



Accueil

Projet Nordkyn

Projet Sud Sauvage

Voile

Technologie

À Propos De Nordkyn Design

Articles En Vedette

Produits

Sep  
27  
2015

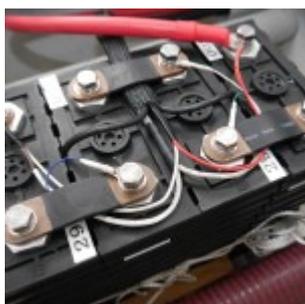
## Lithium Batterie Banques – Fondamentaux

Électrique, Systèmes de batteries au lithium,  
Ingénierie maritime

[Ajouter commentaires](#)

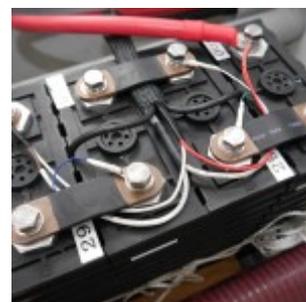
Dernière mise à jour le 21 février 2021 par [Éric Bretscher](#)

*Cet article fait partie d'une série il s'agit de construire les meilleurs systèmes de batteries au lithium de sa catégorie à partir de cellules nues, principalement pour un usage marin, mais une grande partie de ces matériaux sont également pertinents pour les systèmes hors réseau basse tension.*



Des centaines, sinon plus, d'articles de recherche ont été publiés sur les batteries au lithium, ainsi que de nombreux livres. Pourtant, beaucoup de ce matériel n'est pas très applicable aux batteries au lithium à bord des navires marins et peut être trompeur : le type d'application et d'utilisation considéré sont trop différents, la chimie n'est pas la même... les raisons sont nombreuses. Certaines de ces recherches sont très pertinentes cependant. J'ai perdu la trace il y a longtemps du nombre de publications que j'ai lues ou étudiées sur les batteries au lithium dans le processus de conception et de construction de tels systèmes. L'un des meilleurs livres disponibles sur le sujet à l'heure actuelle est *Conception et analyse de grands systèmes de batteries lithium-ion* [1]. Cet article est une tentative de synthétiser les informations fondamentales les plus essentielles sur les piles au lithium pour ceux qui souhaitent les utiliser pour construire des banques de maisons marines.

### Systèmes de batteries au lithium



Merci d'avoir soutenu ce contenu!



### Dernier

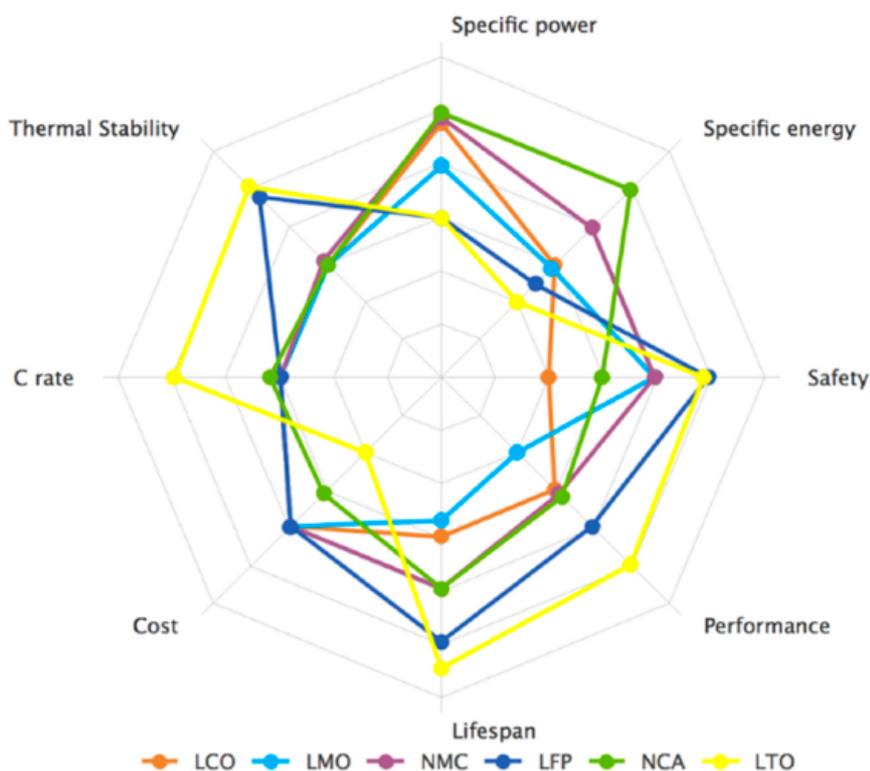
Motor-Zuverlässigkeit :  
Boîte noire Ein Blick auf die Volvo Penta MDI  
Chargement des batteries au lithium marin  
Fiabilité du moteur : un aperçu de la boîte noire Volvo Penta MDI  
Système antisalissure à ultrasons – Partie 2, Lutte contre la croissance des algues  
Système antisalissure à ultrasons – Partie 1, Développement et construction

## Les batteries au lithium détestent absolument être traitées comme des batteries au plomb

Ce matériau est essentiel à lire et à comprendre si vous envisagez sérieusement de passer à une banque de lithium : les batteries au lithium sont très, très différentes des batteries au plomb traditionnelles. Il ne s'agit pas seulement d'échanger.

## Batteries lithium-ion

Premièrement, pour clarifier la terminologie, lithium-ion fait référence à une famille des chimies de batterie, pas un type spécifique de batterie. Il existe de nombreux types de batteries lithium-ion, chacune avec ses points forts et ses faiblesses, comme le montre le tableau d'araignées suivant [6]. Leur caractéristique commune est juste que  $\text{Li}^+$  les ions agissent comme porteurs de charge.



*Résistance et faiblesses des produits chimiques courants des batteries lithium-ion : LCO – lithium-oxyde de cobalt (1991), LMO – lithium-oxyde de manganèse (1996), NMC – lithium-nickel-oxyde de manganèse (2008), LFP – lithium-phosphate de fer (1993), NCA – lithium nickel cobalt oxyde d'aluminium (1999), LTO – oxyde de titanate de lithium (2008).*

Phosphate de fer et de lithium ( $\text{LiFePO}_4$ , (, parfois aussi appelé LFP) et l'oxyde de titane de lithium (LTO) sont de loin les types de batteries au lithium les plus robustes développés jusqu'à présent, mais ils présentent tous deux des densités d'énergie relativement faibles. Les performances

Protection et gestion des banques de batteries au lithium marin

### Sujets

- Construction
  - Aluminium
  - Coût
  - Noyau de mousse
- Conception
  - Conception de bateau à moteur
  - Conception de yachts à voile
  - Navigabilité
- Page d'accueil
- Ingénierie maritime
  - Électrique
    - Systèmes de batteries au lithium
  - Électronique
    - Évitement des collisions
    - Antifouling ultrasonique
- Propulsion
- Voile
  - Dynamique météorologique lourde
  - Mariage
  - Stabilité

### Recherchez Nordkyn Design

Recherche

### Suivre

 S'abonner dans un lecteur  
 Suivez par e-mail

### Contact

[contact@nordkyndesign.com](mailto:contact@nordkyndesign.com)

supérieures et la durée de vie potentielle du LTO sont problématiques à justifier en raison de son coût élevé, ce qui fait de la chimie LFP le choix le plus logique pour les applications de banques de maisons marines. Les autres types de batteries lithium-ion sont pour la plupart totalement inadaptés et déconseillés pour une utilisation à bord d'un yacht en raison de leur faible stabilité thermique et ils cela ne représenterait pas du tout un choix sensé et sûr à bord. En conséquence, les informations présentées sur ce site s'appliquent spécifiquement aux cellules au lithium fer phosphate et aux banques de batteries.

