



**HAL**  
open science

## Stratégie de choix entre différentes technologies de batteries Lithium (Durée de vie, fiabilité...)

Arnaud Sivert, Franck Betin, Bruno Vacossin, Amine Yazidi, Hervé Caron

### ► To cite this version:

Arnaud Sivert, Franck Betin, Bruno Vacossin, Amine Yazidi, Hervé Caron. Stratégie de choix entre différentes technologies de batteries Lithium (Durée de vie, fiabilité...). Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02983334

**HAL Id: hal-02983334**

**<https://hal.science/hal-02983334>**

Submitted on 29 Oct 2020

**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.

# Stratégie de choix entre différentes technologies de batteries Lithium (Durée de vie, fiabilité...)

Arnaud Sivert<sup>1</sup>, Franck Betin<sup>1</sup>, Bruno Vacossin<sup>1</sup> Amine YAZIDI<sup>1</sup>, Hervé caron<sup>2</sup> : [arnaud.sivert@u-picaride.fr](mailto: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) Coordinateur projets de recherche Traction Electrique, SNCF Ingénierie & Projets

**RESUME** - La durée de vie des batteries est un élément essentiel pour connaître le coût d'une installation en fonction de son utilisation. Après avoir présenté la configuration d'un accumulateur, les statistiques de défaillance de cellules, l'estimation de la durée de vie en fonction de la capacité énergétique consommée, 2 études de cas sont présentées en fonction des différentes technologies accessibles sur le marché. Le premier cas est celui des vélos électriques et le deuxième cas celui d'un stockeur d'énergie.

*Mots-clés*—batterie lithium, durée de vie, LTO, LiMN, LFP, stockeur d'énergie, véhicule faible consommation, fiabilité.

## 1. INTRODUCTION

La durée de vie des batteries est un élément essentiel pour connaître le coût d'une installation en fonction de son utilisation. Cette durée de vie dépend de leur composition chimique, de la qualité de leur fabrication mais aussi du nombre prévisionnel de cycles de charge et de décharge, de la profondeur de décharge, DOD (Depth Of Discharge), du taux de décharge et de charge (C rate), de l'effet calendaire (vieillessement dans le temps), de la température et de l'environnement d'utilisation...

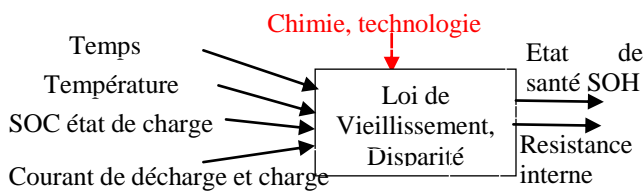


Fig 1. Influence de la loi de vieillissement sur une batterie.

De nombreux articles scientifiques ont démontré que pour un même lot d'éléments sortant de la même chaîne de production, la durée de vie dépendait aussi d'une loi de probabilité [1, 2, 3, 4]. Etant donné qu'il y a souvent un grand nombre de cellules mises en série et parallèle dans une batterie, la fiabilité de l'ensemble peut être faible.

Exemple avec les cellules li-ion NMC qui sont commercialisées depuis 2009, boîtier 18650 (18×65mm), de 3€, 42g, 2,5 A.h, 3,7 V, avec possibilité de décharge à 3C et de charge à 1C sont les éléments les plus vendus à l'heure actuelle. Les applications sont très variées, du vélo électrique (48V, 20 A.h, 800 €, 13S8P 13 cellules en série de 8 cellules en parallèle et donc 104 cellules), à la voiture comme la Tesla S (400 V, 85

KW.h, 22 k€, 96S74P et donc 7104 éléments), au stockeur d'énergie de (800 V, 63 kA.h, 50 MW.h, 216S21000P).

Malheureusement, ni les datasheets des fabricants de cellules ni les bigdatas des équipements portatifs autonomes fournissent des statistiques sur la fin de vie des batteries.

Pourtant, un certain nombre de questions se posent lors de la réalisation d'une batterie :

**Quelle sera l'estimation du coût de la batterie en fonction de l'utilisation ? Quelle sera sa durée de vie ? Quelle est la loi de probabilité de fiabilité de ces batteries ? Est-ce que la configuration des éléments permet de faire une maintenance ? Quelles sont les disparités entre les éléments d'un même fabricant (SOH, résistance interne en fonction du nombre de cycles ou capacité d'énergie utilisée) ?**

Toutes ces questions ont nécessité des études SIMSTOCK, SIMCAL, MOBICUS pour modéliser les éléments.

De plus, lorsqu'une nouvelle technologie de batterie est mise sur le marché, il est toujours nécessaire d'établir une comparaison exhaustive pour connaître les avantages et les inconvénients de cette nouvelle solution. Cette mise en œuvre peut être entreprise en prenant en compte de nombreux paramètres comme ceux de la figure suivante :

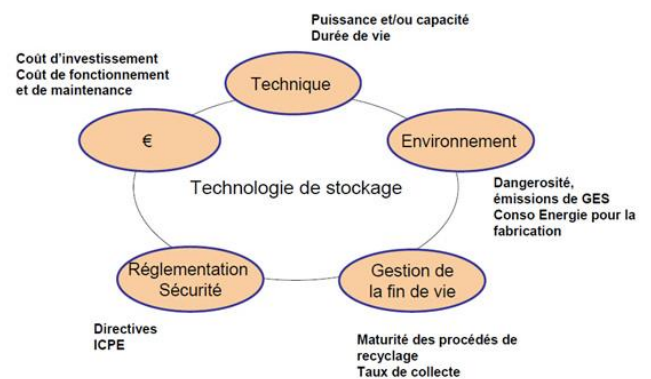


Fig 2. Récurrence de choix entre différents accumulateurs d'énergie.

