



HAL
open science

Capacité énergétique, diagnostic, durée de vie de batterie Lithium Application à l'estimation de l'autonomie d'un véhicule électrique

Arnaud Sivert, Bruno Vacossin, Thierry Lequeu, Franck Betin

► To cite this version:

Arnaud Sivert, Bruno Vacossin, Thierry Lequeu, Franck Betin. Capacité énergétique, diagnostic, durée de vie de batterie Lithium Application à l'estimation de l'autonomie d'un véhicule électrique. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361682

HAL Id: hal-01361682

<https://hal.science/hal-01361682>

Submitted on 7 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Capacité énergétique, diagnostic, durée de vie de batterie Lithium

Application à l'estimation de l'autonomie d'un véhicule électrique

Arnaud Sivert¹, Franck Betin¹, Bruno Vacossin¹, Mael Bosson, Thierry Lequeu²: arnaud.sivert@u-picaride.fr

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

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

(2) Université François Rabelais de Tours, Institut Universitaire de Technologie, Département GEII, 37200 TOURS

RESUME - Les véhicules électriques ont des temps de charge relativement long et des autonomies relativement faibles. Par conséquent, l'estimation de la consommation et de l'autonomie du véhicule sont cruciaux. Cette autonomie va dépendre de la vitesse moyenne, des vitesses de pointe, du dénivelé positif et négatif, de la température batterie, ainsi que de l'état de santé de la batterie. Par conséquent, la jauge d'autonomie d'un véhicule n'est pas directement linéaire en fonction de la distance. Cette non linéarité provoque chez l'utilisateur une méfiance et ne lui permet pas d'avoir une totale confiance dans les véhicules électriques (vélo, scooter, voiture...). De plus, il suffit qu'un seul élément de l'accumulateur soit défaillant pour provoquer une chute de l'autonomie voire un arrêt du véhicule. L'utilisateur doit donc connaître le diagnostic de la batterie et son état de santé pour savoir s'il peut faire le parcours désiré. Cet article présente une stratégie simple pour connaître le comportement de l'accumulateur pendant la charge et la décharge et propose un diagnostic rapide de chaque élément et de l'accumulateur. Cet article présente la détermination de la jauge d'autonomie restante du véhicule en fonction de tous les paramètres précités. Pour savoir, si le véhicule peut faire le parcours sans recharger, une application web d'estimateur de consommation du véhicule a été réalisée et testée avec succès.

Mots-clés—batterie lithium, diagnostic, jauge autonomie, équilibrage.

1. INTRODUCTION

Les véhicules électriques deviennent des nouveaux acteurs du transport. La jauge d'autonomie restante est problématique lors de longs trajets inhabituels pour lesquels la consommation énergétique peut aller jusqu'à 80% de la capacité de la batterie. L'utilisateur ne sait pas s'il va rester assez d'énergie ou s'il va devoir prévoir un arrêt pour recharger. Cette anxiété peut être modérée par une infrastructure de recharge importante [1]. Cependant, la présence de ces bornes ne minimisera pas le temps de la recharge qui peut agacer l'utilisateur.

De nombreuses publications ont été faites avec des méthodes plus ou moins élaborées pour connaître l'état de santé de la batterie (SOH : state of health) et l'état de charge (SOC : state of charge) en fonction de sa technologie [2, 3] or ces données ne sont pas utilisables par un non-expert qui aimerait juste connaître la distance que le véhicule peut encore parcourir sans problème. L'autonomie va dépendre de l'utilisation, donc du parcours : des nombres d'accélération, de la vitesse de pointe, de la somme des dénivelés positifs et négatifs, du type de route (granuleuse ou lisse), de la circulation. A cela s'ajoute aussi

des conditions d'utilisation des accessoires comme le chauffage, la climatisation, l'éclairage, l'autoradio ...

En conséquence, dans cet article, nous allons répondre aux questions suivantes :

- Comment peut être établi l'état de santé de la batterie ?
- Comment peut-on faire le diagnostic de l'accumulateur sans appareillage spécial ?
- Comment peut-on estimer la durée de vie et la fiabilité de la batterie ?
- Quelle stratégie de gestion peut-on adopter pour prolonger la durée de vie des batteries ?
- Quelles sont les stratégies pour connaître l'estimation de l'autonomie restante et ne pas provoquer l'anxiété de l'utilisateur ?

Evidemment, il est possible d'augmenter la capacité énergétique de la batterie au détriment du prix du véhicule (0,5 €/Wh). Sachant que la capacité de la batterie diminue dans le temps même si elle n'est pas utilisée (vieillesse calendaire), cette augmentation de capacité risque de ne pas être amortie au cours de la durée d'utilisation. Par conséquent, avoir une batterie avec une forte capacité énergétique n'est pas idéal à première vue. La solution d'échanger une batterie vide contre une batterie pleine demande une infrastructure et des investissements très importants. De plus, ce n'est pas viable pour un pays étendu avec des zones peu peuplées. Enfin, cette solution conduit à une location de la batterie. Cette stratégie commerciale de location de la batterie ne convient pas à de nombreux consommateurs notamment lorsqu'un véhicule est peu utilisé et que la charge locative reste identique.

En vue de la transition énergétique et de la demande de la minimisation des consommations d'énergie, des véhicules individuels et ultra léger ont commencés à être commercialisés. Ces véhicules ont vu le jour dans des challenges tel que l'éco-marathon Shell.

La mobilité d'un français dans ces déplacements quotidiens est de 26 km avec un temps moyen de 54 minutes, 50% de ces déplacements sont réalisés par un conducteur seul [5]. Enfin, les 31 millions automobilistes français parcourent 11000 km en moyenne par an.

Entre 1994 et aujourd'hui, les chiffres changent peu, que ce soit pour les zones rurales ou urbaines. D'autres études sociétales montrent que les français réalisent en moyenne 8 parcours à plus de 200 km aller-retour dans l'année.

Depuis 2010, des cycles électriques monoplaces sont utilisés et testés au sein de l'IUT de l'Aisne. Avec 200 km d'autonomie et

des vitesses moyennes de 45 km/h, aujourd'hui, ces véhicules ont parcouru 20 000 km [8] [9]. Ces prototypes sont équipés de batterie de technologies différentes Lithium NMC, Lithium NCA, LiFePo4, avec plusieurs constructeurs. En revanche, les stratégies de dimensionnement et de gestion de l'énergie sont identiques.

