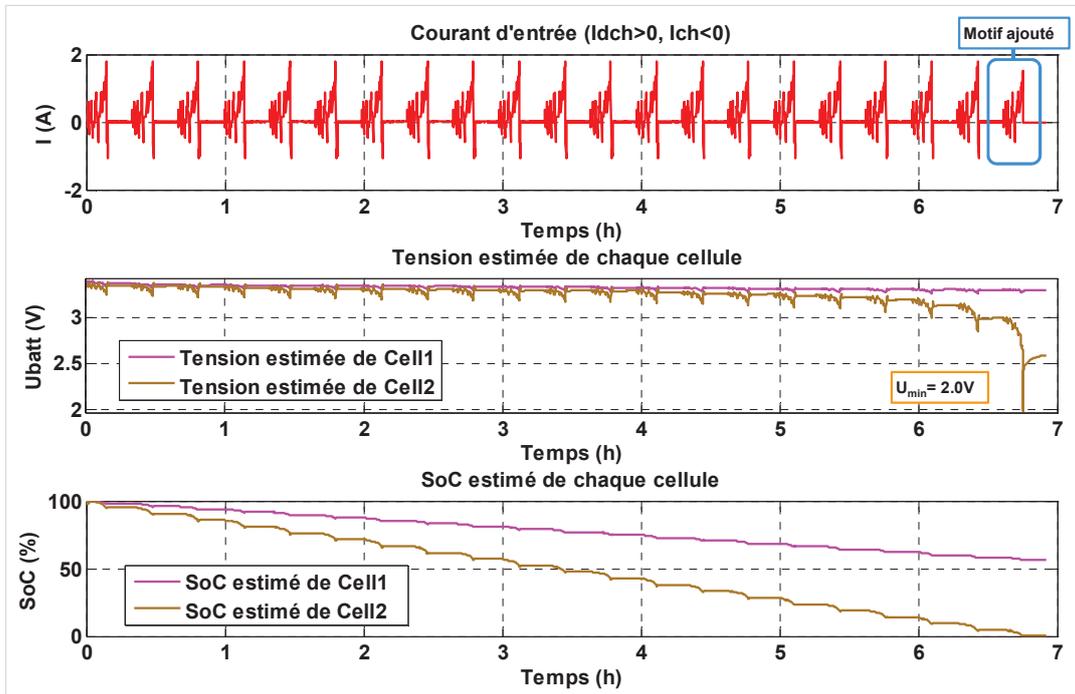


Figure 186 : Simulation des tensions et SoCs de cellules de l'assemblage de la configuration 1 (Config1)

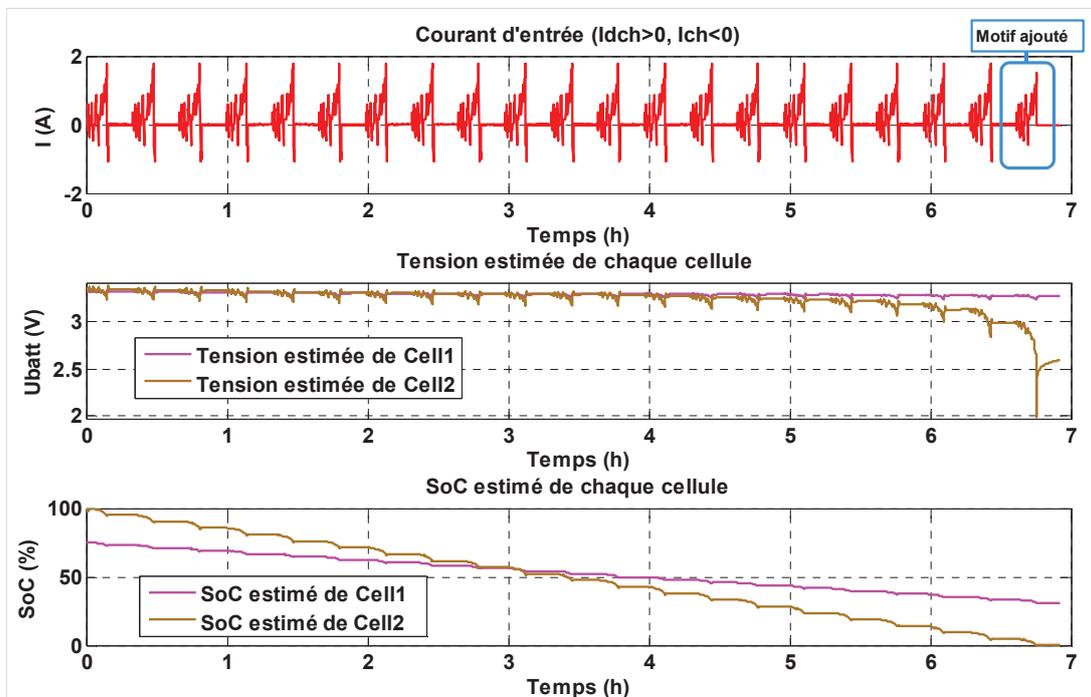


Figure 187 : Simulation des tensions et SoCs de cellules de l'assemblage de la configuration 2 (Config2)

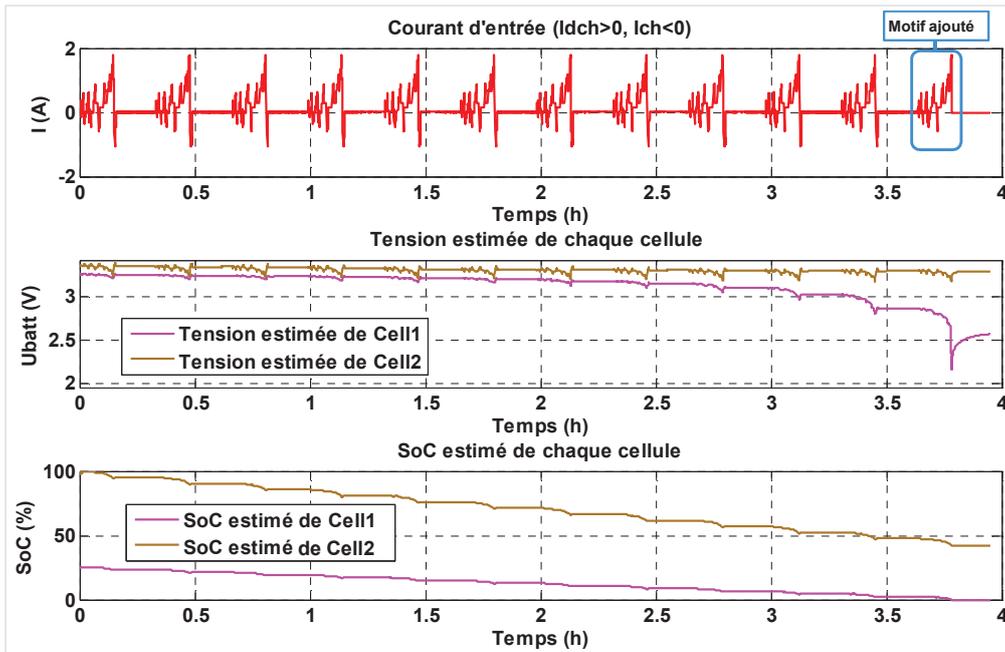


Figure 188 : Simulation des tensions et SoCs de cellules de l'assemblage de la configuration 3 (Config3)

Le modèle de l'assemblage permet aussi d'étudier facilement d'autres cas où les SoCs initiaux des cellules sont différents que ceux des trois assemblages de la Figure 179. Par exemple, la Figure 189 présente une simulation d'un assemblage dans lequel les charges disponibles des cellules sont identiques. Dans ce cas, les SoCs initiaux sont 44% pour la cellule 1 (Cell1) et 100% pour la cellule 2 (Cell2). Bien que les deux cellules aient initialement les mêmes charges disponibles, c'est la cellule 2 (Cell2) qui atteint la première sa tension de limite basse parce qu'elle a une résistance interne plus grande que la cellule 1 (Cell1).

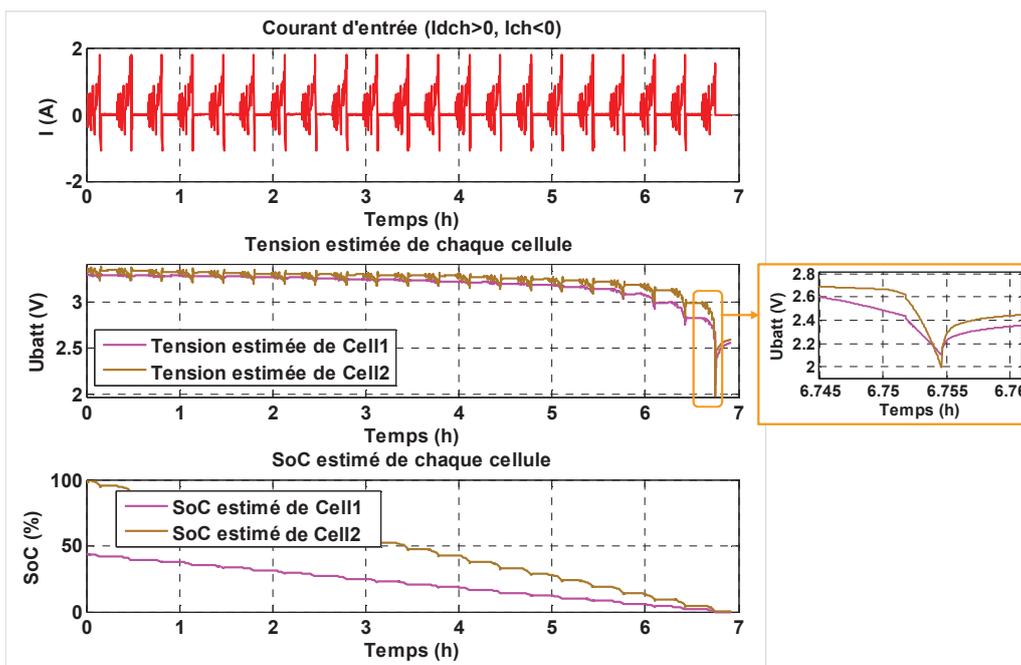


Figure 189 : Simulation des tensions et SoCs de cellules d'un assemblage dans lequel les charges disponibles de ses cellules sont identiques au départ

Conclusion

Dans ce chapitre, deux problématiques sur l'assemblage des cellules en série ont été étudiées : la définition de la capacité réelle et la modélisation de l'assemblage. Dans un premier temps, une définition de la capacité réelle de l'assemblage a été élaborée en s'appuyant sur plusieurs facteurs comme les SoCs initiaux des cellules, les capacités réelles des cellules ainsi que le courant et le protocole de recharge pour tester les capacités réelles des cellules. La capacité réelle de l'assemblage ainsi obtenue permet de prendre en compte la dispersion de la capacité réelle et le SoC des cellules. Dans un deuxième temps, est proposée une approche de la modélisation de l'assemblage en utilisant les modèles individuels des cellules obtenus avec la méthode de caractérisation du Chapitre 4. Les essais de validation ont été menés sur différents assemblages et ont montré que le comportement dynamique de l'assemblage peut aussi être bien représenté avec les modèles de l'assemblage élaborés. Les perspectives des travaux seront d'étendre les définitions énergétiques de l'assemblage des cellules et sa modélisation en série aux cas des cellules en parallèle.

Conclusion générale et perspectives

La connaissance et la gestion de l'énergie du pack de batteries est une problématique majeure dans le cadre du développement des véhicules électriques et hybrides. Pour cela, les constructeurs automobiles ont besoin de modèles numériques pour représenter le comportement dynamique des batteries. L'objectif de cette thèse est de développer, d'une part une méthodologie de caractérisation du comportement dynamique des cellules de batterie et de leurs assemblages et d'autre part des modèles numériques associés qui soient simples, rapides, robustes, présentant le meilleur compromis précision/simplicité.

Le premier chapitre a eu pour vocation d'introduire de manière générale les notions de la batterie et son contexte d'utilisation dans les véhicules électrifiés. Il a montré que, parmi les différentes technologies existantes, les batteries Li-ion et NiMH sont aujourd'hui les deux technologies les plus utilisées pour les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides. Notre étude de thèse s'est donc concentrée sur la modélisation de ces deux technologies de batteries.

Le deuxième chapitre s'est porté sur l'étude bibliographique sur la modélisation de la batterie afin d'identifier un modèle et un type de caractérisation les plus adaptés aux besoins de la thèse. Après une comparaison entre les différents modèles, à savoir, le modèle électrochimique, le modèle de type boîte noire et le modèle de type circuit électrique équivalent, le dernier a été retenu pour sa simplicité de structure, sa rapidité de simulation et de caractérisation, sa robustesse ainsi que sa précision. Ensuite, notre attention s'est portée sur la procédure de caractérisation du modèle de type circuit électrique équivalent dans la littérature ce qui a permis d'identifier deux problématiques qui ne sont pas bien prises en compte dans la littérature : l'intégration de la relaxation dans le modèle et la conception d'une méthodologie générique de caractérisation de batterie adaptée à différents types de batteries. Ces deux problématiques ont donné lieu aux deux grands chapitres suivants dans lesquels de nouvelles solutions ont été proposées.

Le troisième chapitre a traité de l'étude sur la relaxation des batteries afin de clarifier la relation entre ce phénomène et la complexité du modèle. Cette étude a permis d'aboutir à deux outils applicables aux différentes cellules. Le premier outil est une règle générale de calibration de la complexité du modèle qui consiste à déterminer le nombre optimal de circuits R//C à utiliser dans le modèle de batterie en fonction de la durée de relaxation et de la période d'échantillonnage. Le deuxième outil est une méthode d'identification des paramètres du modèle en relaxation.

Le quatrième chapitre a proposé une nouvelle méthode de caractérisation temporelle expérimentale avec un modèle de type circuit électrique équivalent, qui permet de s'appliquer

facilement à différentes batteries et de calibrer la complexité du modèle (nombre de circuits R//C utilisés) en fonction de la durée des mesures lors de la relaxation. Le modèle généré est capable de suivre les évolutions rapides et lentes de la tension de la batterie, ce qui peut améliorer l'estimation de la tension dans les applications BMS (Battery Management System). La méthode de caractérisation a été intégrée dans un logiciel sous Matlab pour faciliter la caractérisation de différentes batteries. Des essais de validations sur différentes batteries, dont trois batteries Li-ion de différents fournisseurs et une batterie NiMH, ont montré que les modèles générés permettent une prédiction précise du comportement dynamique de la batterie. Par ailleurs, afin de réduire la durée de caractérisation expérimentale tout en préservant la précision du modèle obtenu, plusieurs solutions ont aussi été proposées.

Le dernier chapitre a abordé la modélisation des assemblages des cellules en série avec la méthode de caractérisation élaborée dans le chapitre précédent. Des définitions de la capacité réelle et du SoC de l'assemblage ont d'abord été proposées. Elles sont capables de prendre en compte les dispersions en capacités réelles et en SoCs initiaux des cellules. Ces définitions permettent facilement d'obtenir un indicateur de la jauge de charge disponible pour un assemblage quelconque. Puis, la modélisation de l'assemblage avec la méthode de caractérisation élaborée dans le chapitre précédent a été discutée. Les essais de validation ont été menés sur différents assemblages et ont montré que le comportement dynamique de l'assemblage peut aussi être bien représenté avec les modèles identifiés.

Les principaux apports de ce travail sont :

- une compréhension plus approfondie par rapport à la littérature de la relation entre la complexité du modèle de la batterie et la relaxation longue,
- une méthodologie générique de caractérisation expérimentale qui s'applique facilement à différentes batteries et qui prend en compte la relaxation,
- des solutions pour réduire la durée des mesures de caractérisation tout en préservant la précision du modèle dans les phases de relaxation.
- une réflexion quant à la définition énergétique de l'assemblage des cellules en série et à sa modélisation.

Bien évidemment ce travail de thèse ne clôt pas les problématiques auxquelles il a tenté de répondre. Plusieurs axes de recherche font partie des perspectives de la thèse :

- Premièrement, certains résultats de la thèse, comme la règle générale de calibration de la complexité du modèle, l'extrapolation de la relaxation longue et la procédure générique de caractérisation, restent à valider sur plus de technologies de batteries. Cela permettrait d'étendre le périmètre d'utilisation des résultats de la thèse.
- Deuxièmement, la dynamique liée au phénomène de l'hystérésis de l'OCV reste à caractériser. La prise en compte de cette dynamique devrait améliorer l'estimation de l'OCV du modèle.
- Troisièmement, l'influence de la température sur les paramètres du modèle doit être prise en compte. Pour cela, la cellule doit être testée avec la méthode de caractérisation proposée à différentes températures. De plus, un couplage du modèle électrique à un modèle thermique

serait le bienvenu afin de mieux estimer le comportement dynamique des cellules et de leurs assemblages dans le contexte réel des véhicules électrifiés où les cellules subissent des changements de température tout au long de leurs fonctionnements.

- Quatrièmement, il serait aussi intéressant d'intégrer des lois de vieillissement dans le modèle pour tenir compte du vieillissement calendaire (en phase de repos) et du vieillissement par cyclage (en phase de roulage).
- Cinquièmement, les définitions énergétiques de l'assemblage des cellules en série et sa modélisation devraient être étendues aux cas des cellules en parallèle. Différents travaux dans la littérature [106][108] ont montré que le courant traversant chaque cellule en parallèle n'est pas identique. Une estimation précise sur le courant de chaque cellule dans l'assemblage serait primordiale pour garantir la bonne maîtrise du SoC de chaque cellule et de l'énergie disponible de l'assemblage.

