

État de Santé de batterie lithium par Régression Linéaire et par Incremental Capacity Analyst

A.Sivert¹, F.Betin¹, B.Vacossin¹, H.Caron²

(1) Laboratoire des Technologies Innovantes (L.T.I), équipe Énergie Électrique et Systèmes Associés (EESA)

U.P.J.V Université de Picardie Jules Verne, Institut Universitaire de Technologie de l'Aisne GEII, 02880 SOISSONS.

(2) Coordinateur projets de recherche Traction Electrique, SNCF Ingénierie & Projets

RESUME - La gestion d'une batterie (BMS : Batterie Management System) peut être faite analogiquement ou numériquement. La gestion numérique a l'avantage de pouvoir estimer l'état de charge et l'état de santé de la batterie. L'objectif est de connaître la dégradation de l'accumulateur pour connaître sa possibilité d'utilisation le jour J.

De nombreuses méthodes existent pour connaître l'état de santé d'une batterie sans la décharger à 100%. Ces méthodes dépendent de la chimie des batteries lithiums et des ressources que doit avoir le processeur. Plusieurs méthodes sont présentées pour des processeurs ayant une faible capacité de calcul et utilisant un nombre d'échantillons de mesure faibles.

La méthode par (ICA) Incremental Capacity Analyst demande de faire des essais de comportement des variations de l'énergie en fonction de la tension avec des cellules vieilles en charge et en décharge. En revanche, la méthode par régression linéaire de la tension OCV (Open Circuit Voltage) permet de faire une bonne estimation du SOH (State Of Health) sans faire d'essais de vieillissement de la cellule. Mais si en plus de la variation de tension, il y a une variation importante de la résistance interne en fonction de la capacité énergétique alors la régression linéaire n'estimera pas correctement le SOH. Dans cet article, 2 cas sont présentés qui ont permis de mettre en exergue la simplicité et la viabilité de l'estimation de santé par la régression linéaire. De plus 2 chimies seront présentées MCN et LTO.

Mots-clés—batterie, MCN, LTO, SOH, SOC, BMS, Arduino.

1. INTRODUCTION

Pour un véhicule, l'état de santé (SOH state of Health) d'une batterie est très important car il détermine sa possibilité d'autonomie en fonction du vieillissement de la batterie, du dénivelé et de la vitesse moyenne [3]. L'estimation de l'état de santé [1] permet aussi de faire un bilan économique d'utilisation de la batterie et de faire une maintenance prédictive. S'il n'y a pas de souci de fiabilité (statistiques de défaillance sur un ensemble de cellules) alors c'est la perte de la capacité énergétique qui donne l'obsolescence d'un accumulateur. Lorsque des problèmes se présentent sur une batterie, les coûts de remise en fonctionnement conduisent à faire des tests poussés avant de procéder à leur reconditionnement. Il est donc nécessaire de connaître l'état de santé de chaque élément pour savoir s'il est pertinent d'en faire la maintenance et ainsi d'éviter l'obsolescence entière de la batterie. D'ailleurs, tous les fabricants, monteurs et distributeurs de batteries font de la maintenance pour faire durer l'accumulateur le plus longtemps

possible. Sachant que la capacité énergétique diminue et que la résistance de chaque élément augmente en fonction de l'utilisation comment peut-on déterminer le SOH facilement avec une bonne précision ?

Avec des processeurs des cartes open source bon marché tel qu'un Arduino, quelle serait la précision ?

En effet, depuis 2011, les cartes Arduino et leurs cartes dédiées appelées shields permettent de réaliser des systèmes très rapidement sans avoir de problèmes de soudure des composants CMS ou de la réalisation des typons. De nombreuses cartes Arduino existent avec différents processeurs et outils [2]. Cependant, le nombre d'éléments d'une batterie demande de nombreuses entrées analogiques qu'il faut multiplexer avec le shield ka12 qui permet de multiplexer 24 entrées analogiques sur une entrée analogique en utilisant 3 entrées numériques. Par conséquent, avec une carte Arduino DUE qui a 16 entrées analogiques, il est possible de surveiller 384 éléments de batterie avec 48 sorties numériques. Cette carte pourra de plus gérer un chargeur. Les 3 mesures électriques essentielles sur une batterie est l'état de charge, la résistance interne, la capacité énergétique. Cette capacité énergétique dépend bien évidemment de l'état de santé mais aussi de l'état de fonctionnement SOF qui dépend de la température de la batterie. Les démonstrations de l'article se feront sur une batterie d'un véhicule électrique faible consommation d'énergie de 48V 30A.h composée d'éléments 18650 lithium MCN 13S12P dont le contrôleur peut tirer 40A. Le tout est associé à un chargeur réglable de 20A max. Les cellules li-ion NMC qui sont commercialisées depuis 2009, boîtier (18×65mm) avec les résistances thermiques de $R_{th,surf,Amb}=14^{\circ}C/W$, $R_{th,in,surf}=3^{\circ}C/W$ et de capacité thermique de 60 J/°C présentent les caractéristiques suivantes : prix de 3 €, masse de 42 g, capacité énergétique de 2,5 Ah, tension entre 4.2 V et 3V et résistance interne de 80 mΩ avec possibilité de décharge à 3C et de charge à 1C. Le diagnostic sur chaque élément série est impératif à cause des disparités statistiques existant entre chaque élément [8]. Evidemment, plus il y a d'éléments parallèles et moins ces disparités sont importantes grâce à la valeur moyenne de cette distributivité.

Quelles sont les méthodes pour connaître la capacité énergétique d'une batterie ? Ces méthodes dépendent de la complexité du modèle et de la chimie de la batterie. Quel est donc le modèle le plus simple pour une batterie lithium ?