## Qu'est-ce qu'un $\text{LiFePO}_4$ Cellule de batterie?

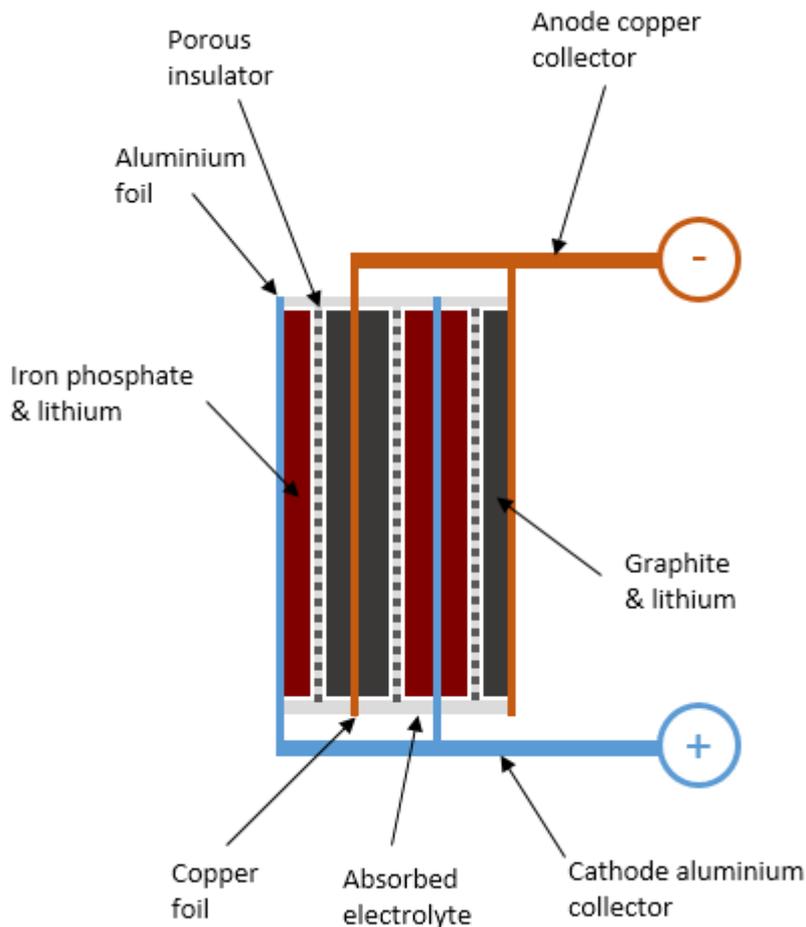
Avant de discuter des aspects "do et don't" de  $\text{LiFePO}_4$  batteries, développer une compréhension de base de leur construction et de leur chimie est très utile. D'une certaine manière, nous avons tendance à ne pas négliger si facilement ce que nous comprenons. Dans le cas des batteries au lithium, couper les coins n'est pas une option.

## Structure interne de la cellule

À l'instar d'une cellule plomb-acide, un  $\text{LiFePO}_4$  la cellule de batterie est formée de plaques positives (cathode), de plaques négatives (anode), de séparateurs isolants poreux les empêchant de se court-circuiter et d'un liquide conducteur (électrolyte) les entourant. Les différences résident dans les matériaux utilisés et dans le fait qu'une batterie au plomb fonctionne par des réactions chimiques transformant ses composants, alors qu'une batterie au lithium déplace simplement les ions lithium pendant la charge et la décharge, laissant tout le reste dans la batterie en grande partie inchangé.

Par définition, l'anode d'un appareil est le côté où le courant entre ; la cathode est l'endroit où il s'écoule. Pour cette raison, la borne positive d'une batterie est la cathode. Cela peut sembler contre-intuitif au début, car l'anode d'une diode est du côté positif.

L'anode d'un  $\text{LiFePO}_4$  la cellule est constituée d'une feuille de cuivre hautement conductrice recouverte de graphite poreux. La cathode est en aluminium recouvert d'un matériau lithium fer phosphate, une sorte de céramique. La capacité spécifique du matériau lithium fer phosphate est d'environ 140 mAh par gramme, donc une cellule de 100 Ah a besoin d'un peu plus de 0,7 kg de matière active dans sa cathode.



*Structure interne d'une pile de batterie au lithium fer phosphate dans un état partiellement chargé.*

Afin de créer une batterie, un électrolyte conducteur doit être prévu pour permettre le transfert de charges entre l'anode et la cathode. L'électrolyte est formé d'un sel de lithium (hexafluorophosphate de lithium,  $\text{LiPF}_6$  typiquement) dissous dans un solvant organique : une combinaison de carbonate d'éthylène, de carbonate de diméthyle, de carbonate de propylène avec divers autres additifs. Ce solvant est très inflammable et entièrement absorbé dans les plaques poreuses et le séparateur. Contrairement à une cellule plomb-acide inondée, il n'y a pas de liquide libre dans un  $\text{LiFePO}_4$  cellule.

Une batterie dans l'état décrit ci-dessus est entièrement déchargée, avec la totalité du lithium présent dans la cathode et l'électrolyte. Ceci correspond à une cellule nouvellement fabriquée. Le fabricant effectue alors *cycles de formation* pour obtenir une cellule utilisable ultérieurement et qui durera. Les cycles de formation contrôlent le développement initial des couches d'Interface Solide/Électrolyte (SEI) à la surface des plaques. La couche SEI provient de réactions chimiques entre l'électrolyte et les électrodes ; elle stabilise la cellule chimiquement, mais continue également à croître progressivement au cours du temps, jusqu'à ce qu'elle devienne préjudiciable à son fonctionnement. Une notion importante est que la couche SEI croît beaucoup plus rapidement

dans le temps à des températures élevées La protection des piles au lithium contre la chaleur est essentielle en termes d'atteinte d'une longue durée de vie L'objectif devrait être d'essayer de les maintenir autour de quelque 15-25°C (59-77°F) autant que possible.

## Cellules prismatiques versus cylindriques

Les cellules peuvent être construites en empilant des plaques parallèles, comme illustré ci-dessus, ou à partir de longues bandes simples roulées sur elles-mêmes en cylindre ou cylindre aplati Les premières sont désignées par cellules prismatiques (en forme de boîte), les secondes sont des cellules cylindriques ou enroulées Leur chimie est exactement la même, les, la principale différence réside dans leur construction et leur capacité à dissiper la chaleur générée en interne et dans une certaine mesure leur coût. Les cellules prismatiques sont parfois encapsulées dans des sachets synthétiques souples au lieu d'un boîtier dur, mais les cellules de pochette sont beaucoup plus fragiles mécaniquement et plus problématiques à travailler.



