



HAL
open science

Modélisation d'une batterie de seconde vie pour le suivi de ses performances dans une station de recharge mobile

Marwan Hassini, Eduardo Redondo-Iglesias, Pascal Venet

► To cite this version:

Marwan Hassini, Eduardo Redondo-Iglesias, Pascal Venet. Modélisation d'une batterie de seconde vie pour le suivi de ses performances dans une station de recharge mobile. Symposium de Génie Électrique SGE 2023, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP), Jul 2023, Lille, France. hal-04166428

HAL Id: hal-04166428

<https://hal.science/hal-04166428>

Submitted on 19 Jul 2023

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.

Modélisation d'une batterie de seconde vie pour le suivi de ses performances dans une station de recharge mobile

Marwan Hassini^{1,2,3} Eduardo Redondo-Iglesias^{1,3} Pascal Venet^{2,3}

¹Univ Eiffel, Univ Lyon, ENTPE, LICIT-ECO7, F-69675 Lyon, France

²Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, INSA Lyon, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Ampère, UMR5005, 69622 Villeurbanne, France

³ERC GEST (Licit-Eco7/Ampère Équipe de Recherche Commune Gestion de l'Énergie et du Stockage pour les Transports), 69500 Bron, France

RÉSUMÉ-Les batteries lithium-ion sont considérées comme un élément clé pour réduire les émissions de gaz à effet de serre des secteurs du transport et de l'énergie. Cependant, l'impact environnemental de ces systèmes de stockage est régulièrement mis en avant. Dans cet article une solution permettant de rendre les batteries plus durables, grâce à leur réutilisation dans des stations de recharge mobiles pour véhicules électriques est proposée. Dans ce travail, une cellule de batterie de seconde vie est modélisée à partir d'essais de caractérisation. Les essais de caractérisation et les modèles électriques présentés peuvent être utilisés comme référence pour évaluer les performances des batteries âgées après leur première vie. Les données expérimentales ainsi que le logiciel utilisé pour les analyser sont fournis en libre accès.

Mots-clés - Batterie, Seconde Vie, Recharge, Économie Circulaire, Modélisation, Circuit Électrique Équivalent, Science Ouverte

1. INTRODUCTION

L'atténuation des effets du changement climatique est considérée comme un défi majeur pour le 21^{ème} siècle. Selon le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), les transports et la production d'électricité sont responsables respectivement de 18 % et 36 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre [1]. Pour réduire cette pollution, les véhicules électrifiés et les énergies renouvelables sont présentés comme des options intéressantes. Pour ces applications, les batteries lithium-ion sont des éléments clés de stockage de l'énergie [1].

En 2021, 340 GWh de batteries ont été produites, et ces quantités devraient augmenter de manière significative, puisqu'elles devraient atteindre 3500 GWh par an d'ici 2030 [2]. Malheureusement, il est bien connu que leur production n'est pas encore durable. Autrement dit, aucune des batteries lithium-ion produites ne peut être fabriquée sans utiliser d'importantes quantités de ressources naturelles et d'énergie. Larcher et Tarascon ont souligné qu'il faut plus de 400 kWh pour produire 1 kWh de batterie lithium-ion et que plus de 75 % de cette énergie est consommée pendant la phase de production des matériaux [3]. Afin de parvenir à une production de l'énergie et à un transport durables, il est essentiel de développer des solutions pour réduire l'impact environnemental des batteries déjà sur le marché ainsi que des futures générations de batteries.

La hiérarchie de gestion des déchets établit un ordre de préférence parmi les actions visant à réduire et à gérer les déchets [4]. La réduction, la réutilisation, le recyclage et l'élimination sont les mesures à prendre pour réduire l'impact environnemental d'un produit. La réduction est l'action à privilégier puisqu'elle consiste à concevoir le produit de manière à limiter les déchets qu'il produira en fin de vie. Dans le contexte des batteries, la réduction consiste à minimiser la quantité et la diversité de matériaux utilisés dans une batterie, en d'autres termes, à réduire la taille de la batterie.

Les véhicules électriques alimentés par des batteries plus pe-

tites seront plus économiques et plus écologiques [5]. Toutefois, ces véhicules auront une autonomie plus réduite et seraient plus dépendants de l'infrastructure de recharge. Pour permettre cette évolution, un réseau de recharge fiable et finement maillé doit être mis en place. Les chargeurs mobiles sont une solution pour renforcer le système d'infrastructure existant. Une station de recharge mobile peut être définie comme un chargeur capable de fournir de l'énergie aux véhicules de manière autonome, c'est-à-dire sans assistance humaine et sans avoir besoin d'une alimentation électrique externe. Cette technologie présente l'avantage de maximiser le taux d'utilisation de la station de recharge, car ces chargeurs sont capables de se déplacer d'un véhicule à l'autre. Ainsi, par rapport aux bornes de recharge fixes qui restent occupés tout le temps de stationnement du véhicule, les bornes de recharge mobiles peuvent être utilisées d'une manière intensive, en se déplaçant d'un véhicule à un autre. Elle offre également une solution de recharge souple, car elle est conçue pour être déployée rapidement à n'importe quel endroit, avec la possibilité d'adapter l'énergie embarquée et la durée du séjour aux besoins des automobilistes [6]. La figure 1 présente deux stations de recharge mobiles autonomes [7].



