

Modélisation de la réponse statique de la diffusion solide dans les batteries lithium-ion

Ghada Bakaraki⁽¹⁾⁽²⁾, Houssam Rabab⁽³⁾, Nicolas Damay^{*(1)}, Khadija El Kadri Benkara⁽¹⁾, Christophe Forgez⁽¹⁾

⁽¹⁾ Université de Technologie de Compiègne, Roberval (Mécanique, énergie et électricité), Centre de recherche Royallieu - CS 60319, 60203 Compiègne Cedex, France

⁽²⁾ Safran Electrical & Power 70-80 Rue Auguste Perret, Créteil, 94000, France

⁽³⁾ TIAMAT, 72 rue des Jacobins, Amiens, 80000, France

RESUME – Un modèle de cellule lithium basé sur un circuit électrique équivalent séparant les effets de diffusions solide et liquide est proposé. La caractérisation des dépendances en courant et en température de la réponse statique de la diffusion solide sont aussi présentées. Grâce à ce modèle, les paramètres de diffusion présentent moins de non-linéarités et sont plus faciles à déterminer en comparaison d'un modèle de Randles classique. Ce modèle est testé pour des cellules Samsung 25R de type NMC+NCA/Graphite+SiO dont la diffusion présente de fortes non-linéarités en état de charge (« state of charge » SoC). Le modèle proposé permet de bien simuler le comportement des cellules testées, notamment en fin de décharge.

Mots-clés—Batteries, lithium-ion, circuit électrique équivalent, diffusion solide, non-linéarités.

1. INTRODUCTION

Le monde est confronté à des défis importants tels que la pollution et les pénuries d'énergie. Les nouvelles technologies énergétiques se développent rapidement et les cellules lithium-ion (Li-ion) sont devenues cruciales pour les applications aéronautiques et automobiles. Un système de gestion des batteries (BMS) performant est nécessaire pour assurer la sécurité et l'efficacité, ainsi que pour surveiller et estimer les états internes des cellules. Tout cela nécessite un modèle des cellules simple et précis. Pour répondre à ces exigences, les circuits électriques équivalents (« *equivalent circuit model* » ECM), sont souvent utilisés. En revanche, les ECM sont généralement basés sur des tables de paramètres qui présentent plusieurs limitations [1,2,3] : difficulté d'ajustement avec le vieillissement, les paramètres sont identifiés à l'aide d'algorithmes d'optimisation dont les résultats ne sont pas toujours physiquement cohérents et ne décrivent le comportement non-linéaire des cellules que pour un ensemble de points discrets. En outre, les ECM classiques ne peuvent pas facilement représenter les effets de diffusion en régime statique, surtout à bas SoC [2,4], ce qui nécessite des tests de caractérisation longs et complexes.

En fait, les phénomènes de diffusion dans les batteries Li-ion sont fortement non linéaires, en particulier dans la région de faible SoC, et il a été démontré dans [4,5] qu'un ECM conventionnel utilisant des tables de paramètres ne peut représenter correctement les effets de diffusion que si leur résolution est relativement élevée et que leur détermination est faite de manière fine.

Dans cet article, nous utilisons un ECM inspiré d'un modèle « *single-particle* » appelé ECM-SP^e [4]. Cette

approche fait la distinction entre les effets de la diffusion dans les particules de la matière active (appelée diffusion solide [6]) et dans l'électrolyte (appelée diffusion liquide [7]). Cette étude se focalise sur la modélisation physique des non-linéarités de la diffusion solide en régime statique, ce qui permet également de simplifier la détermination de ses paramètres.

Plusieurs modèles basés sur la modélisation de la diffusion solide ont été trouvés dans la littérature [8,9]. Il a été aussi démontré dans [1] que l'ECM tenant compte les effets de la diffusion solide est plus performant que l'ECM classique dans lequel les phénomènes de diffusions ne sont pas séparés. Concernant la diffusion solide, d'une part, plusieurs auteurs considèrent qu'elle est représentée par un système du premier ordre [1,2]. D'autre part, elle pourra être représentée par plusieurs systèmes du premier ordre [10,11]. Dans cette étude, nous allons considérer une dynamique d'ordre 3 comme première approximation afin de tester le modèle, et nous nous focalisons particulièrement sur l'identification de la réponse statique de la diffusion solide. La modélisation de la réponse dynamique de la diffusion solide, ainsi que la diffusion liquide ne sera pas abordée dans cet article.

Dans la section 2 nous présentons les circuits électriques équivalents des cellules lithium-ion, en rappelant le modèle de Randles modifié et en le comparant avec l'ECM que nous proposons. La section 3 présente le modèle de diffusion solide et ses dépendances de température et de courant. Le protocole expérimental et la méthodologie d'extraction des paramètres sont détaillés dans la section 4. Les résultats de l'identification des paramètres, ainsi qu'une validation des simulations, sont présentés dans la section 5, avant de conclure l'article.