Exemple avec les batteries LTO qui sont sur le marché depuis 2016, peuvent fournir des courants très importants en décharge 6C et supporter en charge 4C avec un nombre de 10 kcycles pour un SOH (State Of Health) de 80%.

Mais si les taux de charge et de décharge augmentent il y a alors une diminution du nombre de cycle. De combien est-elle ? [13,14]

En comparaison, depuis 2009, les batteries LFP ont fait leurs preuves, cependant, leurs critères de performance sont plus limités avec environ 7000 cycles de fonctionnement pour un taux de décharge de 3C, un taux maximum de charge à 1C et une dégradation calendaire de 8 ans. Dans tous les cas, le nombre de cycles dépend fortement de la composition chimique de la batterie et donc du concepteur.

En revanche, pour la même capacité énergétique, l'inconvénient des batteries LTO par rapport aux batteries LFP est que leur masse et leur volume sont 2,5 fois plus importants. De plus, leur coût est à 2 à 5 fois plus élevé à l'heure actuelle.

Dans tous les cas, il faut donc trouver un compromis entre les nombreuses performances d'une batterie, comme celles représentées sur la figure suivante :

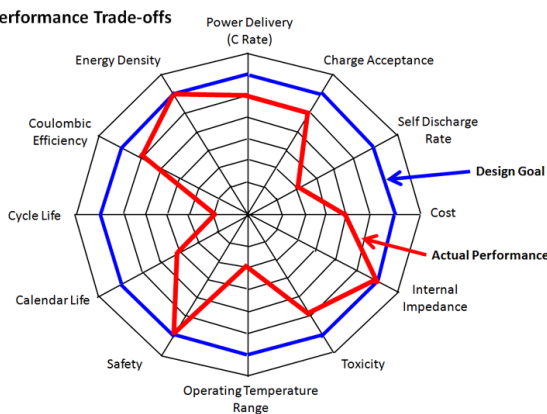


Fig 3. Paramètres d'une batterie.

Avec les performances précédentes, le coût de l'installation en fonction de la technologie et de la durée de vie des éléments doit être estimé.

Enfin, dans cet article des stratégies de choix de batteries seront présentées, l'une pour un vélo électrique et l'autre pour un stockeur.

**Mais tout d'abord, comment est configurée une batterie et quelle est la fiabilité de celle-ci en fonction de cette configuration.**

**2. CONFIGURATION D'UNE BATTERIE ET BMS**

La mise en série des cellules permet d'obtenir plus d'énergie embarquée en additionnant les tensions des éléments et donne la tension désirée au niveau du convertisseur électrique. 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 de diminuer la résistance équivalente comparée au cumul des effets résistifs de l'assemblage en série. A ce jour, il existe de nombreux boîtiers de batterie qui permettent d'avoir des capacités énergétiques plus grandes que 18650 3A.h pour minimiser le nombre d'éléments en parallèle tel que les 26650 5 A.h, 32650 6 A.h. « En format poche » ; toutes les possibilités de quelques A.h à 700 A.h existe.

Plus la capacité énergétique est grande, plus la surface et plus l'épaisseur de la cellule est grande. La résistance interne sera alors plus faible.

Le problème de la mise en parallèle de cellules de résistance interne différente (même avec de faibles écarts) pour des taux de décharge de plus de 1C est qu'il y aura une distributivité des courants et des températures différentes entre les cellules [5, 6].

Cette hétérogénéité des courants au niveau de chaque cellule en parallèle n'est pas mesurée par le BMS de petit accumulateur.

En revanche, Les BMS des gros stockeurs font cette mesure au niveau de chaque rack.

Par ailleurs, un écart de seulement 20% (de la valeur des courants) peut entrainer une diminution de la durée de vie (diminution de 40% du nombre de cycles) par rapport à une configuration comprenant deux cellules en parallèle connectées possédant une résistance interne identique [7].

La mise en parallèle de cellules conduit donc à avoir une certaine hétérogénéité du boîtier par rapport à la disparité des valeurs ohmiques. De plus, si une cellule a une résistance d'autodécharge importante, elle provoquera une décharge des autres cellules mises en parallèle.

Si l'utilisation de l'accumulateur est journalière, l'équilibrage des éléments de la charge aura le temps de se faire. Mais si l'accumulateur n'est pas souvent utilisé alors, la cellule qui a une autodécharge importante, videra entièrement l'énergie des éléments en parallèle jusqu'à atteindre 0 V (ce qui détruira tous ces éléments en parallèle). De même, certains BMS ne voudront pas recharger une batterie dès qu'elle possède une seule cellule dont la valeur se situe en dessous d'une tension de seuil prédéfinie.

La difficulté pour un équilibreur dissipatif est d'être synchronisé avec le courant du chargeur. En effet, si le courant du chargeur est trop important par rapport au courant admissible par l'équilibreur alors l'équilibrage ne se fait pas. En effet, la température admissible de ses résistances va être atteinte en quelques minutes.