FIG. 1. Stations de recharge mobile de Mob-Energy [8] et de Volkswagen [9].

L'énergie stockée par ces chargeurs robotisés étant limitée, ils doivent être considérés comme une technologie complémentaire aux chargeurs fixes. À ce jour, les stations de recharge mobiles existantes peuvent fournir jusqu'à 30 kWh à une puissance maximale de 50 kW [10].

Il est possible d'utiliser des batteries réutilisées pour ces stations de recharge mobiles, ce qui constitue un pas de plus vers une économie circulaire. La réutilisation peut être définie comme la réutilisation complète ou partielle de la batterie dans le but initial pour lequel elle a été conçue [11]. Dans la littérature, les batteries réutilisées sont communément appelées "batteries de seconde vie". Bien qu'il y ait un large consensus dans la communauté des batteries pour reconnaître les avantages environnementaux de la réutilisation, l'intérêt économique des batteries de seconde vie est encore débattu. Trouver des applications susceptibles d'accepter les contraintes des batteries réutilisées reste un défi.

Aussi, bien que la recherche sur les batteries de seconde vie gagne en popularité, deux limitations importantes des études existantes subsistent :

Premièrement, deux définitions de la réutilisation des batteries coexistent dans la littérature. La plupart des auteurs définissent les batteries de seconde vie en termes de niveau de performance. Un seuil de 20 ou 30 % de perte de capacité est souvent considéré comme la limite entre la première et la deuxième vie [12, 13]. Les études qui considèrent cette définition répondent à la question de recherche suivante : comment évolue la performance des batteries très dégradées ? D'autres auteurs définissent les batteries de seconde vie comme des batteries ayant subi un changement d'usage [14, 15]. Cette définition soulève une autre question de recherche : quel est l'effet d'un changement d'usage sur l'évolution des performances de la batterie ? À ce jour, il n'existe pas d'études expérimentales ou de modélisation portant sur l'évolution des performances d'une batterie ayant fait l'objet d'un changement d'usage. Il s'agit d'un manque important car les conditions de fonctionnement peuvent varier considérablement entre la première et la deuxième vie de la batterie.

Deuxièmement, la plupart des recherches existantes ont porté sur des batteries vieillies en laboratoire. Cette méthode a été privilégiée car à ce jour, il reste difficile de se procurer des batteries issues de véhicules électriques en fin de vie. Les études en laboratoire permettent également de contrôler les conditions de fonctionnement pendant toute la durée de vie de la batterie [16]. Néanmoins, dans un contexte industriel, les utilisateurs de batteries de seconde vie n'ont pas accès aux données concernant l'utilisation lors de la première vie. Les performances de la batterie doivent être évaluées pour déterminer si elle est adaptée à une seconde vie. Ces dernières années, quelques études ont évalué les performances des batteries extraites de véhicules électriques [17, 18]. Néanmoins, ces articles sont les premiers travaux axés sur l'évaluation expérimentale des performances et à ce jour aucune étude n'a été réalisée sur la modélisation électrique de ces batteries. Afin de compléter ces premiers travaux, d'autres études doivent être menées pour améliorer la compréhension des impacts sur la performance des batteries suite à leur réutilisation.

2. ÉVALUATION DES PERFORMANCES DES CELLULES DE SECONDE VIE

Ce paragraphe présente les expériences menées pour évaluer les performances d'une cellule de seconde vie. Cette évaluation des performances est nécessaire pour adapter le second usage au niveau de performance de la batterie. Les données produites pour cette étude sont disponibles dans un dépôt public avec une description détaillée des caractéristiques de la cellule et de l'installation, ainsi que des procédures d'essai et du contrôle de la qualité [19, 20].

2.1. Configuration expérimentale

Dans cette étude, une cellule SAMSUNG SDI 94Ah de seconde vie avec une électrode positive NMC a été testée à 0, 25 et 40 °C. Les principales caractéristiques de la cellule sont résumées dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Caractéristiques principales de la cellule Samsung SDI 94Ah [21].

