

Système d'équilibrage de l'état de santé des cellules pour l'amélioration de la durée de vie des batteries

Julien BRIGANT¹, Margot GAETANI-LISEO¹, Alaa HIAZI¹, Ali SARI¹, Pascal VENET¹

¹Universite Claude Bernard Lyon 1, Ampère, UMR5005, INSA Lyon, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Villeurbanne, F-69100, France

L'objectif de ce travail est de proposer une stratégie d'équilibrage de cellules permettant de prolonger la durée de vie des batteries. L'étude se base sur des cellules lithium-ion de chimie NMC (811) pour une application orientée véhicule électrique.

Cet article compare deux types de contrôle d'équilibrage : un équilibrage dissipatif en tension, couramment utilisé par les industriels, et un nouvel équilibrage lui aussi dissipatif se basant sur l'état de santé des cellules. La stratégie proposée est testée, sans ignorer la dimension du coût énergétique de l'équilibrage, sur le logiciel Amesim, développé par Siemens. Les résultats présentés montrent une prolongation de la durée de vie des batteries.

Mots-clés — batterie, lithium-ion, NMC, durée de vie, équilibrage dissipatif, état de santé

1. INTRODUCTION

La transition énergétique et l'interdiction de la vente de véhicules thermiques en 2035 par l'Union Européenne impliquent un besoin en batteries grandissant. Selon le rapport de la fondation Volta de 2023 [1], la production de batteries lithium-ion en 2025 devrait être plus de deux fois celle de 2022 (4 TWh contre 1,6 TWh). Une des hypothèses courantes est qu'afin de limiter l'impact environnemental de cette production, il faudrait prolonger la durée de vie des batteries. Selon les compromis mis en place pour permettre ce gain de durabilité, l'hypothèse peut être plus ou moins légitime.

Les batteries de véhicules électriques, également appelées packs batteries, sont composées de modules eux-mêmes constitués d'assemblages série / parallèle de cellules. La façon dont est utilisée ou laissée au repos un pack est un facteur important dans le vieillissement des cellules, élément unitaire du pack. Ce vieillissement dépend principalement de la température, du courant, et de l'état de charge ou SoC (pour State of Charge) des cellules. La tension est aussi un indicateur important, elle donne une information sur le SoC car ces deux grandeurs sont corrélées. La courbe de la figure 1 représentant la tension à vide OCV (Open Circuit Voltage) en fonction de l'état de charge met en évidence ce lien.

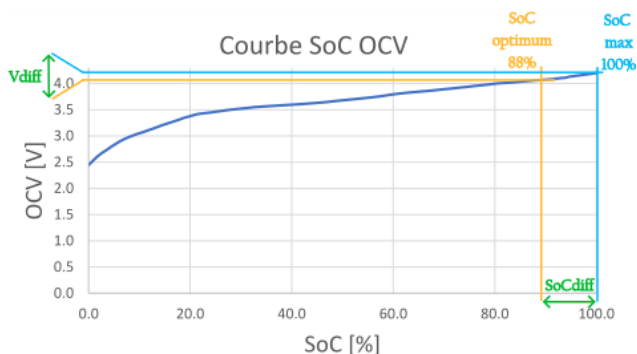


Fig. 1. Courbe $OCV=f(SoC)$ de la cellule étudiée

Aux côtés des cellules lithium, se trouve le BMS (Battery Management System) qui permet de surveiller les grandeurs physiques du pack et d'agir en conséquence (coupure du pack si température trop élevée par exemple). Le BMS assure la sécurité de fonctionnement du pack, permet la sauvegarde ou encore la communication des données et réalise l'estimation des états de la batterie, comme le SoC et dans certains cas l'état de santé, dit SoH (pour State of Health).

Le SoH est communément défini soit par rapport à la perte de capacité, soit par rapport à l'augmentation de la résistance interne de la batterie. La définition choisie dans ces travaux est celle utilisant la capacité, indicateur permettant d'évaluer l'autonomie d'un véhicule. Les références indiquées dans cet article utilisent cette même définition.

Grâce à un circuit d'équilibrage commandé par le BMS, il est possible de gérer l'énergie de chaque cellule au sein d'un pack. Son rôle est d'équilibrer les niveaux de charge des cellules ce qui revient à égaliser les tensions de ces dernières (lien SoC-OCV). Cet équilibrage dit équilibrage en tension a pour but d'utiliser l'entièreté des capacités disponibles dans un module et donc dans chaque cellule le composant. En effet, dans le cas d'un déséquilibre entre les cellules en série, la cellule la moins chargée provoquera l'arrêt de la décharge du module (souvent la cellule la plus faible en SoH). Le même cas de figure peut arriver lors de la charge [2].