Références

- [1] Nouvelles réductions des émissions de CO₂ des voitures et camionnettes, Article vu le 06/09/2012 sur <http://www.automobile-entreprise.com/Nouvelles-reductions-des-emissions,2792>
- [2] Renault Z.E., <http://www.renault-ze.com/fr-fr/gamme-z.e.-6.html>
- [3] J. Robert, J. Alzieu, Accumulateurs au lithium, Techniques de l'ingénieur, D3354, 2005
- [4] A. de Guibert, Le stockage de l'énergie électrique dans les transports, AdG/009.047, Saft, 2009
- [5] Datasheet de la batterie Kokam SLPB 283452H, http://www.kokam.com/english/product/battery_main.html
- [6] Y. Hu, B.J. Yurkovich, S. Yurkovich et al., Electro-thermal battery identification for automotive applications, Technical Presentation, Battery Research Symposium, Center for Automotive Research, Ohio State University, 2009
- [7] J. Pluchet, Etat de la R&D dans le domaine des batteries pour véhicules électriques au Japon, Rapport du stage, Service pour la Science et la Technologie, Ambassade de France au Japon, 2010
- [8] IHS Global Insight, Battery electric and plug-in hybrid vehicles : the advanced energy storage report, volume 2, IHS, 2009
- [9] Véhicule électrique et véhicule électrique hybride, <http://www.voitureelectrique.net>
- [10] J. P. Aditya, M. Ferdowsi, Comparison of NiMH and Li-ion batteries in automotive applications, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Pages 1-6, 2008
- [11] C. Pillot, Present and future market situation for batteries, Advanced Battery Technologies, Frankfurt, 2009
- [12] F. Nemry, G. Leduc, A. Munoz, Plug-in hybrid and battery-electric vehicles : State of the research and development and comparative analysis of energy and cost efficiency, Technical note : JRC 54699, European Commission Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, 2009
- [13] The Battery Pack for Mitsubishi's i MiEV, <http://www.greencarcongress.com/2008/05/the-battery-pac.html>
- [14] A. Sanders, Mitsubishi i-MiEV Technical highlights, 2010, <http://www.autocrc.com/files/File/Mitsubishi%20i-MiEV%20Technical%20Highlights.pdf>
- [15] G. Berdichevsky, K. Kelty, J. Straubel, E. Toomre, The Tesla Roadster Battery System, Tesla Motor, Tesla Motors Inc., 2006, http://webarchive.teslamotors.com/display_data/TeslaRoadsterBatterySystem.pdf
- [16] Datasheet du pack de batterie de Honda Civic obtenu à partir de site internet <http://avt.inel.gov/hev.shtml>
- [17] Datasheet du pack de batterie de Mercedes-Benz S400 obtenu à partir de site internet <http://avt.inel.gov/hev.shtml>
- [18] Traction batteries for EV and HEV applications, <http://www.mpoweruk.com/traction.htm>
- [19] G. L. Plett, Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs, Part 1. Background, Journal of Power Sources, Volume 134, Issue 2, Pages 252-261, 2004
- [20] R. Trigui, B. Jeanneret, F. Badin, Modélisation systémique de véhicules hybrides en vue de la prédiction de leurs performances énergétiques et dynamiques, Construction de la bibliothèque de modèles VEHLIB, Recharge Transports Sécurité, n°83, pages 129-150, 2004
- [21] M. Urbain, Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs Lithium-ion. Estimation en ligne du SoC et du SoH, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009
- [22] A. Patil, V. Patil, D. Shin et al., Issue and challenges facing rechargeable thin film lithium batteries, Materials Research Bulletin, Volume 43, Issues 8-9, Pages 1913-1942, 2008
- [23] D. Aurbach, E. Zinigrad, Y. Cohen et al., A short review of failure mechanisms of lithium metal and lithiated graphite anodes in liquid electrolyte solutions, Solid State Ionics, Volume 148, Issues 3-4, Pages 405-416, 2002
- [24] J.M. Tarascon, C. Masquelier, M. Morcrette et al., Li-ion batteries : Recent advances and future trends, 4th European Conference on Alternative Energies for the Automotive Industry, 2008
- [25] B.J. Landi, M.J. Ganter C.D. Cress et al., Carbon nanotubes for lithium ion batteries, Energy & Environmental Science, Volume 2, Number 6, Pages 638-654, 2009
- [26] W.F. Howard, R.M. Spotnitz, Theoretical evaluation of high-energy lithium metal phosphate cathode materials in Li-ion batteries, Journal of Power Sources, Volume 165, Issue 2, Pages 887-891, 2007

- [27] A. Manuel Stephan, Review on gel polymer electrolytes for lithium batteries, *European Polymer Journal*, Volume 42, Issue 1, Pages 21-42, 2006
- [28] Batscap, La batterie lithium metal polymère, <http://www.batscap.com/la-batterie-lithium-metal-polymere/technologie.php>
- [29] Datasheet de la batterie A123 26650, <http://www.a123systems.com/products-cells-26650-cylindrical-cell.htm>
- [30] Datasheet de la batterie Kokam SLPB 70205130P, http://www.kokam.com/english/product/battery_main.html
- [31] J. Axsen, A. Burke, K. Kurani, Batteries for plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) : Goals and the state of technology circa 2008, Research Report UCD-ITS-RR-08-14, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, 2008
- [32] Datasheet de la batterie GAIA LM 33550, http://www.gaia-akku.com/fileadmin/user_upload/downloads/cells/7%2C5AhUHP_NCA.pdf
- [33] Datasheet de la batterie GS Yuasa LIM 60Ah, http://www.gsyuasa-lp.com/temp/Products/GSYuasa-LIM30H_LIM_60H.pdf
- [34] J. Robert, J. Alzieu, Accumulateurs à oxyde de nickel, *Techniques de l'ingénieur*, D3353, 2005
- [35] M.A. Fetcenko, S.R. Ovshinsky, B. Reichman et al., Recent advances in NiMH battery technology, *Journal of Power Sources*, Volume 165, Issue 2, Pages 544-551, 2007
- [36] John J.C. Kopera, Inside the Nickel Metal Hydride Battery, Cobasys, 2004, http://www.cobasys.com/pdf/tutorial/InsideNimhBattery/..%5Cinside_nimh_battery_technology.pdf
- [37] A. Ledovskikh et al., Modelling of rechargeable NiMH batteries, *Journal of Alloys and Compounds*, Volumes 356-357, Pages 742-745, 2003
- [38] Datasheet de la batterie Saft VH Cs 3500, <http://www.saftbatteries.com/doc/Documents/rechargeable/Cube407/VHCs3500-11120-2-0709.9d901f26-acc8-4216-8336-99b52ce27d47.pdf>
- [39] Datasheet de la batterie Panasonic HHR650D, http://www.panasonic.com/industrial/includes/pdf/Panasonic_NiMH_HHR650D.pdf
- [40] Datasheet de la batterie Sanyo Twicell HR-4/5SCU, <http://www.batteries4pro.com/produits/batteries-accu/4-5cs/accu-1.2v-2100mah-nimh-4-5cs-carton/hr45scu.pdf-155.html>
- [41] E. Kuhn, Contribution à la conception optimale d'une motorisation hybride parallèle : choix d'un modèle d'accumulateur, thèse de l'UTC, 2004
- [42] E. Kuhn, C. Forgez, P. Lagonotte et al., Modelling Ni-mH battery using Causer and Foster structures, *Journal of Power Sources*, Vol. 158, Issue 2, Pages 1490-1497, 2005
- [43] E. Kuhn, C. Forgez, G. Friedrich, Modèle pour accumulateurs Ni-mH en vue d'une application pour véhicule hybride électrique, *Electronique de Puissance du Future*, 2002
- [44] A. Jossen, Fundamentals of battery dynamics, *Journal of Power Sources*, Vol. 154, Issue 2, Pages 530-538, 2005
- [45] M. Park, X. Zhang, M. Chung et al., A review of conduction phenomena in Li-ion batteries, *Journal of Power Sources*, Vol. 195, Issue 24, Pages 7904-7929, 2010
- [46] L. Ménard, G. Fontès, S. Astier, Dynamic energy model of a lithium-ion battery, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 81, Issue 2, Pages 327-339, 2010
- [47] D.V. Do, Diagnostic de batteries Li ion dans des applications embarquées, thèse de l'UTC, 2010
- [48] D.V. Do, C. Forgez, K. El Kadri Benkara et al., Impedance observer for a Li-ion battery using Kalman filter, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 58, Issue 8, Pages 3930-3937, 2009
- [49] M. Montaru, S. Pelissier, Frequency and temporal identification of a Li-ion polymer battery model using fractional impedance, *IFP International Conference-Advances in Hybrid Powertrains*, Vol 65, Number 1, Pages 67-78, 2008
- [50] D. Magnor, N. Soltan, M. Bragard et al., Analysis of the model dynamics for the battery and battery converter in a grid-connected 5kW photovoltaic system, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, EU PVSEC, Art1, 2010
- [51] D. Andre, M. Meiler, K. Steiner et al., Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation, *Journal of Power Sources*, Vol. 196, Issue 12, Pages 5334-5341, 2011

- [52] R.W. J. M. Huang, F. Chung, E.M. Kelder, Impedance simulation of Li-ion battery with porous electrodes and spherical Li⁺ intercalation particles, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 158, n°8, A1459 – A1465, 2006
- [53] W. Lui, C. Delacourt, C. Forgez, S. Pelissier, Study of graphite/NCA Li-ion cell degradation during accelerated aging tests – data analysis of the SimStock Project, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Pages 1-6, 2011
- [54] N. A. Chaturvedi, R. Klein, J. Christensen et al., Algorithms for advanced battery-management systems, *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 30, Issue 3, Pages 49-68, 2010
- [55] W.F. Fang, O. Kwon, C. Wang et al., modeling of Li-ion battery performance in hybrid electric vehicles, *SAE Int. J. Passeng. Cars –Electron. Electr. Syst.*, Volume 2, Issue 1, Pages 418-423, 2009
- [56] T. Dao, C.P. Vyasarayani, J. McPhee, Simplification and order reduction of lithium-ion battery model based on porous-electrode theory, *Journal of Power Sources*, Vol. 198, Pages 329-337, 2012
- [57] M. Chen, G. A. Rincon-Mora, Accurate Electrical Battery Model Capable of predicting runtime and I-V performance, *IEEE transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, Issue 2, Pages 504 – 511, 2006
- [58] S. Tian, M. hong, M. Ouyang, An experimental study and nonlinear modeling of discharge I-V behavior of VRLA batteries, *IEEE transactions on Energy Conversion*, Vol. 24, Issue 2, Pages 452 – 458, 2009
- [59] Y. Hu, S. Yurkovich, Y. Guezennec et al., A technique for dynamic battery model identification in automotive applications using linear parameter varying structures, *Control Engineering Practice*, Vol. 7, Issue 10, Pages 1190-1201, 2009
- [60] M. Urbain, M. Hinaje, S. Raël et al., Energetical modeling of lithium ion batteries including electrode porosity effects, *IEEE Transc. on Energy Conversion*, *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 25, Issue 3, Pages 862-872, 2010
- [61] M. Sarvi, M. Masoum, A neural network model for Ni-Cd batteries, *IEEE Universities Power Engineering Conference*, Pages 1-5, 2008
- [62] A. Munkherjee, *Advances in battery management using neural networks and fuzzy logic*, Cornell University, 2003
- [63] S. Rahimain, S. Rayman, R. White, Comparison of single particle and equivalent circuit analog models for a lithium-ion cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 196, Issue 20, Pages 8450-8462, 2011
- [64] T.K. Dong, A. Kirchev, F. Mattera et al, Dynamic modeling of Li-ion batteries using an equivalent electrical circuit, *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 158, Issue 3, A326-A336, 2011
- [65] M. Montaru, *Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages*, thèse d'INPG, 2009
- [66] S. R. NELATURY, S. Pritpal, Equivalent circuit parameters of NiMH batteries from sparse impedance measurements, *Journal of Power Sources*, Vol. 132, Issues 1-2, Pages 309-314, 2004
- [67] M. Thele, O. Bohlen, D. Sauer et al., Development of a voltage-behavior model for NiMH batteries using an impedance-based modeling concept, *Journal of Power Sources*, Vol. 175, Issue 1, Pages 635-643, 2008
- [68] D. Andre, M. Meiler, K. Steiner et al., Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. II. Modelling, *Journal of Power Sources*, Vol. 196, Issue 12, Pages 5349-5356, 2011
- [69] S. Buller, M. Thele, E. Karden et al., Impedance-based non-linear dynamic battery modeling for automotive applications, *Journal of Power Sources*, Vol. 113, Issue 2, Pages 422-430, 2003
- [70] S. Buller, *Impedance-Based simulation models for energy storage devices in advanced automotive power systems*, PhD dissertation, RWTH Aachen University, 2003
- [71] B.Y. Liaw, G. nagasubramanian, G. Rudolph et al., Modelling of lithium ion cells - A simple equivalent-circuit model approach, *Solid State Ionics*, Vol. 175, Issues 1-4, Pages 835-839, 2004
- [72] M. Dubarry, B.Y. Liaw, Development of a universal modeling tool for rechargeable lithium batteries, *Journal of Power Sources*, Vol. 174, Issue 2, Pages 856-860, 2007
- [73] S. Barsali, M. Ceraolo, Dynamical models of lead-acid batteries : implementation issues, *IEEE Trans on Energy Conversion*, Vol. 17, Issue 1, Pages 16-23, 2002
- [74] S. Abu-Sharkh, D. Doerffel, Rapid test and non-linear model characterization of solid-state lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, Vol. 130, Issues 1-2, Pages 266-274, 2004
- [75] N. Hamad, *Vehicle VRLA battery modeling and fault diagnosis*, SAE, Paper Number 2010-01-0028, 2010

- [76] A. Böhm, J. Melbert, Modeling of automotive batteries for high transient and amplitude dynamics, SAE, Paper Number 2004-01-3038, 2004
- [77] A. Szumanowski, C. Yuhua, Battery Management System based on battery nonlinear dynamics modeling, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 57, Issue 3, Pages 1425-1432, 2008
- [78] C. Zhang, J. Liu, S. Sharkh et al., Identification of Dynamic Model Parameters for Lithium ion batteries used in hybrid electric vehicles, International Symposium on Electric Vehicles (ISEV), 2009
- [79] M. Knauff, D. Niebur, C. Nwankpa, A platform for the testing and validation of dynamic battery models, IEEE Electric Ship Technologies Symposium, Pages 554-559, 2009
- [80] B. Schweighofer, K.M. Raab, G. Brasseur, Modeling of high power automotive batteries by the use of an automated test system, IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, Vol. 52, Issue 4, Pages 1087-1091, 2003
- [81] J. Zhang, S. Ci, H. Sharif et al., An enhanced circuit-based model for single-cell battery, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Pages 672-675, 2010
- [82] L. Serrao, Z. Chehab, Y. Guezennec et al., An aging model of Ni-MH batteries for hybrid electric vehicles, IEEE Vehicle Power and Propulsion, 2005
- [83] R. Kroeze, P.T. Krein, Electrical battery model for use in dynamic electric vehicle simulations, IEEE Power Electronics Specialists Conference, Pages 1336 – 1342, 2008
- [84] Y. Hu, S. Yurkovich, Y. Guezennec et al., Electro-thermal battery model identification for automotive applications, Journal of Power Sources, Vol. 196, Issue 1, Pages 449-457, 2011
- [85] Y. Hu, Identification and state estimation for linear parameter varying systems with application to battery management system design, PhD dissertation, The Ohio State University, 2010
- [86] B. S. Bhangu, P. Bentley, D.A. Stone et al., Nonlinear observers for predicting state-of-charge and state-of-health of lead-acid batteries for hybrid-electric vehicles, IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 54, Issue 3, Pages 783-794, 2005
- [87] A. Vasebi, M. Partovibakhsh, S. Bathaee, A novel combined battery model for state-of-charge estimation in lead-acid batteries based on extended Kalman filter for hybrid electric vehicle applications, Journal of Power Sources, Vol. 174, Issue 1, Pages 30-40, 2007
- [88] T. Hund, D. Ingersoll, Selected test results from the LiFeBatt Iron Phosphate Li-ion battery, Sandia Report, SAND2008-5583, Sandia National Laboratories, 2008
- [89] BioLogic Science Instruments, <http://www.bio-logic.info/potentiostat/vmp3.html>
- [90] Arbin Instruments, <http://www.arbin.com/products/battery>
- [91] Digatron firing circuits, <http://www.digatron.com/en/battery-testing-formation/automotive-batteries/universal-battery-tester/>
- [92] Battery test manual for plug-in hybrid electric vehicles, U.S. Department of Energy, INL/EXT-07-12536, 2008
- [93] D. Doerffel, S.A. Sharkh, A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries, Journal of Power Sources, Vol. 155, Issue 2, Pages 395-400, 2006
- [94] N. Omar, P. Van den Bossche, G. Mulder et al., Assessment of performance of lithium iron phosphate oxide, nickel manganese cobalt oxide and nickel cobalt aluminum oxide based cells for using in plug-in battery electric vehicle applications, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Pages 1-7, 2011
- [95] D. Zhang, B.S. Haran, A. Durairajan et al., Studies on capacity fade of lithium-ion batteries, Journal of Power Sources, Vol. 91, Issue 2, Pages 122-129, 2000
- [96] M. Einhorn, V. Conte, C. Kral et al., Comparison of electrical battery models using a numerically optimized parameterization method, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Pages 1-7, 2011
- [97] M. A. Roscher, D. U. Sauer, Dynamic electric behavior and open-circuit-voltage modeling of LiFePO₄-based lithium ion secondary batteries, Journal of Power Sources, Vol. 196, Issue 1, Pages 331-336, 2011
- [98] H. Zhang, M. Chow, Comprehensive dynamic battery modeling for PHEV applications, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Pages 1-6, 2010
- [99] Advanced Technology Development Program for Lithium-ion batteries : Gen 2 Performance Evaluation Final Report, FreedomCar & Vehicle Technologies Program, Idaho National Laboratory, INL/EXT-05-00913, 2006
- [100] B. Quentin, Etude des mécanismes et modélisation du vieillissement des batteries lithium-ion dans le cadre d'un usage automobile, thèse de doctorat de l'Université Paris Sud, 2012

- [101]N. Picciano, Battery aging and characterization of Nickel Metal Hydride and Lead Acid batteries, Engineering Honors Undergraduate Research thesis, The Ohio State University, 2007
- [102]X. Hu, S. Li, P. Hwei, A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries, Journal of Power Sources, Vol. 198, Pages 359-367, 2012
- [103]U. Tröltzsch, O. Kanoun, H. Tränkler, Characterizing aging effects of lithium ion batteries by impedance spectroscopy, Electrochimica Acta, Vol 51, Issues 8-9, Pages 1664-1672, 2006
- [104]Documentation Matlab : <http://www.mathworks.com/help/toolbox/optim/ug/lsqlcurvefit.html>
- [105]A. LI, P. Gyan, S. Pelissier, P. Venet, Dispositif de caractérisation de batteries, demande de brevet, FR1257328, 2012
- [106]J. Zhang, S. Ci, H. Sharif et al., Modeling discharge behavior of multicell battery, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol 25, Issue 4, Pages 1133-1141, 2010
- [107]F. Feng, R. Lu, G. Wu et al., A measuring method of available capacity of Li-ion series battery pack, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Pages 389-394, 2012
- [108]M. Wu, C. Lin, Y. Wang et al., Numerical simulation for the discharge behaviors for batteries in series and/or parallel-connected battery pack, Electrochimica Acta, Vol 52, Pages 1349-1357, 2006

