

Diagnostic et pronostic du vieillissement de cellules lithium-ion G/LFP en vue d'une réutilisation en seconde vie

William WHEELER ^a, Pascal VENET ^a, Yann BULTEL ^b, Ali SARI ^a

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

^b Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, Grenoble INP, LEPMI, 38000 Grenoble, France

RESUME - Les applications de seconde vie pour les batteries lithium-ion sont une opportunité pour l'industrie de repousser leur coût de recyclage, d'améliorer leur valeur économique et de réduire leur impact environnemental. Le pronostic de la durée de vie restante (RUL) est nécessaire afin d'assurer un fonctionnement correct des batteries dans l'application de seconde vie visée. Pour la mise en place d'un pronostic fiable, il est nécessaire de diagnostiquer les différents phénomènes de vieillissement intervenant. Cet article propose un modèle de loi de vieillissement basé sur une méthode de caractérisation permettant d'identifier le vieillissement dû à la perte de lithium cyclable (LLI) et à la perte de matière active à l'électrode négative (LAM_{NE}) pour des cellules Graphite/Lithium-Fer-Phosphate (G/LFP). Le diagnostic et le pronostic de l'évolution des états de santé (SoH) se basent sur une étude de vieillissement accéléré de vingt cellules cylindriques 18650 de capacité nominale 1,1 Ah.

Mots-clés — Batteries lithium-ion, Lithium-Fer-Phosphate, LFP, diagnostic, pronostic, durée de vie utile restante, RUL, perte de lithium cyclable, LLI, perte de matière active, LAM.

1. INTRODUCTION

Le secteur de la mobilité est en pleine évolution. Aujourd'hui, l'électrification des véhicules se fait par un recours massif aux batteries lithium-ion pour le stockage d'énergie que ce soit pour les véhicules électriques hybrides et les véhicules électriques à batteries [1].

Une grande quantité de batteries en fin de vie seront à traiter dans les années à venir. Bien que le recyclage et la récupération de 50% de la masse de la batterie soient rendus obligatoires au sein de l'Union européenne par la directive 2006/66/CE [2], cette opération représente un coût tant économique qu'environnemental. Les applications de seconde vie pour les batteries lithium-ion sont une opportunité pour l'industrie de repousser les coûts de recyclage, d'améliorer leur valeur économique et de réduire leur impact environnemental. Cependant, la remise en circulation des batteries doit être garantie par le constructeur pour une durée ou un nombre de cycles donné. Or, le vieillissement des batteries lithium-ion est très étudié pour des applications de première vie [3,4], entre 100% et 70% d'état de santé (SoH) mais très peu pour des états de vieillissement prolongés au-delà de ce niveau de dégradation.

L'étude de vieillissement est réalisée ici sur des cellules Lithium-Fer-Phosphate (LFP) neuves jusqu'à des états de santé représentatifs de la seconde vie, c'est-à-dire entre 30% et 40% de leur capacité initiale [5,6]. Cet article propose une méthode de pronostic de la durée de vie utile restante (RUL, « Remaining Useful Life ») basée sur les états de santé des cellules et des électrodes.

2. ÉTUDE DU VIEILLISSEMENT DE CELLULES LFP

2.1. Étude expérimentale

Différents vieillissements accélérés sont étudiés. Le Tableau 1 présente les essais réalisés pour 20 cellules avec des sollicitations différentes. Chaque groupe de cellules est représenté par une couleur, et chaque cellule par un symbole comme indiqué dans le Tableau 1.

La plupart des essais sont effectués à une profondeur de décharge (DoD) de 70% pour évaluer un vieillissement sans décharge complète, cas le plus courant pour les véhicules électriques (cellules groupes 2 à 7). Des essais sont effectués avec une décharge complète (tension de fin de charge égale à 2,5V) pour évaluer l'impact de ce paramètre sur le vieillissement (cellules groupe 1). Deux méthodes de charge sont testées : une charge à courant constant (CC) pour les cellules du groupe 4 ou à courant constant puis à tension constante (CC-CV) pour le groupe 2. L'impact du régime de courant (C-rate) sur le vieillissement est évalué en charge à C/3 et 2C avec les groupes 2 et 5. L'impact du régime de décharge à taux de courant élevé (2C) est testé avec le groupe 7. L'impact de l'abaissement de la tension de fin de charge de 3,65V à 3,55V est étudié avec les groupes de cellules 3 et 6. Un état de charge de 100% est atteint pour une fin de charge à 3,65V. Pour les cellules G/LFP, nous constatons une perte de capacité de stockage d'énergie inférieure à 1% en cas de fin de charge à 3,55V.