Caractéristiques	Valeurs
Format	Prismatique
Électrode positive	NMC
Électrode négative	Graphite
Tension nominale [V]	3.68
Plage de Tension [V]	4.15-2.7
Densité énergétique [Wh/kg]	165
Taille Lxlxh [mm]	173x125x45
Masse [kg]	2.1 kg

Cette cellule a été extraite d'un module BMW i3 acheté sur le marché des batteries de seconde vie. Pour garantir la représentativité de l'étude, les 12 cellules du module ont été testées et une cellule aux performances représentative a été sélectionnée. Le banc de test utilisé était composé d'un cycleur Bitrode et de deux chambres climatiques (Vötsch VT 3050 et Friocell 707).

TABLEAU 2. Test de caractérisation.

Étape	Test	Durée estimée (h)
1	Mesure de capacité	18
2	Mesure d'impédance	8
3	Pseudo-OCV	42
4	Cycles d'usage	12

Le tableau 2 résume le protocole de caractérisation à une température unique et la figure 2 présente le profil de tension au cours de l'essai. L'étape 1 est un test de capacité, consistant en une séquence de trois cycles complets de charge/décharge. L'étape 2 est une mesure de l'impédance grâce à une séquence d'impulsions de courant à différentes profondeurs de décharge (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 et 90 %) et à différents niveaux de courant (0.3C, 0.5C, 0.8C, 1C et 1.3C). L'étape 3 est une mesure de tension en circuit pseudo-ouvert grâce à une décharge/charge complète à C/20. Enfin, l'étape 4 est le cycle de validation utilisé pour évaluer la précision du modèle. Les profils de validation et les résultats sont décrits en détail dans le paragraphe 3.

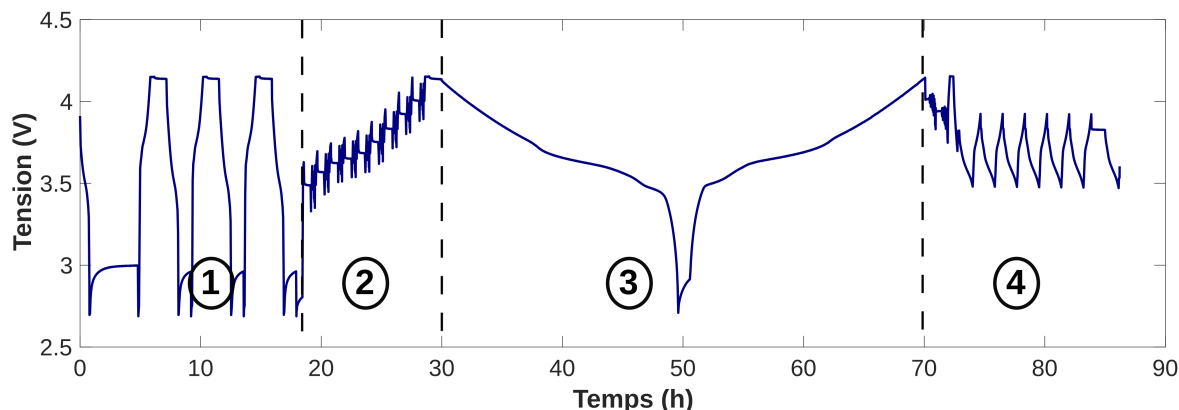


FIG. 2. Profil de tension lors du test.

2.2. Mesure de la capacité

La capacité est mesurée à l'étape 1 du test de caractérisation illustré à la figure 2. La troisième mesure de capacité en décharge est prise comme référence et la capacité est calculée conformément à l'équation 2. La figure 3 présente l'influence de la température sur la capacité.

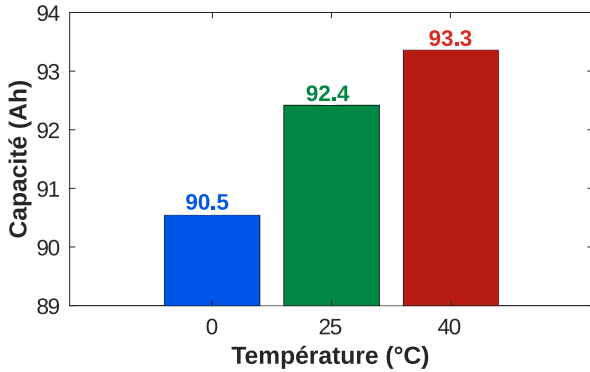


FIG. 3. Capacité de décharge mesurée à 0 °C (barre bleue), 25 °C (barre verte) et 40 °C (barre rouge).

Les capacités indiquées ont été mesurées en décharge avec un profil courant constant-tension constante (en anglais constant current-constant voltage ou CC-CV) et un courant de 1C. Cette méthode est similaire à celle utilisée dans ce travail. Un état de santé peut donc être calculé grâce à l'équation 3. Le tableau 3 compare les capacités mesurées au cours de l'étape 1 à 0, 25 et 40 °C.

2.3. Mesure de la résistance

La résistance est déterminée au cours de l'étape 2 de l'essai de caractérisation présenté sur la figure 2. La résistance est influencée par la température, le signe et l'intensité du courant et la profondeur de décharge de la cellule. La profondeur de décharge et la résistance sont calculées conformément aux équations 4 et 5.