*Les cellules prismatiques sont de tailles beaucoup plus grandes que les petites cellules cylindriques Les batteries sont parfois assemblées intérieurement à partir d'un grand nombre de petites cellules cylindriques.*

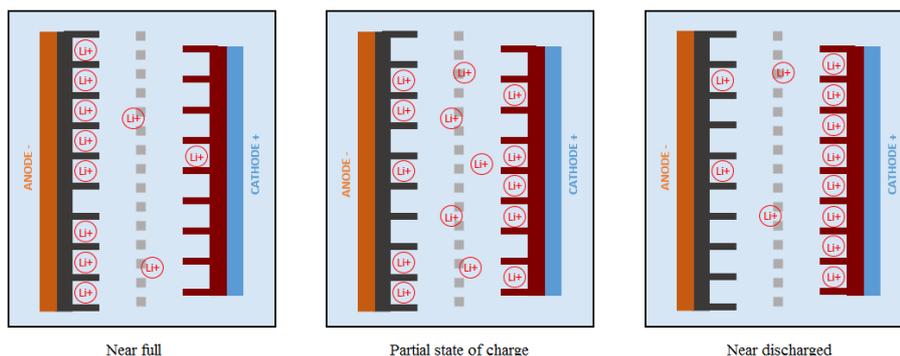
Les cellules bobinées, et les petites cellules cylindriques en particulier, sont moins chères à fabriquer que les plus grosses prismatiques pour une capacité donnée Elles ont également une densité d'énergie volumétrique plus élevée, mais leur section ronde empêche de les tasser ensemble sans interstices et cet avantage ne s'étend pas à la batterie assemblée. Les écarts entre les cellules peuvent présenter un avantage pour le refroidissement lorsqu'une gestion thermique est nécessaire en raison de courants très élevés, mais, dans les applications marines, les courants sont modestes et les cellules de la batterie ne semblent jamais dépasser de plus de quelques degrés la température ambiante Mécaniquement, les cellules cylindriques sont très robustes et très

résilientes aux dommages mécaniques dus aux chocs et aux vibrations, ce qui est bon dans les véhicules électriques.

Les cellules prismatiques semblent mieux vieillir et offrent plus de cycles en fonctionnement que les petites cellules cylindriques, mais cela peut être spécifique aux profils d'utilisation à courant élevé. Les systèmes de batteries au lithium marin sont normalement construits à partir de cellules prismatiques, pour des raisons pratiques avant tout : ils sont beaucoup plus faciles à interconnecter qu'un nombre extrêmement important de petites cellules cylindriques.

## Mécanismes de charge et de décharge

Lorsque la batterie est chargée, le lithium quitte la cathode, migre à travers l'électrolyte et dans l'anode pour former du  $\text{LiC}_6$  comme le lithium s'insère dans la matrice graphite ; dans le même temps, le  $\text{LiFePO}_4$  la cathode se transforme progressivement en phosphate de fer  $\text{FePO}_4$  seulement. À l'inverse, la décharge épuise l'anode en graphite et réinsère le lithium dans la structure cristalline du phosphate de fer de la cathode.



*Migration des ions lithium dans une cellule au lithium fer phosphate tout au long de la charge et de la décharge.*

L'insertion d'ions lithium dans l'un ou l'autre matériau est appelée *intercalation*. Tant le graphite que les matériaux de phosphate de fer sont très stables structurellement, avec ou sans la présence de lithium dans eux, c'est pourquoi ces batteries peuvent être si durables. Ils ne souffrent pas structurellement du processus d'intercalation et de désintercalation du lithium, et par extension ils sont largement immunisés contre le cyclage.

**Ne laissez jamais les batteries au lithium reposer complètement chargées**

Lorsque le sel de lithium est initialement dissous dans l'électrolyte, il se décompose naturellement en ions lithium  $\text{Li}^+$  et les ions hexafluorophosphates  $\text{PF}_6^-$ . Vers la fin de la charge, la cathode manque

de lithium, la quantité d'ions lithium libres dans l'électrolyte diminue rapidement et la tension de la cellule commence à monter très vite. Les électrodes deviennent également beaucoup plus réactives chimiquement à l'égard de l'électrolyte : ce dernier phénomène est néfaste pour la cellule et *plus cette condition persiste longtemps, plus elle provoque une dégradation interne*. Une température ambiante élevée l'accélère encore. La composition électrolytique et les additifs sont les principaux points de différenciation entre les fabricants ; les additifs ont une incidence considérable non seulement sur les performances des cellules, mais également sur l'espérance de vie éventuelle, car ils modifient la façon dont la capacité s'estompe avec le temps en contrôlant le taux de croissance de la couche SEI.

## Capacité actuelle

Pendant la charge, lorsque les ions lithium sont extraits de la cathode de phosphate de fer et insérés dans la structure poreuse en graphite de l'anode, ces ions sont initialement insérés près de la surface puis migrent progressivement plus profondément dans le graphite. Ils ont besoin d'un certain temps pour pouvoir le faire, ce qui crée une limite à la vitesse à laquelle une pile au lithium peut absorber le courant. Si cette limite est dépassée, le lithium placage se produit et il est irréversible, donc ce lithium est perdu par la suite dans la cellule et cela se traduit par une perte permanente de capacité. Pour cette raison, une limite existe sur le taux de charge maximal admissible et cette limite est également dépendante de la température, car l'insertion des ions lithium est plus lente et plus difficile à des températures plus basses.

En décharge, la mobilité ionique est également entravée par les basses températures, mais la décharge est sûre à n'importe quelle température car elle ne se produit aussi vite qu'elle le peut et la tension de la cellule chute si le courant est trop élevé. À des températures où les performances de la cellule ne sont pas affectées, les taux de décharge peuvent être limités par les effets thermiques ; cela peut poser problème dans les applications de véhicules électriques lors d'accélération élevées, mais normalement pas pour les berges marines où les courants de décharge sont pour la plupart modestes par rapport à la taille de la batterie.

## Lithium Plaqué

Le placage au lithium est un phénomène qui mérite son propre paragraphe car il provient principalement d'une mauvaise gestion des cellules. Il est très nocif et entraîne une perte de capacité irréversible. Le placage au lithium fait référence à la formation de lithium métal solide au sein des cellules. Le lithium métal se forme lorsque le mécanisme d'intercalation des ions lithium ne s'effectue pas normalement et que du

lithium solide peut se déposer à la surface de l'anode ou sur ses bords généralement. Il existe un petit nombre de situations bien connues qui favorisent le placage du lithium:

- **Taux de charge excessifs.** Si le taux de charge dépasse le taux d'absorption de la cathode pour les ions lithium, le lithium métal est plutôt déposé sur la surface de l'électrode. La plupart des fabricants recommandent de faire fonctionner les cellules à un niveau égal ou inférieur à 0,3°C, bien que des taux de charge beaucoup plus élevés soient facilement réalisables. Les générations de cellules les plus récentes sont évaluées pour un fonctionnement soutenu jusqu'à 0,5°C.
- **Chargement à température froide.** Les températures proches ou inférieures au point de congélation réduisent considérablement le taux d'absorption des ions lithium dans la cathode en graphite, car l'insertion du lithium devient plus difficile. En d'autres termes, les taux de charge acceptables à des températures ambiantes normales deviennent excessifs dans des conditions froides.
- **Chargement par infidélité.** La charge par filetage provoque le transfert de la totalité du lithium présent dans les cellules vers l'électrode positive, qu'il puisse être normalement inséré dans la cathode de carbone ou non. Tout lithium qui ne peut pas être absorbé finit normalement par plaquer la cathode.