2. PRESENTATION DES CYCLES ELECTRIQUES

Depuis 2010, des cycles ultra légers sont utilisés tous les jours sur la route pour tester leurs fiabilités et leurs autonomies. En effet, plus un véhicule est léger et moins il consommera d'énergie. La vitesse de pointe permet aux tricycles carénés d'atteindre avec l'électrification 80 km/h sur le plat.



fig 1: Différentes réalisations de cycles électriques motorisés entièrement carénés (de 50 kg à 85 kg) [8, 9, 10].

L'accumulateur fournit une tension de 72 V avec une capacité énergétique de 20 Ah et une limitation du courant de la batterie à 40 A, soit 2C (2 fois la capacité énergétique). La puissance de la motorisation est de 2880 W. Notre site dispose aussi de vélos classiques à assistance électrique qui ont été réalisés avec les mêmes performances.

Ces dernières années, les éléments LiFePo4 sont devenus prépondérants car ils offrent un bon compromis entre le prix, la capacité énergétique massique et volumique et la sécurité d'utilisation.

Les batteries et les chargeurs de ces prototypes ont été réalisés aux laboratoires. Les chargeurs avec équilibreur intégré disposent de courants paramétrables de 1C à 0,1C. Toutes les courbes de tension de chaque élément sont visualisables et enregistrables en charge et en décharge. Lors de la charge, la mesure de la résistance interne de chaque élément peut se faire toutes les minutes.

Des bancs de décharge ont aussi été réalisés pour pouvoir faire des tests sur les accumulateurs dans des enceintes thermiques, comme le montre la figure suivante.

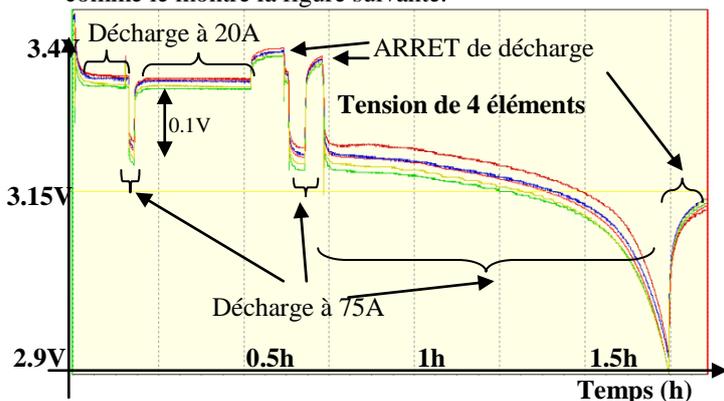


fig 2: Décharge de 4 éléments LiFePo4 90 Ah.

Mais, le véhicule est un banc de test à part entière avec une instrumentation embarquée.

Il suffit qu'un élément de l'accumulateur ne fonctionne pas bien, (résistance d'autodécharge, résistance interne ou capacité énergétique faible par rapport aux autres éléments, échauffement d'un élément) pour que le module électronique de surveillance de la batterie « Battery Management System » (BMS) provoque l'arrêt la décharge (et donc la motorisation du véhicule !). En effet, une augmentation de la résistance interne d'un élément va provoquer une chute de tension en dessous du seuil critique (cut off voltage) et le BMS va arrêter la décharge bien avant que tous les autres éléments soient complètement déchargés. Pour éviter cette situation, il est important de diagnostiquer l'état de santé de chaque élément de batterie en temps réel.

Le taux de fiabilité va, de plus, dépendre du nombre d'éléments utilisés dans l'accumulateur comme nous allons le démontrer dans le paragraphe suivant.

3. TAUX DE FIABILITE D'UN ACCUMULATEUR

La mise en série des cellules permet d'obtenir plus d'énergie embarquée en additionnant les tensions des éléments et permet d'obtenir la tension désirée au niveau du variateur. En revanche, la mise en parallèle de cellules de batterie permet d'avoir une intensité disponible plus importante, avec un courant de décharge par élément acceptable. L'assemblage en parallèle permet la réduction de l'impédance équivalente en prenant en compte le nombre de branches en parallèle, comparée au cumul des effets résistifs dans l'assemblage en série.

Etant donné les légères différences des résistances internes des cellules de la batterie, des déséquilibres de charge et de décharge peuvent apparaître, d'où la nécessité de rééquilibrer les cellules à chaque charge.

D'autre part, lorsqu'il y a plusieurs cellules en parallèle il est difficile de déterminer la cellule défaillante. En effet, seul la tension commune du chaque pack de cellule en parallèle est mesurée. Par conséquent, le pack de cellule en parallèle sera considéré défaillant, même si une seule cellule est défaillante.

Le taux moyen de défaillances de l'accumulateur λ ($\lambda=1/\text{MTBF}$ avec MTBF le taux moyen entre panne Mean Time Between Failures) correspondra à l'équation (1), avec n le nombre de cellules **qu'elles soient en parallèle ou en série.**

$$\lambda_{\text{accumulateur}} (\text{défaillance par heure}) = n \cdot \lambda_{\text{cellule}} \quad (1)$$

Donc, la probabilité de ne pas avoir de panne de l'accumulateur correspondra à l'équation suivante :

$$R_n (\text{temps}) = e^{-\lambda_{\text{cellule}} \cdot n \cdot \text{temps}} = R_{\text{cellule}}^n \quad (2)$$

Prenons par exemple une cellule de batterie de MTBF de 11000 heures, avec un cycle de charge et de décharge par jour. S'il y a 20 éléments le MTBF de l'accumulateur passe à 550 heures. La probabilité de ne pas avoir de disfonctionnement de l'accumulateur au bout de 360 heures est de 52% et au bout de 720h est de 27%.

En conclusion, plus le nombre de cellules sera élevé et plus la fiabilité de l'accumulateur diminue. De plus, remplacer une cellule usagée par une cellule neuve dans un accumulateur qui a déjà un certain nombre de cycle provoquera des problèmes d'équilibrage.