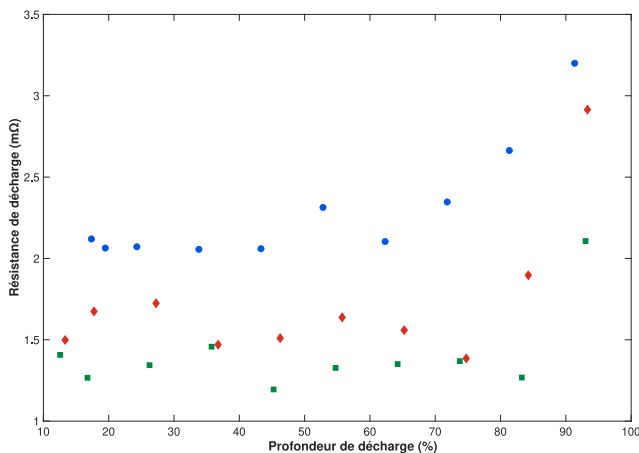


FIG. 4. Résistance en décharge d'une cellule de seconde vie à 0 (points bleus), 25 (carrés verts) et 40 °C (diamants rouges). La mesure est effectuée à -1C et une résistance de 5 s est considérée.

La figure 4 montre l'influence de la température et de la profondeur de décharge sur la résistance de décharge. La mesure est effectuée en décharge avec un régime de courant de -1C et une résistance de 5 s est considérée. L'état de santé lié à l'impédance est un indicateur de l'évolution de la résistance depuis le début de la vie de la batterie. Il peut être calculé à l'aide de l'équation 6. Le tableau 4 compare les résistances mesurées au

cours de l'étape 2 à 0, 25 et 40 °C avec les informations de la fiche technique.

2.4. Comparaison des performances d'une cellule neuve et d'une cellule de seconde vie

Cet article évalue les performances d'une cellule prismatique de grande capacité provenant d'un véhicule électrique. Les tableaux 3 et 4 comparent la capacité et la résistance mesurées sur la cellule de seconde vie avec les données fournies dans la fiche technique.

TABLEAU 3. Comparaison de la capacité d'une cellule neuve (data sheet) et d'une cellule de seconde vie (expériences). "-" signifie que l'état de santé n'a pas pu être calculé.

Température	Neuve	Seconde vie	État de santé
0 °C	Pas de donnée	90.5 Ah	-
25 °C	95.2 Ah	92.4 Ah	97%
40 °C	95.7 Ah	93.3 Ah	97%

TABLEAU 4. Comparaison de la résistance d'une cellule neuve (data sheet) et d'une cellule de seconde vie (expériences). "-" signifie que l'état de santé n'a pas pu être calculé.

Température	Neuve	Seconde vie	État de santé
0 °C	Pas de donnée	2.3 mΩ	-
25 °C	0.75 mΩ	1.3 mΩ	27%
40 °C	Pas de donnée	1.6 mΩ	-

Les résultats présentés ci-dessus montrent, par le biais de résultats expérimentaux, qu'une cellule de seconde vie et une cellule neuve peuvent avoir des performances comparables. Ce résultat pourrait être étendu au niveau du module puisque la cellule testée est représentative de la performance des 11 autres cellules du module. Pour expliquer ce haut niveau de performance, les auteurs émettent l'hypothèse que la cellule de seconde vie testée provenait d'un véhicule accidenté. Cette étude souligne la pertinence de définir la batterie de seconde vie en fonction d'un changement d'application plutôt que d'un niveau de performance. Les batteries peuvent atteindre la fin de leur vie automobile avec un niveau de performance bien supérieur au seuil communément admis de 20 % de perte de capacité.

3. MODÉLISATION DES CELLULES DE SECONDE VIE

Ce paragraphe présente le modèle par circuit équivalent utilisé dans l'étude. Sa précision est évaluée grâce à deux profils d'utilisation : un cycle WLTC et un profil représentatif de l'utilisation réelle d'une station de recharge mobile.

3.1. Présentation du modèle

Le modèle par circuit électrique équivalent utilisé est illustré à la figure 5 et sera appelé "modèle RC".

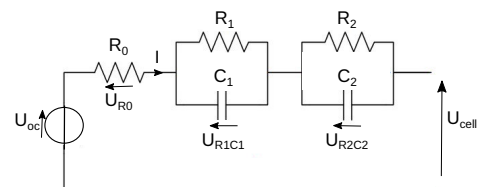


FIG. 5. Modèle RC.