Pour équilibrer les cellules entre elles, il existe deux grands types de circuits, représentés figure 2, permettant un équilibrage dit passif ou dissipatif (schéma de gauche) et un équilibrage actif ou redistributif (schéma de droite). Pour ajuster le SoC, l'équilibrage dissipatif va décharger la cellule la plus chargée dans une résistance en dérivation. L'équilibrage redistributif quant à lui, va répartir l'énergie entre les cellules pour égaliser les niveaux de charge. Par nature, l'équilibrage redistributif aura moins de pertes. Malgré cela, il reste moins utilisé par les industriels car il est composé de plus de composants augmentant sa complexité. Cela en fait une solution plus coûteuse et moins fiable.

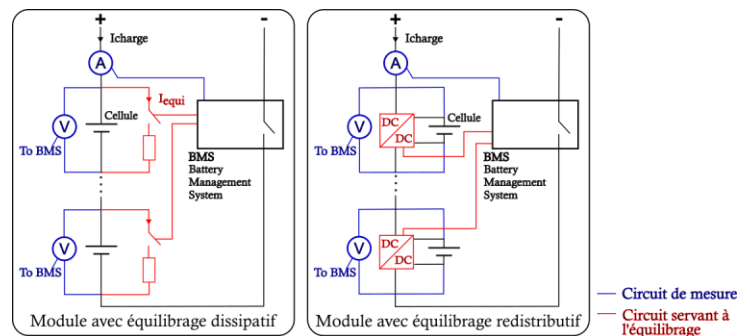


Fig. 2. Schémas exemples de modules avec équilibrages dissipatif et redistributif

La fréquence d'utilisation du circuit d'équilibrage est fortement dépendante du comportement homogène des cellules dans le temps. Dans le cas où les cellules ont des caractéristiques proches (capacité, résistance interne) lors de leur assemblage et que leurs températures de fonctionnement sont similaires, l'équilibrage intervient peu [3]. Une disparité de température lors de l'utilisation est un facteur important pouvant provoquer un vieillissement hétérogène des cellules. Même si une attention particulière est portée sur le fait d'avoir des cellules aux caractéristiques semblables et un refroidissement homogène souvent coûteux et lourd, il reste des disparités entre les cellules. Au fil du temps et du vieillissement le circuit d'équilibrage devient de plus en plus nécessaire pour exploiter correctement le pack batterie.

Dans le cas d'un équilibrage dissipatif le SoH du module est égal à l'état de santé de la cellule la plus faible en capacité, limitant ainsi le module dans son fonctionnement. Le but du nouvel équilibrage présenté est de préserver la cellule la plus faible en y appliquant en fin de charge la tension optimale avec laquelle elle se dégrade moins pour un cycle de fonctionnement donné. Ce niveau de charge optimum dépend de la chimie et du modèle de la cellule mais il est généralement inférieur à 100% ce qui revient à moins charger les cellules les plus vieilles (ayant les SoH les plus faibles, et donc des capacités moindres). La figure 3 représente un module de trois cellules en série aux caractéristiques différentes adoptant cette stratégie.

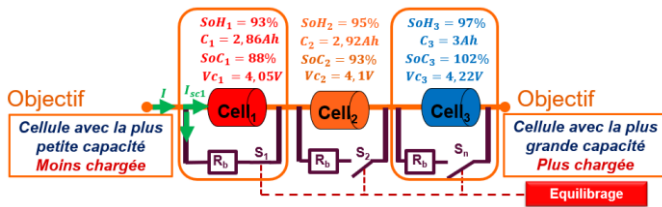


Fig. 3. Exemple du principe d'équilibrage en SoH sur un module de 3 cellules en série lors de la fin de charge

Dans l'exemple de la figure 3, V_c représente la tension de la cellule juste après la fin de charge, reflet du SoC, niveau de charge de la cellule. L'élément $Cell_1$ avec l'état de santé et la capacité la plus basse est sous-chargé à un SoC dit optimal où les pertes en capacité sont limitées. La cellule en meilleure santé quant à celle est légèrement surchargée au-dessus de 100% et cela pour deux raisons :

- Une tension de la cellule plus grande provoquera une tension du module plus haute et une puissance délivrable légèrement plus grande
- Surcharger la cellule en meilleure santé provoquera une perte en capacité plus rapide, aidant à l'homogénéisation des capacités du module

La cellule intermédiaire peut être chargée selon diverses stratégies pouvant être surchargée pour favoriser la tension du pack ou sous-chargée pour préserver sa capacité (cas simulé en partie 3). La stratégie représentée ici est de la charger à un niveau intermédiaire par rapport aux deux autres cellules représentant les extrêmes.

Cet équilibrage limite la capacité exploitable du module à l'instant t de par la limitation de charge de la cellule la plus faible. Cependant dans le cadre des véhicules électriques la capacité du pack n'est que rarement exploitée entièrement. Avec cette stratégie une homogénéisation progressive des capacités des cellules se produit avec pour conséquence une maximisation

de l'autonomie lors des trajets demandant une décharge étendue. La durée de vie du module est prolongée de par la dégradation plus lente de la cellule la plus faible (ayant le moins de capacité).