Quelques soient la configuration de la batterie, l'arrêt de la décharge de l'accumulateur se fera par l'élément ou le rack le plus faible. D'où le fait que les éléments doivent avoir une faible disparité de capacité énergétique et de résistance interne.

L'article [1] et nos tests prouvent qu'il n'est pas possible de faire une sélection de cellules de batterie à la sortie du procédé de fabrication pour sélectionner des éléments qui aurait d'excellentes caractéristiques et une durée de vie très importante. La durée de vie est ainsi aléatoire.

**Mais quelle est la disparité statistique entre les éléments ?**

**3. STATISTIQUE DE DEFAILLANCE DE CELLULES**

A partir d'essais de cyclabilité de cellules li-MCN 18650 LG avec un taux de décharge de 3C et de charge de 1C pour une plage de 25 cycles, l'histogramme de 30 cellules qui ont atteint 80% de la capacité nominale, est représenté sur la figure suivante :

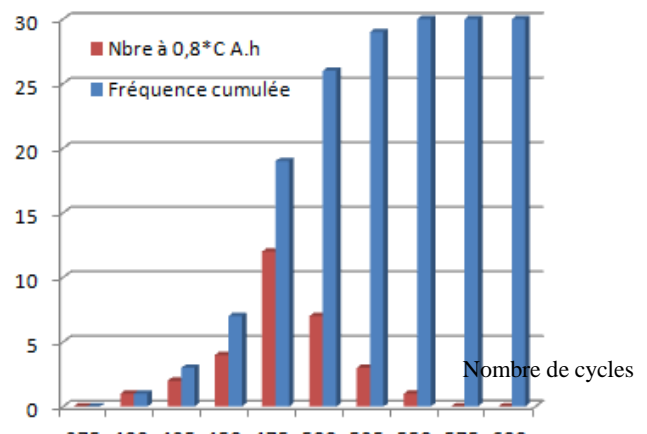


Fig 4. Histogramme du nombre de défaillances d'un élément 18650 avec la fréquence cumulée des nombres de défaillances.

Le taux de défaillances des cellules renseigne sur le comportement de l'accumulateur à être en défaut. Le taux de défaillance peut être déterminé pour chaque plage d'étude (25 cycles pour notre exemple) à partir de la fonction survie notée R (Reliability) correspondant à l'équation suivante (1) :

$$\lambda(t) = \frac{-1}{R} \cdot \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\text{nbr d'element}} \cdot \frac{\text{nbr défaut de la plage}}{\text{plage}} = \frac{-d(\ln(R))}{dt}$$

Sur la figure 4, le nombre de défaillances en rouge ayant une grande variation en fonction du nombre de cycles, le temps moyen entre pannes MTBF (Mean Time Between Failures  $MTBF = 1 / \lambda_{\text{moyen sur une plage}}$ ) est insuffisant pour faire une estimation de probabilité de défaillances précises dans notre cas. Il est possible d'utiliser différentes lois statistiques pour les batteries mais la loi de Weibull [8, 9] est la plus utilisée dans la littérature. Sa fonction est algébrique contrairement à la loi normale. La fonction sur Excel est la suivante et représente l'équation suivante :

$$= LOI.WEIBULL(x, \alpha, \beta, 1) \quad \text{Proba}(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\theta}{\beta}\right)^\alpha} \quad (2)$$

Avec  $\alpha$  qui représente le paramètre de forme de la fonction,  $\beta$  le paramètre d'échelle et  $\theta$  le paramètre de localisation de la distribution par rapport à l'origine.

Il n'y a pas le terme  $\theta$  dans la fonction Excel mais il est possible de l'introduire en calculant la fonction algébrique dans Excel.

Notons que la valeur de la probabilité sera de 0,63 lorsque  $x - \theta = \beta$ .

La densité de probabilité correspond à l'équation suivante :

$$\text{Densité Proba}(x) = (x - \theta)^{\alpha-1} \cdot \frac{\alpha}{\beta^\alpha} \cdot e^{-\left(\frac{x-\theta}{\beta}\right)^\alpha} \quad (3)$$

A partir de la valeur de la fréquence des défaillances cumulée à 0,63 graphiquement, la valeur  $\beta$  correspond à 475 cycles. Pour connaître le facteur de forme  $\alpha$ , l'équation suivante pourrait être utilisée.

$$\alpha = \ln(-\ln(1 - \text{Proba}(x)) / \ln(x/\beta)) \quad (4)$$

Mais avec un seul point, cela ne donne pas correctement le paramètre de forme de la densité de probabilité. La meilleure solution est de tracer la courbe du log népérien de la survie qui correspond à l'équation suivante et d'identifier le coefficient  $\alpha$  qui correspond à la pente de la courbe :

$$\ln(-\ln(1 - \text{Proba}(x))) = \alpha \cdot \ln(x - \theta) - \alpha \cdot \ln(\beta) \quad (5)$$

$\alpha$  correspond donc à la pente de la courbe précédente ce qui donne l'équation suivante qu'il faut ajuster en fonction des données :

$$\alpha = \frac{\ln(-\ln(1 - \text{Proba}(x_2))) - \ln(-\ln(1 - \text{Proba}(x_1)))}{\ln(x_2 - \theta) - \ln(x_1 - \theta)} \quad (6)$$

D'ailleurs sur la figure suivante qui représente l'équation 5, on peut observer avec la fréquence cumulée réelle est la fonction modélisée de Weibull avec ( $\alpha=3, \theta=375, \beta=100$ ).