Une solution constitue à appairer les cellules de la batterie mais cela demandent du temps et un savoir-faire. La qualité de fabrication des batteries est cruciale et un bon fonctionnement

requière des cellules avec des caractéristiques les plus proches possibles.

Dans l'estimation de la fiabilité d'un accumulateur, le BMS actif ou passif doit être pris en compte ce qui diminue encore la valeur de la fiabilité. La maintenance de la batterie demande ainsi d'avoir un accès facile et d'avoir un démontage aisé de chaque élément.

Enfin, en dehors de la fiabilité, d'autres paramètres contribuent à une diminution de la durée de vie de la batterie. **Quelles sont les paramètres qui provoquent une diminution de l'état de santé d'une batterie lithium ?**

4. ETAT DE SANTE ET CAPACITE ENERGETIQUE DE LA BATTERIE

La capacité énergétique d'une batterie est donnée par son constructeur. La figure 3 montre la variation de la capacité énergétique en fonction de la température, sachant que la tension de cut off pour le LiFePo4 est de 2,50V.

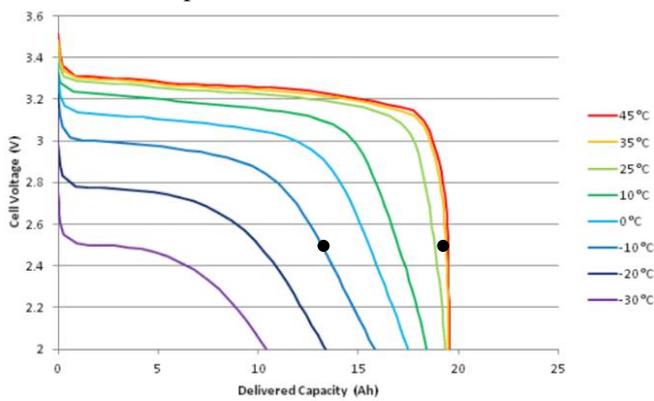


fig 3: Tension en fonction de la capacité énergétique et de la température – LiFePo4 déchargée à 1C à 35°C Q = 19.5Ah – A -10°C Q = 13 Ah [6]

Sur la figure précédente, la chute de tension est surtout provoquée par la résistance interne de la batterie qui augmente pour les températures basses inférieures à 10°C.

La valeur de la résistance interne d'un élément A123 20A.H à l'état sain correspond à l'équation suivante (3):

$$R_{\text{decharge}}(T) = R_{45^{\circ}\text{C}} + (R_{0^{\circ}\text{C}} - R_{45^{\circ}\text{C}}) \cdot e^{\frac{-T}{\tau T}} = 0.0015 + 0.01 \cdot e^{\frac{-T}{18}}$$

La capacité énergétique de la batterie et l'énergie en fonction de la température correspond à l'équation suivante (4) :

$$Q(\text{A.h}) = Q_{45^{\circ}\text{C}} + (Q_{0^{\circ}\text{C}} - Q_{45^{\circ}\text{C}}) \cdot e^{\frac{-T}{\tau T}} = 19.5 + (16 - 19.5) \cdot e^{\frac{-T}{18}}$$

L'énergie fournie par 1 élément en fonction de la température correspond à l'équation suivante (5) :

$$E(\text{W.h}) = 64.5 + (56 - 64.5) \cdot e^{\frac{-T}{18}} + \int R_{\text{decharge}}(T) \cdot I_{\text{dech}}^2 \cdot dt$$

Les mécanismes de vieillissement se produisent lors de l'usage de l'accumulateur (vieillessement en cyclage) mais également pendant les phases de repos.

Pour les A123, la profondeur de décharge entre 0 et 80% (DOD : Depth Of Discharge) n'a que très peu d'influence sur l'état de charge ou de la santé d'une batterie lithium [3, 4].

Par contre, si on continue de décharger au-delà de 100% (erreur de « cut off » du BMS), les éléments se mettent en court-circuit 0V de façon irréversible avec une résistance interne faible. De plus, dans cet état, les éléments « pouch » gonflent. D'ailleurs, des capteurs de pression peuvent diagnostiquer ce genre de problème au niveau d'un accumulateur.

Les statistiques montrent que les véhicules passent plus de 90% de leur vie dans un parking ce qui prouve l'intérêt d'étudier le mode de vieillissement calendaire qui n'est pas négligeable. D'ailleurs, on peut voir sur la figure suivante, la perte de la capacité énergétique en fonction du nombre de cycles (Ah) et du taux de décharge. Cette courbe montre bien le vieillissement provoqué par le cycle de charge et de décharge et par l'effet calendaire.

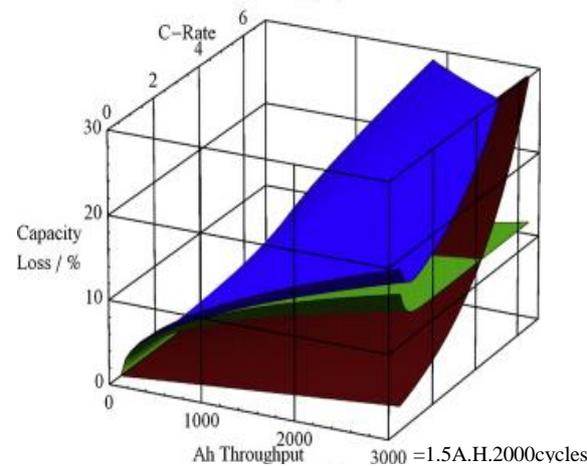


fig 4: Modèle du cycle de vie en fonction de la décharge (Ah) à 20°C – Valable pour LiMn 1,5Ah 2000 cycles [4] Perte de la capacité énergétique totale en bleu, perte calendaire en vert, perte cycle de décharge en brun.

Cette perte de capacité est provoquée en partie par une augmentation de la résistance interne de la batterie (ESR : Equivalent Series Resistance) qui dépend de la température mais aussi de la profondeur de décharge comme on peut le voir sur la figure suivante en mode sain.