Il se compose d'une source de tension OCV en série avec une résistance R_0 qui modélise le comportement ohmique, d'un premier circuit RC pour modéliser le transfert de charge et les processus de double couche et d'un second circuit RC associé au comportement de diffusion. Ce modèle émule la réponse de

la tension de la batterie lorsqu'un courant est appliqué. La tension de la cellule U_{cell} est alors la soustraction de la tensions U_{oc} avec la somme des tensions U_{R0} , U_{R1C1} et U_{R2C2} conformément à l'équation (1).

3.2. Précision sur un profil WLTC

Pour faciliter la comparaison avec d'autres études de modélisation, un profil d'utilisation classique a aussi été utilisé pour valider le modèle : le cycle Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycles (WLTC).

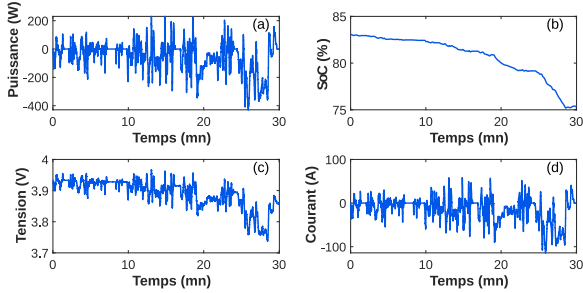


FIG. 6. (a) Puissance, (b) état de charge, (c) tension et (d) évolution du courant au cours d'un cycle WLTC.

La figure 7 représente en bleu la tension de la cellule de seconde vie mesurée à 25 °C et en vert la réponse du modèle.

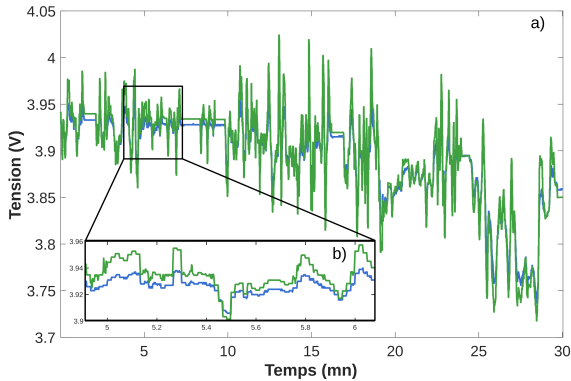


FIG. 7. (a) Données expérimentales (ligne bleue) comparées aux résultats de la simulation (ligne verte) à 25 °C. (b) Zoom autour de 5 min.

Une grande partie de l'erreur provient du comportement dynamique, plus précisément de l'interpolation de la résistance aux niveaux des profondeurs de décharge intermédiaires. Pour améliorer la précision du modèles, une optimisation de la méthode d'interpolation pourrait être réalisée. Des efforts pourraient également être faits pour prendre en compte de manière plus précise l'effet de relaxation. Néanmoins, le niveau de précision reste suffisant pour l'usage visé puisque l'erreur de simulation est inférieure à ± 7 mV, ± 22 mV et ± 40 mV sur respectivement 50, 90 et 99 % du profil.

3.3. Précision sur le profil d'une station de recharge mobile

Le profil d'utilisation d'une station de charge mobile inspiré de profils réels a été utilisé pour évaluer la capacité du modèle à émuler la réponse en tension de la cellule de seconde vie. Les profils d'utilisation réels ont été fournis par la société Mob-Energy. La figure 8 montre le profil d'utilisation du chargeur mobile avec des niveaux de puissance donnés pour une seule cellule lithium-ion.

La première étape du profil consiste en une décharge à forte puissance correspondant au transfert d'énergie du chargeur au

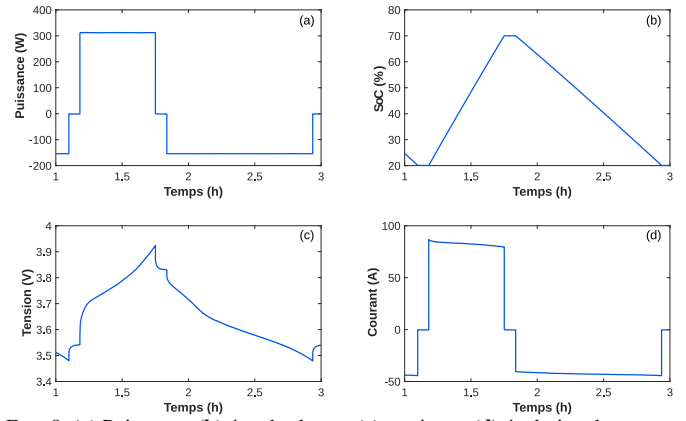


FIG. 8. (a) Puissance, (b) état de charge, (c) tension et (d) évolution du courant au cours du profil d'utilisation d'une station de charge mobile.

véhicule. Au cours de cette étape, la puissance de décharge atteint -150 W à l'échelle de la cellule, ce qui correspond à une décharge de 7200 W à l'échelle du robot (configuration 48S1P). Ensuite, le robot se déplace pour aller à la prise réseau, ce qui correspond à une décharge à puissance de 250 W au niveau du robot, soit 5 W au niveau de la cellule. Ce déplacement depuis la borne de recharge du robot vers le véhicule dure environ 5 minutes. Enfin, le chargeur mobile se charge à partir du réseau. Au cours de cette étape, la puissance de charge atteint 300 W à l'échelle de la cellule, ce qui correspond à une charge de 14400 W à l'échelle du robot. Le robot peut alors passer au prochain véhicule à charger. Cette séquence est répétée 12 fois par période de 24 heures.