2. MODELE SIMPLIFIE D'UNE BATTERIE

L'élément électrochimique peut être modélisé simplement par le modèle électrique suivant :

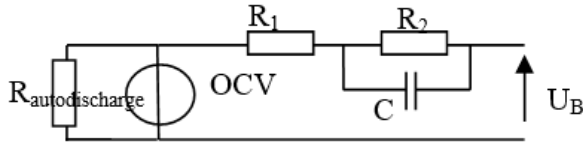


Fig 1. Modèle électrique d'un élément de batterie

Lors d'une impulsion de courant de décharge, la tension de l'élément correspondra à l'équation suivante :

$$U_B(t) = OCV - R_1 \cdot I - R_2 \cdot I \cdot (1 - e^{\frac{-t}{R_2 \cdot C}}) \quad (1)$$

La tension électrochimique OCV (Open-circuit voltage) et les valeurs de résistances dépendent de la température, de la profondeur de décharge et du vieillissement. La tension OCV en fonction de la capacité énergétique diminue presque linéairement comme on peut l'observer sur la figure suivante. Puis à partir de 3.4 V, la tension chute radicalement.

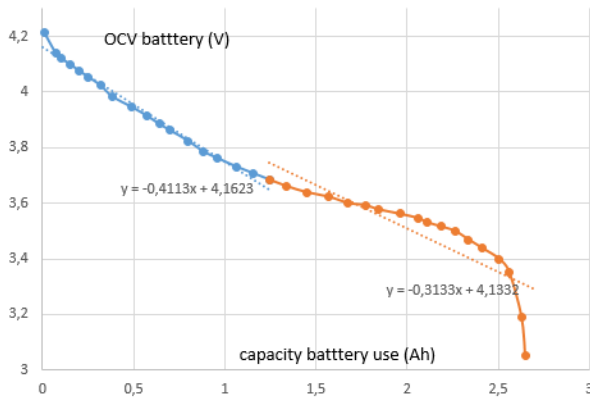


Fig 2. Tension OCV d'un seul élément Li NCM en fonction de la capacité à 20°C élément 18650 Samsung, décharge 1C

Pour un même boîtier et pour le même fabricant, différentes références existent. Pour ces différentes références, la capacité énergétique peut varier de 30% et le taux de décharge possible peut être du simple au double. La résistance R_1 peut être déterminée lors de la mise en courant de décharge et la résistance $R_1 + R_2$ lors de l'arrêt de la décharge. La résistance série $R_1 + R_2$ sera surnommée ESR : Equivalent Serie Résistances. La constante de temps $R_2 \cdot C$ peut varier de quelques ms à la seconde en fonction des chimies et du nombre d'éléments mis en parallèle.

Mais quelle sera la précision de la mesure de l'ESR ? Sachant que sa valeur est relativement faible de l'ordre de 50 mΩ pour un élément 18650, elle devra donc être divisée par le nombre d'éléments mis en parallèle.

3. METHODE DE MESURE ESR

La valeur de la résistance interne d'une batterie correspond à la capacité du courant pouvant être délivré par la batterie sans provoquer de chutes de tension et d'échauffement. Cette valeur évolue essentiellement en fonction de la température et du cyclage. En effet, il y a une augmentation faible de la résistance en fin de décharge. Cette valeur n'est pas identique entre la charge et la décharge [3, 4]. La résistance interne de la batterie est testée à partir de l'équation suivante en mettant un courant de

décharge de 40 A pendant 200 ms sachant que la tension à vide OCV a été mesurée auparavant. On soustrait à ce courant un petit courant appelé I_{small} correspondant au courant absorbé par le BMS numérique qui est de l'ordre de grandeur du mA. Avec ces données, la résistance série est déterminée par l'équation suivante (2) par le processeur.

$$ESR(\Omega) = (V_{small} - V_{discharge}) / (I_{discharge} - I_{small})$$

En négligeant I_{small} , la résistance série correspondra à l'équation suivante (3) :

$$ESR(\Omega) \approx (OCV - V_{discharge}) / I_{discharge}$$

Lorsque la batterie a vieilli, l'augmentation de la résistance interne en charge est aussi déterminante car pour des courants de charge important (1C et plus), le temps de charge sera plus long. En effet, la tension seuil sera atteint plus rapidement ce qui fera diminuer le courant de charge à cause la limitation de la tension batterie à 4.2V pour les éléments LMCN. Maintenant, que la mesure de la résistance est déterminée, l'état de charge doit être mesuré ?

4. SOC (STATE OF CHARGE) PAR COULOMB-MÈTRE

La méthode du coulomb-mètre correspond à l'intégration du courant avec les équations suivantes [9]:

$$SOC(Ah) = SOH(\%) \cdot \int I \cdot dt \quad (4)$$

$$\text{Avec } SOH(\%) = Q(Ah) / Q_{Begin of Life}$$

Pour faire l'intégration, une période d'échantillonnage de 0,1s a été choisie arbitrairement. Une période de 1 seconde serait suffisante puisque le temps de décharge ou de charge à 1C dure plus d'une heure et que les temps d'accélération sont au minimum de 5s pour notre véhicule. Pour connaître l'état de santé SOH, la meilleure méthode est de décharger à 100% la batterie avec le BMS qui arrête la décharge lorsque la tension d'un élément série atteint 3V pour les LMCN, puis de mémoriser le SOH à chaque fois que la batterie a atteint les 100% de décharge tout en prenant en compte la température moyenne des cellules. Cette mémorisation de l'état de santé en fonction de la température peut se faire avec l'EEPROM du processeur. Cependant décharger à 100% la batterie n'est pas très indiqué. En effet, plus la profondeur de décharge (DOD : Depth of discharge) est importante et plus l'état de santé de la batterie diminue. D'ailleurs de nombreux constructeurs d'éléments LMCN préconisent une profondeur de décharge à 80% et donnent un nombre de cycles de vie pour cette valeur. Dans tous les cas, grâce au courant de décharge à l'accélération d'un véhicule et de la résistance interne des éléments, les 80% sont respectés car la plupart des BMS ne mesure pas l'OCV mais la tension batterie de chaque élément série. Ainsi, la chute de la tension interne de la batterie pour ce courant provoquera l'arrêt de l'alimentation de la batterie autour des 80%. En revanche, d'autres méthodes existent pour estimer le SOH en déchargeant la batterie seulement à 25% et non à 100%.