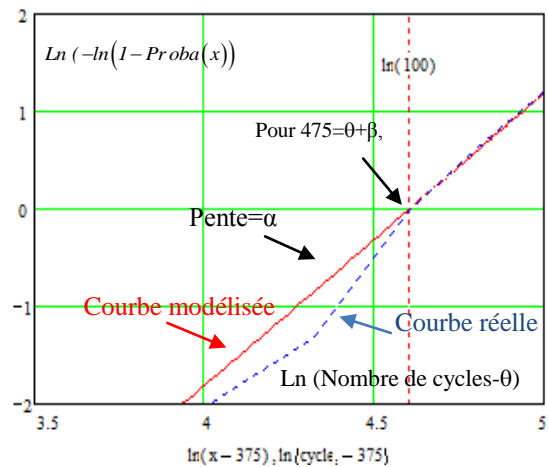


Fig 5. Courbe permettant de déterminer le coefficient  $\alpha$  et  $\beta$  de la loi Weibull.

Sur la figure suivante, on peut observer la fréquence cumulée réel ainsi que différentes lois statistiques qui permettent de connaître l'estimation de la défaillance d'une batterie.

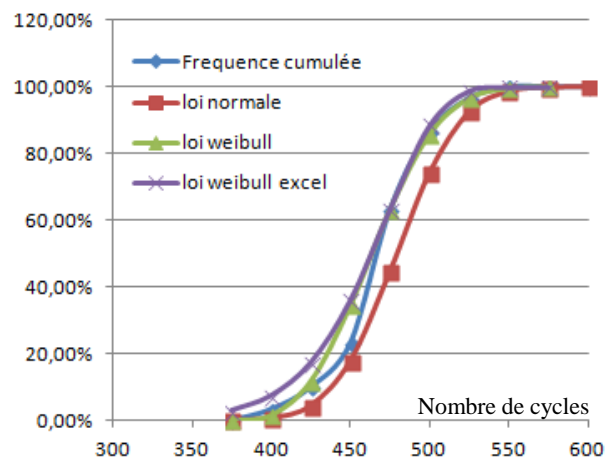


Fig 6. Cumuls des nombres de défaillances réelles (courbe bleue) et estimées avec différentes lois de probabilité.

Sur la figure suivante, la densité de probabilité réelle est estimée :

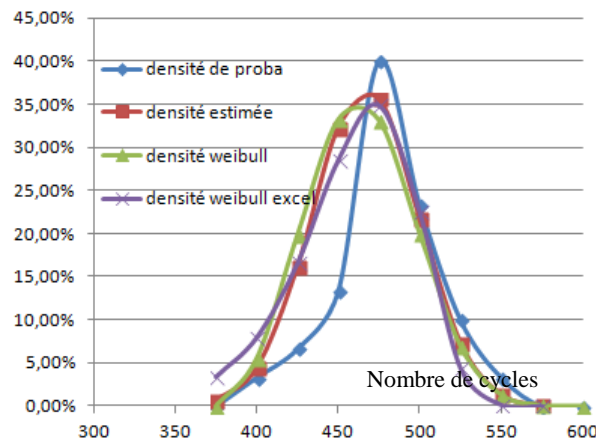


Fig 7. Densité de probabilités réelle et estimée avec différentes lois de probabilité.

Mais ces estimations statistiques ne sont pas viables, s'il y a des cellules de batterie mortes prématurément bien avant la valeur moyenne.

Exemple sur 30 cellules, s'il y a une cellule morte au bout de 100 cycles et une autre au bout de 200 cycles avec ensuite

toutes les autres cellules qui présentent des défaillances identiques aux tests de cyclabilité de cellules précédentes.

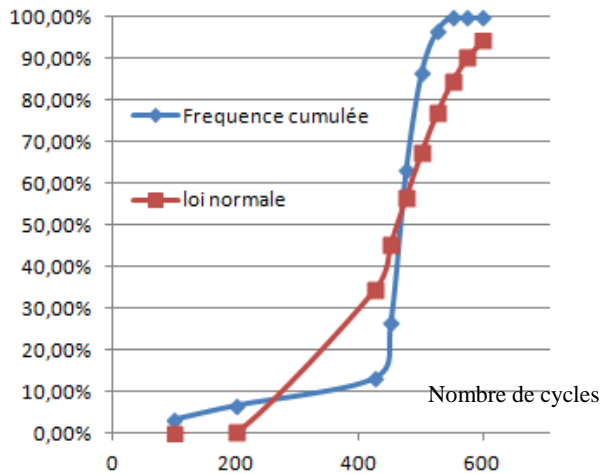


Fig 8. Défaillance réelle et estimée avec la loi normale avec deux cellules mortes au bout de 100 et de 200 cycles sur 30 cellules.

On comprend que la mort subite d'éléments ne permet pas d'avoir une confiance ultime dans les batteries et provoque des coûts de contrats de maintenance de l'accumulateur non négligeables ?

La différence de cycles entre les fabricants peut être très grande tel que 400 cycle chez LG à 4500 cycles chez Leclanché avec 100% de DOD. Ces 4500 cycles peuvent atteindre 8000 cycles avec 80% de DOD. Evidemment, il y a une différence notable de tarif entre les 2 fabricants.

