

# Développement d'une batterie Li-Ion pour des applications d'impulsion de forte puissance

Volker BROMMER, Oliver LIEBFRIED et Sigo SCHARNHOLZ

Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL), France

**RESUME** – Une batterie de forte puissance à base de cellules Li-Ion (LFP- Lithium FerroPhosphate) a été conçue et construite. Elle est constituée d'un système modulaire composé de modules individuels. Les types de cellules LFP ont déjà fait auparavant l'objet d'études poussées qui ont montré une densité de puissance volumétrique très élevée (12 kW/l) en mode de courant impulsionnel (500 ms). Actuellement, la batterie est composée de dix modules à 20 cellules qui peuvent être mis en série ou en parallèle afin d'adapter une charge expérimentale. Ceci permet de varier les applications de façon très flexible. La puissance maximale en mode impulsionnelle atteint plus de 700 kW avec des courants atteignant environ 20 kA. Cet article décrit tout d'abord les résultats obtenus avec des cellules LFP investiguées aux forts courants impulsionnels. Ensuite, le rapport s'intéressera à la conception et la mise en œuvre de la batterie modulaire pour des applications de forte puissance, mais aussi à l'aspect de la sécurité dans l'utilisation des cellules LFP.

*Mots-clés*— *stockage d'énergie, alimentations impulsionnelles de puissance, batteries Li-Ion, batteries LFP (LiFePO<sub>4</sub>, Lithium FerroPhosphate) de puissance*

## 1. INTRODUCTION

Compte tenu de l'électrification croissante des automobiles [1] ou des plateformes mobiles et ce même dans le domaine militaire (navires électriques, véhicules hybrides ou tout électriques [2 - 4]), les batteries Li-Ion font partie des composants les plus intéressants en terme de stockage de l'énergie en raison de leurs densités d'énergie c'est-à-dire des densités de puissance dépassant nettement celles des batteries traditionnelles à base de plomb, de NI-CD ou de NI-MH. Dans le domaine des décharges impulsionnelles, très demandées pour de nombreuses applications nécessitant brièvement une forte puissance, l'évolution des cellules les plus récentes permet d'atteindre une capacité en puissance qui rentre même dans la gamme des supercondensateurs [5] ou des systèmes mécaniques à machines tournantes (volants d'inertie) [4].

L'Institut franco-allemand de recherche de Saint-Louis accorde ainsi un intérêt particulier aux activités de recherche dans ce domaine. En effet, la conversion d'énergie électrique afin de générer des impulsions de forte puissance pour de l'armement électrique joue un rôle primordial [3]. Générer des impulsions de courant de forte puissance sur les plateformes mobiles peut aujourd'hui être principalement réalisé grâce à des générateurs capacitifs ou inductifs. Alors que ces systèmes ont une très forte capacité en puissance (pouvant atteindre les GW), leur énergie stockée est relativement faible et par conséquent ils

doivent être rechargés après avoir généré une décharge impulsionnelle. Cette recharge peut s'effectuer à l'aide de systèmes primaires de forte énergie comme des machines tournantes (alternateurs, volants d'inertie), des batteries, des condensateurs électrolytiques ou des supercondensateurs. Souvent, pour des applications répétitives, une recharge rapide est requise (jusqu'à quelques 100 ms), ce qui demande une forte puissance de charge de l'ordre du MW. La conception d'un système primaire se réalise, regardant des condensateurs d'énergie ou des batteries, en une mise en série / parallèle des centaines ou des milliers des cellules individuelles.

Concernant les batteries Li-Ion, leurs densités d'énergie atteignent aujourd'hui des valeurs pouvant aller jusqu'à 180 Wh/kg (cellules à forte énergie) pour des taux de décharge relativement faibles (C-Rate < 1), ce qui veut dire une décharge continue. Par contre, leurs densités de puissance atteignent des valeurs de plusieurs kW/kg (cellules à forte puissance) pour des taux de décharge très élevés (C-Rate > 100), ce qui correspond à une décharge impulsionnelle [2,5]. À l'ISL, l'attention a plus particulièrement été accordée aux types de forte puissance au détriment d'une moindre densité d'énergie stockée.

Dans le cadre des études sur les puissances maximales de différentes cellules, on a particulièrement tenu compte de l'aspect de sécurité intrinsèque des cellules. En termes de capacité en forte puissance, de stabilité à haute température, de quasi incombustibilité et de durée de vie élevée [6], les cellules du type LiFePO<sub>4</sub> (Lithium FerroPhosphate (LFP)) étaient les plus adaptées.