La figure 9 montre en bleu la tension de la cellule de seconde vie mesurée avec un profil de chargeur mobile à 25 °C. Elle est comparée à la réponse du modèle en vert.

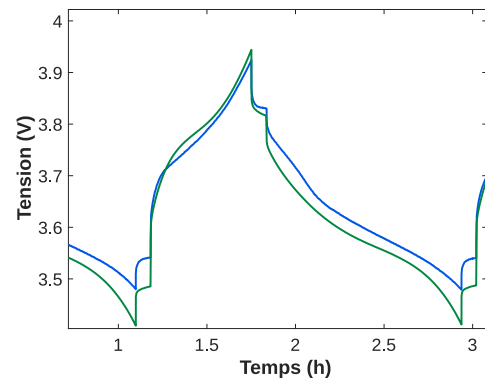


FIG. 9. Influence du choix du modèle sur la précision à 25 °C.

L'erreur de simulation est inférieure à ± 25 mV, ± 45 mV et ± 61 mV sur respectivement 50, 90 et 99% du profil. La précision du modèle est plus faible sur ce profil d'utilisation. Ce résultat peut s'expliquer par l'importance des profondeurs de décharge au cours du profil. L'interpolation des paramètres dynamiques aux niveaux intermédiaires de profondeur de décharge est responsable de plus de 75% de l'imprécision du modèle [7]. Pour améliorer la précision du modèle, la collecte de davantage de points expérimentaux serait nécessaire.

3.4. Temps de calcul et évaluation des erreurs

Le tableau 5 montre la précision et le temps de calcul du modèle pour différentes températures en utilisant un profil WLTC de trente minutes et un profil de station de recharge mobile de onze heures. Les simulations ont été effectuées grâce au logiciel VEH LIB sur SIMULINK R2021a, avec un solveur ode15s et une taille de pas maximale de 100 ms [22]. L'ordinateur utilisé

était un portable DELL Latitude 5290 équipé d'un processeur Intel® Core™ i7-8650U et une vitesse d'horloge de 1,90 GHz.

TABLEAU 5. Précision et temps de calcul du modèle à différentes températures et pour un profil de station de charge mobile ou WLTC.

	Température	WLTC (30mn)	Chargeur (11h)
Précision	0°C	14.8 mV	35.4 mV
	25 °C	12.9 mV	27.2 mV
	40 °C	19.2 mV	-
	Température	WLTC (30mn)	Chargeur (11h)
Temps de simulation	0°C	3 s	35.6 s
	25 °C	3.1 s	35.1 s
	40 °C	3.3 s	-

Le modèle donne des résultats satisfaisants puisque son niveau de précision est dans l'ordre de grandeur des modèles présentés dans la littérature [23, 24, 25, 26]. Le modèle est plus précis avec le profil WLTC qu'avec celui d'une station de recharge mobile. Cette différence peut s'expliquer par la sévérité du profil du chargeur. La performance du modèle reste néanmoins suffisante pour estimer, avec précision et avec une faible charge de calcul, l'énergie stockée dans la station de recharge mobile et son rendement énergétique à un moment donné. Ces quantités sont essentielles pour définir une tarification, une programmation et une gestion de l'énergie optimales afin de maximiser les bénéfices et de minimiser la dégradation de la batterie [27].

4. CONCLUSIONS

Cet article présente une caractérisation expérimentale des performances d'une batterie de seconde vie. Ce travail expérimental contribue à la littérature existante sur les batteries de seconde vie car il est l'un des premiers à évaluer la performance d'une cellule prismatique de grande capacité extraite d'une batterie de véhicule électrique. Les résultats expérimentaux ont montré qu'une cellule de seconde vie et une cellule neuve peuvent avoir des performances comparables. Cette étude met en évidence la pertinence de définir les batteries de seconde vie en fonction d'un changement d'application plutôt que d'un seuil de performance entre la première et la seconde vie.

L'étude de modélisation réalisée a démontré la capacité d'un modèle en circuit électrique équivalent à émuler avec précision la réponse en tension d'une batterie de deuxième vie. L'influence du profil d'utilisation et de la température sur la précision du modèle a également été évaluée. Cette étude contribue au développement de la réutilisation des batteries en présentant une nouvelle application possible : les stations de recharge mobiles. Ce travail constitue également la première étape dans le développement de stratégies de tarification, de programmes de charge et de gestion de l'énergie pour des stations de charge mobiles alimentées par batterie.