Dans la littérature des équilibrages prenant en compte les états de santé des batteries dans le but d'étendre la durée de vie des packs ont déjà été proposés, cependant la majorité de ceux-ci sont redistributifs. Ce type d'équilibrage simulé dans les études [4] et [5] permet d'appliquer une quantité d'énergie déchargée différente pour des cellules en série grâce par exemple à l'utilisation de convertisseurs DC/DC. Dans ce cas précis, il est possible de moduler la quantité d'énergie déchargée de chaque cellule en fonction des états de santé. Plus l'énergie déchargée est grande plus la variation en SoC de la cellule est importante (ΔSoC). Le terme DoD (Depth of Discharge) peut être utilisé pour traduire cette même notion reflétant la profondeur de décharge d'une cellule. Le vieillissement des cellules étant aussi lié au ΔSoC , il devient un levier d'action pour contrôler les états de santé. Plus la cellule est déchargée, plus son vieillissement est important et inversement.

Dans le cas de l'utilisation d'un circuit d'équilibrage dissipatif, il est aussi possible de jouer sur la quantité de charge échangée de chaque cellule en série. Cela est réalisé dans [6] en dissipant de l'énergie supplémentaire pendant la décharge dans les résistances du circuit d'équilibrage, ce qui se traduit en pertes. Cette méthode permet une homogénéisation des états de santé en dégradant d'avantage les cellules en meilleures santé avec des décharges amplifiées n'apportant que des pertes supplémentaires. La vitesse de dégradation de la cellule faible reste inchangée n'améliorant pas la durée de vie du module.

Malgré les études menées, les résultats expérimentaux, et particulièrement ceux à long terme, ne sont pas nombreux. Les études [6], [7] sont allées jusqu'à des prototypes expérimentaux à grande échelle mais avec des équilibrages soit redistributifs [7] soit dissipatifs [6] mais sans prolongement de la durée de vie dans ce cas.

L'originalité du travail présenté dans cet article est l'amélioration de la durée de vie des modules avec un équilibrage dissipatif prenant en compte la santé des cellules. Le levier d'action influant le vieillissement des cellules est le niveau d'état de charge ou SoC et non la quantité de charge déchargée. Le niveau de charge est modulé durant la fin de charge par le biais du circuit d'équilibrage pour limiter la dégradation en capacité de la cellule la plus faible. Le choix du SoC optimum à adopter à la recharge est défini par plusieurs critères de fonctionnement ayant un impact sur le vieillissement (température, profondeur de décharge, courant, temps au repos de la cellule). La partie suivante expose une analyse sur le SoC idéal engendrant le moins de pertes de capacité en fonction d'un cycle d'utilisation et des critères précédemment cités. Ces observations se basent sur une loi de vieillissement présente sur le logiciel de simulation Amesim [8] pour une cellule 18650 de chimie NMC811. Puis, en s'appuyant sur ces résultats, un équilibrage dissipatif permettant d'améliorer la durée de vie du module est proposé.

Nos recherches s'inspirent également d'une thèse réalisée au laboratoire Ampère sur la prolongation de la durée de vie de supercondensateurs [9].

2. ANALYSE DES SOC OPTIMAUX POUR UNE CELLULE DONNÉE

Sur le logiciel de simulation Amesim, la cellule simulée est un accumulateur au format cylindrique 18650, avec une chimie NMC (Nickel Manganèse Cobalt) de type 811 composé d'une

électrode négative en graphite / silicium. Cette dernière a une capacité de 3 Ah (de marque LG, modèle HG2).

Cette cellule va subir un cycle de décharge avec différents niveaux de charge (SoC initial). Le cycle est représentatif d'un profil d'utilisation se rapprochant d'un taxi, il est décrit dans le tableau suivant (Tableau 1).

Tableau 1. Description du profil de test

Phases	Descriptions
Décharge	Température ambiante de 25°C. 8 décharges par jour basées sur cycle normalisé WLTC adapté à une cellule (courant inférieur à 1C) amenant à un ΔSoC de 43% en début de vie de la cellule.
Charge	Après la 8 ^{ème} décharge, une charge CC/CV* (avec phase CC à C/3) est réalisée. Elle est arrêtée lorsque le SoC en fin de charge est égal au SoC initial. *CC/CV charge en Courant Constant puis en Tension Constante
Repos	Reste du temps de la journée.

Dans une journée huit cycles de décharge WLTC (Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycles) normalisés sont réalisés à la suite représentant une distance parcourue par le véhicule de 184 km. Le premier cycle commence à 9h et le dernier finit un peu avant 17h. Le profil d'état de charge d'une cellule du pack est illustré figure 4. Sur cette dernière nous pouvons constater que la batterie (et donc la cellule représentative du SoC du véhicule) est chargée à 100% en début de test. Quand cette dernière est neuve, elle atteint en fin de décharge un SOC proche de 57%, ce qui représente un ΔSoC égal à 43%. Le véhicule neuf a donc 434 km d'autonomie.