Cet article a pour but de décrire les recherches menées sur les cellules LFP afin de déterminer la puissance maximale livrable. Avec en tout 200 de ces cellules l'ISL a conçu et construit une batterie de forte puissance. Cet article se permettra de détailler les concepts de modularité, de sécurité et la méthode utilisée pour recharger les modules de la batterie.

## 2. RECHERCHES MENEES SUR LES CELLULES LFP

### 2.1. Densité de puissance gravimétrique et volumétrique

Comme expliqué dans l'introduction, on a choisi de se focaliser sur les cellules LFP de forte puissance afin d'évaluer leur aptitude pour une source d'énergie primaire. Ces types de cellules se différencient des autres cellules de forte énergie de

part différentes caractéristiques, notamment la construction des électrodes, les matériaux actifs de l'anode ou de la cathode et la consistance du séparateur et de l'électrolyte. Toutes les modifications de ces paramètres ont pour but de réduire la résistance interne et obtenir au final une cellule de forte puissance.

Dans la littérature, les critères d'évaluation de différents types de batteries sont souvent présentés sous la forme de diagrammes Ragone [1,2] où figurent les densités de puissance c'est-à-dire les densités d'énergie gravimétrique. Néanmoins, comme les cellules des différents constructeurs sont un ensemble de différents matériaux - par exemple le matériel du châssis, le volume et la masse des connexions de courant, des dispositifs de sécurité à l'intérieur de la cellule - une comparaison se basant sur le poids ne serait aucunement pertinente. Dans le cas de notre cellule, celle-ci est assortie d'un lourd châssis de sécurité en acier inox, tandis que d'autres cellules testées ont des châssis en aluminium. L'objectif étant d'obtenir des générateurs très compacts, on a mis l'accent sur la densité volumétrique de puissance lors des comparaisons entre les différentes cellules Li-Ion.

## 2.2. Montage expérimental

Depuis un certain temps on a évalué différents types de batteries Li-Ion en appliquant des courants impulsionnels. En utilisant un circuit de test présenté en figure 1 incluant un commutateur à semi-conducteur de puissance (IGCT [7]) il a été possible de commuter des courants pouvant atteindre jusqu'à plusieurs kA (max 5 kA). Ces impulsions de courant ont duré entre plusieurs centaines de millisecondes et une seconde, ce qui correspond aux applications réalistes concernant une charge rapide des générateurs inductifs ou capacitifs de puissance.

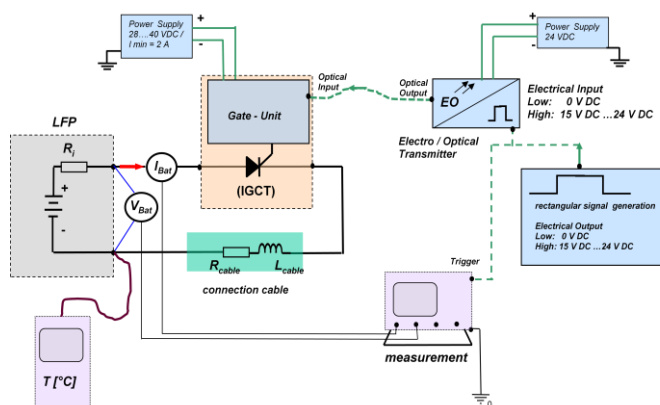


Fig.1 Montage expérimental pour évaluer les cellules Li-Ion à l'aide d'un commutateur semiconducteur de puissance (IGCT).

Le circuit de test est composé de la cellule à tester, représentée par le schéma simplifié équivalent d'une source de tension avec une résistance interne. La batterie est connectée avec l'IGCT par des câbles dont la longueur dépend de l'adaptation de puissance du circuit. Dans le cas présenté, les câbles mesurent 40 cm (section : 35 mm<sup>2</sup>). L'unité de gâchette du commutateur est commandée optiquement via un transmetteur électro-optique, qui, lui-même, reçoit un signal venant d'un générateur rectangulaire avec une longueur temporelle correspondant au temps de commutation du courant. Le courant  $I_{Bat}$  est mesuré par une sonde à effet hall (LEM HAX 2500-S) et la tension  $V_{Bat}$  aux bornes de la cellule est mesurée par une sonde différentielle (Metrix MX9030). Par ailleurs, la température à la connexion de l'anode d'une cellule est mesurée avec une

sonde de type k (Fluke 54 II Thermomètre). Pour tous les tests présentés la température était maintenue à 25°C. Cela veut dire qu'après chaque exécution d'un courant impulsionnel (qui engendre un réchauffement à effet joule dans la cellule), il était nécessaire d'attendre que la température baisse pour atteindre à nouveau 25° C jusqu'à la prochaine exécution du courant.