5. METHODE D'ESTIMATION DU SOH

De nombreuses méthodes plus ou moins complexes existent pour connaître l'état de santé d'une batterie [4, 5]. Voici 3 méthodes plus ou moins simples qui peuvent être implantées dans un processeur ayant peu de ressources de calcul.

5.1. Méthode d'effets d'utilisation

D'un point de vue électrochimique, la dégradation des performances des batteries est le résultat de plusieurs processus physicochimiques simultanés. Cette méthode doit identifier les effets prépondérants tels que mesurer le nombre d'ampères utilisés totales, la température moyenne de batterie, les profondeurs de décharge, l'effet calendaire. A partir des modèles mathématiques, l'estimation de l'état de santé totale doit être déterminée en correspondance avec l'équation suivante (5) :

$$SOH(\%)_{total} = SOH_{temp} \cdot SOH_{nbrA.h, DOD} \cdot SOH_{calendaire} \dots$$

Dans les effets supplémentaires, on pourrait rajouter le régime de courant sachant que pour les véhicules, il ne dépasse jamais celui préconisé par le constructeur des éléments qui est de 3C pour les LMCN. Le modèle mathématique de chaque effet physicochimique est relativement long à faire. Il dépend de la chimie utilisée par chaque constructeur. Ces modèles mathématiques ne sont pas lineaires. De plus, il faudrait prendre en compte l'effet de probabilité de défaillance sur chaque élément surtout si l'écart type est large. A partir d'un parc de batterie, en enregistrant les données moyennes de chaque effet sur 2 ans d'utilisation, il est possible de faire une base statistique pour élaborer les modèles mathématiques des effets. Cependant, ces modèles peuvent devenir rapidement obsolètes avec la chimie des batterie qui peut progresser entre temps. Ces dernières années, l'ICA (Incremental Capacity Analyst) est plus utilisé car elle demande juste de connaître les transitions de variation de la capacité énergétique en fonction de la tension, après avoir vieilli artificiellement et rapidement les batteries en les chargeant et déchargeant sans discontinuité et avec des températures élevées. Mais à quoi correspond cette méthode d'ICA ?

5.2. L'ICA (Incremental Capacity Analyst)

En comparant les niveaux de tension et d'état de charge comme sur la figure 5 lors des transitions de phase des électrodes, il est possible d'identifier si la diminution de capacité est due à une perte de matière active ou à une perte de lithium cyclable. La variation de la tension en fonction de la capacité énergétique n'est donc pas linéaire. Sa dérivée fluctue. L'ICA est ainsi la dérivée de la capacité énergétique par la tension à vide correspondant à l'équation suivante :

$$ICA(A.h/V) = \frac{dQ(OCV_{battery})}{dOCV_{battery}} \quad (6)$$

L'ICA peut être déterminée pour un écart de tension OCV fixe ou bien pour une variation de la capacité énergétique fixe. Avec un écart de tension fixe, la mémorisation des mesures du calcul de l'ICA peut se faire pour tous les changements de 50 mV ce qui donne 24 points de mesure sur une plage de tension de décharge de la batterie de 1.2V correspondant à la variation de 4.2 V à 3 V par élément. Exemple, la variation de la tension en fonction de la tension est représentée sur la courbe suivante pour l'élément 1 correcte et pour l'élément 2 qui a plus de 1000 cycles. Les courbes de tendance ont été ajoutées. L'ICA moyen en décharge peut être déterminée par l'inverse de la pente de la courbe de tendance suivante (exemple pour l'élément 2) :

$$ICA_{moy}(A.h/V) = \frac{dQ(OCV_{battery})}{dOCV_{battery}} = \frac{-1}{0.0513} = 19.44$$

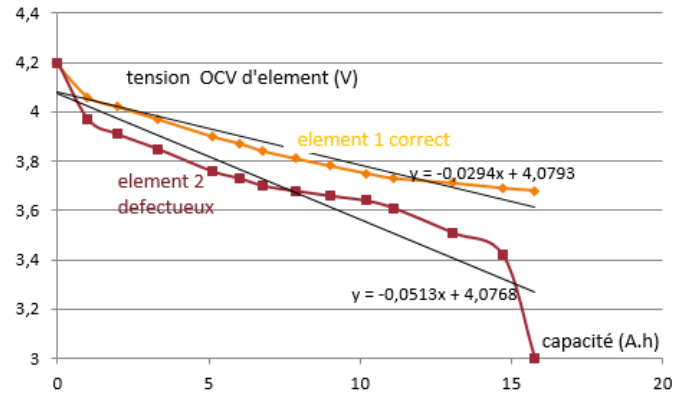


Fig 3. Tension OCV d'élément en fonction de la capacité à 20°C de l'accumulateur 30A.h avec l'élément 2 défectueux par rapport à l'élément 1.

A partir de l'ICA et en prenant les valeurs U_{max} et U_{mini} , l'estimation du SOH est déterminée par l'équation suivante (7) pour l'élément 2 :

$$SOH = \int_{OCV_{mini}}^{OCV_{Max}} ICA_{moy} dOCV = 19.4 \cdot (4.1 - 3.3) = 15.5Ah$$

avec

$$OCV_{mini} = U_{mini} + ESR \cdot I_{decharge} \quad (8)$$

L'ICA est donc indépendante de la résistance ESR. L'estimation de l'état de santé ne dépendra pas de la résistance série de l'élément si celle varie faiblement en fonction de la capacité énergétique. U_{mini} correspond à la tension pour laquelle le BMS va arrêter la décharge de l'élément, en général 3V. Sur la figure suivante, on peut observer que les valeurs de l'ICA de l'élément 2 est bien plus faible que celui de l'élément 1 sur toute la plage de tension d'utilisation de la batterie et pas seulement autour d'une valeur de 3.8 V à 4.2 V. En revanche, la courbe de l'ICA de tous les éléments de la batterie comportant 13 éléments en fonction de la tension de batterie, donne des variations moyennes et n'est pas représentative de l'état de santé de la batterie puisque le BMS arrêtera la décharge pour l'élément le plus faible.