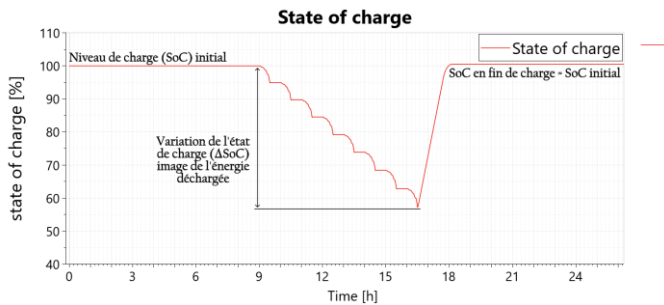


Fig. 4. Evolution du SoC d'une cellule subissant un cycle d'utilisation

L'objectif de l'étude est de reproduire le cycle avec une cellule chargée à différents niveaux de SoC et de déterminer le niveau de charge pour lequel il y a le moins de perte de capacité. Pour simuler la cellule étudiée sur le logiciel Amesim, il existe un modèle électrothermique couplé à une loi de vieillissement. Cela nous permet d'avoir une capacité perdue estimée. Cette loi a été générée par un outil présent dans Amesim [8] se basant sur des données de campagnes de vieillissement. Les études [10], [11] font parties des données ayant servis à la synthèse de cette loi. Les variables d'entrées de la loi sont la température, le SoC, le courant en charge et en décharge.

Grâce à la co-simulation entre Matlab et Amesim, un script Matlab a été codé pour déterminer dans diverses situations le niveau de charge optimum minimisant la perte de capacité. L'algorithme figure 5 représente l'architecture du code développé. Pour chaque combinaison de température et de profondeur de décharge, une boucle d'optimisation (encadrée en rouge sur la figure 5) utilisant la fonction d'optimisation

fminsearchbnd est exécutée. Des simulations du cycle de décharge avec différents niveaux de charge sont lancées sur Amesim, action représentée en bleu sur l'algorithme. En quelques itérations le SoC optimum provoquant le moins de pertes en capacité est déterminé.

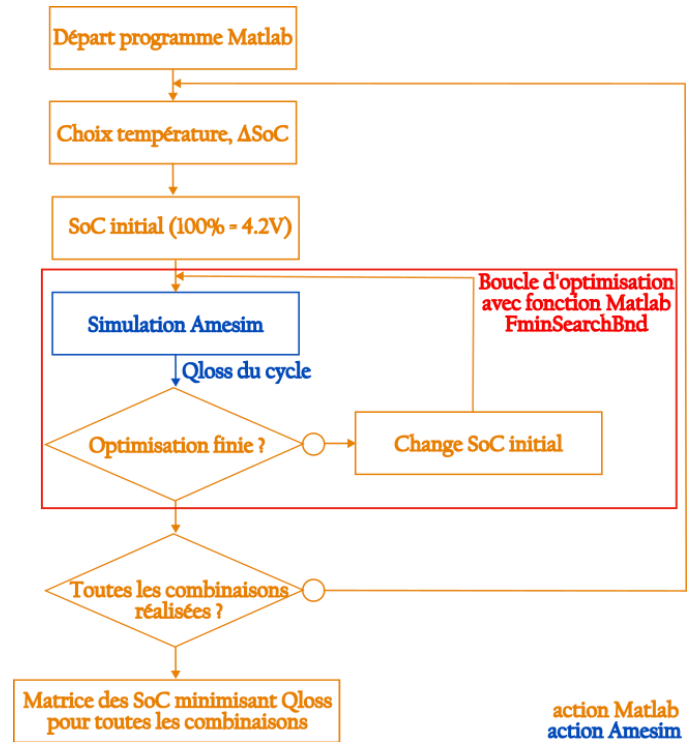


Fig. 5. Algorithme pour la détermination de SoC optimaux (co-simulation Amesim / Matlab)

La figure 6 ci-dessous représente la perte de capacité, appelée Qloss, en fonction des niveaux de charge initiaux et de fin de recharge (égaux), pour la température et le ΔSoC correspondant au cycle décrit dans le tableau 1.