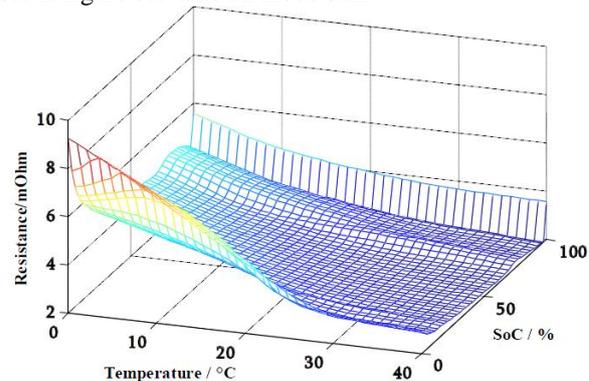


fig 5: Résistance interne lors de la décharge en fonction de la température et de la profondeur de décharge – Élément A123 LiFePo4 dans un état sain [13].

Pour des températures supérieures à 45°C, l'effet calendaire est plus perceptible et cela notamment si l'état de charge reste élevé. Ainsi, le vieillissement calendaire reste relativement faible en France.

La cause essentielle des mécanismes de dégradation pour les batteries lithium provoque l'augmentation de l'impédance interne. D'ailleurs, l'effet du vieillissement est surtout observé dans la gamme [0,1Hz, 1Hz] sur la partie réelle de l'impédance interne [3]. **Mais comment peut-on évaluer l'état de santé d'une batterie lithium ?**

5. METHODE DE MESURE DE L'ETAT DE SANTE

L'état de santé d'une batterie correspond à la capacité énergétique ainsi qu'au courant qu'elle peut fournir sans s'échauffer : cet état de santé correspond donc à une résistance interne très faible. Sur un véhicule, il faut que l'état de santé et

l'état de charge soit connu avec une précision de l'ordre de 1% pour rassurer l'utilisateur.

Plusieurs méthodes existent pour le SOH :

- La méthode par intégration de la puissance [11] : il s'agit d'un comptage du nombre de Watt-heures entrants et sortants avec une remise à zéro après chaque recharge complète. Cette méthode ne permet pas la détermination des variations relatives de l'état de charge en fonction de la température, ni la détermination de l'autodécharge et ni la connaissance de l'état de santé à un moment donné.

- Les méthodes directes basées sur des mesures de la tension et de la résistance interne par impulsions de charge et de décharge [15] ou de l'impédance dynamique par spectroscopie. Pour les LiFePo4, la variation de la tension est très faible en fonction de la profondeur de la décharge (figure 3), cette méthode ne peut pas être utilisée.

Il n'est donc pas possible de connaître précisément la profondeur de la décharge en mesurant la tension à vide ou en charge. En revanche, la méthode d'estimation de la résistance interne est souvent utilisée. Il y a de nombreux composants qui sont dédiés à connaître le SOC par la résistance, comme le circuit bq27500 « battery fuel gauge ».

- Des méthodes adaptatives par Filtre de Kalman sont aussi utilisées : il s'agit d'une structure d'observateurs dont la correction est effectuée de manière optimale et utilisée pour ajuster la variable SOC.

- Méthode par la mesure du temps de charge à courant constant (CC charge) puis en tension constante (CV charge) [3]. Ces temps dépendent évidemment de la résistance interne de la batterie et de la température. Mais pour cela, il faut avoir le modèle de la variation de la résistance interne de la batterie en charge qui devra être validé pour plusieurs types de courant de charge (lente, rapide) et cela en fonction de la température. Sur la figure 6, on peut observer le temps de charge (CC et CV) d'un accumulateur en mode sain.

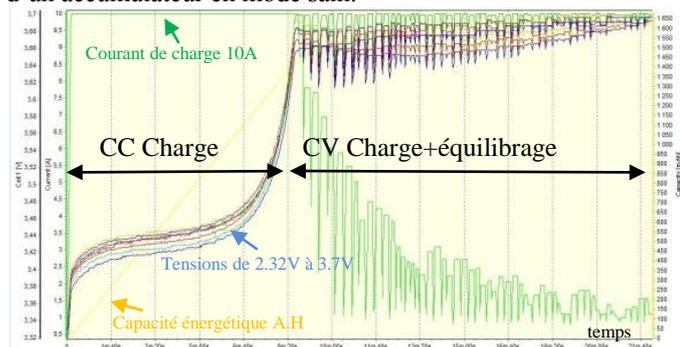


fig 6: Charge d'éléments A123 20Ah à 0,5C dans un état sain à 20 °C, avec la mesure de toutes les tensions de chaque élément en fonction du temps [10].

On peut donc observer sur la figure précédente que toutes les cellules ne sont pas appariées d'où la nécessité de rééquilibrer à chaque charge toutes les cellules.

Pour un véhicule électrique de type vélo, la méthode d'intégration du courant ou de la puissance est très facile à mettre en œuvre pour connaître la consommation en W.h et l'état de santé de la batterie. Donc après une recharge complète, on peut décharger à 100% donc jusqu'à la tension de « cut off » d'un élément de l'accumulateur et finir le parcours en pédalant. Il faut alors vérifier qu'il n'y a pas de différences importantes avec les autres tensions des éléments de l'accumulateur et connaître la capacité énergétique de l'accumulateur donc son état de santé pour une certaine valeur de température moyenne de la batterie.

Après une décharge de 100%, donc avec cutt off du BMS, lors de la charge il est possible de connaître l'énergie absorbée par la batterie, avec une assez bonne précision car le courant de charge est relativement faible (0.25C à 1C) donc moins sensible à la valeur de la résistance interne de la batterie. De plus, le courant de charge est stable par rapport au courant de décharge qui a une forte variation. L'énergie de la batterie correspond à l'équation suivante (6)

$$E_B(W.H) = \text{mesurecharge}100\% - \int R_{\text{charge}}(T,t) \cdot I_{\text{ch}}(t)^2 \cdot dt$$

Le chargeur fait la mesure de la résistance interne toutes les 2 minutes ainsi que l'intégration de la puissance de la batterie et l'intégration des pertes dans la résistance de l'accumulateur tous les 0.2s.