D'après ce qui précède, il devrait être évident qu'un régime de fonctionnement combinant des charges rapides suivies d'une charge par ruissellement est particulièrement néfaste. Une charge rapide a tendance à saturer la surface de l'anode avec des ions lithium puis toute charge supplémentaire entraîne un placage au lithium. Ce scénario peut très facilement être réalisé sur les installations marines où l'accent a été mis sur la recharge rapide grâce à l'utilisation d'un moteur et d'alternateurs (ou de chargeurs CC haute capacité) et où les systèmes d'énergie renouvelable ne parviennent pas à mettre en œuvre correctement une terminaison de charge et à maintenir la cellule. tensions élevées.

## Considérations de sécurité avec les cellules lithium-ion et $\text{LiFePO}_4$

### Chimie

La sécurité est un sujet important dans le contexte des batteries au lithium, pour la simple raison qu'elles sont capables de s'enflammer violemment et de brûler extrêmement chaud et peuvent être problématiques à éteindre.



*Un incendie dans une batterie au lithium fer phosphate a totalement détruit ce véhicule électrique de bricolage, faisant fondre du verre et de l'aluminium. (Photo Greg Fordyce, février 2009)*

Il existe de très nombreux types de chimies lithium-ion sur le marché, et d'autres sont sans doute à venir. Jusqu'à présent, une seule est réellement éligible à l'installation sur les bateaux, et encore plus pour la construction de systèmes de bricolage, en raison de sa température d'inflammation beaucoup plus élevée : le phosphate de lithium fer ( $\text{LiFePO}_4$ ).

### Le diable que vous connaissez contre le diable que vous ne connaissez pas

$\text{LiFePO}_4$  les cellules sont incroyablement stables et robustes chimiquement par rapport aux autres variantes et elles sont également fabriquées dans des tailles qui sont pratiques pour assembler les banques de maison. Cela se traduit principalement par une cellule de batterie qui est extrêmement difficile (mais pas impossible) à enflammer. Compte tenu des gaz explosifs produits par les cellules au plomb lors de la charge et des risques qui y sont associés,  $\text{LiFePO}_4$  en comparaison, les cellules devraient probablement être considérées comme nettement plus sûres, mais elles n'ont pas les longs antécédents en matière de chimie plomb-acide.

Les batteries, quelle que soit leur chimie, contiennent des quantités importantes d'énergie stockée, non seulement électrique mais aussi chimique,

## et peuvent causer des dommages considérables en cas de problème majeur

*Un ingénieur maritime que je connais est descendu un jour dans la salle des machines d'un bateau de pêche qui ne voulait pas démarrer. La batterie plate a été considérée comme le coupable. Lui et le propriétaire ont apporté une batterie de rechange entièrement chargée et des pistes de saut robustes.*

*La banque de départ était faite de deux batteries au plomb 12 V ordinaires. Une forte étincelle a été observée lorsqu'ils ont connecté leur nouvelle batterie en parallèle. Ils y voyaient une confirmation que la banque était vraiment plate. Avant même de pouvoir essayer de faire tourner le moteur, leur batterie a explosé, les inondant de débris et d'acide dans l'espace confiné de la salle des machines. Ils s'en sont à peine sortis, aveuglés par l'acide qui leur brûlait les yeux.*

*Le système de démarrage du moteur était en fait 24 V, les deux batteries étaient en série et il n'y avait pas grand-chose de mal avec elles non plus. Ils se sont déchargés lourdement dans la batterie unique 12 V, provoquant un dégagement intense d'oxygène et d'hydrogène hautement explosif jusqu'à ce que quelque chose déclenche l'allumage.*

Afin d'atteindre un emballement thermique et un tir de batterie avec  $\text{LiFePO}_4$  chimie, l'oxygène retenu dans le matériau phosphate de fer doit être libéré. Contrairement à d'autres compositions de lithium, ceci est extrêmement difficile à atteindre et nécessite d'atteindre des températures très élevées. Il y a eu de nombreux cas de  $\text{LiFePO}_4$  insuffisamment installé, cellules qui ont surchauffé et provoqué de grandes inquiétudes concernant un éventuel incendie, mais aucune qui s'est réellement enflammée et brûlée *pourtant* sur les navires – à ma connaissance, au moment de la rédaction de cet article.

Le fait que la technologie soit en réalité remarquablement indulgente ne devrait pas inciter à prendre davantage de risques ou à en abuser, mais *ce point a déjà été perdu par quelques-uns* et un incident grave avec une installation marine pourrait bien se produire au coin de la rue, tout comme certains véhicules électriques de bricolage ont pris feu dans le passé.

La photographie ci-dessus doit être considérée comme un rappel qui donne à réfléchir de ce qui peut arriver, même avec la chimie du lithium fer phosphate. Dans ce cas, le régime de charge était bien en territoire de surtension et le système manquait de certaines des caractéristiques de protection les plus élémentaires. L'allumage a eu lieu pendant la recharge.

et la voiture a brûlé avec une telle intensité que le verre et l'aluminium ont fondu et se sont accumulés sur le sol sous le véhicule. Le seul carburant notable présent dans cette voiture purement électrique était les batteries au lithium fer phosphate... Inutile de dire qu'il n'y en avait plus assez pour être trop précis sur la cause profonde de l'incendie et qu'un tel événement à bord d'un yacht l'annulerait LiFePO<sub>4</sub> les cellules peuvent fournir des performances et un service extraordinaires à bord des navires, mais contrairement à certains de leurs partisans, les abuser provoque toujours des dommages irréversibles et leur sécurité peut ensuite être gravement compromise.

## Échecs cellulaires

### Comment LiFePO<sub>4</sub> Les cellules échouent de manière catastrophique



*Cette cellule Winston a augmenté la pression jusqu'à ce que le boîtier explose.*

Défaillances catastrophiques de LiFePO<sub>4</sub> les cellules sont presque invariablement associées à la recharge et résultent d'une surcharge et de tensions excessives. Ces pannes sont normalement limitées à la destruction des cellules. Si la tension de la cellule s'élève à 4,3 V ou plus, l'électrolyte est chimiquement décomposé en produits gazeux qui pressurisent le boîtier scellé de la cellule. Si l'accumulation de pression est suffisante, cela peut amener la cellule gonflée à évacuer ces gaz. Dans certains cas, les enveloppes cellulaires se sont rompues violemment.

Les gaz, une fois libérés, sont hautement inflammables, mais ils ne s'enflamment pas spontanément ; la plupart du temps, ils se dissipent simplement. S'ils s'enflamment, ils provoqueraient une sorte d'explosion de gaz externe aux cellules en se combinant avec l'oxygène atmosphérique. Une forme de divertissement robuste serait certainement fournie, mais un incendie de batterie serait encore très improbable. Il convient toutefois de noter que si le  $\text{LiPF}_6$  le sel présent dans l'électrolyte ventilé trouve de l'humidité avec laquelle réagir, du fluorure d'hydrogène (HF) peut se former Ce gaz est suffisamment fluide pour traverser la peau, extrêmement corrosif et cancérigène connu.