Enfin, cette étude a été menée selon une approche de science ouverte. Les données de caractérisation sont partagées sur un entrepôt [19] tandis que le traitement des données a été réalisé grâce à deux logiciels ouverts : DATTES et VEHLIB [22, 28].

5. REMERCIEMENTS

Le financement de ce projet a été assuré par une subvention de la Région Auvergne-Rhône-Alpes. Les auteurs tiennent également à remercier Mob-Energy de leur avoir partagé un profil réel d'utilisation d'une borne de recharge mobile.

A. ÉQUATIONS

A.1. Réponse en tension de la cellule

$$U_{cell} = U_{oc} - U_{R0} - U_{R1C1} - U_{R2C2} \quad (1)$$

avec

- U_{cell} : la réponse en tension de la cellule (V)
- U_{oc} : la tension en circuit ouvert (V)
- U_{R0} : la chute ohmique (V)
- U_{RiCi} : la dynamique de tension modélisée par le i-ème circuit RC (V)

A.2. Capacité

$$Q(t) = \frac{1}{3600} \int_{t_0}^t i(t) dt \quad (2)$$

avec

- $Q(t)$: la capacité mesurée en décharge (Ah)
- $t - t_0$: la durée de la décharge (s)
- i : le courant de décharge appliqué à la batterie (A)

A.3. État de santé capacité

$$SoH_Q = 100 \times \frac{Q(t)}{Q_{BOL}} \quad (3)$$

avec

- SoH_Q : l'état de santé 'capacité' (%)
- $Q(t)$: la capacité mesurée à un état de vieillissement donné (Ah)
- Q_{BOL} : la capacité mesurée en début de vie (BOL) (Ah)

A.4. Profondeur de décharge

$$DoD = DoD_{t_0} - 100 \times \frac{1}{3600 \times Q(t)} \int_{t_0}^t i(t) dt \quad (4)$$

avec

- DoD : la profondeur de décharge (%)
- DoD_{t_0} : la profondeur de décharge initiale (%)
- $Q(t)$: la capacité mesurée à un état de vieillissement donné (Ah)
- i : le courant à un instant donné (A)

A.5. Impédance

$$R_{\Delta t}(t) = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (5)$$

avec

- $R_{\Delta t}(t)$: le module de l'impédance mesurée à un instant donné (Ω)
- Δt : le temps écoulé depuis le début de l'impulsion de courant (s)
- ΔV : la variation de tension après Δt (V)
- ΔI : l'amplitude de l'impulsion de courant (A)

A.6. État de santé impédance

$$SoH_R = 100 \times \left(1 - \frac{R(t) - R_{BOL}}{R_{BOL}}\right) \quad (6)$$

avec

- SoH_R : l'état de santé "impédance" (%)
- $R(t)$: l'impédance mesurée à un instant donné (m Ω)
- R_{BOL} : l'impédance mesurée en début de vie (BOL) (m Ω)

B. RÉFÉRENCES

- [1] IPCC. *Climate Change 2022 : Mitigation of Climate Change*; Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC : Geneva, Switzerland, 2022.