Exemple : Après une décharge à 100% à 25°C, donc lorsque tous les éléments sont à 2.5V pour un accumulateur de 21 éléments A123 (1300W.H nominale), en charge à 6A, la mesure de la charge est de 1310W.H, la température passe rapidement à 27°C, la résistance lors de la charge est de 4 mΩ pratiquement constante en fonction du DOD.

L'énergie de la batterie correspond environ à l'équation suivante :

$$E_B(T) = 1310 - \int_0^{3.15h} 21 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 6^2 dt = 1300W.H \text{ à } 27^\circ C$$

Cette énergie de charge à 100% concorde à l'énergie de décharge utilisable à 100% aux pertes de la résistance interne près correspondant à l'équation suivante (7):

$$E_B(W.h) = \text{mesuredecharge}100\% + \int R_{\text{decharge}}(T,t) \cdot I_{\text{dech}}(t)^2 \cdot dt$$

L'état de santé relative de la batterie correspond à l'équation suivante avec E_n correspondant à l'Energie nominale en mode sain de la batterie :

$$\text{SOH}(\%) = \frac{E_n(T) - E_B(T)}{E_n(T)} \quad (8)$$

Puis, l'état de charge relative peut être déterminé par l'équation suivante avec E_B dépendant de l'état de santé SOH (9).

$$\text{SOC}(\%) = \frac{E_B(T) - (\text{mesuredecharge}100\% + \int R_{\text{decharge}}(T,t) \cdot I_{\text{dech}}(t)^2 \cdot dt)}{E_n(T)}$$

Le SOH doit toujours être réestimé en fonction de l'utilisation et de la température de la batterie.

La résistance interne lors de la charge est plus élevée par rapport à la résistance lors de la décharge. Par conséquent pour une charge à 1C, la température atteinte par la batterie est plus importante que lors de la décharge [9, 13]. C'est pourquoi le taux de charge maximale préconisé par le constructeur est de seulement 1C pour une durée de vie optimale.

Connaître l'état de santé de l'accumulateur d'une voiture électrique est plus problématique car elle ne peut plus rouler après une décharge de 100%. Mais après avoir fait un long parcours il est possible de finir de décharger la batterie à 100% chez soi, avec le chauffage (environ 5 kW pour une voiture), puis de recharger l'accumulateur pour connaître la capacité énergétique de la batterie à 100% et son SOH.

Mais quelle est la tolérance admissible entre les cellules ?

6. TOLERANCE ADMISSIBLE ENTRE LES CELLULES D'UNE BATTERIE

Pour nos cycles électriques, la durée de vie des batteries consiste à trouver la limite pour laquelle la baisse de performances est considérée comme intolérable.

Généralement, une perte de 25% de la capacité énergétique nominale est une limite à l'obsolescence de l'accumulateur. De plus, un échauffement au-delà d'une valeur critique lors d'un

cycle normal d'utilisation est aussi un bon indicateur de défaillances. Cette valeur critique de température de l'accumulateur est préconisée par le constructeur afin de préserver les isolants utilisés et l'électrolyte.

Par exemple, pour une cellule A123 20Ah, la température maximale d'utilisation est de 60°C avec une résistance thermique de 3°C/W (avec 1mm d'espace entre les éléments) et une capacité thermique de 800 J/°C et un coefficient d'entropie $dE(SOC)/dT$ qui varie de -2mV/°C à 2mV/°C [6, 13] en fonction de la capacité énergétique. La température est mesurée sur l'électrode positive ou la chaleur est la plus importante que pour le reste de la batterie. En effet le terminal positif est fait d'aluminium qui possède une résistivité plus importante que celle du cuivre. L'évolution de la température de la batterie correspond à l'équation simplifiée suivante :

$$(T - T_{amb})(^{\circ}C) = P(W) \cdot R_{TH} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R_{TH} \cdot C_{TH}}}) \quad (10)$$

La puissance perdue dans l'élément de la batterie correspond à l'équation suivante avec $R(\Omega)$ correspondant à la résistance interne d'un élément et $I(A)$ à son intensité.

$$P(W) = R(T, SOC) \cdot I^2 + I \cdot T \cdot \frac{dE(SOC)}{dT} \quad (11)$$

Exemple : pour une décharge à 2C, donc à 40A, en continu avec une température ambiante de 20°C et une résistance de 2 mΩ, la cellule aura une puissance à dissiper de 3,2 W. Par conséquent, l'augmentation de température sera de 6,4°C ce qui n'est pas un problème pour la cellule.

En revanche, si la résistance interne passe à 12 mΩ à cause du vieillissement, alors la puissance à dissiper atteint 19,2W et l'augmentation de la température est de 38,4°C soit 58,4°C aux bornes des électrodes. Cette température est critique et le BMS arrêtera le fonctionnement du véhicule s'il n'y a pas une ventilation forcée de la batterie.

Sur la figure suivante, on peut observer l'évolution des pertes thermiques d'un élément en fonction de la profondeur de décharge et du temps.

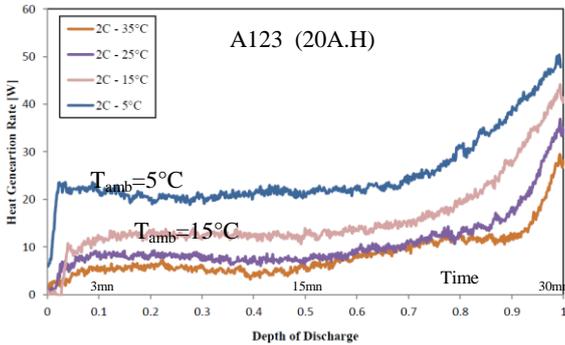


fig.7 : Perte en chaleur pour différentes températures ambiantes pour un courant de décharge 2C en fonction de DOD ou du temps.

D'ailleurs, l'incrémentation de la température sera plus grande à 5°C qu'à 35°C car la résistance interne est plus importante pour les températures faibles. Sur la figure suivante, on peut observer l'incrémentation pour un taux de décharge important de 4C. A 5°C ambiant, la température de la batterie atteindra une température de fonctionnement optimale autour de 20°C.