### Quand les choses vont très contrairement aux batteries au lithium, la chaleur est presque toujours impliquée

Lorsqu'il y a suffisamment de courant pour surchauffer gravement la cellule, l'électrolyte peut bouillir et également s'évacuer hors de la cellule. Dans chaque cas, la cause profonde peut normalement être attribuée à un échec de régulation de charge avec une absence de protection contre les surcharges et une absence de détection de température.

*Un ami qui avait simplement laissé tomber 200 Ah de  $\text{LiFePO}_4$  batteries dans son yacht de croisière quelques mois plus tôt, suivant les conseils du concessionnaire de batteries qui se faisait passer pour un "expert", fait face à un défaut d'alternateur Vingt minutes après avoir quitté la marina sous tension, debout seul dans le cockpit, il remarque une odeur des plus anormales venant du bas-dessous.*

*La cabine était remplie de brume et l'air était presque irrespirable Il a tué le moteur immédiatement Levant le couvercle du compartiment de la batterie, une chaleur intense sortait de la berge détruite Deux des quatre cellules avaient gonflé complètement hors de forme La chaleur était telle qu'il craignait qu'un incendie ne se déclare d'une minute à l'autre et il a prévenu les garde-côtes locaux de la situation.*

*Plusieurs navires à proximité, dont un ferry à passagers de 450 tonnes, sont venus se tenir là jusqu'à ce qu'un patrouilleur de police prenne le yacht en remorque.*

*Les cellules ont mis plusieurs heures à se refroidir au point qu'elles n'étaient plus trop chaudes pour être touchées.*

*Afin de découvrir la cause première de l'incident, le moteur a ensuite été redémarré au ralenti Le voltmètre indiquait 17,5 V au ralenti : l'alternateur était en panne et ne réglait plus Si le problème était passé*

*inaperçu un peu plus longtemps, il ne fait aucun doute que la banque aurait finalement pris feu avec la sortie complète de l'alternateur qui y était déversée en continu.*

Si les éléments de la cellule sont chauffés au-dessus de quelque 200°C (pour LiFePO<sub>4</sub> cellules seulement, *d'autres produits chimiques ont une valeur inférieure*), l'oxygène lié à l'intérieur du matériau phosphate de fer de la cathode est libéré. Ceci est extrêmement dangereux, car cet oxygène libre se recombine ensuite avec d'autres éléments à l'intérieur de la cellule (comme le carbone) agissant comme "fuel" ; cela provoque soudainement la libération de beaucoup plus de chaleur et *emballement thermique* suit rapidement. À ce stade, la combustion est devenue la source dominante de chaleur, la cellule éclate en flammes et un feu extrêmement chaud se propage rapidement aux cellules voisines. Alors que ce scénario peut être difficile à atteindre sur un yacht, certaines installations sur multicoques peuvent comporter des panneaux solaires dépassant 1 kW, d'autres navires sont équipés de gros alternateurs ou de chargeurs d'énergie à terre, des, et de tels systèmes ont certainement la capacité de surchauffer une berge jusqu'au point d'allumage, en cas de dysfonctionnement grave sans mécanisme de protection indépendant pour servir de ligne de défense.

## **Insuffisance Interne Spontanée**

L'autre mécanisme de défaillance se fait par défaut interne se développant au sein de la cellule ; en d'autres termes, la cellule court intérieurement. Cela semble être le plus rare des occurrences pour le moins (je n'ai pas connaissance d'une seule instance ayant entraîné des conséquences significatives avec le LiFePO<sub>4</sub> prismatique<sub>4</sub> cellules) et il convient de noter qu'il peut tout aussi bien en arriver de même pour une cellule au plomb et que celles-ci ont alors tendance à exploser.

Il existe peu de données réelles disponibles pour indiquer ce qui se passe ensuite, mais il convient de noter que enfoncer un clou dans une cellule par exemple et le faire ainsi court-circuiter intérieurement suffit à le faire chauffer et à s'évacuer abondamment, mais pas suffisamment. pour provoquer l'inflammation.

La plupart des autres produits chimiques du lithium s'enflamment spontanément dans les mêmes circonstances car, comme décrit juste plus tôt, l'oxygène lié est libéré par décomposition thermique, mais à une température beaucoup plus basse. C'est la principale raison pour laquelle on ne considère aucune autre chimie du lithium que LiFePO<sub>4</sub> pour le stockage d'électricité à bord.

## **Défaillance de surdécharge**

Il existe une voie bien connue favorisant la défaillance cellulaire interne : la décharge excessive. Si un  $\text{LiFePO}_4$  la cellule est déchargée en dessous de 2,0 V, à un moment donné, sa polarité s'inverse soudainement et le substrat en cuivre de l'anode commence à se dissoudre dans l'électrolyte. Lors de la recharge, ce cuivre hautement conducteur est précipité hors de l'électrolyte et déposé sur la surface de la cathode où il forme des dendrites ou des cristaux aux caractéristiques très pointues. Ces dendrites de cuivre risquent de percer le séparateur isolant mince entre anode et cathode et de court-circuiter la cellule [2].

La première conséquence de la formation de dendrites est une auto-décharge accrue grâce à des micro-court-circuits internes ; ceux-ci induisent également un chauffage des cellules lors de la recharge. Une cellule qui a fait face à un tel traitement peut potentiellement échouer à tout moment par la suite et il n'y a plus aucune garantie qu'elle pourrait échouer "nicely". La cause profonde remonte à l'absence de protection automatique contre les surdécharges.

Lorsque plusieurs cellules sont connectées en série pour former une chaîne de tension plus élevée, si une seule cellule de la chaîne est complètement déchargée et ne peut plus contribuer à aucun courant, elle agit alors uniquement comme une résistance tandis que les cellules restantes continuent d'alimenter le circuit, forçant le courant à travers elle vers l'arrière, de l'anode à la cathode. Ce type d'événement est désastreux pour la cellule et a été le n° #1 mécanisme qui a entraîné des incendies et bien d'autres quasi-accidents sur les véhicules électriques qui ont été rechargés par la suite. La cause première est un manque de protection *au niveau cellulaire* encore une fois.

La surveillance de la tension globale de la batterie n'est pas assez bonne. Les véhicules électriques sont des systèmes à tension beaucoup plus élevée, où des dizaines de cellules peuvent être connectées en série ; cela rend beaucoup plus difficile de s'assurer qu'aucune cellule n'entre jamais en territoire de surdécharge, car une cellule plate ne montre pas autant en termes de tension globale du pack et de surveillance individuelle que de nombreuses cellules ont été plus difficiles techniquement, surtout dans les systèmes de bricolage. Des circuits intégrés spécialisés sont désormais disponibles pour faciliter une telle tâche, mais leur intégration dans un système est une tâche non triviale au niveau du bricolage.

En conclusion, ne surchargez jamais les piles au lithium et ne les emmenez jamais en territoire de surdécharge. Une pile qui a subi un effondrement complet de la tension ou une inversion de polarité n'est bonne qu'à être jeté immédiatement, même s'il semble qu'il puisse être quelque peu rechargé. N'essayez pas, ne risquez pas.

Il en va de même pour les cellules gonflées et surchargées. Certains ont été assez irresponsables pour les écraser à plat dans une presse et les remettre en service, appelant cela "recovery process", prenant un risque illimité dans le but d'économiser quelques centaines de dollars après avoir foiré en premier lieu.