2. LES CIRCUITS ELECTRIQUES EQUIVALENTS

Dans ce paragraphe nous présentons une comparaison entre le modèle classique et le modèle proposé (ECM-SP^e) [4].

2.1. Le modèle électrique équivalent classique

Le modèle classique consiste en un circuit de Randles modifié (fig. 1a), chaque composant représente un phénomène présent dans les cellules Li-ion. On distingue :

- Une résistance série R_s représentant les résistances des connectiques et de l'électrolyte.
- Une résistance R_{surf} en dérivation avec une capacité, représentant les chutes de tension liées aux

* nicolas.damay@utc.fr

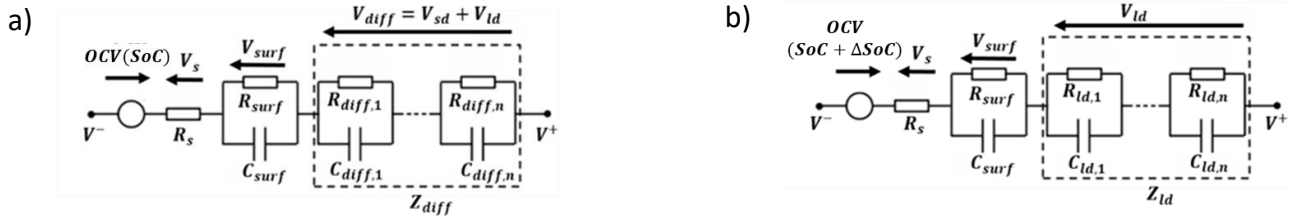


Fig. 1. Modèle a) classique, b) ECM-SPe [3]

phénomènes de transfert de charge et aux couches de passivation.

- Une impédance Z_{diff} combinant tous les phénomènes de diffusion. Cette impédance est l'équivalent d'une série de n circuits RC [3].
- Une source de tension (« open circuit voltage » OCV).

2.2. Le circuit électrique équivalent proposé

Dans l'ECM classique (fig. 1a), Z_{diff} est fortement non-linéaire en SoC car elle représente tous les phénomènes de diffusion. Cela rend difficile la détermination précise de ses paramètres et dégrade la précision du modèle surtout à bas SoC et complexifie la caractérisation de la diffusion. Pour résoudre ce problème, nous avons modifié l'ECM classique en séparant les phénomènes de diffusion (fig. 1b) en :

- Diffusion solide, due au gradient de concentration de lithium au sein des particules des électrodes.
- Diffusion liquide, due au gradient de concentration des ions de lithium dans l'électrolyte.

La diffusion solide dépend du SoC , alors que la diffusion liquide peut être supposée indépendante du SoC [4]. Donc, la tension de diffusion, notée V_{diff} , est la somme des tensions de diffusion solide et liquide notées V_{sd} et V_{ld} respectivement (éq. (1)). À l'instar des modèles électrochimiques [12], nous modélisons l'effet de la diffusion solide sous la forme d'un décalage de l'OCV en SoC noté ΔSoC (éq. (2)). La diffusion liquide sera représentée par l'impédance Z_{ld} indépendante du SoC , elle suit une dynamique similaire à celle représentée par l'équation (3). Aucune modification n'est faite pour les autres paramètres de l'ECM.

$$V_{diff}(I, T, SoC) = V_{sd}(I, T, SoC) + V_{ld}(I, T) \quad (1)$$

$$OCV(T, SoC) + V_{sd}(I, T, SoC) = OCV(T, SoC + \Delta SoC(I, T)) \quad (2)$$

2.3. Comparaison des circuits électriques équivalents

L'ECM proposé, appelé ECM-SPe [4], décrit dans la figure 1.b, introduit une nouvelle approche de la modélisation des effets de diffusion. Cette approche représente la diffusion sous forme de deux phénomènes principaux : la diffusion solide, représentée par le décalage en SoC noté « ΔSoC » (éq. (2)), et la diffusion liquide représentée par plusieurs circuits RC connectés en série, qui est équivalente à l'impédance de diffusion liquide, notée « Z_{ld} ». Cependant, pour les résultats de la simulation présentés à la section 5, un seul circuit RC est utilisé. En effet, un nombre plus élevé de circuits RC pourrait être utilisé, mais cela rendrait l'implémentation du modèle plus complexe.

La principale modification apportée à l'ECM classique réside dans l'OCV et le processus de diffusion. En fait, l'ECM classique (fig. 1a) utilise « Z_{diff} » comme impédance de diffusion. Cette dernière est non linéaire en termes de SoC , car elle représente tous les effets de diffusion.

Dans notre approche de modélisation, nous intégrons les non-linéarités en SoC de la diffusion solide dans l'OCV (éq. (2)). Cela réduit les non-linéarités du modèle puisque Z_{ld} est indépendante du SoC , contrairement à Z_{diff} dans l'ECM conventionnel (fig. 1.a). ΔSoC est, lui aussi, supposé indépendant du SoC .