Annexes

Annexe 1. Détail de calcul de N pour l'équation (41)

L'équation $N = \text{Troncature de } \left(\frac{\log\left(\frac{\Delta t_{\text{Relax}}}{\alpha \cdot T_e \cdot \beta}\right)}{\log(\gamma)} \right) + 1$ est obtenue ainsi :

On sait que $\tau_{N_Relax} \leq \frac{\Delta t_{\text{Relax}}}{\beta}$ (cf. l'équation (40)) et $\tau_{N_Relax} = \gamma^{N-1} \cdot \alpha \cdot T_e$ (cf. Tableau 17). On peut donc déduire :

$$\gamma^{N-1} \cdot \alpha \cdot T_e \leq \frac{\Delta t_{\text{Relax}}}{\beta} \quad (111)$$

Ce qui donne :

$$\gamma^{N-1} \leq \frac{\Delta t_{\text{Relax}}}{\alpha \cdot T_e \cdot \beta} \quad (112)$$

Par la suite, on peut avoir :

$$\log(\gamma^{N-1}) \leq \log\left(\frac{\Delta t_{\text{Relax}}}{\alpha \cdot T_e \cdot \beta}\right) \quad (113)$$

Et puis, on déduit :

$$N \leq \frac{\log\left(\frac{\Delta t_{\text{Relax}}}{\alpha \cdot T_e \cdot \beta}\right)}{\log(\gamma)} + 1 \quad (114)$$

Finalement, en utilisant la fonction de troncature, on peut obtenir :

$$N = \text{Troncature de } \left(\frac{\log\left(\frac{\Delta t_{\text{Relax}}}{\alpha \cdot T_e \cdot \beta}\right)}{\log(\gamma)} \right) + 1 \quad (115)$$

Annexe 2. Détail de calcul de M_{\max} pour l'équation (55)

L'équation $M_{\max} = \text{ceil}\left(\frac{\log(\Delta t_{\text{Relax}}) - \log(5 \cdot \tau_1)}{\log(\gamma_{\text{rec}})}\right) + 1$ est obtenue ainsi :

On sait que $5 \cdot \tau_{M_{\max}} = 5 \cdot \tau_1 \cdot (\gamma_{\text{rec}})^{M_{\max}-1} \geq \Delta t_{\text{Relax}}$ (cf. l'équation (54)). On peut donc déduire :

$$\log(5 \cdot \tau_1 \cdot (\gamma_{\text{rec}})^{M_{\max}-1}) \geq \log(\Delta t_{\text{Relax}}) \quad (116)$$

A partir de l'équation (116), on peut avoir :

$$M_{\max} \geq \frac{\log(\Delta t_{\text{Relax}}) - \log(5 \cdot \tau_1)}{\log(\gamma_{\text{rec}})} + 1 \quad (117)$$

Finalement, en utilisant la fonction $\text{ceil}()$, on peut obtenir :

$$M_{\max} = \text{ceil}\left(\frac{\log(\Delta t_{\text{Relax}}) - \log(5 \cdot \tau_1)}{\log(\gamma_{\text{rec}})}\right) + 1 \quad (118)$$

Annexe 3. Calcul de M0 pour l'équation (56)

L'équation $M0 = \text{ceil}\left(\frac{\log(T_e) - \log(\tau_1)}{\log(\gamma_{\text{rec}})}\right) + 1$ est obtenue ainsi :

On sait que $\tau_{M0-1} \leq T_e \leq \tau_{M0}$ et que $\tau_{M0} = \tau_1 \cdot (\gamma_{\text{rec}})^{M0-1}$ (cf. l'équation (53)). On peut donc déduire :

$$T_e \leq \tau_1 \cdot (\gamma_{\text{rec}})^{M0-1} \quad (119)$$

A partir de l'équation (119), on peut avoir :

$$\log(T_e) \leq \log(\tau_1 \cdot (\gamma_{\text{rec}})^{M0-1}) \quad (120)$$

L'équation (120) donne ensuite :

$$M0 \geq \frac{\log(T_e) - \log(\tau_1)}{\log(\gamma_{\text{rec}})} + 1 \quad (121)$$

Finalement, en utilisant la fonction $\text{ceil}()$, on peut obtenir :

$$M0 = \text{ceil}\left(\frac{\log(T_e) - \log(\tau_1)}{\log(\gamma_{\text{rec}})}\right) + 1 \quad (122)$$

Annexe 4. Détail de la procédure de caractérisation expérimentale d'une cellule

La procédure générique de caractérisation expérimentale d'une cellule quelconque est élaborée suivant la démarche d'identification des paramètres du modèle de la Figure 121. Elle est constituée de deux phases :

- **phase de préparation** pour recueillir les informations sur la cellule testée et définir les conditions expérimentales (par exemple, banc de test utilisé, température d'essai).
- **phase d'expérimentation** pour obtenir, par plusieurs essais indépendants, les mesures de tension et de courant nécessaires pour identifier le modèle de la cellule.

A.1. Phase de préparation

A.1.1. Renseignement des informations sur la cellule testée

Les informations nécessaires pour configurer les essais expérimentaux sont résumées dans le Tableau 50. Ces informations peuvent être obtenues à partir de la spécification de la cellule fournie par le constructeur. Parfois, les informations liées à la décharge ou charge en impulsion ne sont pas indiquées dans la spécification. Dans ce cas, leurs valeurs sont égales à celles liées à la décharge ou charge en continu.

Catégorie	Description	Unité
Capacité	Capacité nominale (C_{Batt_Nom})	Ah
Courant	Courant de décharge maximal en continu ($I_{max_Dch_Con}$)	A
	Courant de décharge maximal en impulsion ($I_{max_Dch_Imp}$)	A
	Courant de charge maximal en continu ($I_{max_Cha_Con}$)	A
	Courant de charge maximal en impulsion ($I_{max_Cha_Imp}$)	A
Tension	Tension minimale pour la décharge en continu (U_{min_Con})	V
	Tension maximale pour la charge en continu (U_{max_Con})	V
	Tension minimale pour la décharge en impulsion (U_{min_Imp})	V
	Tension maximale pour la charge en impulsion (U_{max_Imp})	V
Température	Température d'opération maximale (T_{max})	°C
	Température d'opération minimale (T_{min})	°C

Tableau 50 : Informations nécessaires sur les spécifications de la cellule

A.1.2. Définition des conditions expérimentales

Les essais de caractérisation se font avec un ou plusieurs bancs de test de batterie ainsi qu'une enceinte thermique qui permet de réguler la température ambiante de la cellule à une valeur constante. Pour le bon déroulement des essais, il est nécessaire de définir plusieurs conditions expérimentales comme suit :

- **Protocole de charge complète**

Il est utilisé pour charger la cellule à 100% de SoC. La méthode de charge souvent utilisée pour les cellules Li-ion est celle appelée « Courant constant/Tension constante ». Elle consiste d'abord à charger la cellule à un courant constant à I_{const} jusqu'à ce que la tension atteigne U_{Max_Con} , puis charger avec une tension constante égale à la tension précédente jusqu'à ce que le courant diminue et atteigne une valeur d'arrêt de courant I_{fin_Cha} . Si le constructeur n'indique pas la valeur d'arrêt de courant, C/10 est une valeur communément admise.

- **Protocole d'échantillonnage**

Il consiste à définir les périodes d'échantillonnage (T_e) utilisées respectivement en régime forcé et en relaxation. Afin de limiter le nombre de points de mesure pendant les relaxations longues, il a été mise en place une stratégie d'échantillonnage à période variable dont le détail est présenté dans l'Annexe 5. Dans le cadre de la thèse, les périodes d'échantillonnage utilisées par défaut sont présentées dans le Tableau 51. Le choix de 0.1 s pour la période d'échantillonnage minimale permet d'observer des constantes de temps de l'ordre de la seconde ($\times 1$ s) en accord avec le cahier des charges de la thèse. De plus, la plupart des bancs de test peuvent fonctionner avec une telle période d'échantillonnage.

Période d'échantillonnage	En régime forcé	En relaxation			
		Premières 50s	450s suivantes	4500s suivantes	le reste
T_e (s)	0.1	0.1	1	10	100

Tableau 51 : Périodes d'échantillonnage (T_e) utilisées dans le cadre de la thèse

- **Protocole de sécurité**

Il consiste à définir pour la cellule sa plage de tension autorisée ($[U_{min_Essai}, U_{max_Essai}]$) et sa température maximale autorisée (T_{max}). Par défaut, la plage de tension autorisée est déterminée par les tensions maximales et minimales en impulsions du Tableau 50 ($[U_{min_Essai}, U_{max_Essai}] = [U_{min_Imp}, U_{max_Imp}]$). La température maximale autorisée est égale à la température d'opération maximale de la cellule ($T_{max_Essai} = T_{max}$). Etant donné qu'un essai est constitué de plusieurs étapes (par exemple, charge, décharge, repos), si la tension de la cellule sort de la plage de tension autorisée dans une étape, le banc passe à l'étape suivante de l'essai en cours. Si la température de la cellule dépasse la température maximale autorisée, le banc stoppe l'essai en cours.

A.2. Phase d'expérimentation

La phase d'expérimentation contient 4 essais.

A.2.1. Essai 1 : Activation et test de capacité réelle

Les deux buts de l'essai 1 sont d'activer la cellule et de tester sa capacité. L'activation de la cellule se fait par des cycles de charge/décharge. Elle permet de stabiliser la performance de la cellule. Aucun paramètre n'est identifié à partir de l'essai d'activation. Le détail de l'activation de l'essai 1 se trouve dans le Tableau 52. Les paramètres de l'essai à définir sont :

- I_{Dch_Essai1} : Courant de décharge
- Δt_{Relax_Essai1} : Durée de repos

Par défaut, I_{Dch_Essai1} est égale à 1C et Δt_{Relax_Essai1} est égal à 20 minutes. La durée de l'essai d'activation avec les valeurs par défaut des paramètres est environ 5 heures.

Nom d'étape	Description	SoC final
SoC initial	-	X%
Etape 1 : Décharge à I_{Dch_Essai1}	Décharger à I_{Dch_Essai1} jusqu'à ce que la tension atteigne U_{min_Con}	0%
Etape 2 : Repos de Δt_{Relax_Essai1}	-	0%
Etape 3 : Charge à plein	Charger avec le protocole de charge complète	100%
Etape 4 : Repos de Δt_{Relax_Essai1}	-	100%
Etape 5 : Décharge à I_{Dch_Essai1}	Décharger à I_{Dch_Essai1} jusqu'à ce que la tension atteigne U_{min_Con}	0%
Durée totale estimée		5 heures

Tableau 52 : Détail de l'activation de la cellule de l'essai 1 (1^{ère} partie de l'essai 1)

Le test de capacité de la cellule, effectué tout de suite après l'activation de la cellule, permet d'obtenir les valeurs de la capacité réelle ($C_{Batt_R\acute{e}el}$) et du rendement faradique (η_r). Il est constitué d'un cycle complet de charge/décharge (cf. Etape 1 de la Figure 121). Le détail du test de capacité de l'essai 1 se trouve dans le Tableau 53. Les paramètres de l'essai à définir sont :

- Δt_{Relax_Voulue} : Durée de repos,
- $I_{Dch_TestCapa}$: Courant de décharge pour tester la capacité réelle de la cellule.

Par défaut, Δt_{Relax_Voulue} est égale à 1 h et $I_{Dch_TestCapa}$ est égal à 1C. On remarque que la valeur par défaut de Δt_{Relax_Voulue} est plus grande que celle de Δt_{Relax_Essai1} utilisée dans l'activation de la cellule (cf. Tableau 52). En effet, comme aucun paramètre du modèle de la cellule n'est identifié à partir de l'essai d'activation, la durée de repos Δt_{Relax_Essai1} peut être raccourcie pour réduire la durée totale de l'essai.

Nom d'étape	Description	SoC final
SoC initial	-	0%
Etape 1 : Repos de Δt_{Relax_Voulue}	-	0%
Etape 2 : Charge à plein	Charger avec le protocole de charge complète	100%
Etape 3 : Repos de Δt_{Relax_Voulue}	-	100%
Etape 4 : Décharge à $I_{Dch_TestCapa}$	Décharger à $I_{Dch_TestCapa}$ jusqu'à ce que la tension atteigne U_{min_Con}	0%
Etape 5 : Repos de Δt_{Relax_Voulue}	-	0%
Durée totale estimée		5 heures

Tableau 53 : Détail du test de capacité de l'essai 1 (2^{ème} partie de l'essai 1)

A partir des résultats du test de capacité, la capacité réelle de la cellule est égale à la quantité totale de charge enlevée pendant la décharge (cf. l'étape 4 du Tableau 53). Le rendement faradique est le rapport de la capacité réelle sur la quantité totale de charge fournie pendant la charge (cf. l'étape 2 du Tableau 53). La durée de l'essai de test de capacité est proche de 5 heures.

A.2.2. Essai 2 : Détermination du nombre des motifs en escalier

Le but de l'essai 2 est de déterminer le nombre de motifs en escalier à appliquer respectivement en décharge et en charge. Les motifs en décharge et en charge à utiliser, illustrés sur la Figure 190, sont déterminés en fonction des courants maximaux ($I_{max_Dch_Con}$ et $I_{max_Cha_Con}$) de la cellule selon la méthode présentée dans le paragraphe 4.3.2.

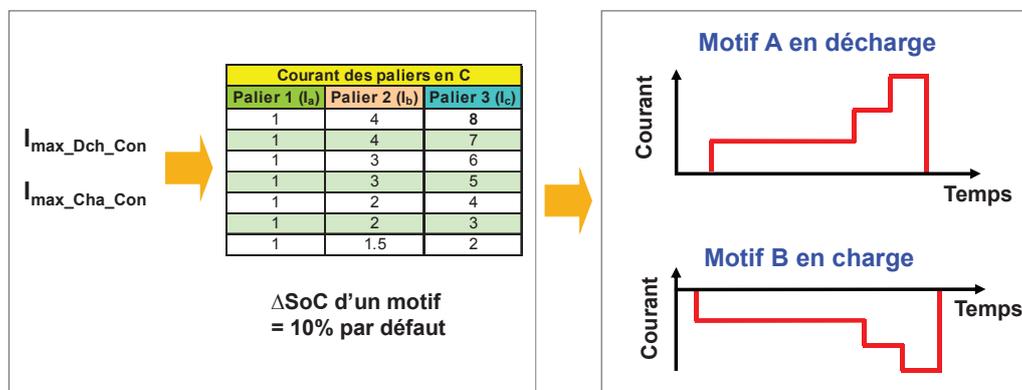


Figure 190 : Détermination des motifs en escalier en décharge et en charge

Le motif A en décharge (cf. Figure 190) est conçu pour s'appliquer entre 95% et 5% de SoC et le motif B en charge entre 5% et 85% de SoC :

- Le choix de 95% de SoC au lieu de 100% de SoC comme point de départ du motif A permet d'obtenir un point de mesure de l'OCV à 95% de SoC. Cela est avantageux pour avoir une courbe de l'OCV(SoC) en décharge plus précise aux SoCs élevés, surtout pour les cellules dont la courbe de l'OCV(SoC) en décharge évolue plus rapidement entre 100% et 95% de SoC qu'entre 95% et 90% de SoC (cf. Figure 48 (b) du Chapitre 2).
- La plage entre 5% et 0% de SoC n'est pas testée par les motifs en escalier. En effet, le comportement de la cellule devient fortement non-linéaire pendant cette plage et des

créneaux simples seront utilisés dans l'essai 3 pour tester cette plage afin de faciliter l'identification des paramètres du modèle.

- Le choix de 85% de SoC comme limite d'application du motif B est pour que la tension de la cellule ne dépasse pas la limite de tension en charge (U_{\max_Con}). Pour avoir une mesure de la courbe de l'OCV(SoC) plus détaillée aux SoCs élevés, comme certaines cellules peuvent avoir la courbe de l'OCV(SoC) en charge qui évolue plus rapidement entre 90% et 95% de SoC (cf. Figure 48 (b) du Chapitre 2), les OCVs sont mesurées à 90% et 95% de SoC en utilisant deux créneaux de charge simples dont chacun ajoute 5% de SoC.

Finalement, à priori 9 motifs A en décharge et 8 motifs B en charge seront utilisés par défaut. Afin de déterminer réellement le nombre de motifs à utiliser ($N_{\text{Motif_Dch}}$ et $N_{\text{Motif_Cha}}$), un essai de pré-test avec des motifs en escalier, décrit par le Tableau 54, est effectué. Les paramètres de l'essai à définir sont :

- $I_{\text{Dch_Essai2}}$: Courant de décharge,
- $I_{\text{Cha_Essai2}}$: Courant de charge,
- $\Delta t_{\text{Relax_Essai2}}$: Durée de repos.

Par défaut, $I_{\text{Dch_Essai2}}$ et $I_{\text{Cha_Essai2}}$ sont égaux à 1C. La durée $\Delta t_{\text{Relax_Voulue}}$ est égale à 20 minutes par défaut comme aucun paramètre du modèle n'est identifié à partir du résultat de l'essai 2. La durée de l'essai 2 est environ 6 heures. La partie essentielle de l'essai 2 (l'étape 2 à l'étape 8) est aussi illustrée sur la Figure 191.