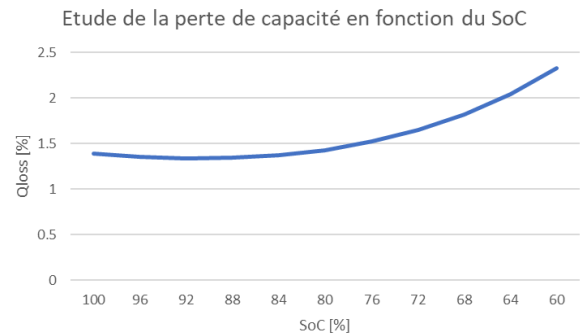


Fig. 6. Evolution de la perte de capacité en fonction du SoC (initial et fin de recharge) d'une cellule subissant le cycle à 25°C, avec un ΔSoC de 43% en début de vie

L'optimum proposé ici est de l'ordre de 88% de SoC. La cellule la plus faible devra donc cycler de la manière suivante pour subir le moins de perte de capacité :

- Charge à un SoC initial de 88%
- Cycle de décharge (cas ΔSoC de 43%)
- Recharge de 45% (SoC avant recharge) à 88%

Avec le vieillissement, la capacité de la cellule va diminuer. Le cycle WLTC lui, va demander la même quantité d'énergie. Cela va donc conduire à une décharge plus profonde de la cellule

au cours du temps. Ainsi, le SoC avant recharge va passer de 45% à 30% en 6 ans et demi de cyclage. Le résultat est donc un ΔSoC qui augmente progressivement au cours du vieillissement.

Il est donc intéressant de voir le comportement de la perte de capacité (Q_{loss}), en fonction de la profondeur de décharge en fin de profil et du niveau de charge initial, en départ du profil test.

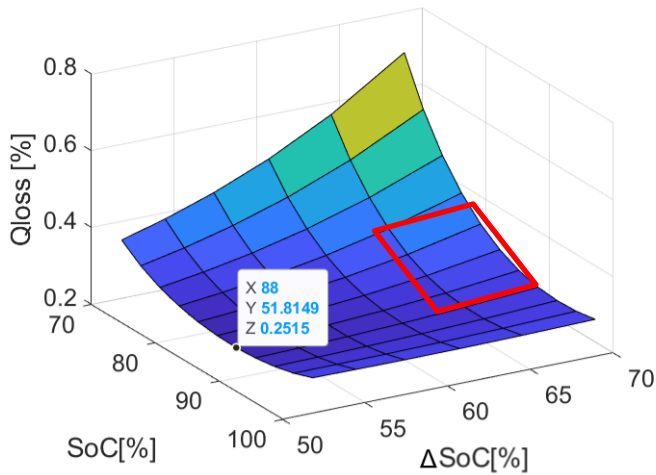


Fig. 7. Perte de capacité (Q_{loss} axe Z) en fonction du niveau de charge (SoC axe X) et de la profondeur de décharge (ΔSoC axe Y) pour une température ambiante à 25°C

La surface de la figure 7 est réalisée grâce à une matrice d'expérience simulée sur le logiciel. Les paramètres de la simulation Amesim sont modifiés grâce au code Matlab. L'encadré rouge de la figure met en avant l'augmentation de Q_{loss} pour un ΔSoC croissant. Lorsque ΔSoC augmente, le SoC avant recharge diminue. Un exemple est le point où la dégradation est la plus grande avec un SoC égale à 70% pour un ΔSoC de la même valeur donnant un SoC avant recharge de 0%.

Le fait de sous-charger la cellule dite faible fait que cette dernière aura le SoC le plus bas de tout le module avant la recharge. A partir d'un SoC minimum (inférieur à 30%) la dégradation impliquée par le fonctionnement à bas SoC devient importante. C'est pour cela que le ΔSoC du cycle ne dépasse pas ici 50% pour une cellule neuve (sachant qu'il augmente avec la perte de capacité de la cellule). Cela évite un SoC avant recharge trop bas impliquant une augmentation de la dégradation contraire à notre objectif de protection de la cellule.

Une intuition concernant ce phénomène est que la cellule d'étude a une électrode négative en graphite dopée en silicium. La présence de silicium provoque une dilatation de l'électrode lorsque la cellule fonctionne à bas SoC provoquant un vieillissement accéléré [12]. Il serait donc éventuellement possible d'utiliser des cycles avec des ΔSoC plus importants pour des cellules limitant ce phénomène ou ne contenant pas de silicium. Le silicium permet cependant dans le cas présent d'augmenter la capacité des cellules. C'est ce compromis entre vieillissement et capacité qui limite la zone d'application de notre équilibrage.

Les tendances de vieillissement observées lors des simulations sont cohérentes avec les campagnes de vieillissement utilisées par la loi [10], [11] et avec des études plus récentes comme [13] portant sur la même cellule.

3. EQUILIBRAGE EN SOH SIMULE

Dans le but de simuler un module batterie à petite échelle, et de réaliser ensuite un prototype expérimental intégrant un équilibrage en SoH, trois cellules sont considérées en série sur le logiciel Amesim.

Ces dernières ont des caractéristiques et conditions de cyclage différentes dans le but de retrouver les hétérogénéités présentes dans un pack batterie. Pour cela les cellules présentent des capacités initiales non identiques ainsi que des coefficients d'échanges avec l'air entourant le module différents. Cela provoque un écart de température jusqu'à 8°C entre la cellule la plus froide et la plus chaude, en fin de charge. Cet écart de température est représentatif d'un système de refroidissement par air forcé pouvant varier de 5 à plus de 10°C selon le design, le flux d'air et la sollicitation du module [14].