Toutes les cellules sont vieillies et caractérisées à 50°C dans une étuve à température contrôlée. Chaque cellule réalise 100 cycles de vieillissement, conformément aux critères du Tableau 1, puis suit une étape de caractérisation. La caractérisation consiste en un premier cycle de décharge CC à C/3 jusqu'à 2,5V puis une charge CC-CV à C/3 jusqu'à 3,65V puis C/10. Ensuite une caractérisation à C/25 en CC est réalisée en décharge puis en charge. Toutes les étapes de vieillissement et de caractérisations sont séparées par une pause de 30 minutes.

Tableau 1. Tableau de synthèse des différents cas de vieillissement.

Références de cellules pour chaque cas de vieillissement	Type de charge	Régime de charge	Tension de coupure	Type de décharge	Régime de décharge	Profondeur de décharge
1a  , 1b  , 1c 	CC	C/3	3.65 V	WLTP	C/3	100 %
2a  , 2b  , 2c 	CC-CV	C/3	3.65 V	WLTP	C/3	70 %
3a  , 3b  , 3c 	CC-CV	C/3	3.55 V	WLTP	C/3	70 %
4a  , 4b 	CC	C/3	3.65 V	WLTP	C/3	70 %
5a  , 5b  , 5c 	CC-CV	2C	3.65 V	WLTP	C/3	70 %
6a  , 6b  , 6c 	CC-CV	2C	3.55 V	WLTP	C/3	70 %
7a  , 7b  , 7c 	CC-CV	C/3	3.65 V	CC	2C	70 %

Le cycle de décharge WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures) est un cycle normalisé pour véhicule. Il permet une bonne représentativité des essais de vieillissement pour des applications de véhicules électriques [7]. Le cycle est défini pour un véhicule en circulation sur un profil de vitesse. Pour ces essais, un profil de décharge en courant est estimé pour un véhicule moyen en circulation. Le véhicule considéré pèse 1,5t, a un coefficient de pénétration dans l'air de 0,75 et un coefficient de résistance au roulement de 0,01. Le rendement de la chaîne de traction considéré est de 0,8. La Figure 1 présente le profil de vitesse issu de la norme et le profil de régime de courant estimé. Le régime de décharge moyen de celui-ci est de C/3.

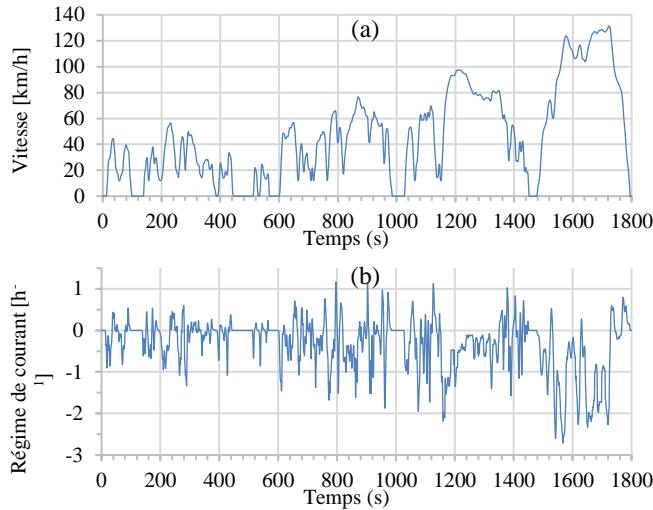


Figure 1: Cycle WLTP (a) en vitesse et (b) en régime de courant.

2.2. Résultats des essais de vieillissement

Les résultats expérimentaux des essais de vieillissement sont présentés sur la figure 2. Les états de santé (SoH) atteints par les cellules vont de 70% à 30% selon les sollicitations lors du vieillissement. Le SoH est défini par l'équation (1) comme le rapport de la capacité maximum exploitable à un état de vieillissement donné $Q_{cellmax}$ sur la capacité initiale de la cellule Q_{cell_0} . La capacité de la cellule $Q_{cellmax}$ est ici définie comme la capacité de charge à C/3 en CC-CV issue du cycle de caractérisation.

$$SoH_{cell} = 100 * \frac{Q_{cellmax}}{Q_{cell_0}} [\%] \quad (1)$$

Sur la Figure , les états de santé des cellules sont représentés en fonction de leur capacité totale chargée et déchargée. La variation de l'état de santé suit au début des essais de vieillissement une courbe en racine carrée des Ah cyclés (de 0 à 1000 Ah environ). Au-delà de 2000 Ah transférés, l'accélération du vieillissement est plus prononcée. Cette accélération du vieillissement apparaît pour tous les essais autour d'un état de santé de 80%.