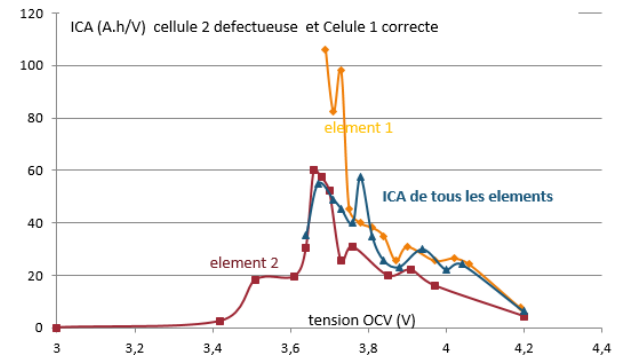


Fig 4. Courbe de l'ICA des différents éléments en fonction de leur tension à 20°C en décharge.

La méthode de l'estimation de la santé par l'ICA [7] consiste donc à détecter une plage de tension pour laquelle l'ICA est invariable en fonction de l'utilisation de la batterie. Puis, à partir de la détection d'une tension minimale ou maximale, la méthode permet de trouver la zone pour laquelle on constate la plus grande diminution de l'aire de l'ICA et enfin, de faire l'intégration de l'ICA pour estimer la capacité énergétique perdue.

Exemple sur la figure suivante, on peut observer la valeur plus faible de l'ICA de la zone 5 en fonction de l'âge de la batterie.

La détection de la tension minimale de la zone 4 (U_4) est donc pertinente. Il suffit donc de détecter U_4 car l'intégration entre $U_{\min}$ et U_4 reste presque fixe et de mesurer par le coulombmètre les pertes de capacité énergétique avec l'équation suivante pour l'élément 1 :

$$\begin{aligned} SOH(Ah) &= \int_{OCV_{\min}}^{OCV_4} ICA_{moy} du + \int_{OCV_4}^{OCV_{\max}} ICA_{moy} du = \\ SOH &= \int_{OCV_{\min}}^{OCV_4} \frac{dQ}{du} du + \int_{OCV_4}^{OCV_{\max}} \frac{dQ}{du} du \\ SOH(Ah) &= 25Ah + mesurecapacité(U_4) \quad (9) \end{aligned}$$

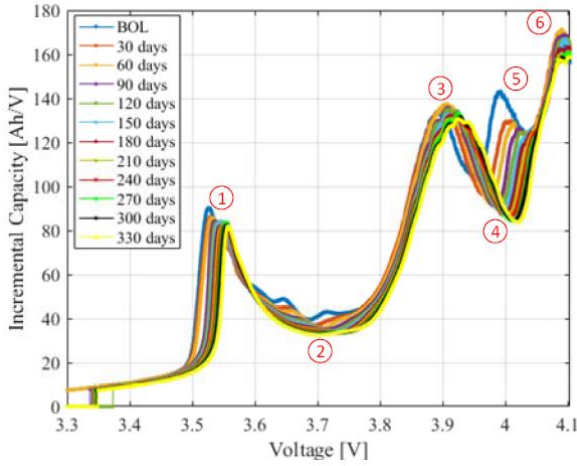


Fig 5. Evolution d'ICA en fonction de l'âge de la batterie LNCM en charge C/5 [6]

L'ICA varie différemment en fonction de la charge et de la décharge et évidemment en fonction de la chimie. Il faut donc faire des tests de vieillissement pour vérifier en fonction de l'âge, les zones pertinentes de détection.

En général, les variations de l'ICA pour les LMCN en charge sont détectables correctement mais seulement pour des courants faibles et à partir d'une décharge de plus de 40%. De même lors de la décharge, l'estimation du SOH est correcte seulement à partir de 40% de décharge. Est-ce que, la méthode par régression linéaire est plus pertinente que celle de l'ICA ?

5.3. Méthode par régression linéaire de l'OCV

Comme pour la mesure de la détermination de l'état de charge par la mesure de tension, l'état de santé peut être estimé par la linéarisation par partie de l'évolution de la tension en fonction de la capacité énergétique.

D'ailleurs, cette évolution correspond à la pente dQ/du de l'ICA. Les 2 méthodes se ressemblent. La détermination du SOH est déterminée par l'équation suivante :

$$SOH(Ah) = \left(\frac{OCV_{\min} - bv}{av} \right) \quad (10)$$

En effet, à partir de la figure 3, l'estimation du SOH a été déterminée grâce aux courbes de tendance et pour un seuil de tension à vide de 3.2V.

Exemple de la capacité pour l'élément 2 dont la résistance est de 18 mΩ alors que pour l'élément 1, elle est de 13 mΩ, le tout avec un courant de décharge de 5A.

$$SOH_2 = \frac{((3.2V + 18 \cdot 10^{-3} \cdot 5A) - 4.07)}{-0.0513} = 15.2Ah$$

$$SOH_1 = \frac{((3.2V + 13 \cdot 10^{-3} \cdot 5A) - 4.07)}{-0.0294} = 27.3Ah$$

Les valeurs de capacités énergétiques de l'élément 1 et 2 sont donc bien estimées. La courbe de tendance de la tension en fonction de la capacité énergétique avec les valeurs av et bv sont facilement déterminables par régression linéaire (méthode des moindres carrés) en prenant au moins 3 à 4 valeurs étalées de 5% de la capacité énergétique :

$$av = \frac{n \cdot \sum SOC_i \cdot U_i - \sum SOC_i \cdot \sum U_i}{n \cdot \sum SOC_i^2 - (\sum SOC_i)^2} \quad (11)$$

$$bv = \frac{\sum U_i - av \sum SOC_i}{n} \quad (12)$$

Les valeurs av et bv sont déterminées par récurrence dans le programme pour chaque changement de valeur de la capacité énergétique [10].