Dans la section suivante, la modélisation des non-linéarités de courant et de température de la diffusion solide sera présentée.

3. MODELE STATIQUE DE LA DIFFUSION SOLIDE

La diffusion solide, i.e. ΔSoC , peut être représentée par plusieurs systèmes d'ordre 1 [10,11]. En plus, toute grandeur représentée par une tangente hyperbolique est aussi décomposée en n systèmes du premier ordre [3,13]. Par conséquent, on a choisi de modéliser ΔSoC d'une façon comportementale, et comme première approximation, en utilisant l'équation suivante (éq. (3)) :

$$\Delta SoC(s) = \Delta SoC_{st} \frac{\tanh(\sqrt{\tau_{sd} \cdot s})}{\sqrt{\tau_{sd} \cdot s}} \quad (3)$$

où " ΔSoC_{st} ", représente la valeur de ΔSoC une fois il atteint le régime établi, " τ_{sd} " est la constante de temps de ΔSoC , et " s " est la variable de Laplace.

Dans cet article, nous nous intéressons uniquement à la modélisation de ΔSoC_{st} . Comme indiqué dans la section 2.3, ΔSoC dépend du courant et de la température. Ces dépendances seront également présentes dans ΔSoC_{st} . La modélisation de ces dépendances sera détaillée dans les sous-sections suivantes.

3.1. Dépendance en courant

Quand le courant de décharge augmente, la capacité déchargée de la cellule diminue [14]. L'augmentation du courant de décharge induit des décalages verticaux et horizontaux des courbes de tension par rapport à l'OCV, ci-après appelée « courbe de référence ». Les décalages horizontaux sont attribués à la diffusion solide, tandis que les décalages verticaux sont dus à d'autres effets tels que la diffusion liquide, la résistance série, la résistance de surface, etc. (fig. 2). Par conséquent, ΔSoC varie avec le courant. Cette dépendance en courant est représentée dans ΔSoC_{st} .

D'après [1,2,11], ΔSoC_{st} varie linéairement avec le courant de décharge. Il est donc représenté par l'équation 4 :

$$\Delta SoC_{st}(I) = K_{sd} \times (I - I_{ref}) \quad (4)$$

Avec K_{sd} , la pente, représentant l'effet de la diffusion solide, I le courant de décharge et I_{ref} le courant de la courbe de référence (voir section 5).

3.2. Dépendance en température

La température impacte significativement la diffusion solide [2]. En fait, quand la température augmente le coefficient de diffusion des ions lithium augmente. Cette dépendance en température est donc présente dans ΔSoC_{st} et par la suite dans K_{sd} , qui évolue avec la température suivant la loi d'Arrhenius (eq. (5)) :

$$K_{sd}(T) = K_{sd}(T_{ref}) \times \exp\left(\frac{E_{a,sd}}{K_b} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (5)$$

Avec $E_{a,sd}$ l'énergie d'activation de K_{sd} , T_{ref} la température de référence en Kelvin et K_b la constante de Boltzmann. La modélisation de ΔSoC_{st} revient donc à identifier K_{sd} , ensuite $K_{sd}(T_{ref})$, avec $T_{ref} = 25^\circ C$ (298K), et $E_{a,sd}$.

À cette fin, nous avons effectué plusieurs essais de décharge continue à différents courants et températures. Le protocole expérimental et la méthodologie d'identification des paramètres sont présentés dans la section suivante.

4. PROTOCOLE EXPERIMENTAL ET IDENTIFICATION DES PARAMETRES

Dans cette étude, des cellules Samsung 18650-25R (NCA+NMC/Graphite+SiO) ont été utilisées. Elles ont une capacité nominale Q_{nom} de 2,5 Ah, une tension nominale de 3,6 V, un régime de courant maximal de 8C en décharge continue et de 1,6C en charge continue. Un système Bio-Logic a été utilisé pour les tests (BCS-815), offrant 8 voies avec un courant maximal de 15A chacune. Sa précision est de 0,1 % de la pleine échelle pour le courant et la tension. En outre, les cellules ont été placées dans une enceinte climatique pour contrôler leur température.