2.3. Méthode de diagnostic de l'état de santé (SoH)

Le vieillissement des cellules lithium-ion est dépendant de nombreux phénomènes de dégradations. Ces phénomènes impactent le fonctionnement des électrodes ou la diminution du lithium cyclable dans la cellule. Ils se regroupent par mode de vieillissement : la perte de lithium cyclable (LLI pour « Loss of Lithium Inventory ») et la perte de matière active aux électrodes négative et positive (LAM_{NE} et LAM_{PE} pour « Loss of Active Material » à l'électrode négative ou positive) [8]. Chaque mode de vieillissement a sa dynamique propre selon les conditions

d'utilisation et de fonctionnement, l'un pouvant être prépondérant par rapport à l'autre [9,10].

Dans cette étude, seules la LLI et la LAM_{NE} sont considérées. La perte de matière active à l'électrode positive n'est pas un cas retenu, car l'électrode LFP ne subit que de très faibles dégradations au cours de l'utilisation dans cette étude. Ce constat semble partagé par la littérature [11]. L'état de santé de l'électrode négative est évalué à partir d'une méthode présentée dans de précédents travaux [5,6]. La méthode de diagnostic se base sur les analyses DVA (Differential Voltage Analysis) et ICA (Incremental Capacity Analysis) pour détecter des points caractéristiques de l'électrode négative. Ces points correspondent à des changements de phases dans le matériau, et donc à une proportion de lithium inséré dans l'électrode négative connue. De plus, chaque phase correspond à un potentiel d'électrode spécifique. La baisse de capacité chargée entre 2 points caractéristiques indique un vieillissement de l'électrode, car celle-ci est directement liée à une diminution de l'insertion de lithium dans l'électrode. Le résultat de cette estimation est présenté sur la figure 3. Le diagnostic permet d'obtenir l'évolution de l'état de santé de l'électrode négative (LAM_{NE}) pendant l'utilisation en première vie : jusqu'à un état de santé SoH_{cell} de 80 %. L'estimateur utilisé n'est pas exploitable au-delà. Le résultat obtenu est présenté à la figure 3. Cette méthode permet d'avoir une estimation du SoH de l'électrode négative sur un usage équivalent à une première vie. L'évolution de l'état de santé de l'électrode négative à une forme différente de celui de la cellule : la variation s'approche de la forme d'un polynôme de degré 2.

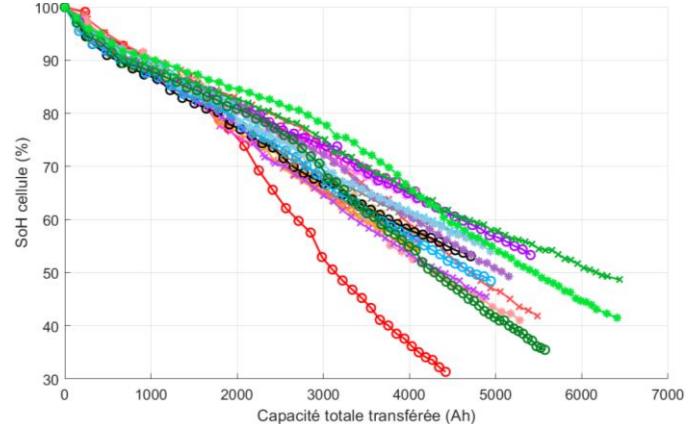


Figure 2 : Résultats des essais de vieillissement accéléré : états de santé des cellules en fonction de la capacité totale chargée et déchargée. Légende au tableau 1.

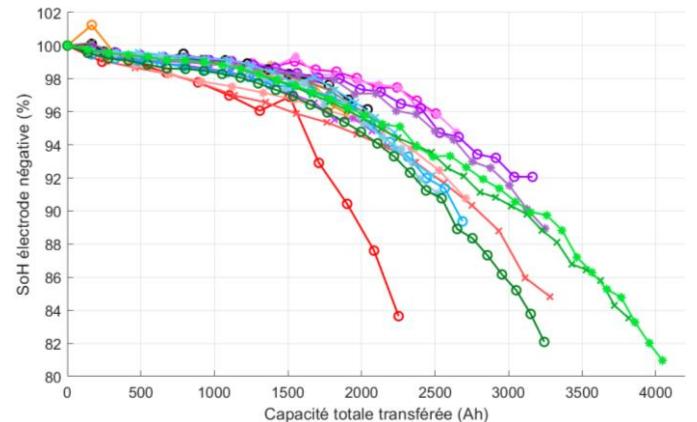


Figure 3 : Estimation de l'état de santé des électrodes négatives en fonction de la capacité totale chargée et déchargée. Légende au tableau 1.