Nom d'étape	Description	SoC final
SoC initial	-	0%
Etape 1 : Charge à plein	Charger avec le protocole de charge complète	100%
Etape 2 : Mise à 25% de SoC	Décharger à $I_{\text{Dch_Essai2}}$ jusqu'à 25% de SoC	25%
Etape 3 : Repos d'une durée de $\Delta t_{\text{Relax_Essai2}}$	-	25%
Etape 4 : Décharges successives avec le motif en escalier de décharge de 25% à 5% de SoC	Appliquer 2 fois le motif A pour aller de 25% à 5% de SoC. Entre deux motifs, un repos de durée $\Delta t_{\text{Relax_Essai2}}$ est imposé.	5%
Etape 5 : Décharge jusqu'à 0% de SoC	Décharger à $I_{\text{Dch_Essai2}}$ pour aller à 0% de SoC	0%
Etape 6 : Mise à 65% de SoC	Charger à $I_{\text{Cha_Essai2}}$ jusqu'à 65% de SoC	65%
Etape 7 : Repos d'une durée de $\Delta t_{\text{Relax_Essai2}}$	-	65%
Etape 8 : Charges successives avec le motif en escalier de charge de 65% à 85% de SoC	Appliquer 2 fois le motif B pour aller de 65% à 85% de SoC. Entre deux motifs, un repos de durée $\Delta t_{\text{Relax_Essai2}}$ est imposé.	85%
Etape 9 : Décharge jusqu'à 0% de SoC	Décharger à $I_{\text{Dch_Essai2}}$ pour mettre à 0% de SoC	0%
Durée totale estimée		6 heures

Tableau 54 : Détail de l'essai 2 pour déterminer les nombres des motifs en escalier à utiliser en décharge et en charge

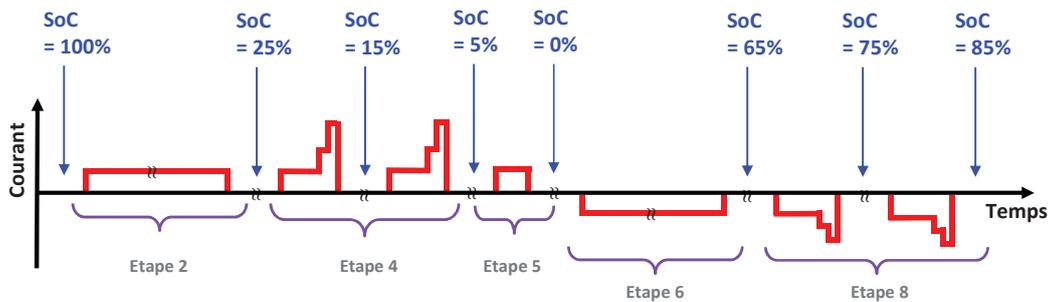


Figure 191 : Illustration du déroulement de l'étape 2 à l'étape 8 de l'essai 2

Avec le résultat de l'étape 4 de l'essai 2, le nombre de motifs à appliquer en décharge est déterminé ainsi :

- Si la tension de la cellule de l'étape 4 est en dessus de la tension de limite U_{\min_Con} , le nombre de motifs à appliquer en décharge $N_{Motif_Dch} = 9$.
- Si la tension provoquée par le deuxième motif atteint la tension de limite, $N_{Motif_Dch} = 8$. Un créneau de décharge d'amplitude I_{Dch_Essai2} remplacera le 9^{ème} motif pour enlever 10% de SoC.
- Si la tension provoquée par le premier motif atteint la tension de limite, $N_{Motif_Dch} = 7$. Deux créneaux de décharge d'amplitude I_{Dch_Essai2} remplaceront les 8^{ème} et 9^{ème} motifs, chaque créneau enlevant 10% de SoC.

Le nombre de motifs à appliquer en charge (N_{Motif_Cha}) est déterminé de même façon avec le résultat de l'étape 8 de l'essai 4. Ces nombres de motifs à appliquer (N_{Motif_Dch} et N_{Motif_Cha}) seront utilisés à l'essai 3.

A.2.3. Essai 3 : Test du comportement dynamique avec les motifs en escalier

Le but de l'essai 3 est de récupérer les mesures (courant et tension) des motifs en escaliers pour identifier les paramètres des modèles à différents SoCs (cf. l'étape 2 de la Figure 121). Le détail de l'essai 3 se trouve dans le Tableau 55. Les paramètres de l'essai à définir sont :

- I_{Dch_Essai3} : Courant de décharge,
- I_{Cha_Essai3} : Courant de charge,
- Δt_{Relax_Voulue} : Durée de repos.

Par défaut, les I_{Dch_Essai3} et I_{Cha_Essai3} sont égaux à 1C. La durée Δt_{Relax_Voulue} est égale à 1 heure par défaut afin de limiter la durée de l'essai 3 à une durée raisonnable (environ 26 h sur le Tableau 55). La durée de 1 heure de repos permet d'identifier des constantes de temps jusqu'à l'ordre de 1000 s (cf. Tableau 40). Si l'on rallonge la durée de repos à une durée plus grande, par exemple à 24 h pour identifier la constante de temps de l'ordre de 10^4 s (cf. Tableau 39), la durée totale de l'essai 3 sera alors d'environ 23 jours, ce qui est difficilement acceptable dans la pratique. La partie essentielle de l'essai 3 (étape 2 à étape 12) est aussi illustrée sur la Figure 192.

Nom d'étape	Description	SoC final
SoC initial	-	0%
Etape 1 : Charge à plein	Charger avec le protocole de charge complète	100%
Etape 2 : Mise à 95% de SoC	Décharger à I_{Dch_Essai3} jusqu'à 95% de SoC	95%
Etape 3 : Repos d'une durée de Δt_{Relax_Voulue}	-	95%
Etape 4 : Décharges successives avec les motifs en escalier de décharge de 95% à 5% de SoC	Appliquer N_{Motif_Dch} fois le motif A . Si $N_{Motif_Dch} < 9$, appliquer par la suite (9 - N_{Motif_Dch}) créneaux de décharge d'amplitude I_{Dch_Essai3} . Entre deux motifs ou deux créneaux, une durée de Δt_{Relax_Voulue} de repos est imposée.	5%
Etape 5 : Décharge à I_{Dch_Essai3} jusqu'à 0% de SoC	-	0%
Etape 6 : Repos d'une durée de Δt_{Relax_Voulue}	-	0%
Etape 7 : Charge à I_{Cha_Essai3} de 0% à 5% de SoC	-	5%
Etape 8 : Repos d'une durée de Δt_{Relax_Voulue}	-	5%
Etape 9 : Charges successives avec les motifs en escalier de charge de 5% à 85% de SoC	Appliquer N_{Motif_Cha} fois le motif B . Si $N_{Motif_Cha} < 8$, appliquer par la suite (8 - N_{Motif_Cha}) créneaux de charge d'amplitude I_{Cha_Essai3} . Entre deux motifs ou deux créneaux, une durée de Δt_{Relax_Voulue} de repos est imposée.	85%
Etape 10 : Charge à I_{Cha_Essai3} de 85% à 90% de SoC	-	90%
Etape 11 : Repos d'une durée de Δt_{Relax_Voulue}	-	90%
Etape 12 : Charge à I_{Cha_Essai3} de 90% à 95% de SoC	-	95%
Etape 13 : Repos d'une durée de Δt_{Relax_Voulue}	-	95%
Durée totale estimée		26 heures

Tableau 55 : Détail de l'essai 3 pour tester les comportements dynamiques avec les motifs en escalier

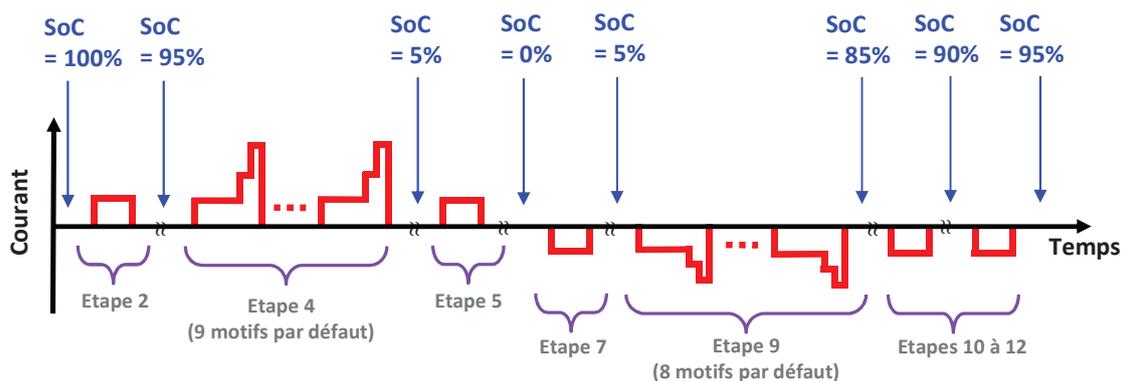


Figure 192 : Illustration du déroulement de l'essai 3

Avec le résultat de l'essai 3, les paramètres du modèle de la cellule peuvent être identifiés à différents SoCs et courants selon la méthode d'identification présentée dans le paragraphe 4.3. De plus, l'ajout des créneaux simples aux SoCs extrêmes permet d'avoir une mesure plus détaillée des courbes de l'OCV(SoC) en décharge et en charge comme indiqué dans le paragraphe A.2.2.

A.2.4. Essai 4 : Test de résistance série avec des impulsions de courant

L'essai 4, qui est optionnel, consiste à appliquer à la cellule des peignes d'impulsions de courant en décharge et en charge comme l'étape 3 de la Figure 121 en cas de besoin de compléter la cartographie de la résistance pour les courants forts. Le peigne d'impulsions à utiliser, illustré sur la Figure 193, est déterminé en fonction des courants maximaux en impulsion de la cellule (cf. $I_{\max_Dch_Imp}$ et $I_{\max_Cha_Imp}$ du Tableau 50). Sur la Figure 193, le peigne contient N_{Imp} paires d'impulsions. La $i^{ème}$ paire d'impulsions est décrite par :

- I_{Dch_i} : Niveau du courant d'impulsion en décharge,
- Δt_{Dch_i} : Durée de l'impulsion en décharge,
- $\Delta t_{Relax_Dch_i}$: Durée de repos après l'impulsion en décharge,
- I_{Cha_i} : Niveau du courant d'impulsion en charge,
- Δt_{Cha_i} : Durée de l'impulsion en charge,
- $\Delta t_{Relax_Cha_i}$: Durée de repos après l'impulsion en charge.

Le nombre de paires d'impulsions N_{Imp} est égal à 5 par défaut. Le niveau du courant pour chaque impulsion (I_{Dch_i} et I_{Cha_i}) est défini par défaut par le Tableau 56. La durée de l'impulsion en décharge Δt_{Dch_i} est égale à 5 fois la période d'échantillonnage T_e par défaut. Comme la période d'échantillonnage est égale à 0.1 s par défaut (cf. Tableau 51), la durée de l'impulsion en décharge Δt_{Dch_i} est égale à 0.5 s par défaut. La durée de l'impulsion en charge Δt_{Cha_i} est adaptée en fonction de l'impulsion en décharge précédente de manière à ce que la variation du SoC d'une paire d'impulsions soit nulle. Les durées de repos après les impulsions en décharge et en charge ($\Delta t_{Relax_Dch_i}$ et $\Delta t_{Relax_Cha_i}$) sont égales à 20 s par défaut.

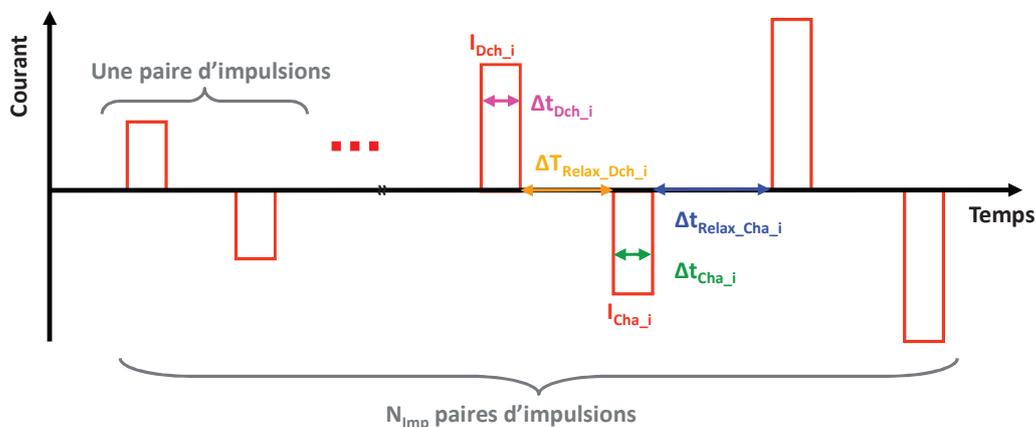


Figure 193 : Un peigne d'impulsions de courant

Numéro de la paire d'impulsion i	1	2	...	N_{Imp}
Courant des impulsions en décharge (I_{Dch_i})	$I_{\max_Dch_Imp} / N_{Imp}$	$2 \cdot I_{\max_Dch_Imp} / N_{Imp}$	...	$N_{Imp} \cdot I_{\max_Dch_Imp} / N_{Imp}$
Courant des impulsions en charge (I_{Cha_i})	$- I_{\max_Cha_Imp} / N_{Imp}$	$-2 \cdot I_{\max_Cha_Imp} / N_{Imp}$	...	$- N_{Imp} \cdot I_{\max_Cha_Imp} / N_{Imp}$

Tableau 56 : Détermination par défaut du niveau de courant pour chaque impulsion du peigne

Une fois que le peigne à utiliser est défini, il est appliqué répétitivement à différents SoCs par défaut entre 95% et 5% de SoC comme illustré sur la Figure 194 :

- Le choix de la plage entre 95% et 5% permet que la tension de la cellule ne dépasse pas les limites de tension (U_{\min_Imp} et U_{\max_Imp}) aux extrémités du SoC ($> 95\%$ et $< 5\%$).
- La séquence type 1 contient un peigne et un créneau de courant à 1C qui enlève 10% de SoC par défaut. Elle est appliquée entre 95% et 15% de SoC, ce qui permet de tester dans cette plage de SoC la résistance série à chaque 10% de SoC.
- La séquence type 2 contient un peigne et un créneau de courant à 1C qui enlève 5% de SoC par défaut. Elle est appliquée entre 15% et 5% de SoC, ce qui permet de tester dans cette plage de SoC la résistance série à chaque 5% de SoC où est présent une non-linéarité plus sévère de R_s selon la littérature.

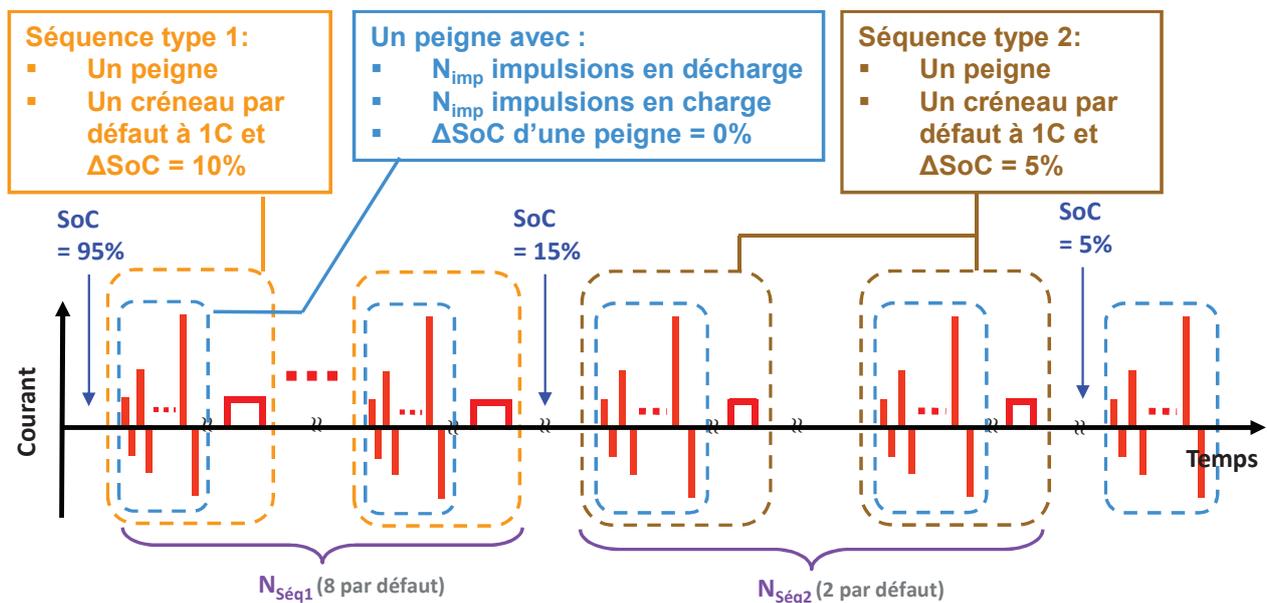


Figure 194 : Application répétitive du peigne d'impulsions entre 95% et 5% de SoC

Dans la pratique, l'application du peigne avec des impulsions de fort niveau risque de faire sortir la tension de la cellule en dehors de la plage de tension autorisée. Afin de réduire ce risque, une simulation du profil de la Figure 194 est effectuée avec le modèle de la cellule obtenu grâce à l'essai 3. Cela permet d'obtenir a priori la réponse en tension de la cellule. Pour un SoC donné, si la tension simulée de la cellule dépasse la plage de tension autorisée à partir de la $j^{\text{ème}}$ impulsion, les impulsions à partir de la $j^{\text{ème}}$ impulsion seront remplacées par la $(j-1)^{\text{ème}}$ impulsion du peigne. L'essai à appliquer avec les peignes ajustés pour différents SoCs est présenté dans le Tableau 57. Les paramètres de l'essai 4 à définir sont :

- $I_{\text{Dch_Essai4}}$: Courant de décharge (1C par défaut)
- $\Delta t_{\text{Relax_Essai4}}$: Durée de repos (20 minutes par défaut)

Par défaut, le courant $I_{\text{Dch_Essai4}}$ est égal à 1C et la durée $\Delta t_{\text{Relax_Essai4}}$ est égale à 20 minutes pour réduire la durée de l'essai.