N'exploitez pas non plus de cellules au lithium endommagées ou "recovered" à bord, jamais.

## Défaillance suite à un dommage mécanique

Un rapport très intéressant [4] sur la sécurité des batteries au lithium en général a été publié en 2011 par la Fire Protection Research Foundation. En plus de couvrir beaucoup d'informations déjà présentées ici, il fournit des informations intéressantes et peu communes:

*Les dommages mécaniques (écrasement ou pénétration) qui se produisent sur les bords des électrodes sont significativement plus susceptibles de provoquer un emballement thermique des cellules que les dommages perpendiculaires aux surfaces des électrodes.*

Cela a été démontré dans des tests spécifiques dans lesquels les bords étroits des cellules étaient mécaniquement sollicités, plutôt que leurs faces principales. L'explication est simple et logique : les dommages sur les bords des plaques ont tendance à conduire à un repliement des électrodes, avec des risques importants de court-circuit important ; la compression ou les perforations perpendiculaires aux séparateurs de plaques entraînent en comparaison des dommages beaucoup plus bénins.

Je ne connais qu'un seul cas où des batteries au lithium marines pourraient être tombées en panne suite à des dommages mécaniques sur un yacht : le crash du pilote Volvo 70 *Équipe Vestas Wind* sur les récifs coralliens au large de l'océan Indien en 2014. Le rapport d'enquête ne contient que deux mentions très succinctes des blocs-batteries au lithium Mastervolt présents à bord, l'une pour indiquer que les batteries ont commencé à s'évacuer à la suite de l'accident et ont été transportées sur une plage voisine, et la seconde pour mentionner qu'il s'est avéré plus tard qu'elles s'étaient épuisées.

Le document attribue la défaillance à l'immersion dans l'eau de mer, mais un simple calcul basé sur la conductivité de l'eau de mer montre que cela n'entraînerait que des courants de décharge de quelques ampères. La pénétration d'eau au sein des cellules est également peu probable en raison de leur nature étanche, du manque de pression d'eau et du fait que la soupape de décharge est conçue pour s'ouvrir en cas de surpression.

interne. Une explication provisoire est que le choc dû à l'impact soudain à la vitesse a provoqué le déplacement des éléments à l'intérieur des enveloppes cellulaires, meurtrissant les bords des plaques et créant un court-circuit. Les cellules elles-mêmes étaient de construction prismatique standard, 180 Ah/3,2 V LiFePO<sub>4</sub>. Si l'impact violent les a effectivement amenés à court-circuiter en interne, alors cela illustre la folie d'utiliser des cellules LFP grand format pour construire des banques de maisons marines comme certains l'ont déjà fait, recourant parfois à des unités individuelles 400 Ah, voire 700 Ah.

## Fuite thermique et allumage des cellules de batterie de chimie du lithium

Comme déjà développé précédemment, l'emballement thermique est une réaction chimique qui suit la dissociation de l'oxygène contenu dans le matériau cathodique. Cette réaction nécessite de la chaleur : la surcharge en elle-même suffit à détruire les cellules, mais pas suffisante pour mettre le feu à une batterie au lithium. La quantité de courant et la durée en jeu doivent être suffisantes pour élever la température interne avant que l'emballement thermique puisse se produire.

C'est pourquoi les sources de charge de haute puissance telles que les alternateurs et les chargeurs de puissance – pire – shore peuvent représenter des dangers potentiels importants lorsqu'aucun mécanisme de déclenchement automatisé fiable, efficace et indépendant n'est mis en œuvre.

Une étude intéressante [5] de l'emballement thermique de trois chimies différentes de cellules au lithium a été publiée en 2014. Dans ce travail, un certain nombre de petites cellules cylindriques à base de lithium/graphite de 18650 ont d'abord été complètement chargées puis chauffées progressivement dans une chambre spécialement conçue :

*“À une température critique, une chaîne de réactions exothermiques peut être déclenchée. Les réactions conduisent à une nouvelle augmentation de température, ce qui à son tour accélère la cinétique de réaction. Cette dégradation auto-accélérée catastrophique de la batterie Li-ion est appelée emballement thermique.”*

*“Pendant l'emballement thermique, des températures aussi élevées que 900°C peuvent être atteintes et la batterie peut libérer une quantité importante de gaz combustible et (si inhalé à des concentrations élevées) toxique.”*

Les cellules de batterie testées comportaient trois types différents de matériaux cathodiques :

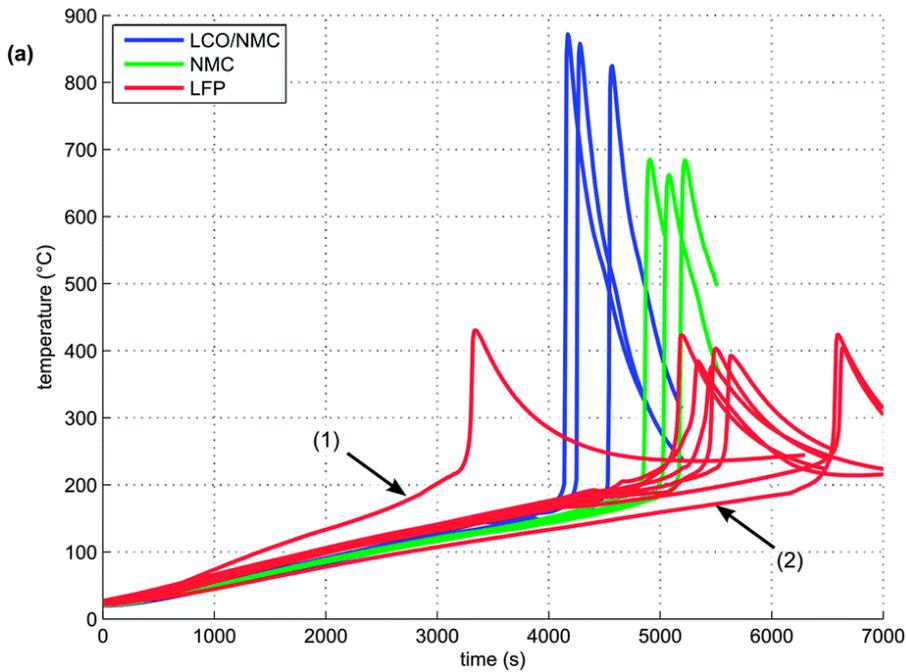
1. **LCO/NMC**, un mélange de dioxyde de lithium-cobalt et de dioxyde de lithium-nickel-manganèse-cobalt :  $\text{LiCoO}_2 / \text{Li}(\text{Ni}_{0,50}\text{Mn}_{0,25}\text{Co}_{0,25})\text{O}_2$ . Cette chimie est une tentative d'appivoiser la nature violente du dioxyde de lithium et de cobalt seul et les cellules ont été évaluées à 2,6 Ah à une tension moyenne de 3,8 V, avec une masse de 44,3 grammes.
2. **NMC**, lithium nickel manganèse dioxyde de cobalt :  $\text{Li}(\text{Ni}_{0,45}\text{Mn}_{0,45}\text{Co}_{0,10})\text{O}_2$ . Les cellules avaient une capacité de 1,5 Ah, une tension moyenne de 3,8 V et une masse de 43,0 grammes.
3. **LFP**, phosphate de fer et de lithium :  $\text{LiFePO}_4$ . La capacité de la cellule était de 1,1 Ah à une tension moyenne de 3,3 V et sa masse était de 38,8 grammes.