De plus, un tableau des coefficients av et bv peuvent être enregistré sur une carte SD pour chaque cycle de décharge pour analyser l'évolution de l'estimation en fonction de l'utilisation de la batterie.

Cette dernière méthode de régression linéaire est très simple d'utilisation et elle est valable pour un certain nombre de technologies de batterie lithium. En revanche, pour les Lipofer qui ont une diminution de la tension en fonction de la capacité énergétique, trop faible, cette méthode ne sera pas adaptée.

La courbe de tendance de l'OCV avec la diminution de la tension en fonction donne une assez bonne estimation de la capacité énergétique restante et du SOH comme sur la figure 3. Mais Est-ce que si la résistance série évolue fortement en fonction de la capacité énergétique, cette dernière méthode sera-t-elle galvaudée ?

5.4. Méthode de la régression linéaire avec SOH résistif important.

Si le SOH résistif a une évolution importante en fonction de la capacité énergétique alors l'estimation du SOH par la tendance de l'OCV est impactée et l'estimation du SOH de capacité énergétique n'est plus viable.

Le SOH résistif dépend par l'équation suivante :

$$SOH_R(\%) = \frac{ESR(T, SOC)}{ESR_{\text{Begin of Life}}(T, SOC)} \quad (13)$$

En général, un SOH résistif de 150% à une certaine température indique un défaut de la cellule. Sur l'accumulateur 1 défectueux de la figure 3, l'augmentation de la résistance en fonction de la capacité énergétique était très faible de l'ordre de 130%. Ce n'est pas le cas, sur l'accumulateur 2 de la figure 6 où la résistance interne en fin de capacité énergétique, passe de 11 mΩ à 30 mΩ (augmentation de 272%) ce qui provoque une chute de tension de l'élément U2 très importante à cause du courant important de décharge (15A). En fait, cet accumulateur de 72 V, 20 A.h de 18S2P donc de 2 éléments en parallèle de 10 A.h, si 1 des 2 éléments n'a pratiquement plus de capacité énergétique alors la capacité énergétique est divisée par 2.

D'ailleurs, sur la figure suivante, l'hystérésis entre la courbe de décharge à 15 A et de charge à 6 A peut être observée.

Sur cet accumulateur normalement de 20 Ah, On peut observer que la tension à vide de l'élément 1 a un état de santé de 16 A.h alors que l'élément 2 est de 10,3 A.h.

D'ailleurs en décharge, on peut observer qu'entre la tension de l'élément U2 et la tension à vide OCV2, il y a presque la même pente avec juste un décalage dû à la résistance interne. Puis en

charge, il y a un fort décalage en fin de charge entre ces 2 courbes à cause de l'augmentation des résistances internes.

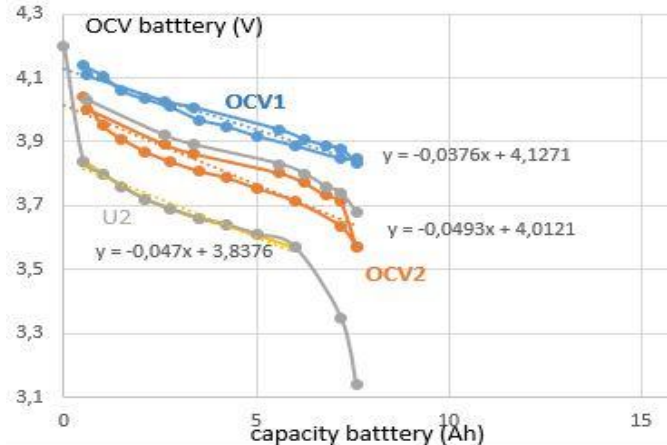


Fig 6. Tension OCV d'éléments en fonction de la capacité à 20°C de capacité énergétique 20A.h qui a plus 1000 cycles avec des DOD multiples (OCV2 SOH 50%, OCV1 SOH à 80%)

Donc, l'estimation de l'état de santé par la régression linéaire de la tension à vide de cet élément 2 qui a une résistance interne qui varie énormément n'est pas viable.

Statistiquement, plus il y a d'éléments en parallèle et plus le phénomène du SOH résistif sera faible sur le SOH de la capacité énergétique.

Remarque en charge : la résistance de l'élément 1 est de 2 mΩ et celle de l'élément 2 est de 4,7 mΩ. La tension U2 était pratiquement identique à la tension U1 malgré la différence des tensions OCV et ne permettait pas de savoir qu'il y avait un problème lors des mesures pendant la charge.

Mais comment les mesures de caractérisations ont été faites sur les batteries ?

6. BMS NUMERIQUE ET BANC DE TEST CYCLEUR

Un BMS numérique avec hardware et software open source donnant l'état de santé, l'état de charge, la résistance interne et la tension de chaque élément en fonction de la capacité énergétique a été réalisée [11]. Ce BMS est dédié au véhicule et donne la distance restante parcourable grâce au SOH mais aussi en fonction de la consommation moyenne du véhicule comme on peut l'observer sur la figure suivante :

Ce programme est téléchargeable sur le forum Arduino [10]. Il peut être modifié en fonction de l'utilisation.

A partir du BMS précédent, un banc de test a été réalisé sur tous types de batteries lithium pour vérifier leur capacité énergétique, l'évolution de la résistance en fonction de leur nombre de cycles. Sur la figure suivante, on peut observer, le banc de test pour des éléments LTO.