Nom d'étape	Description	SoC final
SoC initial	-	0%
Etape 1 : Charge à plein	Charger avec le protocole de charge complète	100%
Etape 2 : Mise à 95% de SoC	Décharger à I_{Dch_Essai4} jusqu'à 95% de SoC	95%
Etape 3 : Repos d'une durée de Δt_{Relax_Essai4}	-	95%
Etape 4 : Test des R_s avec les séquences de type 1	Appliquer 8 fois la séquence de type 1 à la cellule, après chaque séquence, une durée de Δt_{Relax_Essai4} est imposée	15%
Etape 5 : Test des R_s avec les séquences de type 2	Appliquer 2 fois la séquence de type 2 à la cellule, après chaque séquence, une durée de Δt_{Relax_Essai4} est imposée	5%
Etape 6 : Test des R_s avec un peigne à 5% de SoC	Appliquer 1 fois le peigne à la cellule	5%
Durée totale estimée		8 heures

Tableau 57 : Détail de l'essai 4 pour tester la résistance série de la cellule aux forts courants

Avec le résultat de l'essai 4, les sauts de tension provoqués par les impulsions peuvent être utilisés pour identifier la résistance série aux forts courants et à différents SoCs (cf. l'étape 3 de la Figure 121).

Annexe 5. Outil de choix de la période d'échantillonnage pour la mesure de la tension de relaxation

Dans le cadre de la caractérisation d'une batterie, il est nécessaire d'étudier les caractéristiques de la batterie durant la relaxation qui est une phase après un arrêt de sollicitation où le courant de la batterie est nul et la tension de la batterie tend vers une valeur finie appelée OCV (Open Circuit Voltage) ou tension à l'équilibre. L'évolution de la tension de relaxation est décrite par des constantes de temps de l'ordre de quelques millisecondes à quelques dizaines d'heures (cf. Chapitre 2). Au début de la mesure expérimentale de la tension de relaxation, une période d'échantillonnage (T_e) courte du système d'acquisition est nécessaire pour observer les constantes de temps rapides que l'on veut identifier. La dynamique de la tension de relaxation devenant de plus en plus lente, il n'est pas nécessaire de conserver une période d'échantillonnage courte pour toute la durée des mesures. En appliquant des périodes d'échantillonnage variables au cours de la mesure pour qu'elles soient adaptées au domaine temporel des constantes de temps, on évitera de générer des données de mesure surabondantes tout en assurant la meilleure précision possible.

Afin de bien répondre à cette nécessité, un outil sous Excel a été réalisé pour déterminer les périodes d'échantillonnage variables au juste nécessaire à utiliser pendant une mesure de la tension de relaxation. Avec cet outil, on pourra réaliser une acquisition adaptée à l'identification des différentes constantes de temps. L'utilisateur doit fournir la valeur de la plus petite constante de temps estimée pour la relaxation considérée et la durée de l'enregistrement. Puis en fonction de divers paramètres modifiables par l'utilisateur (rapport entre 2 périodes d'échantillonnage, nombre minimal d'échantillons pour identifier une constante de temps), l'outil calcule les différentes périodes d'échantillonnage nécessaires, leurs plages d'utilisation et le nombre de points de mesure obtenus.

(a) Principe de l'outil de détermination des périodes d'échantillonnage variables

Le principe mis en œuvre pour déterminer les plages d'utilisation des différentes périodes d'échantillonnage (T_{e_1}, T_{e_2}, \dots , avec $T_{e_i} < T_{e_{i+1}}$) pendant la mesure de la tension d'une relaxation est le suivant : soit une période d'échantillonnage T_{e_i} , elle ne permet pas d'identifier correctement une constante de temps plus faible qu'une certaine valeur. Il ne faut donc pas employer cette période T_{e_i} tant que la dynamique associée à cette constante de temps évolue encore, c'est-à-dire pour des instants antérieurs à une certaine limite. De proche en proche on peut aussi fixer les limites d'utilisation de chaque valeur de T_{e_i} . La détermination des périodes d'échantillonnage variables se déroule en 5 étapes comme dans le Tableau 58.

Etape 1 : Calculer la période d'échantillonnage minimale																															
Paramètres à saisir par l'utilisateur	<ol style="list-style-type: none"> $\tau_{\text{min_voulue}}$: Constante de temps minimale que l'utilisateur veut identifier en fonction de l'application. (Valeur par défaut : 1s) α : Rapport entre la constante de temps minimale identifiable et la période d'échantillonnage ($\frac{\tau_{\text{min_identifiable}}}{T_e}$). (Valeur par défaut 10. En fait, avec l'influence de bruit de mesure, il est délicat de déterminer la valeur optimale de α. Donc en pratique, on préconise d'utiliser une valeur grande, par exemple, $\alpha \geq 10$) 																														
Résultat de calcul	Période d'échantillonnage minimale : $T_{e_min} = \frac{\tau_{\text{min_voulue}}}{\alpha}$ T_{e_min} est la première période d'échantillonnage à utiliser pendant la mesure de la tension de relaxation ($T_{e1}=T_{e_min}$)																														
Etape 2 : Saisir des périodes d'échantillonnage possibles																															
Paramètres à saisir	<ol style="list-style-type: none"> λ : Rapport entre deux périodes d'échantillonnage ($T_{e_{i+1}}/T_{e_i}$). (Valeur par défaut : 10) T_{e_max} : Période d'échantillonnage maximale envisageable. (Valeur par défaut : 100s) 																														
Etape 3 : Fixer le domaine de contribution de chaque constante de temps (τ)																															
Paramètres à saisir	<ul style="list-style-type: none"> ξ : Nombre de τ à partir duquel la contribution en tension de ce τ est négligeable. (Valeur par défaut : 5) Par exemple, pour une exponentielle, après une durée de $3 \cdot \tau$ ($\xi = 3$), la contribution en tension diminue à $e^{-3} = e^{-3} = 4.9\%$ de sa valeur initiale. Pour $\xi = 4$, on obtient 1.8%, pour $\xi = 5$, on obtient 0.6%, pour $\xi = 6$, on obtient 0.2%. 																														
Etape 4 : Saisir la durée d'enregistrement de la relaxation																															
Paramètres à saisir	<ul style="list-style-type: none"> Δt_{relax} : Durée d'enregistrement de la relaxation 																														
Etape 5 : Détermination des plages d'application de chaque T_e à utiliser pendant la relaxation																															
Résultats de calcul	<table border="1"> <thead> <tr> <th>T_e à utiliser</th> <th>Expression</th> <th>Instant d'application</th> <th>Durée d'application</th> <th>Nombre de points</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T_{e_1}</td> <td>T_{e_min}</td> <td>0</td> <td>$T_{e_2} \cdot \alpha \cdot \xi$</td> <td>$T_{e_2} \cdot \alpha \cdot \xi / T_{e_1} + 1$</td> </tr> <tr> <td>$T_{e_2}$</td> <td>$\lambda \cdot T_{e_min}$</td> <td>$T_{e_2} \cdot \alpha \cdot \xi$</td> <td>$T_{e_2} \cdot \alpha \cdot \xi \cdot (\lambda - 1)$</td> <td>$\alpha \cdot \xi \cdot (\lambda - 1)$</td> </tr> <tr> <td>$\vdots$</td> <td>$\vdots$</td> <td>$\vdots$</td> <td>$\vdots$</td> <td>$\vdots$</td> </tr> <tr> <td>$T_{e_{M-1}}$</td> <td>$\lambda^{M-2} \cdot T_{e_min}$</td> <td>$T_{e_{M-1}} \cdot \alpha \cdot \xi$</td> <td>$T_{e_{M-1}} \cdot \alpha \cdot \xi \cdot (\lambda - 1)$</td> <td>$\alpha \cdot \xi \cdot (\lambda - 1)$</td> </tr> <tr> <td>$T_{e_M}$</td> <td>$\lambda^{M-1} \cdot T_{e_min}$</td> <td>$T_{e_M} \cdot \alpha \cdot \xi$</td> <td>$\Delta t_{\text{relax}} - T_{e_M} \cdot \alpha \cdot \xi$</td> <td>$(\Delta t_{\text{relax}} - T_{e_M} \cdot \alpha \cdot \xi) / T_{e_M}$</td> </tr> </tbody> </table> <p>Avec: $\begin{cases} T_{e_M} \leq T_{e_max} \\ T_{e_M} \leq \Delta t_{\text{relax}} - T_{e_M} \cdot \xi \cdot \alpha \end{cases}$</p>	T_e à utiliser	Expression	Instant d'application	Durée d'application	Nombre de points	T_{e_1}	T_{e_min}	0	$T_{e_2} \cdot \alpha \cdot \xi$	$T_{e_2} \cdot \alpha \cdot \xi / T_{e_1} + 1$	T_{e_2}	$\lambda \cdot T_{e_min}$	$T_{e_2} \cdot \alpha \cdot \xi$	$T_{e_2} \cdot \alpha \cdot \xi \cdot (\lambda - 1)$	$\alpha \cdot \xi \cdot (\lambda - 1)$	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	$T_{e_{M-1}}$	$\lambda^{M-2} \cdot T_{e_min}$	$T_{e_{M-1}} \cdot \alpha \cdot \xi$	$T_{e_{M-1}} \cdot \alpha \cdot \xi \cdot (\lambda - 1)$	$\alpha \cdot \xi \cdot (\lambda - 1)$	T_{e_M}	$\lambda^{M-1} \cdot T_{e_min}$	$T_{e_M} \cdot \alpha \cdot \xi$	$\Delta t_{\text{relax}} - T_{e_M} \cdot \alpha \cdot \xi$	$(\Delta t_{\text{relax}} - T_{e_M} \cdot \alpha \cdot \xi) / T_{e_M}$
T_e à utiliser	Expression	Instant d'application	Durée d'application	Nombre de points																											
T_{e_1}	T_{e_min}	0	$T_{e_2} \cdot \alpha \cdot \xi$	$T_{e_2} \cdot \alpha \cdot \xi / T_{e_1} + 1$																											
T_{e_2}	$\lambda \cdot T_{e_min}$	$T_{e_2} \cdot \alpha \cdot \xi$	$T_{e_2} \cdot \alpha \cdot \xi \cdot (\lambda - 1)$	$\alpha \cdot \xi \cdot (\lambda - 1)$																											
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots																											
$T_{e_{M-1}}$	$\lambda^{M-2} \cdot T_{e_min}$	$T_{e_{M-1}} \cdot \alpha \cdot \xi$	$T_{e_{M-1}} \cdot \alpha \cdot \xi \cdot (\lambda - 1)$	$\alpha \cdot \xi \cdot (\lambda - 1)$																											
T_{e_M}	$\lambda^{M-1} \cdot T_{e_min}$	$T_{e_M} \cdot \alpha \cdot \xi$	$\Delta t_{\text{relax}} - T_{e_M} \cdot \alpha \cdot \xi$	$(\Delta t_{\text{relax}} - T_{e_M} \cdot \alpha \cdot \xi) / T_{e_M}$																											

Tableau 58 : Détails des 5 étapes pour déterminer les périodes d'échantillonnage à utiliser pendant la mesure de la tension de relaxation

(b) Exemple d'application de l'outil de détermination des périodes d'échantillonnage variables

Etape 1 : Calcul de la période d'échantillonnage minimale					
Paramètres à saisir par l'utilisateur					
1. $\tau_{\text{min_voulu}} = 1 \text{ s}$: Constante de temps minimale que l'utilisateur veut identifier					
2. $\alpha = 10$: Rapport entre la constante de temps minimale identifiable et ($\frac{\tau_{\text{min_identifiable}}}{T_e}$)					
Résultat de calcul					
Période d'échantillonnage minimale : $T_{e_min} = \frac{\tau_{\text{min_voulu}}}{\alpha} = 0.1 \text{ s}$					
Etape 2 : Saisir le rapport des périodes d'échantillonnage possibles					
Paramètres à saisir					
1. $\lambda = 10$: Rapport entre deux périodes d'échantillonnage ($T_{e_{i+1}}/T_{e_i}$)					
2. $T_{e_max} = 100$: Période d'échantillonnage maximale					
Etape 3 : Fixer le domaine de contribution de chaque constante de temps (τ)					
Paramètres à saisir					
<ul style="list-style-type: none"> $\xi = 5$: Après $5 \cdot \tau$, la contribution en tension est diminué à $e^{-5} = 0.6\%$ de sa valeur initiale et la contribution de ce τ est donc considérée comme négligeable. 					
Etape 4 : Saisir la durée de la relaxation					
Paramètres à saisir					
<ul style="list-style-type: none"> $\Delta T_{\text{relax}} = 86400\text{s (24h)}$: Durée de la relaxation 					
Etape 5 : Détermination des T_e à utiliser pour la relaxation					
Résultats de calcul	T_e à utiliser	Expression	Instant d'application	Durée d'application	Nombre de points
	T_{e1}	0.1	0	50	501
	T_{e2}	1	50	450	450
	T_{e3}	10	500	4500	450
	T_{e4}	100	5000	81400	814
Le nombre total de points échantillonnés est 2215 .					

Tableau 59 : Un exemple de détermination des périodes d'échantillonnage variables à utiliser pendant la mesure de la tension de relaxation

Dans le cadre de l'exemple précédent (Tableau 59), on peut tracer l'évolution de la période d'échantillonnage en fonction du temps en échelle logarithmique comme sur la Figure 195.

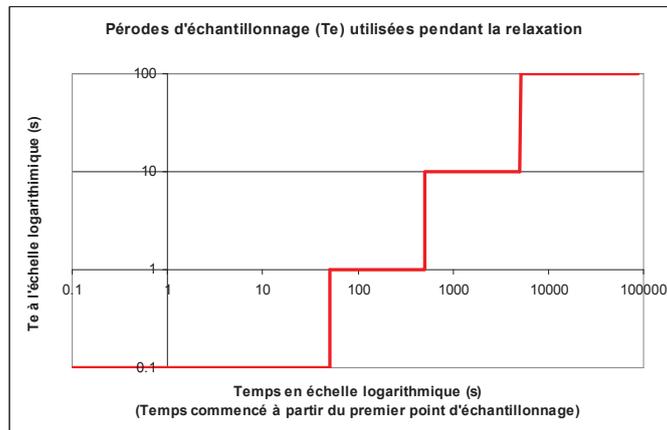


Figure 195 : Exemple des périodes d'échantillonnage utilisées pendant une relaxation de 24h

(c) Exemple d'application de l'outil de détermination des périodes d'échantillonnage variables

Présentée sur la Figure 196, l'interface de l'outil est organisée en deux parties :

- La partie gauche : « **Paramètres à Saisir par l'Utilisateur** » englobe les étapes 1 à 4 du Tableau 58
- La partie droite : « **Résultats** » affiche sous forme d'un graphique et de tableaux le résultat des périodes d'échantillonnage variables déterminées par l'étape 5 du Tableau 58. Seule la durée d'application est reportée dans ce tableau de synthèse. Le nombre total de points échantillonnés est aussi indiqué dans cette partie.

Avec cet outil, l'utilisateur peut vérifier le nombre total de points échantillonnés et augmenter ou réduire ce nombre en ajustant les paramètres dans les étapes 1, 2 ou 3 en fonction de son application.

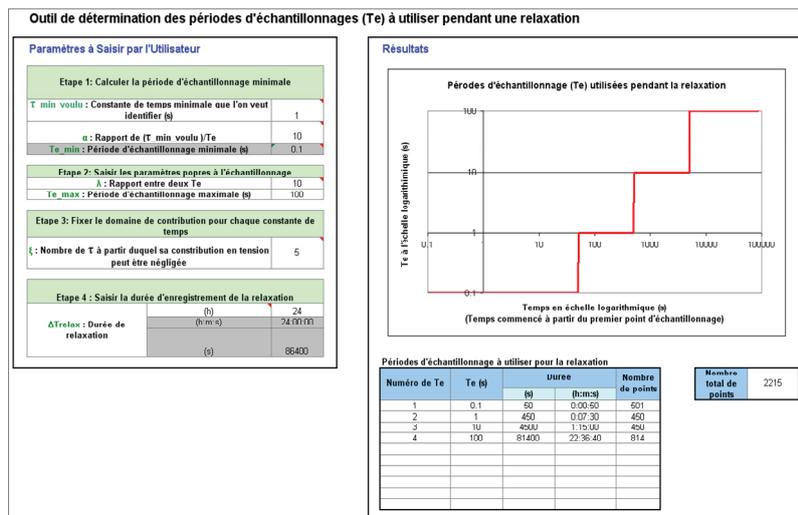


Figure 196 : Interface de l'outil de détermination des périodes d'échantillonnage sous Excel

Annexe 6. Paramètres du modèle de la cellule identifiés avec la mesure de la Figure 151

Les paramètres identifiés à partir des profils en décharge et en charge de l'essai 3 sont présentés respectivement sur la Figure 197 et la Figure 198. Les valeurs des résistances sont affichées à l'échelle logarithmique afin de mieux les visualiser.