La perte énergétique provoquée par la résistance interne de la batterie pour une décharge de 100% correspond à l'équation suivante :

$$W_{perte} (W.H) = \int_0^{t_{100\%}} R(SOC, T) \cdot I^2 \cdot dt \quad (12)$$

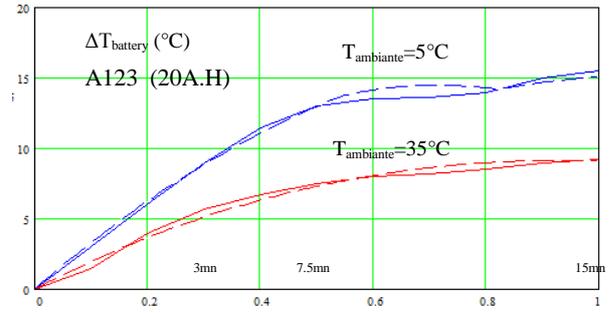


fig 8 : Incrémentation de chaleur pour un courant de décharge 4C en fonction du DOD et du temps en mode sain, mesure en trait plein et modélisé en trait pointillé.

À une température ambiante de 20°C, pour une cellule A123 de 64 Wh, en mode sain avec une résistance de 2 mΩ, l'énergie perdue est de 0,8 Wh à 1C et de 1,6 Wh à 2C, soit 2.6% de la capacité nominale.

En mode dégradé, avec une résistance de 12 mΩ, l'énergie perdue est de 4,8 Wh à 1C et de 9,6 Wh à 2C soit 16% de la capacité nominale.

Remarque : une différence de résistance interne provoque un temps plus long de la recharge à tension constante à cause de l'équilibrage de chaque élément.

7. ÉQUILIBRAGE DE LA CHARGE ET DE LA CAPACITE ENERGETIQUE

Si toutes les tensions électrochimiques (OCV : Open Circuit Voltage) sont identiques, alors le temps de rééquilibrage à chaque cycle dépendra seulement de la différence entre la résistance interne de la plus grande d'une cellule par rapport à la plus faible, appelé ΔR . Ce temps de rééquilibrage de charge dépend de la puissance lors de l'équilibrage et correspond à l'équation suivante :

$$t(H) = \frac{\Delta E_{equilibre} (W.h)}{\text{puissance}_{charge_1_cell}} \quad (13)$$

Avec $\Delta E_{equilibre}$ correspondant à la différence des pertes d'énergies dans les résistances (14):

$$\Delta E_{equilibre} = \int \Delta R_{decharge} \cdot I_{dech}^2 \cdot dt + \int \Delta R_{charge} \cdot I_{ch}^2 \cdot dt$$

Dans le cas le plus défavorable, avec une décharge à 2C et une charge à 1C, avec une décharge à 100%, l'équation du déséquilibre est la suivante avec la capacité énergétique Q (Ah) et l'intensité de charge à 1C

$$\Delta E_{equilibre} = (\Delta R_{decharge} \cdot I \cdot 2 + \Delta R_{charge} \cdot I) \cdot Q \quad (15)$$

Dans le cas de la batterie A123 20Ah, une intensité de 20A et avec un écart de 1mΩ entre la résistance de décharge et de la charge, la différence d'énergie sera de 2Wh. Avec une puissance de 1,65W pour l'équilibrage pour une cellule, il faudra 1,2 h pour faire le rééquilibrage.

L'équilibrage passif à faible puissance, en déchargeant les cellules les plus chargées avec des résistances, est une solution peu onéreuse à mettre en œuvre. Ce type d'équilibrage peut être observé sur la figure 6.

Par contre un rééquilibrage actif peut être plus rapide, mais ce système est plus complexe donc plus cher.

Si le rééquilibrage ne se fait pas, alors l'écart de la capacité énergétique augmente entre la cellule qui a la résistance interne la plus faible et l'élément qui a la résistance interne la plus grande.

Le SOH et le SOC doit être déterminée en fonction du rééquilibrage et en fonction de l'élément qui a une résistance de décharge la plus importante.

L'instrumentation du véhicule électrique indique à l'utilisateur : la consommation en Wh, le % de l'énergie restante, la température des éléments de batteries, les Wh par km... L'instrumentation utilisée [11] a une erreur sur la mesure de puissance de 0,12% et une erreur sur celle de l'énergie de 0,124%.

En dehors de la connaissance de l'état de santé de la batterie, de l'énergie consommée depuis cette batterie en temps réelle, ce qui intéresse l'utilisateur d'un véhicule électrique, est concrètement, le nombre de kilomètres qu'il peut faire avec l'énergie restante en prenant en compte éventuellement une réserve de sécurité de quelques % afin de ne pas avoir l'inquiétude de tomber en panne ...

Dans tous les cas, la distance parcourue va dépendre de la consommation du véhicule et du trajet à effectuer. C'est pourquoi un estimateur de consommation en fonction de la somme du dénivelé et de la vitesse moyenne a été développé ...

8. ESTIMATION DE CONSOMMATION SUR UN PARCOURS

Depuis 2012, une application ebikemaps.com [12] a été développée pour estimer la consommation des véhicules électriques. En effet, il est possible de tracer son parcours sur « Google Maps est de connaître le dénivelé positif et la consommation pour ce parcours. Pour cela, le véhicule doit être modélisé avec le coefficient d'aérodynamisme k_{aero} ($W/(km/h)^3$), le coefficient de roulement, et le rendement de la motorisation η en fonction de la puissance résistive. La puissance absorbée du véhicule correspond à l'équation suivante (16).

$$P_{abs}(W) = \left[k_{Aero} \cdot Vit^3 + (k_{roul} + k_{pente}) \cdot Vit(km/h) \right] / \eta$$

Sur un parcours donné, la consommation énergétique en fonction du cycle motorisé peut être estimée approximativement par l'équation suivante (17) :

$$E(W.h) = (P_{motor}(V_{moy}) - P_{humain}) \cdot \frac{(distance - D^-)}{V_{moy}(km/h)} + \frac{M \cdot g \cdot D^+}{3,6}$$

avec la vitesse moyenne en km/h, D^+ , D^- les dénivelés positifs, négatifs et la distance en km.

Donc à partir de l'équation précédente, une estimation de la consommation de l'énergie de la batterie peut être réalisée, comme on peut l'observer sur la figure suivante avec sa jauge de batterie en fonction du parcours et de la vitesse moyenne et la température extérieure.