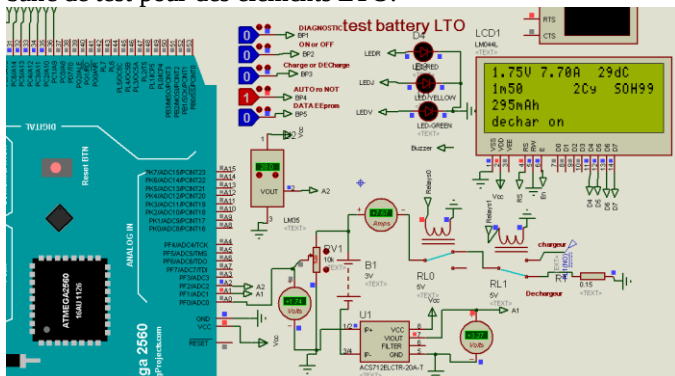


Fig 7. Banc de test de cyclage avec estimation du SOH par régression linéaire en fonction de la cyclabilité des éléments.

En effet, les LTO ont un nombre de cycles 10 fois plus important que les LMCN d'après leurs fabricants. 7 petits bancs de tests de cyclage d'éléments vont permettre de vérifier les datasheets. Mais Quelle est la tension d'arrêt à utiliser, donc la profondeur de décharge ?

Quelles sont les valeurs pour avoir une bonne estimation de l'état de santé par la régression linéaire lors du cyclage de la batterie ?

Est-ce que l'ICA permettra aussi déduire l'état de santé ?

7. ELEMENT LTO ET ESTIMATEUR DE SOH

Les batteries LTO en boîtier 18650 ont une tension qui varie de 2.7 V à 1.5 V avec une capacité énergétique de 1.35 Ah à 1C pour une température de 20°C [12]. Les batteries LTO peuvent supporter des taux de charge et de décharge à plus de 6C pour une température ambiante sans atteindre la température interne destructrice. Suivant les données constructeurs, le SOH pour atteindre 80% de la capacité originale est de plus 10 kcycles pour des taux de décharges de 4C, mais aucun article indépendant scientifique confirme ces données. D'où, la nécessité d'effectuer un test pour confirmer les données des constructeurs. Mais quelles sont les caractéristiques des batteries LTO car les données constructeurs ne sont pas précises. Faut-il un système refroidissement forcé pour une décharge à plus de 4C ? [13] Quelle devra être la vitesse de ventilation pour avoir une décharge plus importante sans avoir une destruction de la batterie et un emballement thermique ?

La figure suivante présente l'évolution de la tension LTO 18650 de marque GTK [12] en fonction de la capacité énergétique.

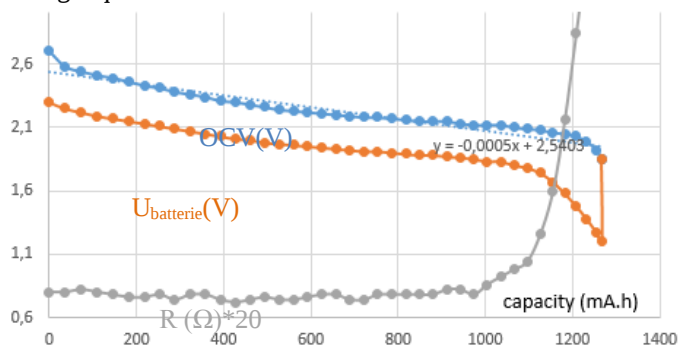


Fig 8. Tension OCV d'éléments LTO en fonction de la capacité à 20°C avec arrêt de décharge à 1.2 V pour un taux de décharge de 4C.

La résistance interne des LTO est pratiquement 2 fois plus faible que celle des éléments LMCN, mais leur résistance augmente beaucoup plus fortement en fin de décharge. Par conséquent, la température évolue très rapidement en fin de capacité énergétique. A -20°C, la résistance interne passe de 0.04 Ω à 0.15 Ω. Par conséquent, à ces températures basses, les pertes dans l'élément sont plus importantes. La température a tendance à atteindre une valeur en régime établi de 5°C avec une diminution de la résistance interne proche de la valeur à la minimale de 0.04 Ω. Sur la figure suivante, on peut observer l'évolution de l'OCV et de la température en fonction du temps. Le choix de la tension d'arrêt de décharge est de 0.8V à 4C pour avoir une décharge proche de la capacité énergétique et une température atteinte de l'élément en surface de 40°C.

Le temps de la décharge est de 14 minutes et le temps de charge est de 50.5 minutes. Un cycle de charge et de décharge dure donc 64.5 minutes.

Pourtant lors de la charge, il faut seulement 15minutes pour reprendre 1 Ah avec un taux de charge de 2.5C mais la charge

à tension constante est relativement longue cependant, elle permet à la batterie de se recharger à 100%.

Sachant, que l'incrément de température avec un courant important lors de la décharge correspond à l'équation suivante :

$$\Delta T_{max} \approx \frac{ESR(SOC, T) \cdot I \cdot Q \cdot 3600}{C_{TH}} = \frac{0.04 \Omega \cdot 6.75 A \cdot 1.3 Ah \cdot 3600}{60 J / ^\circ C} =$$

avec une température ambiante de 20°C, la température atteinte pour une décharge à 5C est aux alentours de 40°C. avec une ventilation à 1.5m/s, la température atteinte est de 32°C. On peut observer l'évolution de la tension OCV et de la température sur la courbe suivante. Cette évolution est très proche d'une utilisation classique et donc sera gardée.

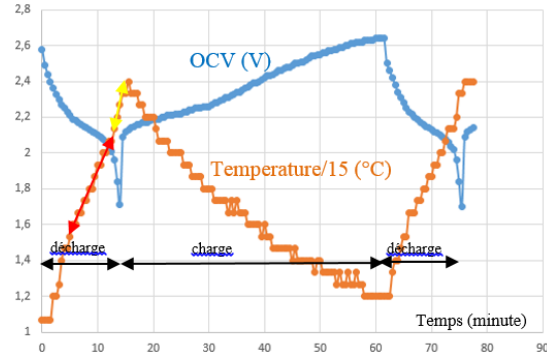


Fig 9. Température et OCV en fonction du temps pour une température ambiante de 17°C avec un taux de décharge de 5C et un taux de charge 2.5C.

Sur la courbe précédente, la pente en rouge correspond à l'évolution de la température lorsque la résistance de l'élément est constant (0.04 Ω), puis la pente en rouge indique l'évolution de la température lorsque la résistance interne augmente fortement en fin de décharge.