Pour l'hétérogénéité de capacité, un choix a été fait en accord avec la capacité nominale (3Ah) et la capacité minimum (2.95Ah) données par le constructeur.

Tableau 2. Hétérogénéité de capacité

Cellule	Capacité [Ah]
Cellule à 26°C	3.075*1
Cellule à 30°C	3.075*0.98 (3.05)
Cellule à 34°C	3.075*0.96 (2.95)

La capacité la plus faible a été attribuée à la cellule ayant la plus grande température de fonctionnement et qui vieillira la plus vite. C'est un choix simplifiant le raisonnement cependant une multitude de cas sont possibles.

Notre application n'étant pas orientée puissance nous n'avons pas considéré une différence entre les cellules ni d'évolution de la résistance interne.

Les trois cellules ont subi le cycle prédéfini avec premièrement un équilibrage en tension dit classique jusqu'à obtenir 20% de pertes de capacité de la cellule à 34°C (critère pour la fin de première vie). Puis une autre simulation avec un équilibrage en SoH a été réalisée dans les mêmes conditions dans le but de comparer l'évolution des capacités individuelles des cellules et de constater ou non la prolongation de la durée d'utilisation du pack.

Ce nouvel équilibrage va gérer les niveaux de charge de chaque cellule en fonction de leur état de santé. La cellule avec le moins de capacité sera chargée à un niveau de SoC optimum (SoCopti) limitant la dégradation. La cellule ayant la plus grande capacité est chargée à 100% ou plus (appelé SoCmax). La différence entre SoCopti et SoCmax (nommé SoCdiff) est le reflet d'une charge à des niveaux de tension différents séparés d'une tension V_{diff} . En fin de charge quand les tensions des cellules (notées V_{cell}) sont supérieures à 4.15V (tension de seuil nommée $V_{\text{equiStart}}$) le circuit d'équilibrage va créer et maintenir la différence de tension (V_{diff}) entre la cellule en meilleure santé et les autres cellules. Cet écart sera créé en activant le circuit d'équilibrage des cellules les plus faibles en capacité comme le montre la dernière étape de l'algorithme figure 8. La charge CC/CV étant pilotée par la cellule la plus haute en tension, cela va permettre d'atteindre le SoCmax pour la cellule avec le meilleur état de santé et le SoC optimal pour les autres en fin de charge.

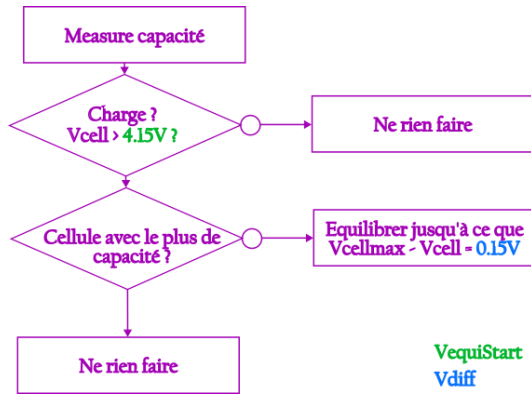


Fig. 8. Algorithme équilibrage SoH

La figure 9 a) représente les tensions des 3 cellules pendant le cyclage avec l'équilibrage en tension sur une période de quelques jours. Ces dernières sont toutes égales et donc superposées. La partie b) quant à elle représente l'évolution sur plusieurs années des capacités des trois cellules (nommées Ccell) pour ce même équilibrage.

Dans le cas de l'équilibrage en SoH, les tensions des trois cellules présentent un écart inter-cellules généré par le circuit d'équilibrage visible sur la figure 9 c). La tension de la cellule la plus forte en capacité (cellule 26°C) est légèrement surchargée à 4.22V, les autres sont sous-chargées à 4.07V et superposées sur la figure. Une fois l'écart de tension présent, il varie peu et par conséquent l'équilibrage ne se déclenche plus. L'équilibrage en six ans et demi n'a fonctionné qu'un fois pour établir l'écart de tension initial. La réactivation du circuit d'équilibrage se fera si l'écart en tension se résorbe ou lorsque la cellule la plus faible changera.

L'équilibrage classique en tension quant à lui ne s'est pas déclenché durant les plus de cinq ans de cyclage. Les différences de capacités et le ΔSoC n'étaient pas suffisants pour créer un delta de tension entre les cellules de plus de 50mV lors de la recharge. Cette valeur de 50mV est utilisée comme limite de déclenchement dans le BMS commercial étudié dans [15].