Mais comment connaître l'estimation de la durée de vie en fonction d'une utilisation qui n'est souvent pas régulière ? En effet, le besoin d'utilisation est difficile à définir pour un véhicule électrique. Celui-ci peut changer en fonction des saisons mais aussi en fonction de l'état d'esprit de son utilisateur. De même, la politique énergétique peut évoluer et ainsi, au cours des ans, modifier le besoin de stockeurs.

#### 4. ESTIMATION DE LA DUREE DE VIE

L'estimation de la durée de vie des batteries est effectuée par de nombreuses méthodes d'interpolation lorsqu'une des cellules aura atteint un SOH de 80 % car au-delà le SOH diminue très rapidement lors des essais. L'autre facteur est l'augmentation de la résistance interne au-delà de 400% de la résistance nominale. En effet, cela provoque des chutes de tension importantes qui déclenchent le BMS bien avant la fin de la capacité énergétique de la batterie. De plus, il y a une augmentation de la température de la cellule incriminée.

Les tests de cyclabilité et de modélisation sont relativement longs et ne représentent pas l'utilisation que l'on fait parfois du système.

De plus, la durée de vie à partir de la consommation et de la profondeur de décharge DOD, n'est pas linéaire pour les batteries.

D'ailleurs sur la figure 9, on peut s'apercevoir que pour une profondeur de décharge de 50%, il y a 4 fois plus de cycles possibles par rapport à une profondeur de 100%. La capacité énergétique utilisable est donc double avec des profondeurs de décharge de 50 % par rapport à 100 %.

Le modèle de la courbe mathématique non linéaire de la figure 9 correspond à l'équation suivante :

$$\text{nbr de cycle} = 2.510^6 \cdot \text{DOD}^{-1.7} \quad (7)$$

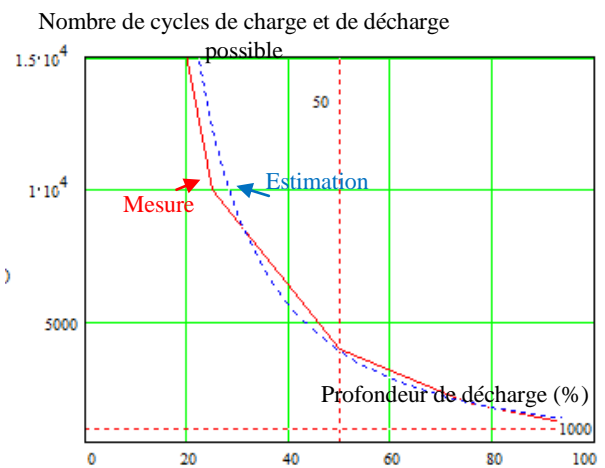


Fig 9. Nombre de cycles de charge en fonction du DOD (profondeur de décharge) d'éléments LiNMC.

En conséquence, la consommation possible sur la figure suivante en fonction du DOD est presque linéaire avec pour estimation (8) :

$$\text{ConsommationPos(A.h)} = \text{nbr de cycle} \cdot \frac{\text{DOD}(\%)}{100} \cdot \text{capacité} = 2.510^6 \cdot \text{DOD}^{-0.7} \cdot 2.5\text{A.h}$$

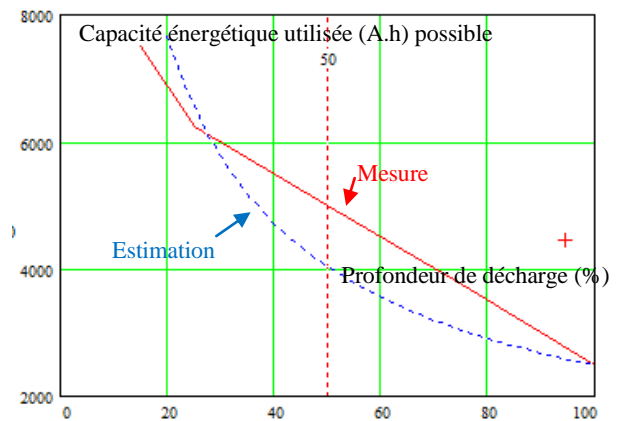


Fig 10. Nombre d'Ampères-heures utilisés en fonction du DOD d'éléments LiNMC 2.5A.h.

En revanche, en fonction de son utilisation et pour savoir si le SOH n'est pas trop affectés. Des tests sont effectués trimestriellement avec une décharge de 100% du SOH.

Après un certain nombre de tests, la durée de vie de la batterie peut être estimée par interpolation linéaire.

Exemple, on peut observer sur la figure suivante le SOH d'un de nos vélos. 4 cellules sur 36 ont été changées à cause de morts subites sur l'accumulateur.

L'écart entre les points n'est pas constant car le nombre de kilomètres et la consommation ne sont pas constants. Notamment, l'utilisation l'hiver est un peu plus faible que l'été. Avec une utilisation assez conséquente, il faut 8 points (2 ans) pour avoir une interpolation linéaire ou l'équation de la tendance permettant d'avoir une estimation de la durée de vie de la batterie.

La problématique, c'est que la technologie et la chimie des batteries évoluent très rapidement. De plus, les écarts, au niveau de la durée de vie entre 2 constructeurs, peuvent aller du simple ou double.

Ce qui est valable pour une marque n'est pas valable pour les autres. De même, ce qui valable hier ne sera pas valable demain si la chimie ou le process du fabricant change.