La précision de l'estimation est d'environ 5% sur des parcours allant de 20 km à 200 km. Environ 50% de la consommation dépend du dénivelé positif avec des véhicules qui ont une masse faible de l'ordre de 140 kg avec le cycliste. Sachant que l'estimateur ne prend pas en compte le freinage régénératif électrique, la granulométrie de la route, le vent et la consommation due aux accélérations.

On peut remarquer sur la figure 11, que la puissance est fortement hachée à cause des nombreuses accélérations sur un parcours, alors que l'estimateur filtre ces demandes en énergie. Certaine jauge pour certain véhicule électrique indique la distance restante à parcourir à partir de l'équation suivante, avec la capacité restante de la batterie et la consommation moyenne sur une certaine distance (ici 10 km) (18).

$$Distance(km) = \text{capacité}_{restante} (W.H) / \left[\text{conso}_{moyenne} (W.H) / 10km \right]$$

A partir de cette équation, la distance estimée restante sera faussée si après un dénivelé faible une montée conséquente se présente. La consommation moyenne sur nos vélobicycles peut ainsi passer de 5 Wh/km à 10 Wh/km sur certains parcours pour une vitesse moyenne identique en fonction du profil du parcours. L'application indique la vraie distance restante à partir de la destination désirée.

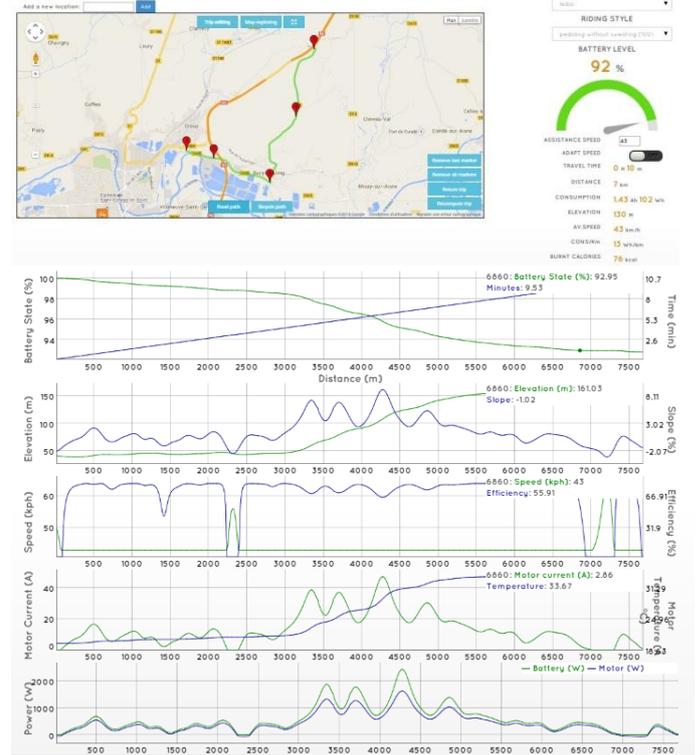


fig 10: Estimation de la consommation énergétique en fonction d'un parcours et d'une vitesse moyenne fixée pour un tricycle caréné. La puissance résistive et la température du moteur sont aussi estimées. [8]

Sur la figure suivante, on peut observer les mesures de la consommation, de la puissance sur le parcours précédents, ce qui permet de confirmer l'estimateur.

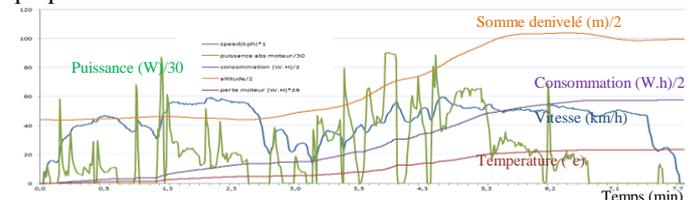


fig 11: Enregistrements de la vitesse (bleu), de la puissance (vert), de l'énergie (violet), de l'altitude, de la somme du dénivelé positif et de la température moteur.

9. ESTIMATION DE LA DUREE DE VIE DE LA BATTERIE

Sur les batteries A123 20Ah à 25°C, le vieillissement calendaire provoque une perte de moins de 3 % de la capacité énergétique est de 15 ans, comme on peut l'observer sur la figure 12.

Sur la figure 13, le nombre de cycle à 25°C est de 5200 cycles (102600Ah) pour une perte de 20% de la capacité énergétique par rapport à la capacité initiale.

Etant donné que les vélobicycles consomment environ 1200 Ah pour 10000 km, la durée de vie estimée de la batterie serait de 850 000 km avec un courant de décharge de 2C, une température de 25°C et un taux de décharge de 100%.

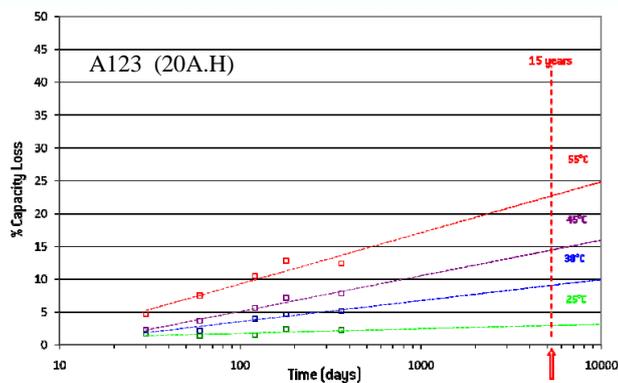


fig 12: Vieillessement calendaire des éléments LiFePo4 A123 avec 50% d'énergie stockés [6].

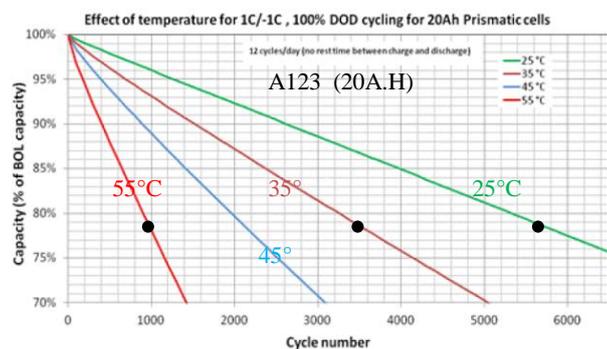


fig 13: Perte de la capacité énergétique à différentes températures avec 100% de DOD [6].