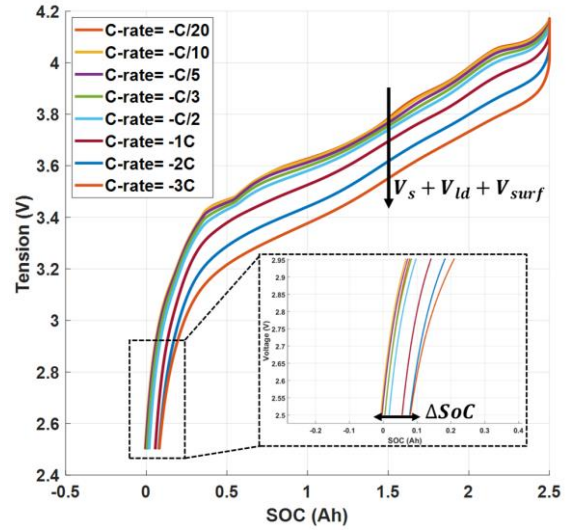


Fig. 2. Les décalages verticaux et horizontaux

4.1. Le protocole expérimental

La caractérisation de la dépendance en courant de la réponse statique de la diffusion solide (eq. (4)) consiste en des essais de décharge à courant constant à C/20, C/10, C/5, C/3, C/2, 1C, 2C et 3C. Ces essais ont également été réalisés à trois températures (10 °C, 25 °C et 35 °C), qui est le nombre minimum requis afin de valider la loi d'Arrhenius.

La première étape consiste en une décharge résiduelle à C/2 jusqu'à ce que la tension de coupure (2,5 V) soit atteinte. Ensuite, la cellule est rechargée en CC-CV avec un courant constant de C/2 jusqu'à ce qu'elle atteigne 4,2 V, suivi d'une charge à une tension constante jusqu'à C/20 pour charger complètement la batterie. La deuxième étape consiste à décharger la cellule avec un courant de C/20, suivie d'une charge identique à celle effectuée lors de la première étape. L'étape suivante répète la deuxième étape pour les courants restants. A noter qu'un temps de relaxation de 6 heures a été ajouté après chaque charge et chaque décharge afin de s'assurer que la température et la tension de la cellule sont stabilisées. La figure 3 illustre le profil du courant et de la tension correspondante des essais de décharge avec un courant

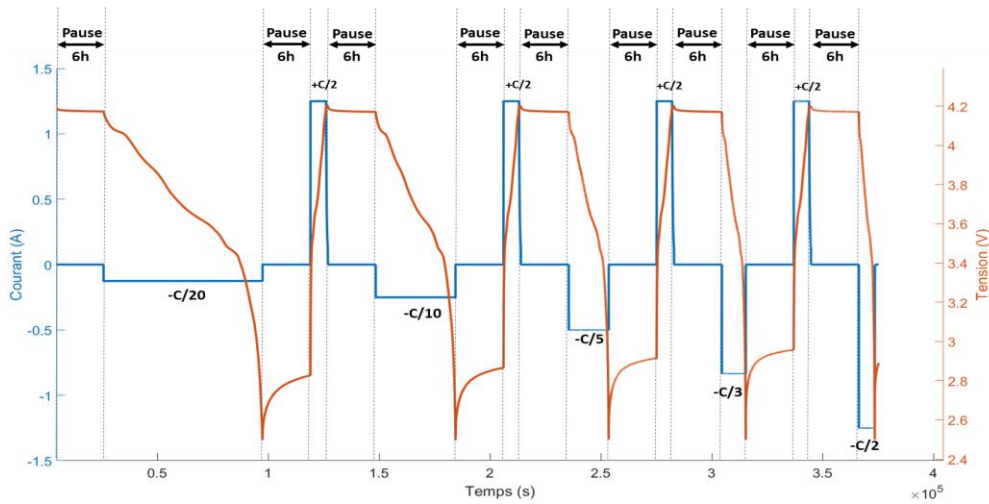


Fig. 3. Profils de tensions et de courants des essais de décharge

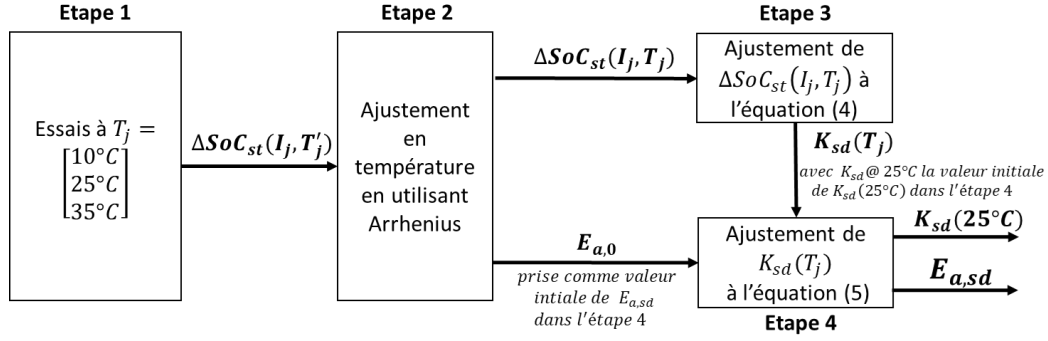


Fig. 4. Etapes d'identification des paramètres

constant à 25 °C. La décharge résiduelle à C/2, les décharges à 1C, 2C et 3C, ainsi que les charges intermédiaires et les périodes de relaxation correspondantes, ont été omises pour rendre la figure plus claire