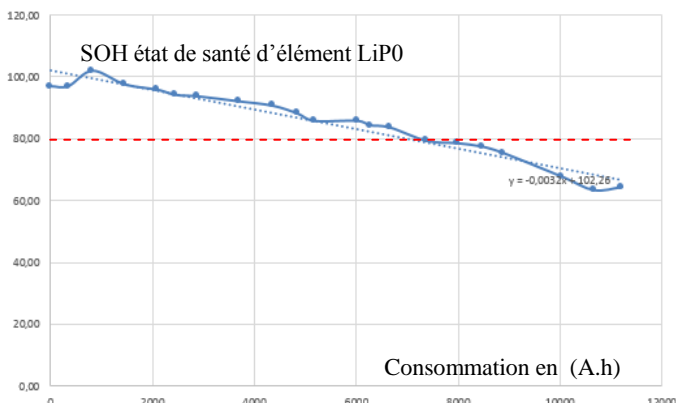


Fig 11. Etat de santé d'une batterie de vélo pendant 5 ans pour une utilisation aléatoire d'une batterie 20A.h 36 éléments.

Evidemment, chaque application étant différente, la stratégie de réalisation d'un accumulateur sera différente. 2 applications radicalement différentes seront présentées.

### 5. APPLICATION VELO ELECTRIQUE

Notre laboratoire a réalisé de nombreux vélos électriques qui sont utilisés tous les jours et nous avons des études avec un retour d'expérience de la société Cristalyte Europe et ses retours de garantie et de maintenance.

Les vélos électriques carénés de 2100W [5], 72V demande une autonomie maximale journalière de 150 km avec une consommation moyenne de 10 W.h/km donc 1500 W.h. Ce vélo peut être rechargé souvent toutes les 2 heures mais cela doit être fait rapidement. En effet, la charge ne demande pas une grosse puissance (1440 W). Les prises sont ainsi nombreuses pour pouvoir faire le recharger. Le taux de décharge est faible 1.5C et celui de la charge est de 1C avec 1500 W. La durée avec un taux de décharge à 1.5 C est faible car il correspond aux accélérations et aux grandes montées. En revanche, le vélo demande de minimiser la masse et le volume de l'accumulateur.

Suite à l'étude de l'analyse de l'utilisation de nos vélos électriques, l'utilisation sur une année correspond à la pratique suivante. :

- 65% du temps pour moins de 20 km/jr donc 4745 km/an et 13% DOD.
- 20% du temps pour moins de 60km/jr donc 4380 km/an, 40% DOD
- 15% du temps pour des trajets de 150 km/jr donc 8212 km/an 100% DOD mais souvent il y a une recharge pendant le midi de 720 W.h et donc la décharge est souvent inférieure à 70% de DOD.

Etant donné que les fabricants donnent seulement le nombre de cycles de vie, pour faire une estimation de la durée de vie de la batterie, il faut transformer l'utilisation précédente qui va donner la consommation annuelle en A.h avec un nombre de cycles à 80% avec les 2 équations suivantes :

$$\text{conso annu(W.h)} = 365 \cdot \sum \text{dis tan ce} \cdot \text{conso} \cdot \text{utilisation} \quad (9)$$

$$\text{Nbrcycle\_equivalentpan} = \text{conso annu} / (\text{tension} \cdot \text{capacité} \cdot 0.8) \quad (10)$$

Toujours pour notre utilisation, la consommation annuelle est de 2480 A.h donc pour 155 cycles équivalents à 80% de 20 A.h malgré une charge tous les jours. En revanche, cette consommation correspond à 590 cycles équivalents à 80% en

LTO (5A.h) qui a une capacité énergétique 4 fois plus faible que les Li MCN mais qui peuvent se recharger 4 fois plus vite.

Etant donné que la durée de vie est plus grande lors des faibles profondeurs de décharge. L'estimation de la durée de vie en cycles équivalents vue précédemment, est donc prise par défaut.

4 technologies sont donc possibles mais le temps de charge 1C étant faible pour les LFP, LiPO et LiMCN fait que la batterie doit faire 1500W.h alors que pour la batterie LTO peut faire 300W.h.

Par conséquent, la configuration des batteries est :

- LFP A123 poche (21 éléments séries de 20 A.h à 30 €) donc avec un taux de décharge 1.5C, une durée de vie est estimée à 7 kcycles à 100% de DOD pour ce type de charge et décharge et un vieillissement calendaire prévue de 10 ans.
- LTO de 1,3 A.h 4 € boîtier 18650 (30 séries et 4 parallèles) avec un taux de décharge 6C et de charge 4C, la durée de vie est estimée à 7 kcycles à 100% de DOD. En revanche, en diminuant la puissance demandée au moteur à 3C, une durée de vie estimée à 15 kcycles est possible mais il y aura moins d'accélération du véhicule. Le vieillissement calendaire est de plus de 12 ans.
- li MCN boîtier18650 (136 éléments à 3 € de 2.5A.h (17 séries et 8 parallèles) avec un taux de décharge 1.5C, la durée de vie est estimée à 400 cycles à 100% de DOD et à 800 cycles à 50% du DOD. Cependant, le vieillissement calendaire est limité à 4 ans.
- LiPO poche de 10 A.h de marque YUNTONG ou GTK (18 éléments séries et 2 parallèles) donc avec un taux de décharge 1.5C, la durée de vie est estimée à 500 cycles à 80% de DOD pour ce type de charge et décharge et un vieillissement calendaire de 5 ans.