- [2] IEA. *Global Supply Chains of EV Batteries*; IEA : Paris, France, 2022.
- [3] Larcher, D.; Tarascon, J.M. Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage. *Nat. Chem.* **2015**, *7*, 19–29. doi : 10.1038/nchem.2085.
- [4] European Union. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives. *Off. J. Eur. Union* **2008**, L 312/3.
- [5] Redondo-Iglesias, E., Vinot, E., Venet, P., & Pelissier, S. Electric vehicle range and battery lifetime : A trade-off. In Proceedings of the Electric Vehicle Symposium (EVS32), Lyon, France, 21–22 May 2019.
- [6] Kong P.Y. Autonomous Robot-Like Mobile Chargers for Electric Vehicles at Public Parking Facilities. *IEEE Trans. Smart Grid* **2019**, *10*, 5952–5963. doi : 10.1109/2893962.
- [7] Hassini, M., Redondo-Iglesias, E., & Venet, P. Second-Life Batteries Modeling for Performance Tracking in a Mobile Charging Station. *World Electric Vehicle Journal* **2023**, *14*, 94. <https://doi.org/10.3390/wevj14040094>
- [8] Mob-Energy. Mob-Energy. Available online : <https://www.mob-energy.com/en/home> (accessed on 31 march 2023).
- [9] Volkswagen. The Mobile Charging Robot—Presenting a Vision. Available online : <https://www.volkswagen-newsroom.com/> (accessed on 31 march 2023).
- [10] Afshar, S., Macedo, P., Mohamed, F., & Disfani, V. Mobile charging stations for electric vehicles—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2021**, *152*. doi : 10.1016/111654.
- [11] European Commission. *Sustainable Batteries Regulation*; European Commission : Brussel, Belgium, 2020.
- [12] Coron, E., Geniès, S., Cugnet, M., & Thivel, P. X. High-Energy Li-Ion Cells : Impact of Electrode Ageing on Second Life Viability. *J. Electrochem. Soc.* **2021**, *168*, 100539. doi : 10.1149/1945-7111/ac3112.
- [13] Seger, P. V., Thivel, P. X., & Riu, D. A second life Li-ion battery ageing model with uncertainties : From cell to pack analysis. *J. Power Sources* **2022**, *541*, 231663. doi : 10.1016/j.jpowsour.2022.231663.
- [14] Michelini, E., Höschele, P., Ratz, F., Stadlbauer, M., Rom, W., Ellersdorfer, C., & Moser, J. Potential and Most Promising Second-Life Applications for Automotive Lithium-Ion Batteries Considering Technical, Economic and Legal Aspects. *Energies* **2023**, *16*, 2830. doi : 10.3390/en16062830.
- [15] Rallo, H., Casals, L. C., De La Torre, D., Reinhardt, R., Marchante, C., & Amante, B. Lithium-ion battery 2nd life used as a stationary energy storage system : Ageing and economic analysis in two real cases. *J. Clean. Prod.* **2020**, *272*, 122584. doi : 10.1016/j.jclepro.2020.122584.
- [16] Hassini, M., Redondo-Iglesias, E., & Venet, P. *Lithium-Ion Battery Data : From Production to Prediction*. *Batteries*, **2023**, *9*, 385. doi : 10.3390/batteries9070385.
- [17] Quinard, H., Redondo-Iglesias, E., Pelissier, S., & Venet, P. Fast Electrical Characterizations of High-Energy Second Life Lithium-Ion Batteries for Embedded and Stationary Applications. *Batteries* **2019**, *5*, 33. doi : 10.3390/batteries5010033.
- [18] Albuquerque, L., Lacrosonnière, F., Roboam, X., & Forgez, C. Incremental Capacity Analysis as a diagnostic method applied to second life Li-ion batteries. In Proceedings of the Electrimacs 2022, Nancy, France, 16–19 May 2022.
- [19] Hassini, M., Redondo-Iglesias, E., Venet, P., Gillet, S., & Zitouni, Y. Second Life Batteries in a Mobile Charging Station : Experimental Performance Assessment. **2022**, <https://hal.science/hal-03713844/>.
- [20] Hassini, M., Redondo-Iglesias, E., Venet, P., Gillet, S., & Zitouni, Y. Second-life batteries in a Mobile Charging Station : Model Based Performance Assessment. In Proceedings of the 35th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS35), Oslo, Norway, 11–15 June 2022.
- [21] PushEV Samsung SDI 94Ah battery cell full specifications. Available online : <https://pushevs.com/2018/04/05/samsung-sdi-94-ah-battery-cell-full-specifications/> (accessed on 31 march 2023).
- [22] Jeanneret B. VEHLIB. Available online : <https://gitlab.univ-eiffel.fr/eco7/vehlib> (accessed on 31 march 2023).
- [23] Baghdadi, I., Briat, O., Eddahech, A., Vinassa, J. M., & Gyan, P. Electro-thermal model of lithium-ion batteries for electrified vehicles applications. In Proceedings of the 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE, Buzios, Brazil, 3–5 April 2015; pp. 1248–1252. doi : 10.1109/ISIE.2015.7281651.
- [24] Seger, P. V., Coron, E., Thivel, P. X., Riu, D., Cugnet, M., & Genies, S. Open data model parameterization of a second life Li-ion battery. *J. Energy Storage* **2021**, *47*, 103546. doi : 10.1016/j.est.2021.103546.
- [25] Quelin, A., & Damay, N. Coupling electrical parameters of a battery equivalent circuit model to electrodes dimensions. *J. Power Sources* **2023**, *561*, 232690. doi : 10.1016/232690.
- [26] Juston, M., Damay, N., & Forgez, C. Extracting the diffusion resistance and dynamic of a battery using pulse tests. *J. Energy Storage* **2023**, *57*, 106199. doi : doi.org/10.1016/106199.
- [27] Houbbadi, A., Trigui, R., Pelissier, S., Redondo-Iglesias, E., & Bouton, T. Optimal scheduling to manage an electric bus fleet overnight charging. *Energies* **2019**, *12*, 2727. doi : 10.3390/en12142727.
- [28] Redondo-Iglesias, Eduardo and Hassini, Marwan and Venet, Pascal and Pelissier, Serge DATTES : Data Analysis Tools for Tests on Energy Storage. *Zenodo*, **2023**. doi : 10.5281/zenodo.8134472