4.2. La méthodologie d'identification des paramètres

L'extraction des paramètres de la réponse statique de la diffusion solide comporte quatre étapes principales (fig. 4) :

- **L'étape 1** consiste à déterminer ΔSoC_{st} en se basant sur les essais de décharge décrits à la section 4.1. Afin de trouver ΔSoC_{st} , les décharges avec un courant inférieur à 1C seront utilisées (voir section 5). Pour les cellules utilisées dans cette étude, l'effet de la diffusion solide (*i.e.* le décalage horizontal) se manifeste clairement en fin de décharge, dans la plage 2,5 V - 2,8 V, comme le montre la figure 2. Par conséquent, nous supposons que les valeurs ΔSoC_{st} sont associées à un courant de décharge I_j et à la température de fin de décharge correspondante T'_j , puisque la température de la cellule n'est plus égale à la température d'essai (imposée par l'enceinte climatique) en raison de l'échauffement de la cellule. On obtient ainsi $\Delta SoC_{st}(I_j, T'_j)$.
- **L'étape 2** consiste à corriger les points $\Delta SoC_{st}(I_j, T'_j)$ pour les ramener à la température de l'essai T_j en utilisant les équations 6 et 7 :

$$\Delta SoC_{st}(I_j, T'_j) = \Delta SoC_{st}(T_{ref}) \times \exp\left(\frac{E_{a,0}}{K_b} \left(\frac{1}{T'_j} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (6)$$

$$\Delta SoC_{st}(I_j, T_j) = \Delta SoC_{st}(I_j, T'_j) \times \exp\left(\frac{E_{a,0}}{K_b} \left(\frac{1}{T_j} - \frac{1}{T'_j}\right)\right) \quad (7)$$

D'abord, nous effectuons l'ajustement de $\Delta SoC_{st}(I_j, T'_j)$ à l'aide de l'équation 6, à chaque courant I_j . En conséquent, l'algorithme d'optimisation identifiera $\Delta SoC_{st}(T_{ref})$ et $E_{a,0}$ qui est une première estimation de l'énergie d'activation de la diffusion solide. Ensuite, nous utilisons $E_{a,0}$ et $\Delta SoC_{st}(I_j, T'_j)$ à chaque courant I_j avec l'équation 7. Cela donne $\Delta SoC_{st}(I_j, T_j)$ et $E_{a,0}$ sera utilisée comme valeur initiale pour $E_{a, sd}$ dans l'étape 4.

- **L'étape 3** consiste à faire l'ajustement de $\Delta SoC_{st}(I_j, T_j)$ en utilisant l'équation 4. Par la suite, nous trouvons la pente K_{sd} pour $T_j=10$ °C, 25 °C et 35 °C. La pente K_{sd}

obtenue à 25 °C servira comme valeur initiale pour $K_{sd}(T_{ref})$, avec $T_{ref} = 298$ K (25 °C), dans l'étape 4.

- **L'étape 4** consiste à réaliser un ajustement de $K_{sd}(T_j)$ à l'équation 5 afin d'identifier $K_{sd}(T_{ref})$ et $E_{a, sd}$.

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette section, nous présenterons les résultats de chacune des étapes d'identification décrites dans la section 4.2, ainsi que des résultats de simulation du modèle.

5.1. Résultats d'identification de la diffusion solide

Pour l'**étape 1**, on a considéré $I_{ref} = C/5$. D'après les spécifications du fabricant des cellules utilisées dans cette étude, la capacité de décharge est calculée avec un régime de courant de C/5. En plus, l'utilisation des régimes de courant élevés réduit les erreurs résultantes de l'intégration du courant afin de calculer le SoC. C'est pour cela que nous proposons d'utiliser la courbe de tension à C/5 comme « courbe de référence » et avec cela $I_{ref} = 0,5$ A. Ensuite, on calcule le décalage en SoC, noté ΔSoC , entre la courbe à C/5 et les autres courbes de tension aux régimes plus élevés.

La figure 5 illustre, pour chaque température testée, les valeurs de ΔSoC mesurées en fin de décharge à chaque courant. On remarque que pour les régimes de courant supérieurs à C/2 (1,25 A), les points de données ne sont plus alignés avec les précédents. Cela est engendré par la dynamique de la diffusion solide, en plus de l'échauffement significatif de la cellule en fin de décharge, surtout à forts régimes de courant. En conséquence, on peut diviser la courbe de ΔSoC en deux zones notées « 1 » et « 2 » respectivement (figure 5). A forts régimes de courant, les décharges devenant plus courtes, la diffusion en phase solide n'a pas le temps d'atteindre son régime stationnaire. Ainsi, le comportement linéaire jusqu'à C/2 (zone 1) permet de supposer que le ΔSoC mesuré correspond bien à ΔSoC_{st} , mais pas au-delà de C/2. En fait, la diffusion solide est un phénomène lent, dont la constante de temps est de l'ordre d'une heure voire plus [8]. Donc, pour les décharge rapides (zone 2), la diffusion solide n'aura pas le temps suffisant pour atteindre le régime statique, *i.e.* ΔSoC_{st} .