Le tableau ci-dessous fait la synthèse avec le coût de revient pour 10 ans. Donc en cycles équivalents, les LFP devront supporter 1550 et 5900 cycles pour les LTO, sans prendre en compte le nombre de cycle en fonction du DOD.

Tableau 1. Comparatif de technologie d'un accumulateur (1500 W.h/ 72V)

Type batterie	Prix/cell	nbr série	nbr //	masse (kg)	vol (dm <sup>3</sup> )	prix accu €	Cycle vie	Prix à 10 ans
Li MCN 3A.h 50g	3	19	8	7	3.3	456	0.5k	1413
LTO 1.3A.h 37g	4	30	4	4.0	2.4	480	7k	404
LFP 20A.h 0.5kg	30	21	1	10.6	5.6	630	7k	140
LiPO 10A.h 0.2kg	10	18	2	7	3.4	360	0.5k	1116

On peut observer que les éléments LFP sont les moins chers à longs termes par rapport aux autres sans avoir la problématique d'être rechargés souvent pour les LTO et d'emmener son chargeur partout (masse non négligeable de 2.5 kg).

A ce jour, les vélos électriques dont certains date de 2009 ont plus de 30 000 km. La maintenance des li-MCN de l'accumulateur doit se faire parfois à cause d'une mort subite d'un élément (dendrite ou résistance interne trop grande provoquant le non fonctionnement de la batterie)

De même, pour les LiPO, tous les ans, 1 élément a du être changé à cause de résistance interne trop grande et une capacité énergétique inférieure à 60% ainsi que parfois un gonflement de la poche.

En revanche, aucune maintenance pour les LFP A123, mais une mort subite pour les éléments LFP Poniions qui ont un nombre de cycles de vie données par le constructeur bien plus faible que les A123

Avec l'utilisation précédente sur un vélo droit, presque tous les ans, la batterie qui est une LiMCN, devait être changée.

En effet, les vélos droits électriques consomment en moyenne 40 W.h/km. Donc, le nombre de cycles par an moyen est de 620, cela dépasse ainsi la durée de vie de l'accumulateur. D'ailleurs, en fin de vie, l'autonomie des accumulateurs LiMCN n'est plus que de 70%, voire moins. Par conséquent, ces éléments ne sont plus—été utilisés malgré leur avantage massique et volumique.

Les taux de charge à 1C et décharge 1.5C utilisé ne provoquent pas d'échauffement problématique. De plus, le courant de décharge de la batterie n'étant pas constant, l'incrément de température n'excède jamais 20°C. Elle ne demande donc pas à être refroidie.

Les chargeurs ont des BMS intégrés et permettent de savoir si un élément à une résistance trop grande. De plus, les chargeurs ont une mesure de la résistance interne pour chaque élément au mΩ près. Les disparités résistives sont assez faibles et ne permettent pas de faire une synthèse. En revanche, dès qu'il y a un gonflement de poche ou un perçage de poche, la résistance est fortement augmentée de plus de 300 %. Cela provoque des temps de charge beaucoup plus longs à cause du manque d'équilibrage.

Evidemment, la stratégie pour un stockeur sera radicalement différemment.

#### 6. APPLICATION A UN STOCKEUR A BATTERIES

Réalisation d'un stockage d'énergie pour la SNCF de 800 V, 63 kA.h, 50 MW.h, avec un taux de charge et décharge de 0.065C (3,2 MW) de 12 heures à 80% de DOD.

L'objectif de ce stockeur est de [10, 11,12] :

- réaliser des trains hybrides,
- de minimiser les chutes de tension du réseau,
- que les trains puissent arriver à destination, malgré une coupure éventuelle du réseau.
- de lisser le prix de l'énergie électrique aux heures de pointes dont le coût est beaucoup plus élevé que celui des heures creuses.

La SNCF demande, en général, que leurs différents systèmes garantissent un fonctionnement pendant 30 ans.

Ce stockeur demande une utilisation de 2 fois par jour à presque à 40 MW.h donc 80% du DOD et donc 20 000 cycles de durée de vie sur 30 ans

Ce stockeur demande énormément d'éléments en fonction de la capacité énergétique des éléments et en fonction de leur technologie avec une certaine configuration qui va être préjudiciable à la fiabilité du système.

Cependant pour un système comme ce stockeur, une modularité d'éléments parallèles de 120 kg a été prévue. Chaque rack de même dimension de 0.088m<sup>2</sup> est indépendant électriquement et peut être coupé de la source.

La durée de fonctionnement demandée n'est pas compressible, elle ne permet donc pas de minimiser la capacité énergétique des batteries LTO par 4 de la batterie malgré ces possibilités de recharge rapide à 4C.

- Rack LTO de 30 A.h (20 séries et 3 parallèles) donc de 46 V et 4.2KW.h de 100 kg à 8400 € avec une durée de vie estimée à 15 000 cycles à 4C charge et décharge. Le vieillissement calendaire est de plus de 20 ans.

- Rack LiMCN 42 A.h (60 séries et 3 parallèles) donc de 73 V et 9.6 KW.h de 100 kg à 9600 € avec une durée de vie estimée à 8 000 cycles à 1C. Le vieillissement calendaire est de 10 ans.