Le donne à LFP la densité de puissance la plus faible avec  $1,1\text{Ah} \times 3,3\text{V} = 3,63\text{Wh}$ . LCO/NMC et NMC délivrent respectivement 9,88Wh et 5,7Wh, soit 272 % et 157 % de la valeur de LFP pour le même volume géométrique Le calcul peut être poursuivi pour inclure la masse des cellules, auquel cas LFP ressort un peu mieux du fait de son poids plus léger, mais reste toujours en dernière position.

Cela explique à lui seul pourquoi certaines applications s'écartent de l'option la plus sûre et la plus robuste représentée par le lithium fer phosphate La défaillance désormais célèbre d'une batterie de secours au lithium cobalt à bord d'un Boeing 787 Dreamliner me vient à l'esprit, ainsi que des questions sur les raisons pour lesquelles nous devrions accepter des risques aussi élevés dans le but d'économiser quelques kilogrammes sur un avion.

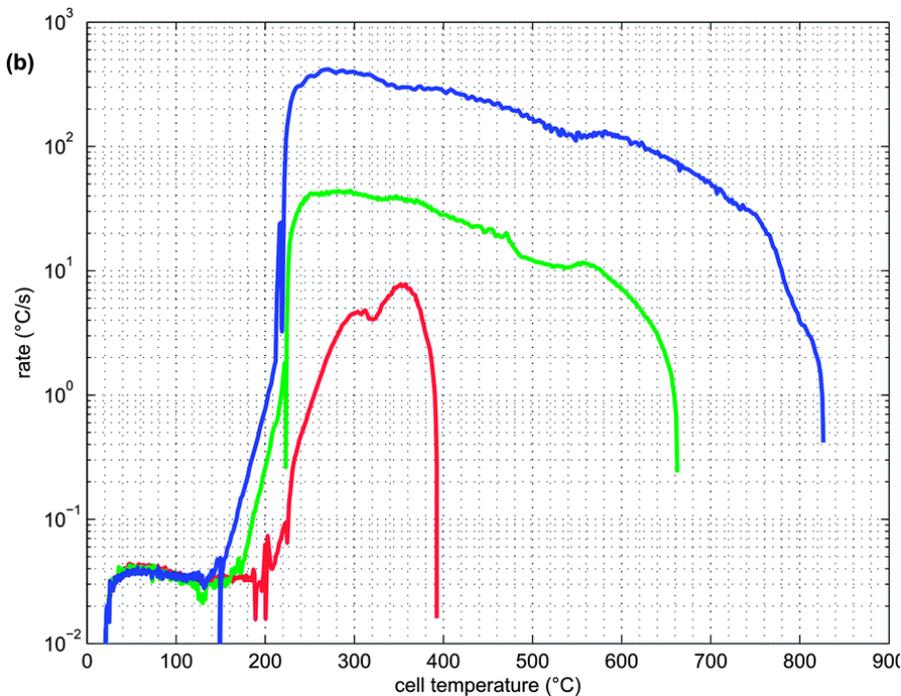
Dans le cas des batteries marines, cela n'a tout simplement aucun sens, et encore plus pour les systèmes de bricolage où des erreurs de conception et d'installation peuvent survenir.

Les résultats des essais de chauffage sont édifiants:



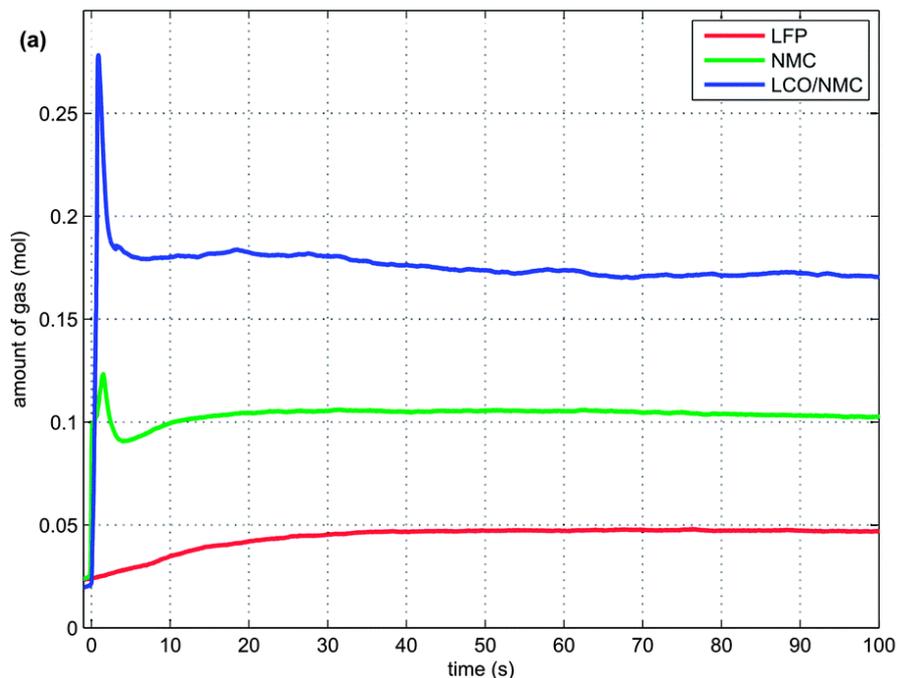
*Emballlement thermique et lectures de température pour trois chimies différentes de batteries au lithium. Les courbes rouges concernent les cellules au lithium fer phosphate sous des vitesses de chauffage rapides (1) et lentes (2). L'allumage se produit toujours vers 200°C.*

Les cellules au lithium fer phosphate nécessitent la température la plus élevée pour s'enflammer, brûlaient plus progressivement et atteignaient des températures beaucoup plus basses que les autres types.



*La forte augmentation de la vitesse de chauffage indique l'apparition d'un emballlement thermique. Avec une température d'inflammation d'environ 200°C, les batteries au lithium fer phosphate (en rouge) sont plus difficiles à mettre le feu puis ne chauffent pas aussi violemment que les autres types. Alors que la cellule Lithium-Cobalt a atteint une vitesse de 400°C par seconde en éclatant en boule de feu, son équivalent LFP n'a enregistré qu'un taux de 8°C par seconde.*

Un autre graphique d'intérêt montre les taux de rejet de gaz:



*Comportement à la ventilation de diverses chimies de batteries au lithium  
Contrairement aux autres échantillons testés, qui se sont gasés soudainement et violemment, les cellules au lithium fer phosphate (courbe rouge) commencent à libérer des gaz très progressivement jusqu'à atteindre un taux constant.*

Le graphique met clairement en évidence l'absence d'explosion initiale dans le cas de la cellule LFP, mais montre également que la combustion est toujours en cours après 100 secondes. Un retour sur le premier tracé de cette série montre clairement que les piles au lithium brûlent longtemps et à chaud une fois allumées et que tous les ingrédients pour propager le feu aux matériaux à proximité sont présents.

Tandis que  $\text{LiFePO}_4$  les batteries sont remarquablement sûres et stables, elles ne sont pas une option pour une installation imprudente et/ou négligente.