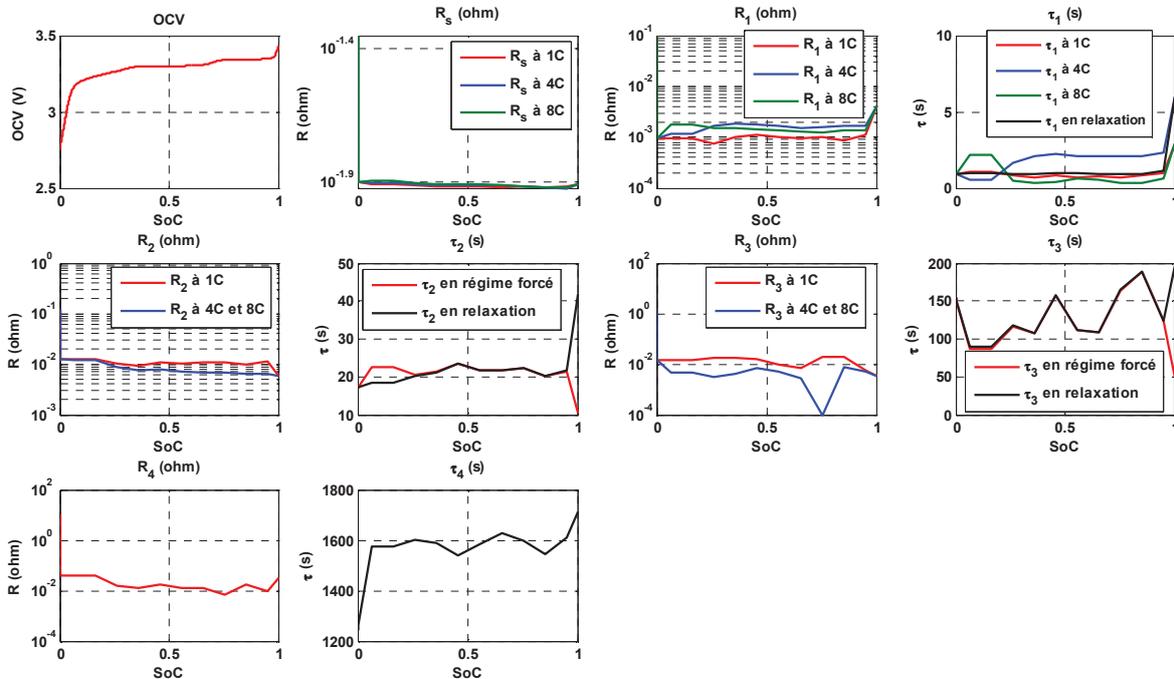


Figure 197 : Paramètres identifiés avec le profil en décharge de l'essai 3 de la cellule d'A123

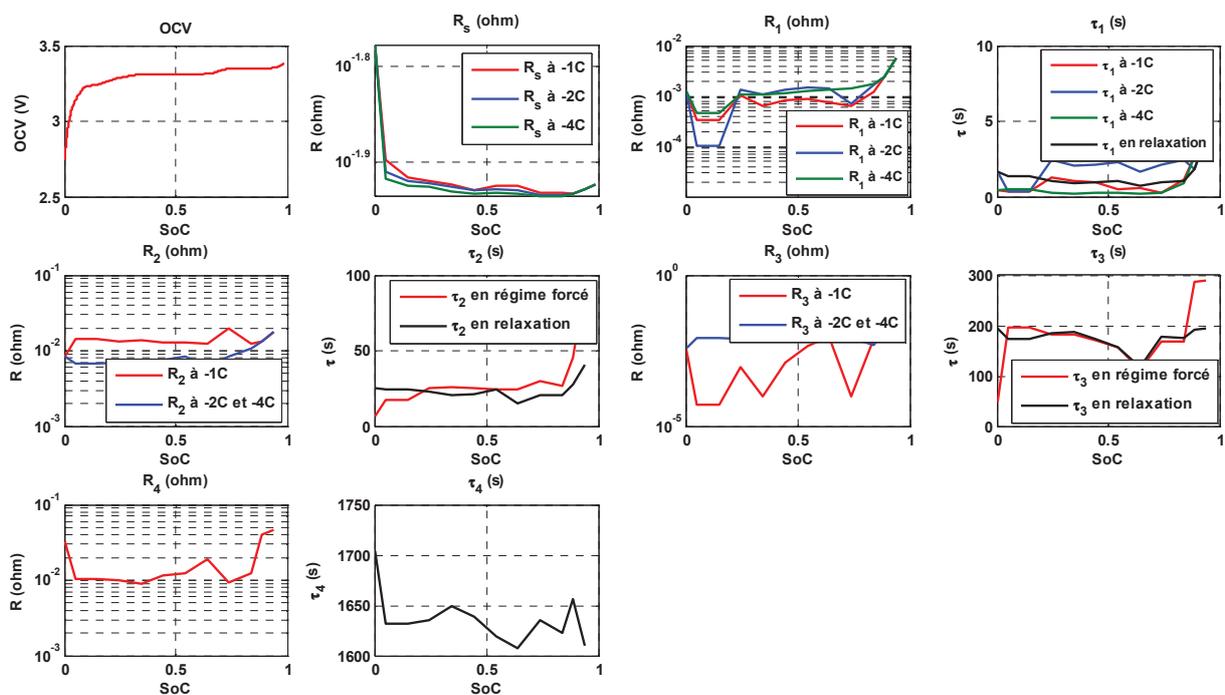


Figure 198 : Paramètres identifiés avec le profil en charge de l'essai 3 de la cellule d'A123

Annexe 7. Cartographie de la résistance série R_s identifié avec la mesure de l'essai 4

La Figure 199 présente la cartographie de la résistance série pour des courants forts en fonction du SoC identifiée à partir de l'essai 4 (cf. Figure 153). Pour les courants en décharge, la résistance série diminue quand l'amplitude de courant augmente. La tendance de la résistance série pour les courants en charge est moins évidente. Cela est d'une part lié aux amplitudes des courants en charge qui sont trop faibles pour faire apparaître une dépendance de la résistance en fonction du courant, et d'autre part au bruit de mesure de tension du banc Delta/H&H qui a une influence sur la précision d'identification de la résistance. Par exemple, pour le courant en charge de - 2 A, la variation importante de la résistance est liée au bruit de mesure de tension du banc Delta/H&H qui est de l'ordre de 10 mV et qui engendre une incertitude de $10 \text{ mV} / 2 \text{ A} = 5 \text{ m}\Omega$ sur la résistance pour le courant - 2 A.

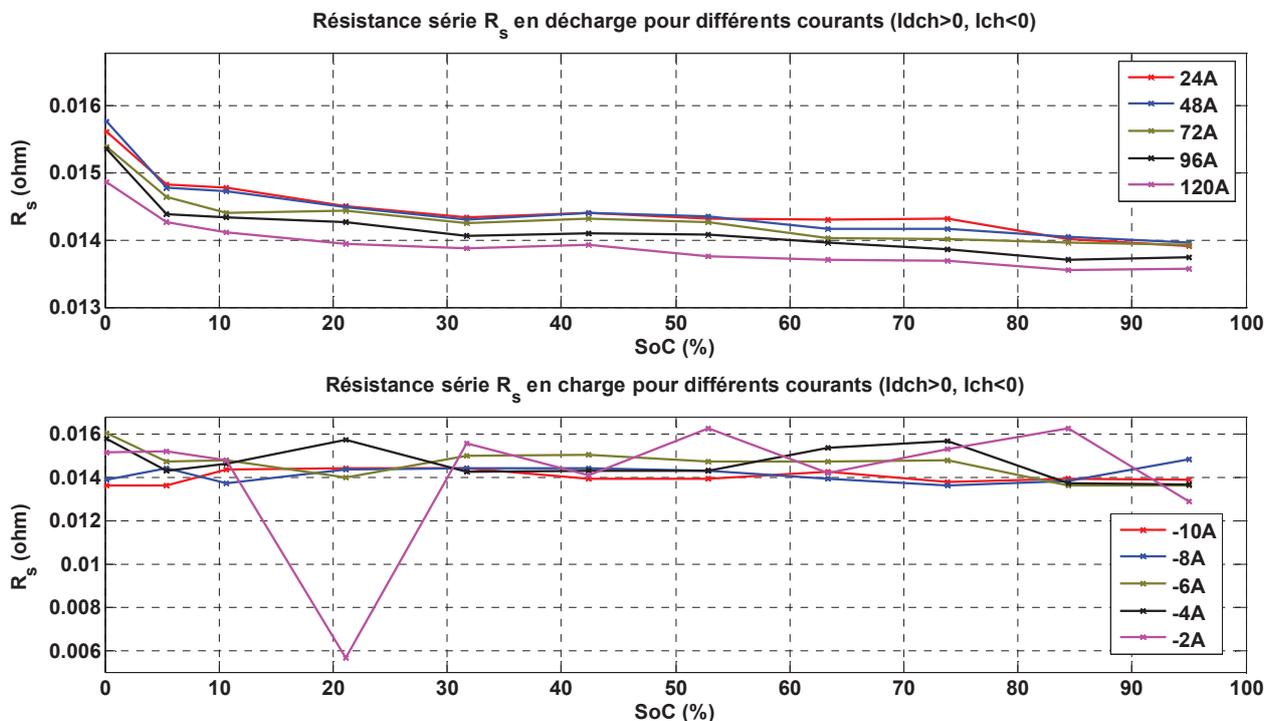


Figure 199 : Résistance série pour différents courants forts de la cellule d'A123

Annexe 8. Trois cellules caractérisées avec la procédure de caractérisation

Catégorie	Description	Kokam	NEC	Saft	Unité
Technologie	Technologie de la cellule	NMC	LMO	NiMH	-
Capacité	Capacité nominale (C_{Batt_Nom})	12.0	4.3	3.0	Ah
Courant	Courant de décharge maximal en continu ($I_{max_Dch_Con}$)	60	12	40	A
	Courant de décharge maximal en impulsion ($I_{max_Dch_Imp}$)	240	30	150	A
	Courant de charge maximal en continu ($I_{max_Cha_Con}$)	36	4.5	3	A
	Courant de charge maximal en impulsion ($I_{max_Cha_Imp}$)	-	-	-	A
Tension	Tension minimale pour la décharge en continu (U_{min_Con})	2.7	2.5	0.8	V
	Tension maximale pour la charge en continu (U_{max_Con})	4.2	4.2	-	V
	Tension minimale pour la décharge en impulsion (U_{min_Imp})	-	-	0.6	V
	Tension maximale pour la charge en impulsion (U_{max_Imp})	-	-	-	V
Température	Température d'opération maximale (T_{max})	60	60	40	°C
	Température d'opération minimale (T_{min})	-20	-30	-10	°C
Photo	Photo de la cellule				-

Tableau 60 : Informations des cellules de Kokam, NEC et Saft

Annexe 9. Justification de la dépendance au courant des tensions de relaxation par analogie avec une réponse exponentielle à une impulsion

Sur la Figure 109, les chutes de tension U_{3_Relax} et U_{4_Relax} , correspondant aux constantes de temps les plus grandes (τ_{3_Relax} et τ_{4_Relax}), ne présentent pas une dépendance remarquable au courant. Cela s'explique par analogie avec une réponse exponentielle d'un circuit R//C à une impulsion de courant.

La tension du circuit R//C à la fin de la sollicitation de l'impulsion peut s'exprimer par l'équation (123) :

$$U = I \cdot R \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) \quad (123)$$

avec :

- U : tension du circuit R//C à la fin de sollicitation de l'impulsion
- I : courant de l'impulsion
- Δt : durée de l'impulsion
- τ : constante de temps du circuit R//C

Cas I :

Quand la durée de l'impulsion Δt est très supérieure à la constante de temps τ du circuit R//C :

$$\Delta t \gg \tau \quad (124)$$

L'équation (124) peut être approximée par :

$$U \approx I \cdot R \quad (125)$$

Cela indique que la tension U varie en fonction du courant I.

Cas II :

Quand la durée de l'impulsion Δt est très inférieure à la constante de temps τ du circuit R//C :

$$\Delta t \ll \tau \quad (126)$$

L'équation (123) peut être approximée par :

$$U \approx I \cdot R \cdot \frac{\Delta t}{\tau} \quad (127)$$

Le produit de I et Δt correspond à la charge échangée pendant l'impulsion :

$$\Delta Q = I \cdot \Delta t \quad (128)$$

En remplaçant $I \cdot \Delta t$ par ΔQ , l'équation (127) devient :

$$U \approx \frac{R}{\tau} \Delta Q \quad (129)$$

L'équation (129) indique que la tension U varie seulement en fonction de la charge ΔQ . Comme les différentes impulsions de régime forcé ont le même ΔQ , les valeurs U_{i_Relax} correspondant à ces constantes de temps sont les mêmes quel que soit le courant.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison des technologies Li-ion et NiMH [4][7][8][10][11]	21
Tableau 2 : Liste non-exhaustive des véhicules électriques	21
Tableau 3 : Liste non-exhaustive des véhicules électriques hybrides.....	22
Tableau 4 : Performances souhaitées des packs de batteries pour les VEs et VEHS [12]	22
Tableau 5 : Exemple des structures de packs de batteries pour des véhicules électriques et des véhicules électriques hybrides selon [9][13][14][15][16][17].....	23
Tableau 6 : Périmètres typiques de fonctionnement des cellules de batteries dans les VEs et les VEHS [12][18][19].....	24
Tableau 7 : Liste non exhaustive des matériaux anodiques pour l'électrode négative [3]	27
Tableau 8 : Liste non exhaustive des matériaux cathodiques pour l'électrode positive [3][7][12][24][25][26].....	28
Tableau 9 : Exemples de batteries Li-ion commercialisées [29][30][31][32][33].....	30
Tableau 10 : Exemples de batteries NiMH commercialisées [38] [39] [40]	32
Tableau 11 : Comparaison entre les modèles électrochimiques et les modèles de type circuit électrique équivalent en vue du besoin dans le cadre de la thèse (1 – Bon, 2 – Moins bon).....	53
Tableau 12 : Durées estimées de mesure de l'impédance en fonction de la fréquence minimale (f_{min}) et du nombre de points de mesure par décade de fréquence (N_{pt}) avec le banc Biologic VMP3 piloté par le logiciel EC-Lab [89] avec la fréquence maximale fixée à 5 kHz	65
Tableau 13 : Valeurs de l'inductance à différentes températures pour deux batteries Li-ion [65]....	70
Tableau 14 : Résumé des procédures de caractérisation et des sensibilités des paramètres du modèle générique de circuit électrique équivalent selon l'étude bibliographique de ce chapitre (? – A priori n'est pas modifiée car l'inductance ne dépend que de la géométrie du circuit où est intégrée la cellule).....	77
Tableau 15 : Exemples des modèles de la littérature et leurs performances pour la simulation temporelle de la batterie	78
Tableau 16 : Ré-échantillonnage géométrique sur une mesure de durée Δt_{Relax} avec échantillonnage à période constante T_e et contenant N échantillons (le facteur q est calculé par $q = \left(\frac{\Delta t_{Relax}}{T_e}\right)^{\frac{1}{N-1}}$).....	90
Tableau 17 : Division théorique d'une relaxation dont la durée est Δt_{Relax} et la période d'échantillonnage minimale est T_e	92
Tableau 18 : Définition par défaut de α , β , δ et γ	92
Tableau 19 : Exemple du nombre maximal de circuit R//C en fonction de la durée de relaxation avec différentes périodes d'échantillonnage T_e selon l'équation (43)	93
Tableau 20 : Conditions aux limites de constantes de temps calculées avec $\gamma = 9$ pour le modèle avec 5 circuits R//C	95
Tableau 21 : Conditions aux limites de constantes de temps calculées avec $\gamma = 14$ pour le modèle avec 5 circuits R//C	95
Tableau 22 : Illustration de la méthode de dichotomie pour un exemple où les nombres possibles de circuits R//C sont de 1 à 10 et le nombre optimal est de 5.....	100
Tableau 23 : Comparaison des U_{i_Relax} des deux modèles	104
Tableau 24 : Tableau récapitulatif des 6 essais effectués sur chacune des 3 technologies de cellules testées à 25 °C avec le banc Biologic	106
Tableau 25 : Constantes de temps reconstruites et leur durée de validité pour la règle de détermination du nombre de circuits R//C du modèle	115
Tableau 26 : Exemple du nombre de circuits R//C à utiliser en fonction de la durée de relaxation avec différentes périodes d'échantillonnages T_e	117
Tableau 27 : Comparaison des erreurs d'estimation des deux modèles sur la Figure 114	124

Tableau 28 : Comparaison des erreurs d'estimation des deux modèles sur la Figure 115	125
Tableau 29 : Comparaison des erreurs d'estimation pour les relaxations à différents SoCs	129
Tableau 30 : Liste des paramètres inconnus à identifier pour le modèle d'une cellule à une température donnée	133
Tableau 31 : Résumé d'identifications des constantes de temps selon la stratégie de la Figure 123	137
Tableau 32 : Liste des paramètres à identifier avec un motif en escalier pour un modèle avec n R//C	142
Tableau 33 : Caractéristiques de la cellule d'A123 pour configurer le motif en escalier en décharge	142
Tableau 34 : Tableau des paramètres à l'issue de l'étape 1	144
Tableau 35 : Tableau des paramètres à l'issue de l'étape 2	145
Tableau 36 : Tableau des paramètres à l'issue de l'étape 3	148
Tableau 37 : Tableau des paramètres à l'issue de l'étape 4	150
Tableau 38 : Tableau des paramètres à l'issue de l'étape 5	152
Tableau 39 : Tableau des paramètres à l'issue de l'étape 6	153
Tableau 40 : Tableau des paramètres pour le modèle avec 4 circuits R//C	154
Tableau 41 : Erreurs RMS entre les mesures des essais et les simulations des modèles	156
Tableau 42 : Informations nécessaires sur les spécifications de la cellule	156
Tableau 43 : Informations de la cellule d'A123 renseignées selon sa spécification donnée par le constructeur	161
Tableau 44 : Caractéristiques des bancs utilisés	161
Tableau 45 : Résumé des erreurs RMS entre les tensions mesurées et les tensions estimées du modèle de la Figure 151	164
Tableau 46 : Résumé des erreurs RMS entre les tensions mesurées et les tensions estimées des modèles de 4 cellules (A123, Kokam, NEC et Saft)	168
Tableau 47 : Informations détaillées sur les 2 cellules Li-ion de technologie LiFePO ₄ d'A123 utilisées pour constituer les 2 assemblages	180
Tableau 48 : Etats initiaux des cellules et des assemblages	185
Tableau 49 : Résumé des erreurs RMS entre les tensions mesurées et les tensions estimées des modèles des assemblages	189
Tableau 50 : Informations nécessaires sur les spécifications de la cellule	204
Tableau 51 : Périodes d'échantillonnage (Te) utilisées dans le cadre de la thèse	205
Tableau 52 : Détail de l'activation de la cellule de l'essai 1 (1 ^{ère} partie de l'essai 1)	206
Tableau 53 : Détail du test de capacité de l'essai 1 (2 ^{ème} partie de l'essai 1)	207
Tableau 54 : Détail de l'essai 2 pour déterminer les nombres des motifs en escalier à utiliser en décharge et en charge	208
Tableau 55 : Détail de l'essai 3 pour tester les comportements dynamiques avec les motifs en escalier	210
Tableau 56 : Détermination par défaut du niveau de courant pour chaque impulsion du peigne	211
Tableau 57 : Détail de l'essai 4 pour tester la résistance série de la cellule aux forts courants	213
Tableau 58 : Détails des 5 étapes pour déterminer les périodes d'échantillonnage à utiliser pendant la mesure de la tension de relaxation	215
Tableau 59 : Un exemple de détermination des périodes d'échantillonnage variables à utiliser pendant la mesure de la tension de relaxation	216
Tableau 60 : Informations des cellules de Kokam, NEC et Saft	220