On peut observer dans le tableau suivant, les 3 technologies avec le nombre de cellules et la configuration. Enfin le prix de l'accumulateur ainsi que le prix pour une utilisation de 15 kcycles est indiqué.

Tableau 2. Comparatif de technologie pour le stockeur

Type batterie	Prix/cell	nbr série	nbr //	masse (T)	Vol (m <sup>3</sup> )	prix accu M€	Cycle vie	Prix à 15k cycles
LTO 30A.h 1,1kg	130	364	2100	840	4649	99	15k	99
LFP 700A.h 21kg	700	242	90	458	236	15	7k	32
LiMCN 43A.h 1kg	50	216	1465	317	1928	16	4.5k	52

A ce jour, on peut observer que par rapport au prix de l'utilisation des batteries LTO n'est pas très rentable (par rapport aux batteries LFP et LiMCN) car le prix des LTO est encore trop important. En plus, cela demande un génie civil plus conséquent. En effet, le volume et la masse sont bien plus importants que pour les autres technologies.

Si la fiabilité de la batterie et son BMS sont importants, la fiabilité des systèmes de recharge doit aussi être prise en considération. D'ailleurs, il y a un chargeur pour chaque rack.

Les stockeurs à volants d'inertie offrent des durées de vie importantes mais pour optimiser le volume, la masse et le rendement la régénération est de moins d'une heure. Par conséquent, les volants d'inertie ne sont pas une alternative à l'utilisation de ce stockeur à batterie qui a une génération de 12h.

#### 7. CONCLUSION

Le choix d'une technologie d'une batterie va dépendre de nombreuses caractéristiques techniques (résistance interne, capacité énergétique, taux de décharge, masse, volume, durée de vie, disparité entre les éléments, système de surveillance, modularité...) mais aussi commerciale à cause du prix qui est en fonction entre l'offre et de la demande mais aussi de la fluctuation des matières premières. Le prix dépendra aussi de la qualité de fabrication et de la chimie utilisée.

Une faible évolution technique et du marché font qu'une technologie de batterie peut devenir prépondérante par rapport à une autre. Cet article montre aussi la difficulté de faire un choix entre une technologie par manque d'informations de la part des constructeurs.

En revanche, en fonction de l'utilisation, l'article démontre qu'il est possible avec la diminution du SOH d'estimer la durée de vie.

L'article démontre que les morts subites et l'arrêt de fonctionnement du BMS de l'accumulateur de l'élément le plus faible ne permet pas d'estimer correctement la durée de vie.

Notons par ailleurs, que seules les grandes entreprises peuvent vendre un système avec une garantie très longue (de plus de 10 ans) avec des extensions de garantie et de contrats de

maintenance et cela pour des produits de nouvelles générations adaptables aux anciennes.

## 8. REFERENCES

- [1] T. Baumhöfer, M. Brühl « Production caused variation in capacity aging trend and correlation to initial cell performance » Feb 2014 Journal Power Sources
- [2] N. Williard, W. He, "Reliability and Failure Analysis of Lithium Ion Batteries for Electronic Systems" 2012 13th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging
- [3] Zhitao Liu a, CherMingTan , "A reliability-based design concept for lithium-ion battery pack in electric vehicles" October 2014
- [4] Ecker.M, Nerea Nieto. N " Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O<sub>2</sub>-based 18650 lithium-ion batteries", February 2014 Journal Power Sources
- [5] A. Sivert, F. Betin, B. Vacossin, M. Bosson, "Capacité énergétique, diagnostic, durée de vie de batterie Lithium Application à l'estimation de l'autonomie d'un véhicule électrique" Revue 3EI N°84, Avril 2016
- [6] T. Bruen, J. Marco « Modelling and experimental evaluation of parallel connected lithium ion cells for an electric vehicle battery system" april, 2016, [Journal of Power Sources](#)
- [7] R. Gogoana, B. Pinson "Internal resistance matching for parallel-connected lithium-ion cells and impacts on battery pack cycle life" April 2014, Journal of Power Sources
- [8] A. BARRÉ « Analyse statistique de données issues de batteries en usage réel sur des véhicules électriques, pour la compréhension, l'estimation et la gestion des phénomènes de vieillissement », thèse Octobre 2014, U Grenoble
- [9] A. Sivert, F. Betin, B. Vacossin "Fiabilité d'éléments d'accumulateurs Lithium 18650 (mise en étude)" Revue 3EI N°93, juin 2018
- [10] M. POLINE, L. GERBAUD « Dimensionnement optimal de train hybride : comparaison entre différents types de batteries » revue 3EI N°89 July 2017
- [11] M. Thiounn, «Evaluation of the hybrid locomotive "Plathee" - A Platform for Energy Efficiency and Environmentally Friendly Hybrid Trains",» World Congress on railway research, WCRR, May 2011.
- [12] O. BOSSI, Contribution au dimensionnement et à la gestion par optimisation de systèmes de stockage d'énergie pour les réseaux électrique ferroviaires, thèse Grenoble, 2016.
- [13] K. Zaghbi, M. Dontigny, A. Guerfi, P. Charest, "Safe and fast-charging Li-ion battery with long shelf life for power applications" Journal of Power Sources April 2011
- [14] D. Anseán, M. González "Fast charging technique for high power lithium iron phosphate batteries: A cycle life analysis"