Une fois de plus, ces données ont été collectées pour des cellules de la taille de 18 650, qui sont très petites ; une expérience anecdotique telle que l'incendie du véhicule mentionné précédemment montre qu'une banque de cellules prismatiques LFP en feu est capable de produire des températures beaucoup plus élevées que celles enregistrées dans l'étude.

Cette information donne à réfléchir et certains peuvent décider de rester avec les batteries au plomb et leurs inconvénients en conséquence : c'est bien il y a des conseils irresponsables à trouver (facilement), suggérant

que construire une batterie au lithium est juste une question d'équilibrer un ensemble de cellules et de le jeter dans le bateau après avoir peaufiné quelques tensions de charge. Ce sont les conséquences qui pourraient découler de telles pratiques.

## Espérance de vie et défaillance terminale de $\text{LiFePO}_4$ Cellules

À la fin de leur vie, les piles au lithium finissent par tomber en panne en manquant de capacité. Les dommages chimiques et le placage des électrodes à l'intérieur de la cellule consomment finalement une partie du lithium disponible à l'origine pour le stockage d'énergie, consomment de l'électrolyte et empêchent le lithium restant de migrer entre l'anode et la cathode ; la batterie ne peut plus être chargée ou déchargée suffisamment pour être utilisable et elle doit être jetée.

Des températures élevées, 40°C et plus typiquement, accélèrent grandement ces réactions chimiques indésirables et raccourcissent la durée de vie des cellules. Dans le cas des installations à bord des navires marins, il faut veiller strictement à ne pas les installer dans des environnements chauds tels que les compartiments moteurs pour cette raison.

Alors que les petites cellules cylindriques principalement utilisées dans les appareils portables tombent généralement en panne relativement rapidement en raison du chauffage répété lors de la recharge et que les batteries des véhicules électriques en général peuvent souffrir du chauffage provoqué par des courants de décharge intenses provoqués par les accélérations, les cellules prismatiques dans des applications plus conservatrices telles que les banques de maisons marines ont été présentant un bilan de plus en plus phénoménal. Les plus anciens en service ont peut-être environ 7 ou 8 ans maintenant (2015) et personne n'a encore trouvé de chiffre clair en termes d'espérance de vie. Il devient de plus en plus clair que la barre des 10 ans sera atteinte et dépassée par certaines banques de maisons de lithium marin.

Les tests de cycle accélérés n'ont aucune pertinence dans le contexte des banques de maisons marines car ils mettent l'accent sur les cellules bien au-delà du fonctionnement normal dans ce type de service et ne parviennent pas à modéliser le vieillissement du calendrier, c'est-à-dire le passage du temps. Dans une application de banque de maison sur un yacht, la fin de vie se produira lorsqu'il n'y aura pas suffisamment de capacité à faire du vélo, ou encore, la capacité de courant de décharge n'est plus suffisante pour supporter des charges élevées, comme les onduleurs.

À ma connaissance, aucune banque de maison au lithium correctement gérée n'a encore atteint une fin de vie naturelle. Toutes celles qui ont été jetées ou remplacées ont échoué en raison d'événements externes et complètement évitables.

#### Références:

[1] *Conception et analyse de grands systèmes de batteries lithium-ion*, Shriram Santhanagopalan, Kandler Smith, Jeremy Neubauer, Gi-Heon Kim, Ahmad Pesaran et Matthew Keyser, 2014, ISBN : 978-1-60807-713-7

[2] *Enquête sur les défaillances des cellules LiFePO4 dans des conditions de surdécharge*, Hao He, Yadong Liu, Qi Liu, Zhefei Li, Fan Xu, Clif Dun, Yang Ren, Mei-Xian Wang et Jian Xie, *Journal de la Société électrochimique*, 160 (6) A793-A804 (2013)

[3] *Enquête sur les pannes des cellules LiFePO4 dans des conditions de surcharge*, Fan Xua, Hao He, Clif Dunb, YaDong Liua, Mei-xian Wanga, Qi Liua, Yang Renc et Jian Xiea, *ECS Transactions*, 41 (39) 1-12 (2012)

[4] *Évaluation des risques et de l'utilisation des batteries lithium-ion*, Exponent Failure Analysis Associates, Inc, publié par la Fire Protection Research Foundation (2011)

[5] *Expériences d'emballage thermique sur des batteries Li-ion grand public avec des cathodes de type oxyde métallique et olivine*, Andrey W. Golubkov, David Fuchs, Julian Wagner, Helmar Wiltsche, Christoph Stangl, Gisela Fauler, Gernot Voitic, Alexander Thalera et Viktor Hackere, *Royal Society of Chemistry, RSC Adv.*, 2014, 4, 3633

[6] *Etat de l'Art de la Batterie Lithium-Ion Estimation SOC pour Véhicules Électriques*, R. Zhang, B. Xia, B. Li, L. Cao, Y. Lai, W. Zheng, H. Wang et W. Wang, *Energies* 2018, 11, 1820 ; doi : 10.3390/en11071820

Publié par Éric Bretscher à 17h43

**Laisser une réponse**

**Votre Commentaire**

|            |  |               |
|------------|--|---------------|
| <b>Nom</b> |  | (obligatoire) |
|------------|--|---------------|

|               |  |               |
|---------------|--|---------------|
| <b>E-mail</b> |  | (obligatoire) |
|---------------|--|---------------|

|            |  |
|------------|--|
| <b>URI</b> |  |
|------------|--|

Submit Comment

De l'acide au plomb au lithium : nouvelle technologie de batterie pour l'alimentation électrique à bord

Caractéristiques pratiques des cellules de batterie au lithium fer et phosphate

#### Disclaimer

Certaines des informations présentées et discutées sur ce site font référence à des situations difficiles et impitoyables en mer et dans des régions du monde où aucune assistance en temps opportun ne peut être attendue. Ces informations ne doivent pas être interprétées comme des conseils pour agir d'une certaine manière. Elle ne représente que l'expérience personnelle et les points de vue partagés par l'auteur pour fournir une perspective et une réflexion prompte. Différents yachts se comportent différemment, certains modèles se heurtent à des limites sévères par mauvais temps qui peuvent compromettre irrémédiablement leur sécurité et la vie des personnes à bord, et les conditions ne sont jamais deux fois les mêmes. Dans de nombreux cas, si vous décidez de vous attaquer à certains des océans et zones présentés ici, prenez votre navire là où il ne devrait pas être ou faites un mauvais appel, vous mourrez et ne serez probablement jamais retrouvé. Ce que vous décidez de faire, c'est toute votre responsabilité. C'est aussi votre liberté. Prenez-en grand soin.

© 2013-2022 Eric Bretscher, Nordkyn Design Ltd  
Tout le matériel présenté sur ce site est protégé par le droit d'auteur de l'auteur et ne peut être copié ou reproduit.

Veuillez vous référer au Conditions d'utilisation pour des informations complémentaires.

Politique d'utilisation équitable : La citation d'extraits d'articles ou de publications est acceptable et autorisée à condition qu'elle puisse être considérée comme une utilisation raisonnable. Il doit être renvoyé à la source et ne peut pas inclure de photographies, de graphiques, d'animations ou de matériel autre qu'une quantité limitée de texte, sauf autorisation écrite explicite.