3. PRONOSTIC DE LA DUREE DE VIE UTILE RESTANTE (RUL)

3.1. Considérations initiales pour le pronostic

L'établissement d'un pronostic de la durée de vie utile restante est nécessaire afin de pouvoir évaluer la vitesse de variation de l'état de santé des cellules lithium-ion en vue d'une réutilisation en seconde vie. La méthode proposée basée sur des lois de vieillissement considère le vieillissement de l'électrode négative comme la cause principale de l'accélération de la dégradation de l'état de santé des cellules. La méthode de pronostic est présentée pour la cellule 7c. Seules les données disponibles pour un état de santé de la cellule entre 100% et 75%, i.e. première vie, sont considérées afin d'établir un pronostic. La littérature considère une fin de première vie entre 80% et 70% de l'état de santé de la cellule [2,3]. Le reste des données expérimentales permettra ainsi de comparer le pronostic de l'état de santé à l'état de santé mesuré.

La méthode proposée considère un vieillissement majoritairement dû à une perte de lithium cyclable (LLI) en première vie puis d'une combinaison des pertes de lithium cyclable et de matière active à l'électrode négative (LAM_{NE}) pendant la seconde vie (Figure 2). Le vieillissement observé en première vie, entre 100% et 80% d'état de santé de la cellule, suit une forme en racine (carré ou n-ième) en fonction des Ah échangés puis est linéaire. La racine carrée peut être associée à un vieillissement dû à la température et à une plus forte réactivité à l'état neuf. L'épaisseur de la couche de la SEI (Solid Electrolyte Interphase), faible initialement, s'accroît avec le vieillissement et consomme du lithium cyclable (LLI). Cette forme en racine carrée est notamment observée pour des essais en vieillissement calendaire. La partie linéaire peut également être associée à de la LLI au cours de l'utilisation. La consommation de lithium cyclable est considérée alors comme étant due au craquèlement de la SEI et à l'apparition d'une zone de l'électrode favorisant de nouvelles réactions parasites. Le craquèlement apparaît à cause du changement de volume de l'électrode lors de sa lithiation ou délithiation, donc pendant l'utilisation.

La perte de matière active suit une variation différente. L'outil de diagnostic montre plutôt un vieillissement en polynôme de degré 2 (figure 3). D'autres auteurs proposent une loi de vieillissement de forme exponentielle [10]. Ce constat de vieillissement de plus en plus rapide est également observé par Dubarry et al. [9]. Le vieillissement de l'électrode négative est considéré comme non uniforme : certaines surfaces présentent un fort dépôt alors que d'autres restent fonctionnels. Certaines zones deviennent alors inactives et empêchent l'échange d'ions lithium avec l'électrode positive en vis-à-vis. Elles bloquent alors le fonctionnement d'une fraction de la surface active de la cellule. Nous considérons dans cette étude que le vieillissement de l'électrode a un impact direct sur le fonctionnement de la cellule.

3.2. Etapes pour l'établissement de l'outil de pronostic

Seules les données issues des essais expérimentaux entre 100% et 75% d'état de santé de la cellule sont utilisées pour établir l'outil de diagnostic. Ces données sont représentées en couleur sur la figure 4 (a). L'estimation de l'état de santé de l'électrode négative est effectuée pour ces données et représentée en noir. La première étape consiste à obtenir la loi de vieillissement de l'électrode négative. Les paramètres du polynôme de degré 2 donnés par l'équation (2) permettent d'approcher la variation de l'état de santé de l'électrode négative en fonction de la capacité totale transférée x .