Par conséquent, avec le cyclage qui décharge à 100% et des éléments groupés, le cyclage ne peut dépasser 5C sans ventilation. Le choix de la valeur d'arrêt est aussi primordial. En effet, pour une tension d'arrêt correspondant à un OCV de 2.1 V pour une capacité énergétique de 1Ah, l'incrément de température sera bien plus faible que pour une tension d'arrêt de 1.5 V pour avoir une capacité énergétique de 1.2 Ah. D'où l'utilisation de plusieurs cycleurs, pour connaître l'interaction statistique sur le nombre de cycles des éléments LTO.

Grâce aux cycleurs, les courbes de l'ICA peuvent être tracées pour connaître les zones de variations en fonction du nombre de cycles. Avec environ 1000 cycles à ce jour, aucune zone n'a été détectée pour l'instant. Mais l'ICA lorsque l'élément est neuf donne la courbe suivante, il y a un pic négatif à 2.3 V qui pourrait être intéressant pour déterminer les pertes de capacité énergétique.

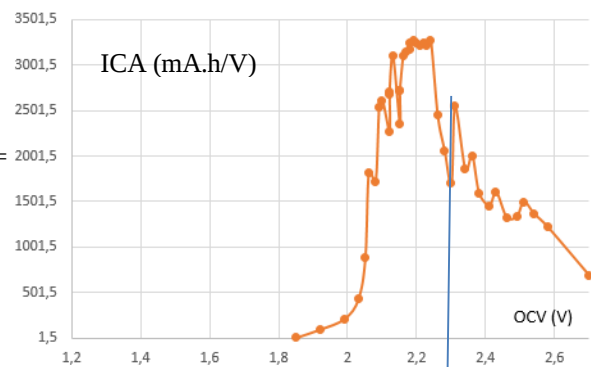


Fig 10. Capacité incrémentale d'éléments LTO en fonction de la tension OCV pour une température ambiante de 20°C et pour un taux de décharge de 4C

Sur la figure suivante, on peut observer la tension OCV en fonction de la capacité.

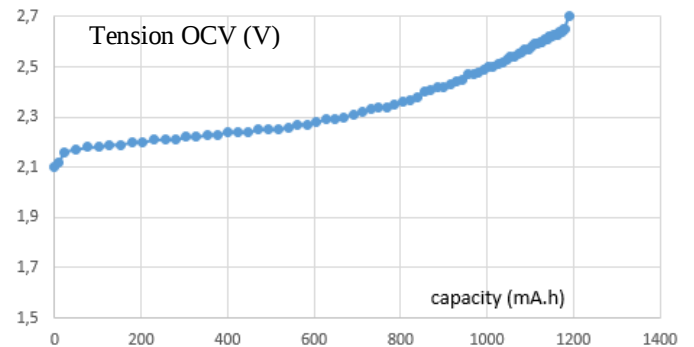


Fig 11. Tension OCV en charge d'éléments LTO en fonction de la capacité à 20°C pour un taux de charge de 2.5C

En charge, la résistance à 20°C est de 0.04 Ω . Elle augmente légèrement à 0.052 Ω en fin de charge. Le courant de charge diminue fortement à partir de 2.4 V à cause des résistances parasites du câblage. Cependant, cela permet à la batterie d'atteindre la température ambiante.

En charge, sur la courbe de l'ICA, il y a un pic négatif qui pourrait être intéressant pour déterminer le SOH, pour l'OCV de 2,43 V.

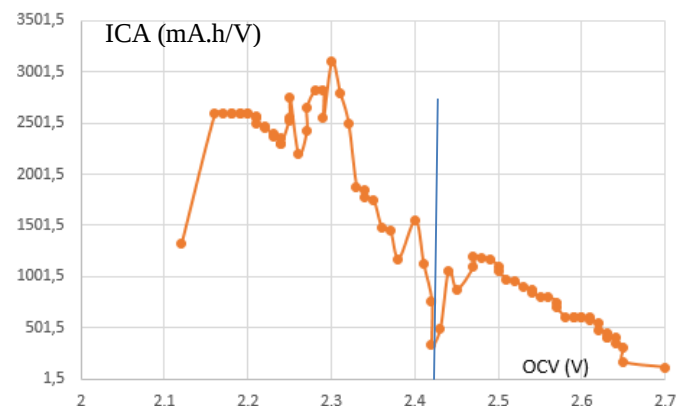


Fig 12. Capacité incrémentale de LTO en fonction OCV pour une température ambiante de 20°C et pour un taux de charge de 2.5C

Sur la figure suivante, on peut observer la variation de la capacité énergétique en fonction d'un cyclage intensif avec un taux de décharge de 5C et un taux charge à courant constant à 2.5C mais le taux charge à tension constante est relativement long (35 minutes). Cela permet de recharger à 100% l'élément et que sa température atteigne la température ambiante.

La variation de la capacité est due aux petites erreurs de calibrage du capteur de courant qui est de $\pm 0.05A$. D'ailleurs, à chaque cycle, le capteur est recalibré pour minimiser l'erreur. C'est pour cela qu'il y avait plus d'erreurs d'étalonnage au début du cyclage. Lors de nos essais avec ventilation et sans ventilation sur la figure suivante, on peut observer que la capacité énergétique dépend légèrement de la température.