En générale, 90% des cycles ont des décharges peu profondes inférieures à 40%. Mais les constructeurs donnent rarement l'équation ou la courbe du nombre de cycle de vie en fonction du DOD comme on peut l'observer sur la figure suivante [14].

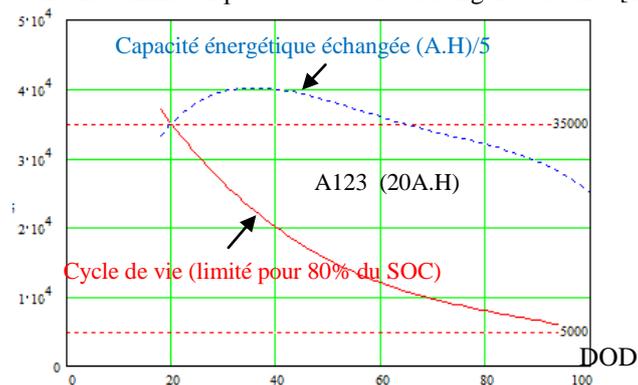


fig 14: Evolution du nombre de cycle et de la consommation échangée en Ah en fonction du DOD à 25°C avec une utilisation du véhicule tous les jours.

Sur la figure précédente on peut observer la capacité énergétique échangée en Ah en fonction de DOD. On peut observer qu'il y a une optimisation aux alentours de 37 % du DOD.

10. CONCLUSIONS

Cet article a permis d'établir que l'on pouvait connaître simplement l'état de santé de chaque élément d'une batterie installée sur un véhicule électrique. L'augmentation de la résistance interne due au vieillissement provoque une chute de la capacité énergétique ainsi qu'un échauffement préjudiciable à la batterie. La durée de vie, quant-à-elle, dépend du taux de décharge et de la température de stockage. Par conséquent,

pour une certaine puissance, il est préférable d'augmenter la tension de l'accumulateur pour ne pas dépasser un taux de décharge de 2C. Cette augmentation de la tension demande un nombre d'éléments plus importants au détriment de la fiabilité. Pour minimiser le taux de décharge, l'utilisation de super capacités est une solution [7] mais qui reste cependant encore onéreuse aujourd'hui. La connaissance du vieillissement de la batterie en fonction de l'utilisation permet d'estimer sa durée de vie pour une étude marketing [3]. L'étude du nombre de cycles possibles pour un accumulateur demande de faire des études relativement longues. Ces données sont peu fournies par les constructeurs. Il en est de même pour la fiabilité de la cellule. Dans tous les cas l'autonomie va dépendre surtout de la consommation du véhicule.

Pour toutes ces raisons, un estimateur de consommation est obligatoire pour prendre en compte la somme des dénivelés et la vitesse moyenne et la température extérieure. Une application a été testée sur plus de 1500 cycles (vélos, tricycles, vélomobiles) avec succès. Cet estimateur prend en plus en compte l'état de santé de la batterie ainsi que sa température qui joue un grand rôle en ce qui concerne la capacité énergétique de la batterie. Cet estimateur est une bonne stratégie de gestion de l'autonomie qui peut être utilisé pour tous les types de véhicules électriques.

11. REFERENCES

- [1] J.Neubauer, E.Wood, "The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility" *Journal of Power Sources*, 257, 12–20, 2014
- [2] S.Santhanagopalan, K.Smith, J.Neubauer "Design and Analysis of Large Lithium-Ion Battery Systems" 2015 artec house
- [3] A.Addahieh « Modélisation du vieillissement de l'état de santé de batteries lithium pour l'application de véhicule électrique hybride » thèse 2014 Université Bordeaux
- [4] J.Wang, J.Purewal, P.Liu « Degradation of lithium ion batteries employing graphite negatives and nickel-cobalt-manganese oxide+ spinel manganese oxide positives: mécanismes de vieillissement et estimation de la vie » *Journal of Power Sources*, 269, 2014
- [5] http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=ip1252
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rev3.pdf>
- [6] A123 "Battery pack design, validation and assemblage" 02/2014
- [7] A.Sivert, F.Betin, S.Cariere, « Gestion et dimensionnement de l'énergie embarquée pour un véhicule électrique à faible consommation » Symposium de Génie Électrique (SGE'14) : EF-EPF-MGE juillet 2014, ENS Cachan.
- [8] A.Sivert, F.Betin, B.Vacossin, T. Lequeu, M.Bosson "Optimization of the mass for a low-power electric vehicle and consumption estimator (e-bike, e-velomobile and e-car)" WSEAS 2015
- [9] FORUM VELO HORIZONTAL DEC/2015
<http://VELOHORIZONTAL.BBFR.NET/T17956-VELOMOBILE-ELECTRIC-LEIBA-X-STREAM-IUT-AISNE>
- [10] A.Sivert, F.Betin, T.Lequeu, "Pedagogical study of an electric bike with low energy consumption, management and dimensioning of onboard energy: eco marathon" WSEAS, World Scientific and Engineering Academy and Society, 2014.
- [11] A.Sivert, F.Betin, T.Lequeu "Instrumentation d'un véhicule motorisé électrique faible consommation de type éco marathon" *Revue 3EI* N°81, Juillet 2015
- [12] Estimateur de consommation d'énergie d'un véhicule 2015:
<http://www.ebikemaps.com/> green race <http://www.jurassicstest.ch/GR/>
- [13] A.Samba, N.Omar, H.Gualous « Modélisation Electrothermique 2D d'une batterie lithium-ion de type pouch » *Revue 3EI* N°78, oct 2014
- [14] N.Omara, M.Monema, Y.Firoouza, J.Salminenc "Lithium iron phosphate based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model" *Applied Energy* 113 (2014)
- [15] M.Hung, C.Lin, L.Lee, "State-of-charge and state-of-health estimation for lithium-ion batteries based on dynamic impedance technique" *Journal of Power Sources*, December 2014