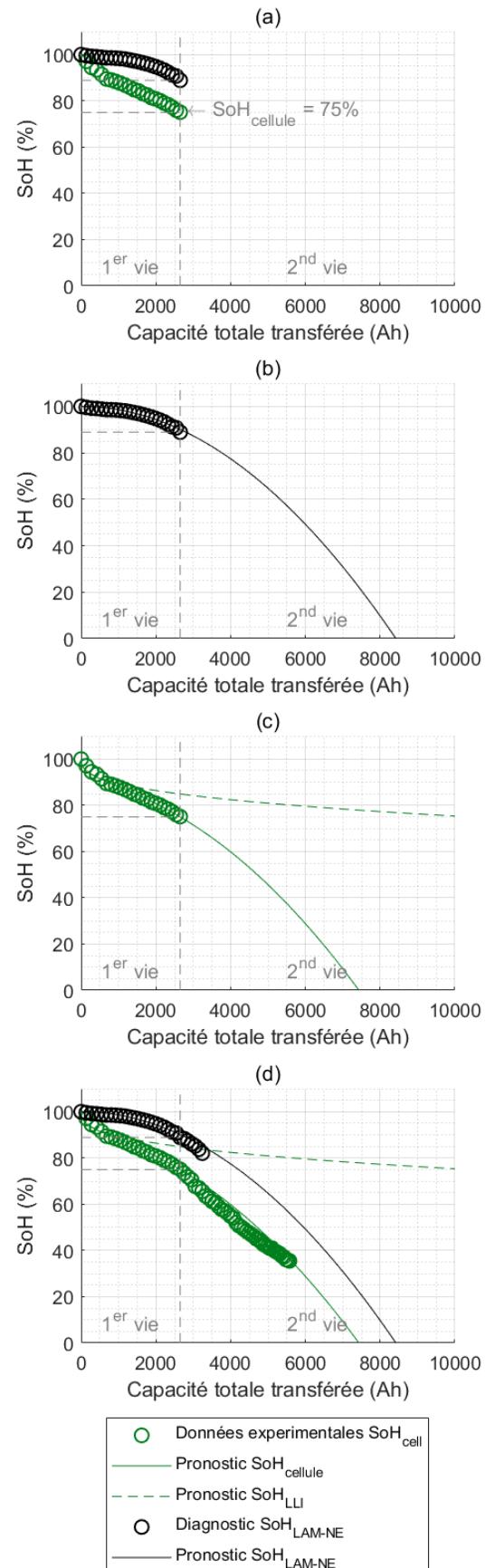


Figure 4 : Application de la méthode de pronostic pour la cellule 7a. (a) Données expérimentales en première vie, (b) pronostic de l'état de santé de l'électrode négative, (c) pronostic de la perte de lithium cyclable (LLI) et de la cellule. (d) Comparaison des données de seconde vie avec le pronostic.

La capacité totale transférée correspond à la capacité totale chargée et déchargée au cours des essais de vieillissement. Le vieillissement est considéré comme nul et sans dynamique (la tangente pour SoH_{NE} en 0 est nulle) à l'état neuf d'où respectivement $p_0 = 100\%$ et $p_1 = 0$. Le paramètre p_2 est alors obtenu par ajustement paramétrique. Cette première étape permet de déterminer le polynôme donnant la loi d'évolution de l'état de santé de l'électrode négative à la figure 4 (b).

$$\text{SoH}_{\text{électrode neg.}} = p_0 + p_1 \cdot x + p_2 \cdot x^2 \quad [\%] \quad (2)$$

Les paramètres obtenus sont ensuite utilisés afin d'obtenir une loi de vieillissement pour la cellule complète. Celle-ci donnée à l'équation (3) correspond à une somme composée du polynôme précédent et d'une fonction en racine n-ième $r_1 \cdot x^{r_2}$. Les paramètres du polynôme de degré 2 sont imposés par la première étape. La racine n-ième représente quant à elle la perte de lithium cyclable. Les paramètres r_1 et r_2 peuvent être déterminés par un ajustement paramétrique. Le paramètre r_2 est compris dans l'intervalle $[0 ; 1]$. Cette deuxième étape donne la courbe représentée en vert et trait continu sur la figure 4 (c). La ligne continue est le résultat de la loi de vieillissement de la cellule. La courbe verte en trait pointillé représente la fonction racine n-ième pour la perte de lithium cyclable.

$$\text{SoH}_{\text{cell}} = r_1 \cdot x^{r_2} + p_0 + p_1 \cdot x + p_2 \cdot x^2 \quad [\%] \quad (3)$$

La figure 4 (d) compare les données expérimentales sur l'ensemble de l'essai de vieillissement au pronostic obtenu. Elle

synthétise les étapes (a) à (c) de la figure 4. Les données expérimentales concordent avec la projection obtenue par le modèle. La méthode de pronostic est appliquée aux données de toutes les cellules issues des essais expérimentaux, seul le résultat final de la méthode de pronostic (similaire à la figure 4 (d)) est représenté pour chaque cellule sur la figure 5.