Comme l'objectif principal de cet article est de modéliser la réponse statique de la diffusion solide, il faut donc considérer

la zone de la courbe de ΔSoC où la dynamique est négligée (zone 1). Alors, les points à C/5, C/3 et C/2 ont été choisis et seront notés « ΔSoC_{st} » dans la suite de cet article.

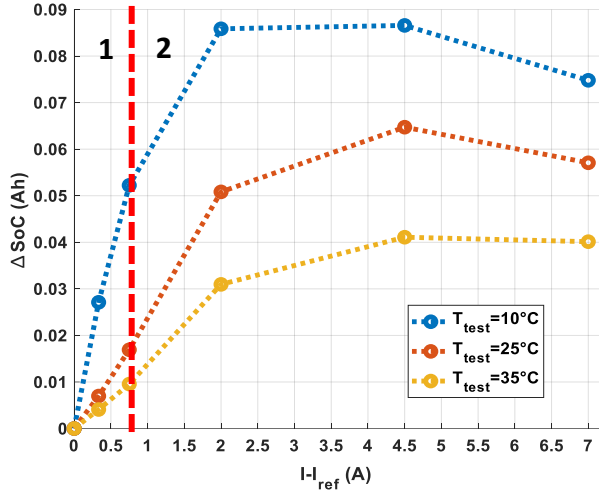


Fig. 5. Evolution de ΔSoC en fonction de $I-I_{ref}$

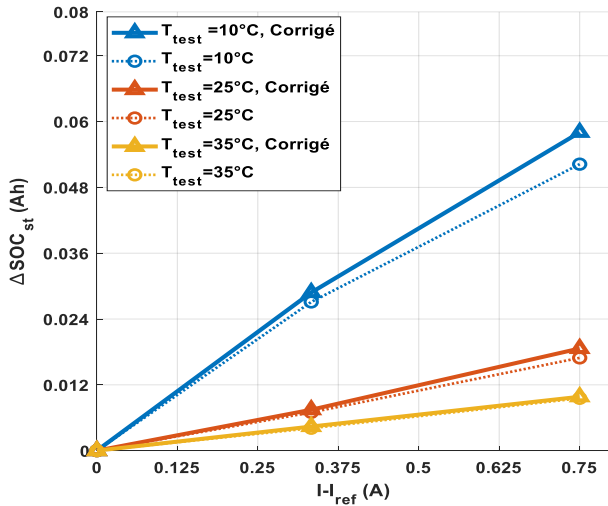


Fig. 6. Ajustement en température de ΔSoC_{st}

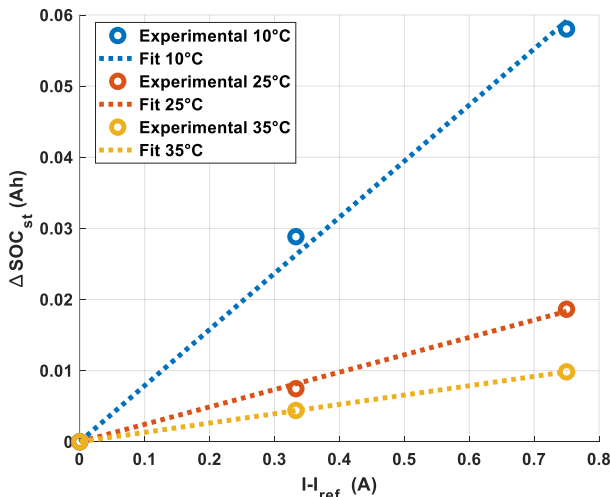


Fig. 7. Ajustement linéaire de ΔSoC_{st}

Tableau 1. Valeurs de K_{sd} pour les différentes températures testées

	T=10 °C	T=25 °C	T=35 °C
K_{sd} (h)	0.0797	0.0247	0.0132

La figure 6, montre les points notés ΔSoC_{st} après ajustement en température (**étape 2**), avec $E_{a,0} = 0,54$ eV. En fait, l'effet de cet ajustement est plus remarquable à 10°C, vu que les décharges à basses températures engendrent un échauffement plus important de la cellule. En plus, nous remarquons une allure quasiment linéaire des points après ajustement.