Liste des figures

Figure 1 : Gamme des véhicules électriques de Renault (de gauche à droite : Twizy, Zoé, Fluence électrique et Kangoo électrique) [2].....	10
Figure 2 : Exemple de l'influence de la dispersion des caractéristiques des cellules sur l'énergie utile de l'assemblage.....	11
Figure 3 : Vue éclatée d'un accumulateur [3].....	14
Figure 4 : Principe de fonctionnement des accumulateurs	15
Figure 5 : Comparaison de différentes technologies d'accumulateur sur le diagramme de Ragone [4]	15
Figure 6 : Non-linéarité de la capacité en fonction du courant de décharge pour une batterie lithium-ion Kokam pour une température ambiante de 23 °C [5]	16
Figure 7 : La courbe OCV(SoC) mesurée 1 h après décharge et après charge d'une batterie A123 à 25°C [6].....	18
Figure 8 : Formats de packaging des accumulateurs : (a) Bouton, (b) Cylindrique, (c) Prismatique	19
Figure 9 : Trois catégories de véhicules électrifiés.....	19
Figure 10 : Exemples des véhicules électriques et véhicules électriques hybrides dans l'histoire [9]	20
Figure 11 : Comparaison de différentes technologies de batterie [8] (1 – Mauvais, 10 – Excellent)	21
Figure 12 : Exemple de (a) cellule prismatique (b) module (c) stack (d) pack.....	22
Figure 13 : Comparaison des profils de puissance et de courant des packs de batteries d'un véhicule électrique et d'un véhicule électrique hybride pour le profil de roulage FTP75	24
Figure 14 : Etude des courants de VE et de VEH sur une fenêtre temporelle de la Figure 13	25
Figure 15 : Transport des ions à l'intérieur d'un accumulateur Li-ion [21]	26
Figure 16 : Formation de dendrites durant la charge (schéma simplifié selon [23])	26
Figure 17 : Ions lithium dans la structure de graphite.....	27
Figure 18 : Batterie lithium métal polymère de la compagnie Batscap [28]	29
Figure 19 : Photos de quelques batteries Li-ion commercialisées	30
Figure 20 : Photos de quelques batteries NiMH commercialisées.....	32
Figure 21 : Réponse en tension d'une batterie à une sollicitation de courant en décharge	35
Figure 22 : Diffusion des ions lithium dans les électrodes pendant et après une décharge [46]	37
Figure 23 : Mesure de l'OCV d'une batterie Li-ion de technologie LiFePO ₄ après différentes durées de relaxation [97]	38
Figure 24 : Ordre de grandeur des plages de temps des effets physiques dans les batteries [44].....	39
Figure 25 : Exemple de comportement en fréquentiel d'une batterie Li-ion A123 à 50% de SoC et à 25°C dans le diagramme de Nyquist [48]	40
Figure 26 : Exemple de comportement en fréquentiel d'une batterie Li-ion avec l'apparition de deux demi-cercles liés à l'interface SEI (figure retravaillée à partir de [50])	40
Figure 27 : Exemples de variation de l'impédance pour 4 différentes batteries Li-ion en fonction de : (a) Etat de charge [44], (b) Courant de polarisation [70], (c) Température [50] et (d) Vieillesse [53].....	41
Figure 28 : Synthèse d'un modèle électrochimique pour une batterie Li-ion à partir de [55].....	43
Figure 29 : Schéma circuit électrique équivalent à deux électrodes poreuses d'une cellule Li-ion [63].....	44
Figure 30 : Modèle de circuit électrique équivalent d'une cellule [65].....	45
Figure 31 : Modèle générique de circuit électrique équivalent simplifié d'une cellule.....	45
Figure 32 : Composants utilisés dans les modèles à CPE.....	47

Figure 33 : (a) Eléments possibles pour représenter différentes parties du tracé de Nyquist d'une batterie Li-ion sur la Figure 25 (b) structure du modèle utilisé dans [41]~[43], [47]~[49], [67] (c) structure du modèle utilisé dans [64][66]	48
Figure 34 : (a) Un exemple de représentation de l'impédance de la batterie pour le cas où deux demi-cercles liés à l'interface SEI sont apparus dans le tracé de Nyquist [68] (b) Structure du modèle utilisée dans [68][69][70].....	48
Figure 35 : Influence de l'inductance sur l'intersection avec l'axe réel dans le tracé de Nyquist (Simulation effectuée à l'aide du logiciel EC-Lab de Biologic [89]).....	49
Figure 36 : Structure de Foster (a) et de Cauer (b) pour approximer l'impédance de Warburg [42]	50
Figure 37 : Approximation de l'élément CPE dans le diagramme de Bode par 5 circuits de R//C en série [49]	50
Figure 38 : Approximation du circuit de Zarc par 5 circuits de R//C en série [68].....	50
Figure 39 : (a) Circuit simplifié pour représenter les effets de transfert de charges et double couche (b) Circuits R//C en série pour représenter l'effet de transfert de matière (c) Circuit de transmission pour représenter l'effet de transfert de matière.....	51
Figure 40 : Modèle de Thévenin avec les circuits R//C connectés en série.....	51
Figure 41 : Modèle utilisé dans [60]	52
Figure 42 : Modèle utilisé dans [86][87]	52
Figure 43 : (a) Schéma typique des équipements pour la caractérisation d'une batterie (b) un exemple d'instrumentation d'une batterie Li-ion [88].....	55
Figure 44 : (a) Un banc de Biologic (VMP3+Amplificateur de courant) [89] (b) Un banc d'Arbin (BT-2000) [90] (c) Un banc de Digatron (UBT) [91].....	55
Figure 45 : Caractéristique de la tension, du courant et de la capacité pendant une charge CCCV pour une batterie Li-ion de Kokam de 0.36 Ah [5].....	57
Figure 46 : Caractéristique de la tension et de la température pendant une charge à 1C pour une batterie NiMH de Saft de 3.5 Ah [38].....	58
Figure 47 : (a) Evolution de la capacité réelle normalisée en fonction de courant de décharge (en C) et de la température pour une batterie Li-ion [94] (b) Evolution de la capacité réelle pour une batterie Li-ion pendant le vieillissement [95]	59
Figure 48 : (a) Exemple de profil avec succession de décharge pour la mesure de l'OCV en fonction du SoC [96] (b) Exemple d'évolution de l'OCV en fonction du SoC pour une batterie Li-ion (OCVs mesurées après une heure de repos) [47]	60
Figure 49 : Mesure de la tension d'une batterie Li-ion en fonction du SoC pendant la sollicitation à C/25 en décharge et en charge [72].....	61
Figure 50 : (a) Profil des motifs en escalier pour décharger la batterie [59] (b) Evolution du SoC de la batterie pendant la caractérisation avec l'application successive du profil de (a) [59].....	61
Figure 51 : Comparaison des résultats de l'OCV identifiés par la troisième méthode (ID sur la figure) et des résultats de l'OCV mesurés par la première méthode (meas sur la figure) pour une batterie Li-ion [59].....	62
Figure 52 : Mesures de l'OCV en fonction du SoC d'une batterie Li-ion à trois températures [83].	62
Figure 53 : Mesures de l'OCV d'une dizaine batteries Li-ion 18650 à différents avancement de vieillissement (jusqu'à -30% de capacité) [100].....	63
Figure 54 : Comparaison entre un tracé de Nyquist (courbe bleu) d'une batterie Li-ion à 4 °C et l'estimation avec le modèle à CPE (courbe rouge) de la Figure 34 (b) [68]	64
Figure 55 : Influence de la durée de repos sur la mesure de l'impédance pour une batterie Li-ion à 50% de SoC et à -30 °C [51].....	65
Figure 56 : Influence du courant de polarisation sur la fréquence minimale de mesure de l'impédance pour une batterie Li-ion de 12Ah à 80% de SoC [49].....	66
Figure 57 : Identification de l'élément CPE par les réponses temporelles de la batterie à des créneaux de courant à 1C à différents SoCs pour une batterie Li-ion de 12Ah [49].....	66
Figure 58 : Exemple de caractérisation temporelle de la résistance R_s	67
Figure 59 : Profil avec créneaux composés pour une batterie Li-ion de 0.94 Ah [102].....	68

Figure 60 : Profil de motif en escalier pour une batterie NiMH de 6.5Ah [59].....	69
Figure 61 : Inductance L en fonction du SoC à différents courants de polarisation en charge et en décharge pour une batterie Li-ion [64]	69
Figure 62 : Résistance série mesurée par caractérisation fréquentielle en fonction du SoC à différents courants de polarisation pour une batterie Li-ion [64]	70
Figure 63 : Résistance série en fonction du SoC à différents courants de polarisation pour une batterie Li-ion de 100Ah [74] par caractérisation temporelle.....	71
Figure 64 : (a) Résistance série en fonction de la température et du SoC d'une batterie Li-ion par caractérisation fréquentielle [51] (b) Résistance série pendant le vieillissement en cyclage à 25 °C d'une batterie Li-ion par caractérisation temporelle (Figure refaite à partir de [99]).....	71
Figure 65 : Evolution des paramètres (R, Q, RxQ et α) de l'impédance de transfert de charges et double couche en fonction du SoC et du courant pour une batterie NCM de 12Ah [49].....	72
Figure 66 : (a) Evolution de résistance R de l'impédance de transfert de charges et double couche en fonction du courant à différentes températures pour des batteries Li-ion [65] (b) Variation de la capacité et de la résistance R de l'impédance de transfert de charges et double couche pendant le vieillissement en cyclage pour une batterie Li-ion [53].....	73
Figure 67 : Variation des paramètres de l'impédance de transfert de matière en fonction du SoC et à différents courants de polarisation en charge et en décharge pour une batterie Li-ion de 2.3 Ah (Figure refaite à partir de [64])	74
Figure 68 : Tensions simulée et mesurée pendant la relaxation d'une batterie Li-ion de 2.3Ah à 50% de SoC après décharge et charge [64].....	74
Figure 69 : Variation des paramètres de l'impédance de transfert de matière en fonction du SoC et à différents courants de décharge pour une batterie Li-ion de 0.85 Ah (Figure refaite à partir de [57])	75
Figure 70 : Tension mesurée et simulée d'une batterie Li-ion pour une décharge en créneau à C/2 suivie par une relaxation de plus de 5 h [60]	75
Figure 71 : Variation du paramètre Q de l'impédance de transfert de matière en fonction du SoC et à différentes températures pour des batteries Li-ion de capacités différentes [65]	76
Figure 72 : Evolution du coefficient de Warburg pendant le vieillissement en cyclage pour une batterie Li-ion [103].....	76
Figure 73 : Structure de modèle retenue pour l'étude de la thèse.....	80
Figure 74 : Illustration de la surestimation du SoC causée par la relaxation longue.....	83
Figure 75 : Structure de modèle retenue pour l'étude de la thèse.....	84
Figure 76 : Exemple de la réponse de la batterie et contribution de chaque élément de l'équation (24).....	84
Figure 77 : Réinitialisation de la base du temps au travers d'un changement de variable	86
Figure 78 : Démarche d'identification d'une relaxation.....	89
Figure 79 : (a) Exponentielle normalisée échantillonnée à période constante (b) Exponentielle normalisée échantillonnée à période variable (échantillonnage géométrique).....	90
Figure 80 : Un exemple des valeurs de constantes de temps en fonction de la valeur de γ pour une relaxation de durée $\Delta t_{Relax} = 24$ h (86400 s) avec la période d'échantillonnage minimale $T_e = 0.1$ s.....	94
Figure 81 : Constantes de temps τ_{i_Relax} de la Figure 80 sur une échelle semi-logarithmique en fonction de i pour différentes valeurs de γ	94
Figure 82 : Schéma résumant les données d'entrée et de sortie de la division théorique de la relaxation.....	95
Figure 83 : Détail des itérations d'identification des paramètres pour un modèle avec n circuits R//C	98
Figure 84 : Les principales entrées et sorties de la fonction « lsqcurvefit » de Matlab.....	98
Figure 85 : Détail d'itération de la méthode de dichotomie pour chercher le nombre optimal de circuit R//C.....	100
Figure 86 : Essai permettant d'avoir la mesure de la tension pendant une relaxation de durée 24 h à 45% de SoC d'une cellule A123	101

Figure 87 : Erreur d'estimation du SoC introduite par l'évolution de la tension pendant la relation sur la cellule A123 de la Figure 86	102
Figure 88 : Résultats d'identifications en utilisant la tension pendant la relaxation de la Figure 86	103
Figure 89 : Comparaison des résultats d'identification des deux modèles de la Figure 88	104
Figure 90 : Simulation de la tension pendant la relaxation de 24 h avec les paramètres identifiés des deux modèles de la Figure 88	105
Figure 91 : Essais sur la cellule LiFePO ₄ d'A123 pour obtenir à différents SoCs les mesures de la tension de relaxation 24 h (a) après décharge et (b) après charge	107
Figure 92 : Essais sur la cellule NMC de Kokam pour obtenir à différents SoCs les mesures de la tension de relaxation 24 h (a) après décharge et (b) après charge	107
Figure 93 : Essais sur la cellule NiMH de Saft pour obtenir à différents SoCs les mesures de la tension de relaxation 24 h (a) après décharge et (b) après charge	107
Figure 94 : Mesure de l'OCV de la cellule A123 1 h et 24 h (a) après décharge et (b) après charge	108
Figure 95 : Mesure de l'OCV de la cellule Kokam 1 h et 24 h (a) après décharge et (b) après charge	108
Figure 96 : Mesure de l'OCV de la cellule Saft 1 h et 24 h (a) après décharge et (b) après charge	108
Figure 97 : Erreur d'estimation du SoC en pourcent introduite par l'évolution de la tension pendant la relaxation entre 1 h et 24 h pour (a) cellule A123, (b) cellule Kokam et (c) cellule Saft	109
Figure 98 : Erreur RMS relative en pourcentage en fonction du nombre de R//C pour les relaxations à différents SoCs des cellules (a) A123, (b) Kokam et (c) Saft	110
Figure 99 : Synthèse des valeurs maximales des erreurs RMS relatives en fonction du nombre de R//C pour chaque cellule de la Figure 98	110
Figure 100 : Synthèse des constantes de temps τ_{i_Relax} identifiées en relaxation avec (a) 4 R//C, (b) 5 R//C et (c) 6 R//C (chaque graphique indique la valeur de la plus grande constante de temps identifiable en régime forcé)	112
Figure 101 : Constantes de temps τ_{i_Relax} identifiées avec le modèle constitué de 5 R//C à partir des relaxations à différents SoCs des cellules (a) A123, (b) Kokam et (c) Saft	113
Figure 102 : Chutes de tensions U_{i_Relax} identifiées avec le modèle constitué de 5 R//C à partir des relaxations à différents SoCs des cellules (a) A123, (b) Kokam et (c) Saft	114
Figure 103 : Constantes de temps reconstruites pour la règle générale de détermination du nombre de circuit R//C du modèle	114
Figure 104 : Démonstration de la position de la période d'échantillonnage entre deux constantes de temps reconstruites	116
Figure 105 : Description des essais sur une cellule Li-ion d'A123 pour obtenir des relaxations d'1h après différents niveaux de sollicitation en décharge	119
Figure 106 : Résultats d'identification des constantes de temps pour les relaxations après la sollicitation à 1C	119
Figure 107 : Résultats des représentations des relaxations après les sollicitations à 5C, 10C et 20C avec les constantes de temps identifiées par les relaxations après la sollicitation à 1C	119
Figure 108 : Résultats de la Figure 107 avec le temps à l'échelle logarithmique	120
Figure 109 : Comparaisons des U_{i_Relax} pour différentes relaxations après décharge (a) à 90% de SoC et (b) à 40% de SoC	120
Figure 110 : Résultats des représentations des relaxations après la sollicitation à -4C avec les constantes de temps identifiées par les relaxations après la sollicitation à -1C	121
Figure 111 : Comparaisons des U_{i_Relax} pour différentes relaxations après charge (a) à 70% de SoC et (b) à 10% de SoC	121
Figure 112 : Illustration de l'idée d'extrapolation de la relaxation longue	122
Figure 113 : Exemple d'extrapolation de la valeur de U_{5_Relax} à partir des valeurs de U_{2_Relax} , U_{3_Relax} et U_{4_Relax} identifiées avec la relaxation d'1h à 45% de SoC de la cellule A123	123

Figure 114 : Performance du modèle avec 5 circuits R//C reconstruit pour extrapoler la relaxation longue de 1h à 24h à 45% de SoC de la cellule A123	124
Figure 115 : Performance du modèle avec 5 circuits R//C reconstruit pour extrapoler la relaxation longue de 1 h à 24 h (a) à 85% et (b) à 25% de SoC de la cellule A123	124
Figure 116 : Relaxation longue de 1 h à 24 h à 45% de SoC de la cellule A123 avec l'axe du temps (a) à l'échelle linéaire et (b) à l'échelle logarithmique (<i>la tension de relaxation au-delà de 2.2 h est proche d'une droite - cf. ligne droite pointillée en noir</i>)	126
Figure 117 : Illustration des étapes pour étudier la relation entre la durée de mesure ajoutée au-delà de 2.2 h et la précision d'identification de la pente de la ligne droite	127
Figure 118 : Ecart absolu de ΔU_{Ecart} en fonction de la durée ajoutée	127
Figure 119 : Performance du modèle avec 5 circuits R//C reconstruit avec la mesure de 5.2 h pour extrapoler la relaxation longue de 5.2 h à 24 h (a) à 85%, (b) à 45% et (c) à 25% de SoC de la cellule A123	129
Figure 120 : Structure de modèle retenue pour l'étude de la thèse	132
Figure 121 : Démarche d'identification des paramètres du modèle de la cellule	134
Figure 122 : Exemple de réduction du nombre de relaxation avec l'utilisation d'un motif en escalier	135
Figure 123 : Illustration de la stratégie d'identification des constantes de temps avec le motif en escalier	137
Figure 124 : Tableau de spécification des amplitudes du motif en escalier quand le courant maximal de la cellule $I_{\text{max}} \leq 8C$	138
Figure 125 : Résumé de la méthode de construction du motif de caractérisation en décharge ou en charge	139
Figure 126 : Illustration de la réponse d'une cellule à un motif en escalier	140
Figure 127 : Motif en escalier en décharge pour la cellule d'A123	143
Figure 128 : Démarche d'identification des paramètres avec un motif en escalier	143
Figure 129 : Evolution de l'OCV pendant le motif en escalier	144
Figure 130 : Evolution des chutes de tension sur les 4 ^{ème} et 5 ^{ème} circuits R//C pendant le motif en escalier	146
Figure 131 : Sauts de tension provoqués par le motif en escalier	146
Figure 132 : (a) un exemple de la non-linéarité de résistance série (b) Réponse de la résistance série à une sollicitation en escalier	147
Figure 133 : Démonstration du résultat erroné du calcul de R_s par l'équation (87)	148
Figure 134 : Evolution de la chute de tension sur R_s pendant le motif en escalier	149
Figure 135 : Enlèvement des contributions de l'OCV, de la résistance série R_s et des 4 ^e et 5 ^e circuits R//C	149
Figure 136 : Réinitialisation de la base du temps pour le régime forcé a (RF_a) de $u_{\text{residu}}(t)$	150
Figure 137 : Evolution de chute de tension sur le 3 ^{ème} circuit R//C $u_3(t)$ pendant les régimes forcés « b » et « c » (RF_b et RF_c)	151
Figure 138 : Régimes forcés b et c (RF_b et RF_c) de $u_{\text{residu}}(t)$ avec réinitialisation de la base du temps	153
Figure 139 : Comparaison entre la mesure expérimentale de l'essai de décharge avec le motif en escalier et les résultats de simulations avec les deux modèles identifiés	155
Figure 140 : Comparaison entre la mesure expérimentale d'un essai de validation et les résultats de simulations avec les deux modèles identifiés	155
Figure 141 : Principe de l'essai 1 pour tester la capacité réelle de la cellule	157
Figure 142 : Détermination des motifs en escalier en décharge et en charge	158
Figure 143 : Principe de l'essai 2 pour déterminer les nombres des motifs en escalier à utiliser en décharge et en charge	158
Figure 144 : Principe de l'essai 3 pour caractériser la cellule avec les motifs en escalier en décharge et en charge	159
Figure 145 : Principe de l'essai 4 pour tester la résistance série R_s aux forts courants	159