3.3. Résultats

Les résultats de l'outil de pronostic, pour les cellules issues des essais expérimentaux présentés au Tableau 1, sont représentés sur la figure 5. Les cellules de chaque groupe sont représentées sur un même graphique. Les données issues des essais expérimentaux obtenues au-delà d'un état de santé de 75% montrent une bonne estimation de l'outil de pronostic. Les mesures obtenues corroborent la loi de vieillissement présenté ci-dessus. Le pronostic individuel des cellules proposé permet donc de décrire le comportement d'une cellule sur le reste de sa vie. La méthode permet de prendre en compte le vieillissement inhomogène des cellules avec des conditions expérimentales identiques.

Les essais à tension de fin de charge réduite, 3,55V au lieu de 3,65V, issus des groupes 3 et 6 montrent un vieillissement plus homogène entre cellules (figure 5 (c) et (f)). Ce constat est partagé avec les essais du groupe 4 (figure 5 (d)) utilisant une charge à courant constant sans fin de charge à tension constante. Ces 3 groupes donnent un résultat de pronostic similaire avec un état de santé de 20% prévu pour 7200 Ah transféré pour les

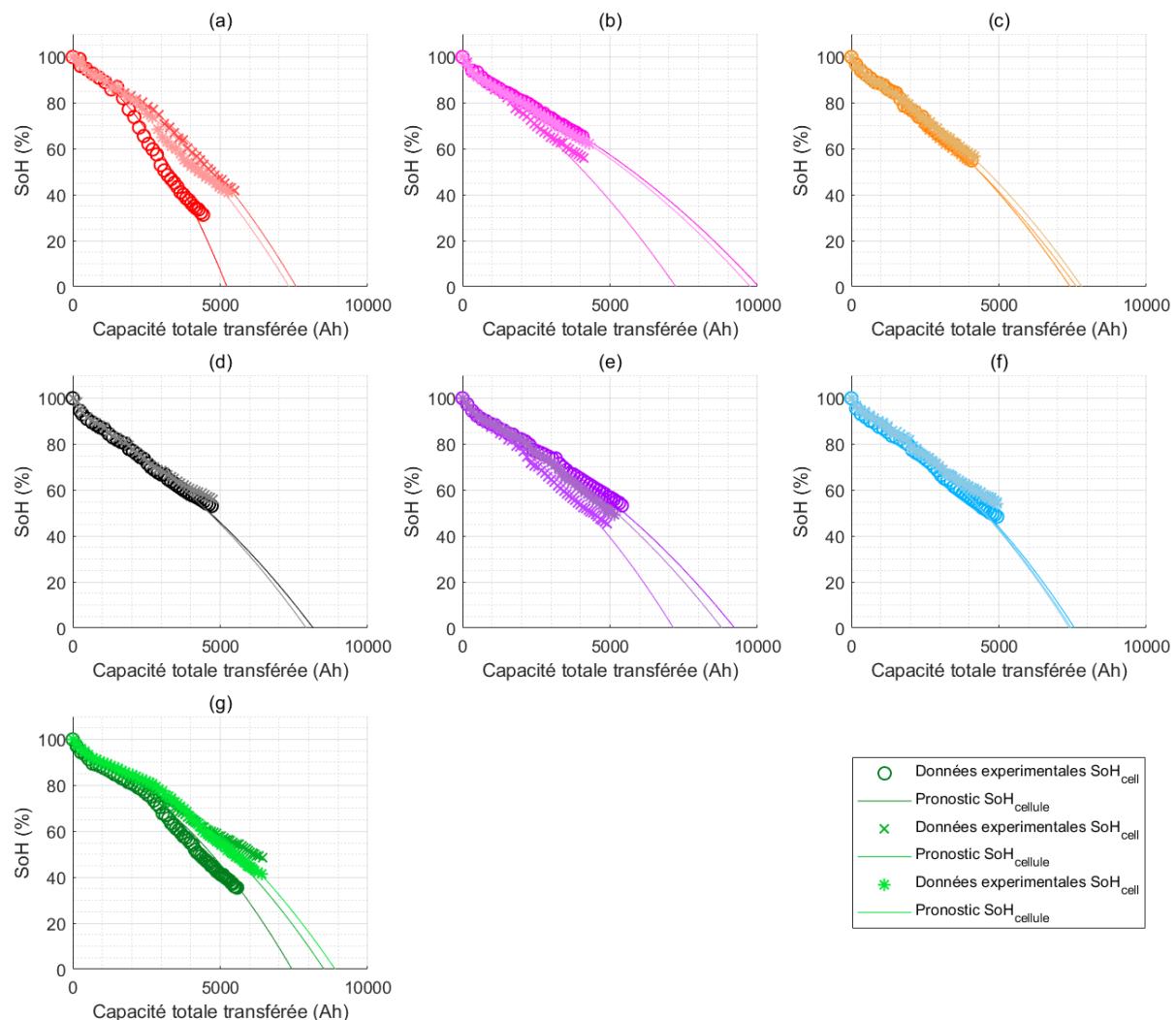


Figure 5 : Résultats des essais expérimentaux et de l'outil de pronostic pour l'état de santé de la cellule (SoH_{cell}) pour les cellules :
(a) groupe 1, (b) groupe 2, (c) groupe 3, (d) groupe 4, (e) groupe 5, (f) groupe 6 et (g) groupe 7.

cellules des groupes 3 et 6 et 7700 Ah transférés pour les cellules du groupe 4. Nous pouvons cependant observer un léger ralentissement du vieillissement sur les cellules du groupe 6 de façon similaire à la cellule 7b à partir d'un état de santé des cellules de 60%.

Les cellules des groupes 6 et 7 (figure 5 (f) et (e)) ont le même cycle de vieillissement, à la tension de fin de charge près. Bien que le vieillissement soit moins homogène pour le groupe 7, la durée de vie estimée des cellules est similaire aux résultats du groupe 6. Pour ce dernier groupe, le vieillissement n'est pas ralenti par l'abaissement de la tension de fin de charge, contrairement à ce qui était attendu. Le vieillissement est cependant plus homogène.

Les cellules du groupe 1 dont les états de santé sont représentés sur la figure 5 (a) ont un cycle de vieillissement avec une profondeur de décharge plus importante que celle des cellules du groupe 4. Le résultat montre un vieillissement globalement plus rapide pour certaines cellules dans le cas d'une décharge complète.