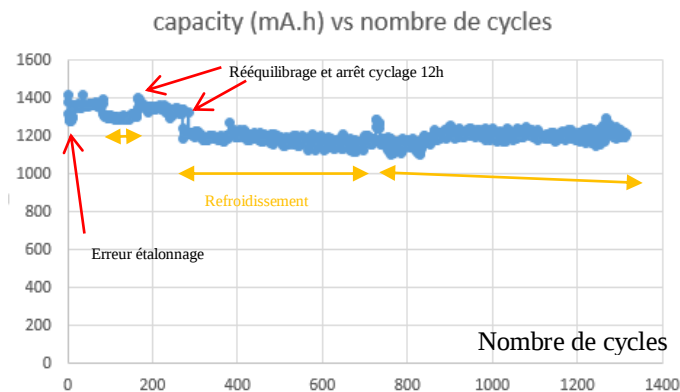


Fig 13. Capacité incrémentale en fonction de la tension OCV pour une température ambiante de 20°C et pour un taux de charge de 5C

Pendant, le cyclage, celui-ci détermine en permanence le SOH, avec l'estimateur par régression linéaire qui donne une très bonne estimation comme on peut l'observer sur la figure suivante. Le choix de la tension 0C V mini de la régression linéaire a été de 2,1 V.

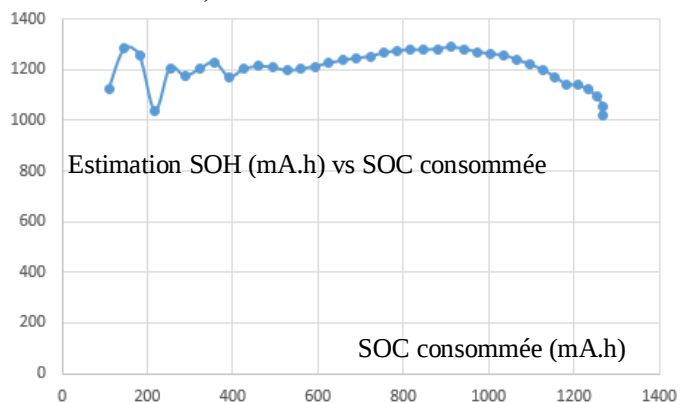


Fig 14. Estimation de l'Etat de santé d'éléments LTO par régression linéaire, lors de la décharge.

Sur la figure précédente, une erreur au début du SOC peut être observée à cause de la variation importante de la tension en début de décharge de 2.7 V à 2.5 V, puis l'erreur se minimise proche en étant proche de 0 pour redevenir importante à la fin de décharge.

Evidemment, une régression polynomiale à la place d'une régression linéaire pourrait minimiser ces erreurs. Cela pourra faire l'objet de perspectives futures.

8. CONCLUSION

Cet article a présenté la méthode simple d'estimateur d'état de santé de batteries LMNC et LTO ainsi que leurs limites de viabilité. Ces méthodes ont pu être utilisées pour faire un banc de test de cyclage de batteries. Ce banc peut être modifié pour

d'autres méthodes en utilisant un processeur peu cher. Il est ainsi donc possible de multiplier les configurations de ce banc de tests pour faire aussi des statistiques sur des batteries comportant beaucoup d'éléments.

La SNCF est en train d'étudier la possibilité d'avoir des trains électriques sur des lignes non électrifiées, ainsi qu'un stockeur d'énergie en cas de défaillance du réseau électrique. La durée de vie d'un train étant de 20 ans voir de 30 ans, la vérification régulière de l'état de santé des batteries et un enjeu très importants pour le bon fonctionnement de la circulation des trains et pour leur fiabilité. Il s'agit naturellement de ne pas provoquer de pannes « sèches » à cause d'un problème d'autonomie. L'utilisation d'un BMS qui permet d'élaborer une bonne gestion de tous les éléments est ainsi réellement cruciale.

9. REFERENCES

- [1] A. Sivert, B. Vacossin F. Betin, H. Caron « Gestion de la sécurité de batterie Lithium NCM avec états de charges et de santé utilisant l'Arduino » revue 3EI N°98 octobre 2019
- [2] A.Sivert, B.Vacossin, F.Betin « Performance Arduino avec Outils (IDE, Matlab, ISIS,) pour Commander un éclairage arrière autonome de leds de puissance » revue 3EI N 98 septembre 2019
- [3] A. Sivert, V. Boitier, A. Faquir, F.Betin, T.lequeu « Trotinettes électriques : instrumentation, modélisation, simulation et contrôle sous Arduino » Revue 3EI N 91°, Janvier 2018, <https://www.fichier-pdf.fr/2017/10/19/trottinette-electrique-contrrole-sous-arduino/>
<https://forum.arduino.cc/index.php?topic=473015.0>
- [4] A.Sivert, F.Betin, B.Vacossin, T.Lequeu "Lithium battery : diagnostics, lifespan. Application to estimate the range of an electric vehicle" WSEAS TRANSACTIONS on ENVIRONMENT and DEVELOPMENT 2017
<http://www.wseas.org/multimedia/journals/environment/2017/a045815-367.pdf>
- [5] Bruno Scrosati, « *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles* » book 2015
- [6] Stroe, Daniel-Ioan « SOH Estimation of LMO/NMC-based Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries Using the Incremental Capacity Analysis Technique » Proceedings of the 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition
- [7] Thèse d'Elie Riviere « Détermination in-situ de l'état de santé de batteries lithium-ion pour un véhicule électrique » nov 2016
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01555463/document>
- [8] A. Sivert, B. Vacossin F. Betin, « Fiabilité d'éléments d'accumulateurs Lithium 18650 (mise en étude) » Revue 3EI N 91°, Juillet 2018
- [9] A. Sivert, F. Betin, T. Lequeu « Instrumentation d'un véhicule motorisé électrique faible consommation de type « éco marathon » Revue 3EI N°81, Juillet 2015
- [10] Forum Arduino : [BMS, Etat de charge et de santé de batterie lithium, banc de cyclage avec arduino](https://forum.arduino.cc/index.php?topic=632204.msg4280343#msg4280343)
<https://forum.arduino.cc/index.php?topic=632204.msg4280343#msg4280343>
- [11] [BMS , State of charge and estimate health battery lithium with Arduino](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01596035/document)
- [12] Datasheet 18650 LTO
https://www.academia.edu/32374502/LTO_18650_datasheet_specs
- [13] Thèse Sara Abada « Compréhension et modélisation de l'emballage thermique de batteries Li-ion neuves et vieilles »
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01596035/document>