Ensuite, un ajustement linéaire a été réalisé (**étape 3**), et nous obtenons les courbes linéaires présentées dans la figure 7. Les résultats de l'ajustement sont présents dans le tableau 1. Il est clair que K_{sd} diminue avec l'augmentation de la température. Cette observation est en accord avec la littérature [1,2,15]. Une fois identifiées, les valeurs de K_{sd} et $E_{a,0}$ trouvées dans les étapes précédentes, constituent les paramètres d'entrée d'un algorithme d'optimisation basé sur l'équation (5). Les valeurs trouvées pour $K_{sd}(T_{ref})$ et $E_{a,sd}$ sont 0,0252 heures et 0,54 eV respectivement (**étape 4**). Dans [16], Ecker et al. ont trouvé pour la diffusion graphitique une énergie d'activation de 0,47 eV. L'énergie d'activation trouvée dans cet article ($E_{a,sd} = 0,54$ eV) est donc cohérente avec celle obtenue par Ecker et al. On remarque également que la valeur de $K_{sd}(25^\circ C)$ est très proche de celle obtenue, à la même température, dans l'étape 3 (Tableau 1). Donc, les résultats de la figure 7 démontrent que le modèle linéaire de ΔSoC_{st} est proche des mesures réalisées aux températures testées.

5.2. Résultats de simulation du modèle

Bien que cela dépasse le cadre de ce travail, nous avons identifié la constante de temps de diffusion solide τ_{sd} ainsi que la diffusion liquide représentée par Z_{ld} (fig. 1b). Quant aux autres paramètres du modèle, ils ont été identifiés selon la même méthodologie que celle décrite dans [3]. Ensuite, nous avons testé notre modèle complet à 25 °C pour des décharges constantes à C/2, 1C, 2C et 3C. Les résultats sont représentés dans la figure 8. Nous remarquons que la tension simulée est très proche de la tension mesurée, même dans la zone de bas SoC. Ceci est important pour estimer avec précision l'état de la batterie dans la région de faible SoC. Cependant, des décalages verticaux apparaissent entre la tension simulée et la tension mesurée, principalement dans deux intervalles de SoC. Le premier se situe entre 0,35 Ah et 1,37 Ah, et le second entre 1,96 Ah et 2,37 Ah. Cela peut être dû à la courbe OCV utilisée dans le modèle, ou aux valeurs des résistances et des constantes de temps du modèle. Ces paramètres ont été identifiés à l'aide d'algorithmes d'optimisation, dont les résultats ne sont pas toujours exacts. En plus, les décalages qui sont souvent observés pendant les décharges à fort C-rate, peuvent être le résultat d'un comportement hétérogène, qui n'est pas pris en compte dans notre modèle [17]. Cela peut expliquer la différence à 3C autour de SoC 0,5 Ah. En outre, le modèle proposé néglige la diffusion à l'électrode positive. Cela peut conduire à des erreurs dans l'estimation de la tension, en particulier dans les régions où le SoC est modérément élevé.

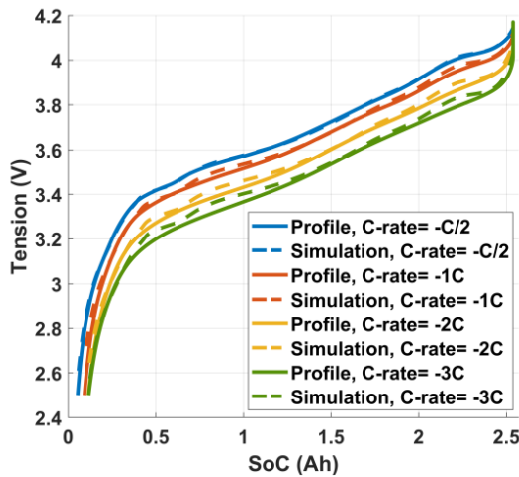


Fig. 8. Résultats de simulation à 25°C

6. CONCLUSION

Dans cet article, un ECM basé sur la physique, inspiré d'un modèle « single-particle » appelé ECM-SP^e, pour les cellules NMC+NCA/Graphite+SiO a été présenté. Ce modèle est basé sur la séparation des phénomènes de diffusion solide et liquide qui se produisent dans les cellules lithium-ion. Dans cette étude, on a supposé que l'effet de la diffusion solide est principalement attribué à l'électrode négative et est représenté par un décalage en état de charge (ΔSoC) entre la tension de la cellule et l'OCV. Nous avons alors proposé un modèle de non-linéarités de la réponse en régime statique de la diffusion solide (ΔSoC_{st}), avec une variation linéaire avec le courant. La dépendance de ΔSoC_{st} avec la température suit la loi d'Arrhenius avec une énergie d'activation identifiée égale à 0,54 eV, ce qui est en accord avec la littérature.

Le protocole expérimental et la méthodologie d'extraction des paramètres de la diffusion solide en régime établi ont été proposés. Nous avons montré que ces paramètres sont identifiables à bas régimes de courant seulement, en justifiant le choix de la plage de courant à considérer. Les régimes plus élevés sont intéressants pour identifier la dynamique de la diffusion solide, ce qui est en dehors du cadre de cet article. L'identification de la dynamique de la diffusion solide ainsi que l'impédance de la diffusion liquide a été faite par ailleurs afin de tester l'ECM complet. La sortie du modèle était proche de la tension mesurée, en particulier à bas SoC. Le modèle a également de bonnes performances même dans la région de faible SoC, où la modélisation devient critique et complexe.