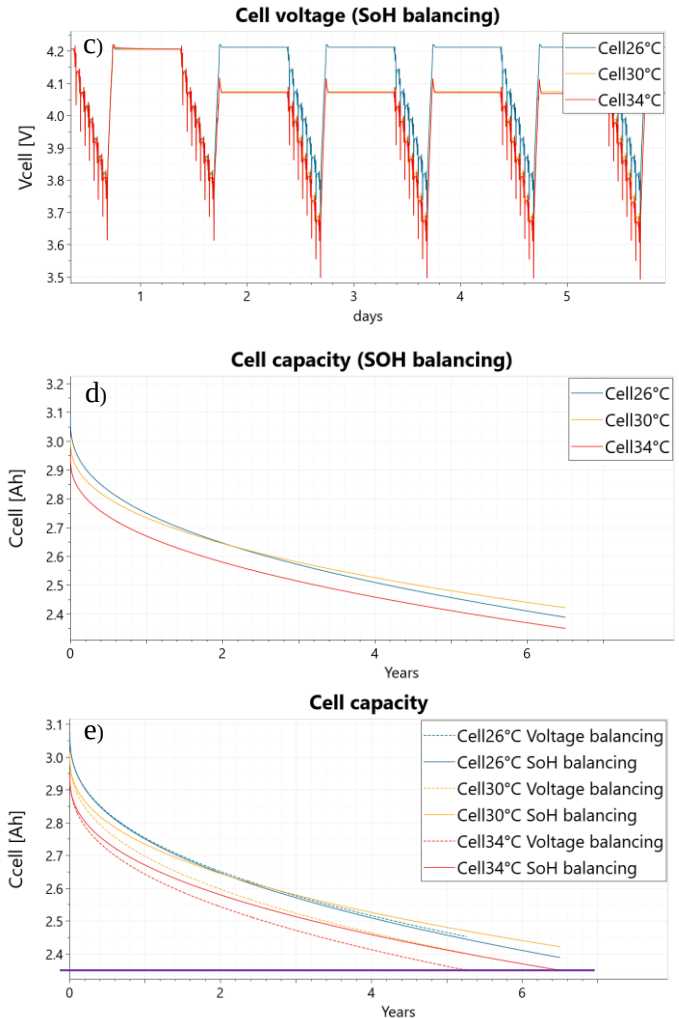
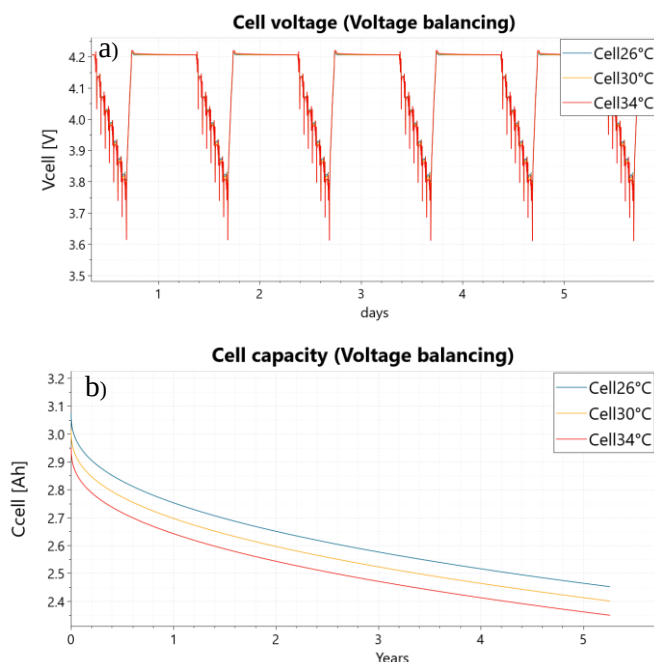


Fig. 9. Comparaison de l'équilibrage en SoH et de l'équilibrage en tension, a) tensions cellules, équilibrage tension b) capacités cellules, équilibrage tension c) tensions cellules, équilibrage SoH d) capacités cellules, équilibrage SoH e) capacités cellules, comparaison équilibrage tension et SoH

Dans le cas de l'équilibrage en tension, l'hétérogénéité initiale de capacité n'évolue pas ou très peu (figure 9 b). L'écart entre les capacités s'amplifie légèrement pendant la durée du cyclage. Pour l'équilibrage en état de santé figure 9 d) nous pouvons observer que la différence maximale de capacité entre les cellules est divisée par deux au cours des six ans de cyclage. Nous pouvons constater la modification des vieillissements provoquée par l'équilibrage en SoH avec le croisement des capacités des cellules 26 et 30°C. Au bout de 2 ans la cellule à 26°C n'est plus celle avec la plus grande capacité. Enfin la cellule la plus faible en capacité et fonctionnant à la plus haute température (34°C) a vieilli moins vite. Par conséquent elle a atteint la limite de 20% de pertes de capacité plus tard. La figure 9 e) compare l'évolution des capacités entre les deux équilibrages, la ligne violette représente la limite des 20% de pertes de capacité. Quand nous comparons les deux courbes rouges représentant les cellules les plus faibles en capacité pour les deux équilibrages nous pouvons identifier que la ligne rouge continue (équilibrage SoH) croise la ligne violette presque un an et demi plus tard que celle en pointillé (équilibrage en tension). Cela représente une augmentation du temps de cyclage de 16 %.