Les états de santé des cellules du groupe 6 sur la figure 5 (f), cyclent avec une charge rapide (2C) plutôt qu'avec une charge à C/3 (cellules du groupe 2). Le reste du cycle de vieillissement est identique entre les cellules de ces deux groupes. Le résultat montre des vieillissements similaires, notamment pour ces deux groupes de cellules.

4. CONCLUSIONS

Ce travail présente une étude de vieillissement ainsi que les méthodes de diagnostic de l'état de santé des cellules et de leur électrode négative. La méthode de pronostic de l'état de santé de cellules lithium-ion GLFP est présentée et testée sur l'ensemble des essais expérimentaux. Le résultat est obtenu à partir de données de première vie, c'est-à-dire pour les données disponibles entre 100% et 75% d'état de santé de la cellule.

La méthode utilise l'information de l'état de santé de l'électrode négative et son impact sur l'état de santé de la cellule pour évaluer l'accélération du vieillissement. Les résultats montrent une bonne prévisibilité du vieillissement en seconde vie dans le cas d'une conservation du même profil d'utilisation. Les travaux montrent que le fonctionnement des batteries lithium-ion jusqu'à des états de santé faibles est possible. Le vieillissement non linéaire de l'électrode négative et de la cellule sur l'ensemble de leur utilisation est cependant à considérer.

L'outil de pronostic proposé permet de prendre en compte les différents mécanismes de vieillissement intervenant dans les cellules GLFP. La forme de la loi de vieillissement de l'électrode négative est considérée à partir des constatations issues de la méthode de diagnostic. Le résultat montre une bonne estimation de l'état de santé de chacune des cellules pour un même cycle d'utilisation. L'étude de vieillissement avec un cycle d'utilisation identique en premier et en seconde vie est nécessaire afin de vérifier le comportement des cellules dans un cas unique avant d'envisager de modéliser leur vieillissement. Il sera ensuite envisageable d'étudier le vieillissement des cellules avec un changement d'application entre la première et la seconde vie.

Le pronostic de durée de vie utile d'un assemblage de cellule en série dépend du pronostic de la cellule la plus faible. Or, une disparité importante des résultats est observée pour des cellules dans les mêmes conditions expérimentales. Les travaux montrent un vieillissement plus homogène dans le cas de fin de charge à tension réduite ou sans fin de charge à tension

constante. L'abaissement de la tension de fin de charge n'impacte que faiblement la capacité chargée dans les cellules GLFP (inférieure à 1%). Un vieillissement plus homogène permettrait d'éviter la présence de cellule avec un vieillissement plus important dans un assemblage et donc d'augmenter la durée de vie du système en seconde vie.