Ce modèle peut être une solution prometteuse pour réduire les dépendances du modèle en SoC et, par conséquent, le temps de caractérisation nécessaire pour les identifier par rapport à l'utilisation de tables d'interpolation multidimensionnelles. Le modèle de non-linéarités proposé a le potentiel de réduire les non-linéarités en SoC, simplifier la caractérisation des phénomènes de diffusion et améliorer les performances du modèle dans la région à faible SoC. Par conséquent, la précision des estimateurs d'état est susceptible de s'améliorer. Comme perspective de ce travail, une dépendance à l'état de santé peut être ajoutée au modèle.

7. REFERENCES

- [1] X. Xu, S. Tang, H. Ren, X. Han, Y. Wu, L. Lu, X. Feng, C. Yu, J. Xie, M. Ouyang, W. Liu, Y. Yan, Joint state estimation of lithium-ion batteries combining improved equivalent circuit model with electrochemical mechanism and diffusion process, *Journal of Energy Storage*, 2022.
- [2] C. Chen, Y. Huang, X. Yu, M. Zhang, X. Han, Y. Sun, Y. Zheng, Improving the accuracy of voltage estimation in the low charge state range at low temperature: An equivalent circuit model considering the influence of temperature on solid phase diffusion process, *Journal of Energy Storage*, 2024.
- [3] F. Vendrame, N. Damay, H. Rabab, C. Forgez, M. Sayegh, Non-invasive diagnosis of solid electrolyte interphase and charge transfers resistances for degraded lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, 2024.
- [4] H. Rabab, Modeling of sodium-ion batteries for on-board diagnosis of their states of charge and health, PhD Thesis, University of Technology of Compiègne, France, 2024.
- [5] M. Juston, N. Damay, C. Forgez, Extracting the diffusion resistance and dynamic of a battery using pulse tests, *Journal of Energy Storage*, 2023.
- [6] D. M. Bernardi, J.-Y. Go. Analysis of pulse and relaxation behavior in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 196(1), 2011.
- [7] X. Zhou, J. Huang, Z. Pan, M. Ouyang, Impedance characterization of lithium-ion batteries aging under high-temperature cycling: Importance of electrolyte-phase diffusion. *Journal of Power Sources*, 2019.
- [8] P. Rodríguez-Iturriaga, D. Anseán, S. Rodríguez-Bolívar, V. Manuel García, M. González, J. Antonio López-Villanueva, Modeling current-rate effects in lithium-ion batteries based on a distributed, multi-particle equivalent circuit model, *Applied Energy*, Part A.
- [9] D. Guo, G. Yang, X. Feng, X. Han, L. Lu, M. Ouyang, Physics-based fractional-order model with simplified solid phase diffusion of lithium-ion battery, *Journal of Energy Storage*, 2020.
- [10] X. Han, M. Ouyang, L. Lu, J. Li, Simplification of physics-based electrochemical model for lithium ion battery on electric vehicle. Part I: Diffusion simplification and single particle model, *Journal of Power Sources*, 2015.
- [11] M. Ouyang, G. Liu, L. Lu, J. Li, X. Han, Enhancing the estimation accuracy in low state-of-charge area: A novel onboard battery model through surface state of charge determination, *Journal of Power Sources*, 2014.
- [12] F. Kremer, S. Rael, M. Urbain, 1D electrochemical model of lithium-ion battery for a sizing methodology of thermal power plant integrated storage system, *AIMS Energy* 8, 2020.
- [13] E. Kuhn, C. Forgez, P. Lagonotte, G. Friedrich, Modelling Ni-mH battery using Cauer and Foster structures, *Journal of Power Sources*, 2006.
- [14] Y. Zheng, W. Gao, X. Han, M. Ouyang, L. Lu, D. Guo, An accurate parameters extraction method for a novel on-board battery model considering electrochemical properties, *Journal of Energy Storage*, 2019.
- [15] R. Xiong, J. Huang, Y. Duan, W. Shen, Enhanced Lithium-ion battery model considering critical surface charge behavior, *Applied Energy*, 2022.
- [16] M. Ecker, T.K.D. Tran, P. Dechent, S. Käbitz, A. Warnecke, D.U. Sauer, Parameterization of a physico-chemical model of a lithium-ion battery: I. determination of parameters. *Journal of The Electrochemical Society*, 2015.
- [17] M. Farkhondeh, M. Pritzker, M. Fowler, C. Delacourt. Mesoscopic Modeling of a LiFePO₄ Electrode: Experimental Validation under Continuous and Intermittent Operating Conditions. *Journal of The Electrochemical Society*, 2017.