Côté énergie déchargée, le module avec l'équilibrage SoH a délivré 43kWh contre 34.8kWh pour son homonyme en tension. Cela représente un gain de 23.6% en énergie déchargée durant la première vie du module jusqu'à une perte en capacité de 20%.

Pour l'énergie délivrée, l'équilibrage en SoH a dissipé environ 2.5Wh contre 0 pour l'équilibrage classique qui ne s'est pas déclenché (déséquilibre en tension insuffisant). Ces pertes générées par l'équilibrage en SoH rapportées à l'énergie totale déchargée représentent 0.006% ce qui est négligeable par rapport au 23.6% d'énergie déchargée supplémentaire. Ces résultats prometteurs restent à approfondir et à explorer dans d'autres conditions d'utilisation.

4. CONCLUSIONS

Ces premiers résultats de simulation montrent qu'en prenant en compte l'état de santé des cellules composant un pack batterie, il est possible de prolonger la durée de vie de ce dernier. Ces bénéfices sont accessibles avec la technologie déjà présente dans les véhicules électriques comme un BMS et un circuit d'équilibrage dissipatif, tous deux standards.

Dans ces études la perte de capacité simulée par le logiciel est directement exploitée. La prochaine étape étant de mettre en place des méthodes d'estimation en ligne.

Par la suite la stratégie pourra être d'avantage optimisée et devra être validée en conditions réelles. Un prototype sera donc réalisé et cyclera pour tenter de démontrer la prolongation de la durée de vie d'un module test.

5. REFERENCES

- [1] Volta foundation, « 2023 Annual Battery Report », <https://volta.foundation/battery-report-2023>
- [2] G. L. Lacey, « Balancing 2nd Life Batteries with Different SOH for Use in Storage Systems », in *CIREN 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, sept. 2021
- [3] I. Zilberman, J. Schmitt, S. Ludwig, M. Naumann, et A. Jossen, « Simulation of voltage imbalance in large lithium-ion battery packs influenced by cell-to-cell variations and balancing systems », *J. Energy Storage*, vol. 32, p. 101828, déc. 2020
- [4] S. Chowdhury, M. N. Bin Shaheed, et Y. Sozer, « An Integrated State of Health (SOH) Balancing Method for Lithium-Ion Battery Cells », in *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, sept. 2019
- [5] X. Li, X. Yin, Z. Tian, X. Jiang, L. Jiang, et J. Smith, « Multi-layer state of health balancing control for a battery-based energy storage system to extend cycle life based on active equalization circuits », *Front. Energy Res.*, vol. 10, 2022
- [6] Zhan Ma et al., « Multi-layer SOH Equalization Scheme for MMC Battery Energy Storage System », 2020
- [7] N. Li, F. Gao, T. Hao, Z. Ma, et C. Zhang, « SOH Balancing Control Method for the MMC Battery Energy Storage System », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, n° 8, p. 6581-6591, août 2018
- [8] R. Mingant, M. Petit, S. Belaïd, et J. Bernard, « Data-driven model development to predict the aging of a Li-ion battery pack in electric vehicles representative conditions », *J. Energy Storage*, vol. 39, p. 102592, juill. 2021
- [9] S. SHILI, P. VENET, A. HIJAZI, et A. SARI, « Contrôle des circuits d'équilibrage des systèmes de stockage d'énergie (supercondensateurs) en vue d'estimer et d'améliorer leur durée de vie », Université Claude Bernard, Lyon1, Lyon, 2016
- [10] Khiem Trad, « EVERLASTING D2.3 – Report containing aging test profiles and test results », 2020
- [11] Y. Preger et al., « Degradation of Commercial Lithium-Ion Cells as a Function of Chemistry and Cycling Conditions », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 167, n° 12, p. 120532, sept. 2020
- [12] M. P. Bonkile et al., « Is silicon worth it? Modelling degradation in composite silicon-graphite lithium-ion battery electrodes », *J. Power Sources*, vol. 606, p. 234256, juin 2024
- [13] M. Luh et T. Blank, « Comprehensive battery aging dataset: capacity and impedance fade measurements of a lithium-ion NMC/C-SiO cell », *Sci. Data*, vol. 11, n° 1, p. 1004, sept. 2024
- [14] G. Zhao, X. Wang, M. Negnevitsky, H. Zhang, et C. Li, « Performance Improvement of a Novel Trapezoid Air-Cooling Battery Thermal Management System for Electric Vehicles », *Sustainability*, vol. 14, n° 9, Art. n° 9, janv. 2022
- [15] A. Khalid, A. Stevenson, et A. I. Sarwat, « Performance Analysis of Commercial Passive Balancing Battery Management System Operation Using a Hardware-in-the-Loop Testbed », *Energies*, vol. 14, n° 23, Art. n° 23, janv. 2021