L'abaissement de la tension de fin de charge n'impacte pas la durée de vie des cellules dans ces travaux. Ce constat est néanmoins contradictoire avec d'autres études de la littérature en cas de charge rapide [12]. Ce résultat est à vérifier pour des régimes de courant plus élevés, notamment dans le cas de travaux sur de la recharge rapide ou recharge optimisée. De façon plus générale, l'impact sur le vieillissement à long terme des charges rapides et optimisées est à évaluer.

De futurs travaux permettront de vérifier l'impact du vieillissement de l'électrode négative sur le vieillissement global de la cellule. Une étude post mortem permettra de vérifier l'état des électrodes après leur vieillissement et son impact sur le fonctionnement de la cellule.

5. REMERCIEMENTS

Nous remercions EVE SYSTEM pour le financement de ces travaux de recherche avec le soutien de l'ANRT (subvention CIFRE 2018/1625).

6. REFERENCES

- [1] U.S. DOE, Energy Storage Grand Challenge: Energy Storage Market Report, (2020).
- [2] Directive 2006/66/CE du Parlement Européen et du Conseil du 6 septembre 2006 relative aux piles et accumulateurs ainsi qu'aux déchets de piles et d'accumulateurs et abrogeant la directive 91/157/CEE, 2006.
- [3] E. Martinez-Laserna, E. Sarasketa-Zabala, I. Villarreal Sarria, D.I. Stroe, M. Swierczynski, A. Warnecke, J.M. Timmermans, S. Goutam, N. Omar, P. Rodriguez, Technical Viability of Battery Second Life: A Study from the Ageing Perspective, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 54 (2018) 2703–2713. doi:10.1109/TIA.2018.2801262.
- [4] H. Quinard, E. Redondo-Iglesias, S. Pelissier, P. Venet, Fast Electrical Characterizations of High-Energy Second Life Lithium-Ion Batteries for Embedded and Stationary Applications, *Batteries.* 5 (2019) 33. doi:10.3390/batteries5010033.
- [5] W. Wheeler, A. Sari, P. Venet, Y. Bultel, E. Riviere, LFP battery aging behavior: diagnosis of cell materials for second life applications William, in: IMLB 2022, Sydney, Australia, 2022.
- [6] W. Wheeler, A. Sari, P. Venet, Y. Bultel, E. Riviere, Étude du vieillissement de cellules LFP : diagnostic de l'état de santé de la cellule et des électrodes en vue d'une réutilisation en seconde vie, in: JCGE 2022, Le Croisic, France, 2022.
- [7] M. Ben-Marzouk, S. Pelissier, G. Clerc, A. Sari, P. Venet, Generation of a Real-Life Battery Usage Pattern for Electrical Vehicle Application and Aging Comparison with the WLTC Profile, *IEEE Trans. Veh. Technol.* 70 (2021) 5618–5627. doi:10.1109/TVT.2021.3077671.
- [8] C.R. Birk, M.R. Roberts, E. McTurk, P.G. Bruce, D.A. Howey, Degradation diagnostics for lithium ion cells, *J. Power Sources.* 341 (2017) 373–386. doi:10.1016/j.jpowsour.2016.12.011.
- [9] M. Dubarry, C. Truchot, B.Y. Liaw, K. Gering, S. Sazhin, D. Jamison, C. Michelbacher, Evaluation of commercial lithium-ion cells based on composite positive electrode for plug-in hybrid electric vehicle applications. Part II. Degradation mechanism under 2 C cycle aging, *J. Power Sources.* 196 (2011) 10336–10343. doi:10.1016/j.jpowsour.2011.08.078.
- [10] M. Dubarry, C. Truchot, B.Y. Liaw, Synthesize battery degradation modes via a diagnostic and prognostic model, *J. Power Sources.* 219 (2012) 204–216. doi:10.1016/j.jpowsour.2012.07.016.
- [11] M. Klett, R. Eriksson, J. Groot, P. Svens, K. Ciosek Högström, R.W. Lindström, H. Berg, T. Gustafson, G. Lindbergh, K. Edström, Non-uniform aging of cycled commercial LiFePO4/graphite cylindrical cells revealed by post-mortem analysis, *J. Power Sources.* 257 (2014) 126–137. doi:10.1016/j.jpowsour.2014.01.105.
- [12] R. Mathieu, Modélisation de l'influence de la rapidité de recharge totale ou partielle sur les performances électro-thermiques et la durée de vie des batteries pour applications automobiles, Thèse, Université de Bordeaux, 2020.