Figure 146 : Logiciel de caractérisation de cellule	160
Figure 147 : Simulateur du comportement dynamique de la cellule	160
Figure 148 : Résultat de l'essai 1 pour activer la cellule et tester sa capacité réelle	162
Figure 149 : Motifs en escalier utilisés	162
Figure 150 : Résultat de l'essai 2 pour déterminer le nombre des motifs en escalier à utiliser.....	163
Figure 151 : Principal résultat de l'essai 3 pour tester le comportement dynamique de la cellule : (a) profil en décharge (b) profil en charge.....	164
Figure 152 : Peigne d'impulsions utilisé pour la cellule d'A123	164
Figure 153 : Principal résultat de l'essai 4 pour tester la résistance série aux forts courants entre 95% et 5% de SoC selon la Figure 145.....	165
Figure 154 : 3 autres cellules caractérisées avec la procédure de caractérisation : (a) Kokam 12Ah, (b) NEC 4.3Ah et (c) Saft 3Ah	165
Figure 155 : Un cycle du profil de courant NEDC	166
Figure 156 : Comparaison entre la mesure de l'essai de validation et l'estimation du modèle identifié de la cellule A123	166
Figure 157 : Comparaison entre la mesure de l'essai de validation et l'estimation du modèle identifié de la cellule Kokam	167
Figure 158 : Comparaison entre la mesure de l'essai de validation et l'estimation du modèle identifié de la cellule NEC	167
Figure 159 : Comparaison entre la mesure de l'essai de validation et l'estimation du modèle identifié de la cellule Saft.....	168
Figure 160 : Exemple du déroulement des 4 essais de caractérisation	169
Figure 161 : Illustration du principe de la solution proposée pour tester plusieurs batteries	170
Figure 162 : Principe du système de démultiplexeur.....	171
Figure 163 : Prototype du système de démultiplexeur avec 8 voies de test : (a) partie matérielle et (b) partie logicielle.....	171
Figure 164 : Organisation des cellules à l'intérieur d'un pack	174
Figure 165 : Structures élémentaires de l'assemblage : (a) structure des cellules en série et (b) structure des cellules en parallèle.....	174
Figure 166 : Exemple montrant l'insuffisance de la définition du SoC de l'assemblage proposée dans [106].....	175
Figure 167 : Illustration de la problématique de la gestion du SoC de chaque cellule pour l'assemblage des cellules en série	176
Figure 168 : Illustration de la définition de la capacité réelle de l'assemblage des cellules en série	177
Figure 169 : Evolutions des tensions des 12 batteries Li-ion en série pendant une recharge de « CC/CV » [107].....	177
Figure 170 : Définitions de charge disponible et de charge acceptable pour une cellule	178
Figure 171 : Exemple illustrant le calcul de la capacité réelle et du SoC de l'assemblage	179
Figure 172 : Deux assemblages pour illustrer la définition de la capacité réelle de l'assemblage..	179
Figure 173 : Décharge de l'assemblage de la configuration A	181
Figure 174 : Recharge de l'assemblage de la configuration B	181
Figure 175 : Mesures de la tension de l'assemblage de deux cellules en série et les tensions de chaque cellule.....	182
Figure 176 : Comparaison entre la tension simulée de la chute de tension avec la résistance de câblage calculée ($u_{R_{c\grave{a}b}}$) et l'écart entre la tension mesurée de l'assemblage et la somme des tensions mesurées des cellules ($(u_1+u_2) - u_{ass}$).....	183
Figure 177 : Modèle de l'assemblage de N cellules en série	183
Figure 178 : Illustration de la démarche d'évaluation de la performance du modèle de l'assemblage	184
Figure 179 : 3 assemblages avec configurations différentes.....	185

Figure 180 : Résultats expérimentaux pour la décharge de l'assemblage de la configuration 1 (Config1).....	186
Figure 181 : Résultats expérimentaux pour la décharge de l'assemblage de la configuration 2 (Config2).....	186
Figure 182 : Résultats expérimentaux pour la décharge de l'assemblage de la configuration 3 (Config3).....	187
Figure 183 : Comparaison entre la mesure et l'estimation du modèle de l'assemblage de la configuration 1 (Config1)	188
Figure 184 : Comparaison entre la mesure et l'estimation du modèle de l'assemblage de la configuration 2 (Config2)	188
Figure 185 : Comparaison entre la mesure et l'estimation du modèle de l'assemblage de la configuration 3 (Config3)	189
Figure 186 : Simulation des tensions et SoCs de cellules de l'assemblage de la configuration 1 (Config1).....	190
Figure 187 : Simulation des tensions et SoCs de cellules de l'assemblage de la configuration 2 (Config2).....	190
Figure 188 : Simulation des tensions et SoCs de cellules de l'assemblage de la configuration 3 (Config3).....	191
Figure 189 : Simulation des tensions et SoCs de cellules d'un assemblage dans lequel les charges disponibles de ses cellules sont identiques au départ.....	191
Figure 190 : Détermination des motifs en escalier en décharge et en charge	207
Figure 191 : Illustration du déroulement de l'étape 2 à l'étape 8 de l'essai 2	209
Figure 192 : Illustration du déroulement de l'essai 3.....	210
Figure 193 : Un peigne d'impulsions de courant.....	211
Figure 194 : Application répétitive du peigne d'impulsions entre 95% et 5% de SoC	212
Figure 195 : Exemple des périodes d'échantillonnage utilisées pendant une relaxation de 24h	217
Figure 196 : Interface de l'outil de détermination des périodes d'échantillonnage sous Excel.....	217
Figure 197 : Paramètres identifiés avec le profil en décharge de l'essai 3 de la cellule d'A123.....	218
Figure 198 : Paramètres identifiés avec le profil en charge de l'essai 3 de la cellule d'A123	218
Figure 199 : Résistance série pour différents courants forts de la cellule d'A123	219

Nomenclature

(Pour les Chapitres 3, 4 et 5)

α	: Valeur entière pour déterminer la plus petite constante de temps théorique
β	: Valeur entière pour déterminer la condition à la limite supérieure des constantes de temps théoriques
ϵ_{acc}	: Erreur acceptable
γ	: Rapport de deux constantes de temps consécutives
γ_{Rec}	: Rapport entre deux constantes de temps reconstruites
δ	: Valeur entière pour déterminer la condition à la limite inférieure des constantes de temps théoriques
τ_i	: Constante de temps d'un circuit R//C
τ_{i_Relax}	: Constante de temps d'un circuit R//C en relaxation
$\tau_{i_Relax_Min}$	: Condition à la limite inférieure d'une constante de temps τ_{i_Relax}
$\tau_{i_Relax_Max}$	: Condition à la limite supérieure d'une constante de temps τ_{i_Relax}
τ_{i_RF}	: Constante de temps d'un circuit R//C en régime forcé
τ_{i_RFa}	: τ_i pour le courant I_a
τ_{i_RFb}	: τ_i pour le courant I_b
τ_{i_RFc}	: τ_i pour le courant I_c
τ_m	: Constante de temps reconstruite
τ_{M0}	: Première constante de temps reconstruite supérieure à T_e
τ_{Mmin}	: Plus petite constante de temps identifiable parmi les constantes de temps reconstruites
τ_{Mmax}	: Plus grande constante de temps identifiable parmi les constantes de temps reconstruites
C_i	: Condensateur d'un circuit R//C
$C_{Ass_R\acute{e}el}$	: Capacité réelle de l'assemblage
$C_{Batt_R\acute{e}el}$	: Capacité réelle de la cellule
C_{Batt_Nom}	: Capacité nominale de la cellule
$C_{Batt_R\acute{e}el_i}$	: Capacité réelle d'une cellule dans l'assemblage
$ceil(X0)$	: Fonction qui renvoie l'arrondi à la valeur supérieure de X0
$i(t)$	: Courant de la cellule en fonction du temps
I	: Courant de la cellule à un instant donnée
I_0	: valeur de courant
I_1	: valeur de courant
I_a	: Valeur de courant du 1 ^{er} palier du motif de courant
I_b	: Valeur de courant du 2 ^{er} palier du motif de courant
I_c	: Valeur de courant du 3 ^{er} palier du motif de courant
I_{const}	: Courant constant de charge
I_{Cha_Essai2}	: Un courant de charge de l'essai 2
I_{Cha_Essai3}	: Un courant de charge de l'essai 3
I_{Cha_i}	: Courant de la i ^{ème} impulsion en décharge de l'essai 4
I_{Dch_Essai1}	: Courant de décharge de l'essai 1
I_{Dch_Essai2}	: Courant de décharge de l'essai 2
I_{Dch_Essai3}	: Courant de décharge de l'essai 3
I_{Dch_Essai4}	: Courant de décharge de l'essai 4
I_{Dch_i}	: Courant de la i ^{ème} impulsion en décharge de l'essai 4
$I_{Dch_TestCap}$	: Courant de décharge pour tester la capacité réelle
I_{fin_Cha}	: Courant indiquant la fin de charge
$I_{max_Dch_Con}$	: Courant de décharge maximal en continu
I_{max}	: Courant maximal de la cellule
$I_{max_Dch_Imp}$	: Courant de décharge maximal en impulsion
$I_{max_Cha_Con}$	: Courant de charge maximal en continu
$I_{max_Cha_Imp}$	: Courant de charge maximal en impulsion
I_{Ref}	: Courant de référence en décharge pour tester la capacité réelle

K_{\max_Essai}	: Température maximale de la cellule autorisée pendant l'essai
n	: Nombre de circuit R//C
$N_{Creneaux_Dch}$	: Nombre de créneaux de décharge de l'essai 3
$N_{Creneaux_Cha_1}$	: Nombre de créneaux de charge de l'essai 3 à $I_{Cha_Essai3_1}$
$N_{Creneaux_Cha_2}$	: Nombre de créneaux de charge de l'essai 3 à $I_{Cha_Essai3_2}$
N_{Ech}	: Nombre de points de mesure de tension pendant une relaxation
N_{imp}	: Nombre des impulsions de décharge de l'essai 4
N_{min}	: Limite inférieure des nombres possibles des circuits R//C
N_{max}	: Limite supérieure des nombres possibles des circuits R//C
N_{Motif_Dch}	: Nombre de motifs prédéfini de décharge de l'essai 3
N_{Motif_Cha}	: Nombre de motifs prédéfini de charge de l'essai 3
N_{seq1}	: Nombre de séquence de type 1 de l'essai 4
N_{seq2}	: Nombre de séquence de type 2 de l'essai 4
N_{test}	: Nombre de circuits R//C à tester
OCV	: Tension de circuit ouvert à un état de charge donné
OCV _{Init}	: Tension de circuit ouvert initial
OCV _{Relax}	: Tension de circuit ouvert en relaxation
OCV(SoC _{RFa})	: Tension de circuit ouvert à la fin du RF _a
OCV(SoC _{RFb})	: Tension de circuit ouvert à la fin du RF _b
OCV(SoC _{RFc})	: Tension de circuit ouvert à la fin du RF _c
OCV(SoC _{Relax})	: Tension de circuit ouvert pendant la relaxation
q	: Facteur pour l'échantillonnage géométrique
Q_{Acc_i}	: Charge acceptable d'une cellule dans l'assemblage
Q_{Acc_Ass}	: Charge acceptable de l'assemblage
Q_{Dis_i}	: Charge disponible d'une cellule dans l'assemblage
Q_{Dis_Ass}	: Charge disponible de l'assemblage
ΔQ	: Charge échangée
R_{Cab}	: Résistance de câblage
R_i	: Résistance d'un circuit R//C
R_{i_RF}	: Résistance d'un circuit R//C en régime forcé
R_{i_RFa}	: R_i pour le courant I_a
R_{i_RFb}	: R_i pour le courant I_b
R_{i_RFc}	: R_i pour le courant I_c
R_s	: Résistance de série
R_{s_RFa}	: R_s pour le courant I_a
R_{s_RFb}	: R_s pour le courant I_b
R_{s_RFc}	: R_s pour le courant I_c
RF_a	: Régime forcé a pour le courant I_a
RF_b	: Régime forcé b pour le courant I_b
RF_c	: Régime forcé c pour le courant I_c
SoC _{Ass}	: Etat de charge de l'assemblage
SoC _i	: Etat de charge d'une cellule dans l'assemblage
SoC _{Init_i}	: Etat de charge initial d'une cellule dans l'assemblage
SoC _{Fin_i}	: Etat de charge final d'une cellule dans l'assemblage
SoC _{Fin_Dch}	: SoC à la fin des motifs en décharge de l'essai 3
SoC _{Fin_Cha}	: SoC à la fin des motifs en charge de l'essai 3
SoC _{RFa}	: SoC à la fin du RF _a
SoC _{RFb}	: SoC à la fin du RF _b
SoC _{RFc}	: SoC à la fin du RF _c
SoC _{Relax}	: SoC pendant la relaxation
ΔSoC_{Motif}	: Variation de SoC d'un motif
t	: Temps
t_{Relax}	: Temps réinitialisé pour l'étude de la relaxation
t_{RFa}	: Temps réinitialisé pour le régime forcé « a »
t_{RFb}	: Temps réinitialisé pour le régime forcé « b »
t_{RFc}	: Temps réinitialisé pour le régime forcé « c »
T_0	: Instant à la fin du régime forcé

T_e	: Période d'échantillonnage
T_{\max}	: Température maximale d'opération de la cellule
T_{\min}	: Température minimale d'opération de la cellule
Δt_a	: Durée du régime forcé « a » (RF_a)
Δt_b	: Durée du régime forcé « b » (RF_b)
Δt_c	: Durée du régime forcé « c » (RF_c)
Δt_{Dch_i}	: Durée de la $i^{\text{ème}}$ impulsion en décharge de l'essai 4
Δt_{Cha_i}	: Durée de la $i^{\text{ème}}$ impulsion en charge de l'essai 4
Δt_{Relax}	: Durée de relaxation
$\Delta t_{Relax_Cha_i}$	: Durée de relaxation après la $i^{\text{ème}}$ impulsion en charge de l'essai 4
$\Delta t_{Relax_Dch_i}$	: Durée de relaxation après la $i^{\text{ème}}$ impulsion en décharge de l'essai 4
Δt_{Relax_Essai1}	: Une durée de relaxation de l'essai 1
$\Delta t_{Relax_Essai3_1}$	: Une durée de relaxation de l'essai 3
Δt_{Relax_Essai4}	: Durée de relaxation voulue de l'essai 4
Δt_{Relax_Voulue}	: Relaxation voulue
$u_{batt}(t)$	: Tension de la cellule en fonction du temps
$u_i(t)$	: Chute de tension sur un circuit R//C en fonction du temps
$u_{Rc\grave{a}b}(t)$	: Chute de tension sur la résistance de câblage
$u_s(t)$	: Chute de tension sur la résistance série R_s en fonction du temps
U_0	: Tension de la cellule à un instant donnée
U_{const}	: Tension constante de charge
U_{batt}	: Tension de la cellule à un instant donnée
U_{batt_RFa}	: Tension de la cellule à la fin du régime forcé « a » (RF_a)
U_{batt_RFb}	: Tension de la cellule à la fin du RF_b
U_{batt_RFc}	: Tension de la cellule à la fin du RF_c
U_{i_Relax}	: Chute de tension sur le circuit $R_i//C_i$ au début de la relaxation
U_{i_RFa}	: Chute de tension sur le circuit $R_i//C_i$ à la fin du régime forcé « a » (RF_a)
U_{i_RFb}	: Chute de tension sur le circuit $R_i//C_i$ à la fin du RF_b
U_{i_RFc}	: Chute de tension sur le circuit $R_i//C_i$ à la fin du RF_c
U_{\max_Essai}	: Tension maximale de la cellule autorisée pendant l'essai
U_{\max_Con}	: Tension maximale de la cellule pour la sollicitation en continu
U_{\max_Imp}	: Tension maximale de la cellule pour la sollicitation en impulsion
U_{\min_Con}	: Tension minimale de la cellule pour la sollicitation en continu
U_{\min_Essai}	: Tension minimale de la cellule autorisée pendant l'essai
U_{\min_Imp}	: Tension minimale de la cellule pour la sollicitation en impulsion
U_{Relax_init}	: Tension initiale de la relaxation
U_{s_RFa}	: Chute de tension sur R_s à la fin du RF_a
U_{s_RFb}	: Chute de tension sur R_s à la fin du RF_b
U_{s_RFc}	: Chute de tension sur R_s à la fin du RF_c
ΔU_{STa}	: Saut de tension causé par le changement de courant de $0A$ à I_a
ΔU_{STb}	: Saut de tension causé par le changement de courant de I_a à I_b
ΔU_{STc}	: Saut de tension causé par le changement de courant de I_b à I_c