La figure 2 montre une photo des deux cellules LFP de puissance mises en série (pour une adaptation de puissance, décrite au chapitre 2.3). On peut voir les mesures du courant, de la tension et la température aux niveaux des bornes des cellules.

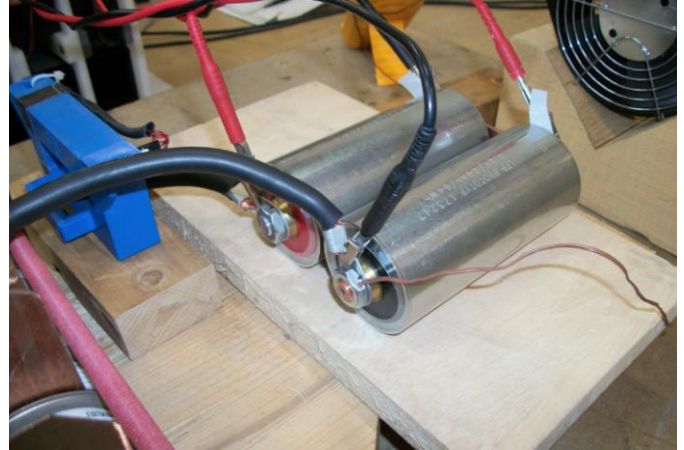


Fig.2 Test de deux cellules Li-Ion mises en série avec la mesure de  $I_{Bat}$  (Sonde bleue à effet hall),  $V_{Bat}$  aux bornes de de chaque cellule (mesurées avec des sondes différentielles) et la température (fil brun) à l'anode d'une cellule. À l'arrière plan se trouve un ventilateur pour refroidir la cellule après les impulsions.

Les spécifications selon la fiche technique [8] des cellules qui étaient testées sont les suivantes :

Fabricant	GAIA
Type de cellule (type cathode)	LiFePO <sub>4</sub>
Capacité nominale (0,2 C)	20 Ah
Tension nominale	3,2 V
Impédance AC (1 kHz)	≤ 0,5 mΩ
Impédance DC (2 sec / décharge 20 C)	≤ 1,3 mΩ
Energie spécifique (0,2C)	69 Wh/kg
Densité d'énergie (0,2 C)	173 Wh/l
Puissance spécifique (60 C)	2700 W/kg
Densité de puissance (60 C)	6800 W/l
Courant de décharge max (DC)	500 A
Courant de décharge max (2sec)	1200 A
Courant de charge max (15sec)	400 A

## 2.3. Procédure d'essai et détermination de $R_i$ et $P_{max}$

La détermination de la puissance maximale délivrable s'obtient par l'adaptation du circuit de décharge extérieure avec la résistance interne  $R_i$  de la batterie:

$$R_i = R_{ext} \quad R_{ext} = R_{IGCT} + R_{Cable} \quad (1)$$

En négligeant l'effet de réchauffement des câbles de connexion, la résistance ohmique se détermine en fonction de la longueur des câbles et est considérée comme constante. La résistance non linéaire du semi-conducteur IGCT dépend du courant selon les spécifications  $V_T / I_T$  en état conducteur. Les deux résistances s'élèvent à environ 1,2 mΩ (pour des courants compris entre 2,5 kA et 3 kA). Adapter la puissance avec une seule cellule s'est avéré impossible (en raison d'une  $R_i$  mesurée à environ 0,6 mΩ). Il a donc été nécessaire de connecter une deuxième cellule en série afin d'obtenir l'adaptation. La

résistance interne  $R_i$  se calcule à l'aide de la tension et du courant  $V_{Bat}$  et  $I_{Bat}$  mesuré aux bornes des cellules par

$$R_i = \frac{V_0 - V_{Bat}}{I_{Bat}} \quad (2)$$

où  $V_0$  représente la tension en circuit ouvert. Finalement la puissance maximale peut être calculée par

$$P_{max} = \frac{V_0^2}{4 * R_i} = V_{Bat} * I_{Bat} \quad (3)$$

La figure 3 représente un résultat de test avec deux cellules LFP en adaptation de puissance et avec une température de cellules de 25 °C. La courbe supérieure montre le courant impulsionnel (150 C) pendant une durée de 500 ms. Les courbes en-dessous montrent les tensions à la sortie des cellules individuelles. Les courbes inférieures montrent la résistance  $R_i$  respectivement la puissance  $P_{max}$  calculée pour chaque cellule.

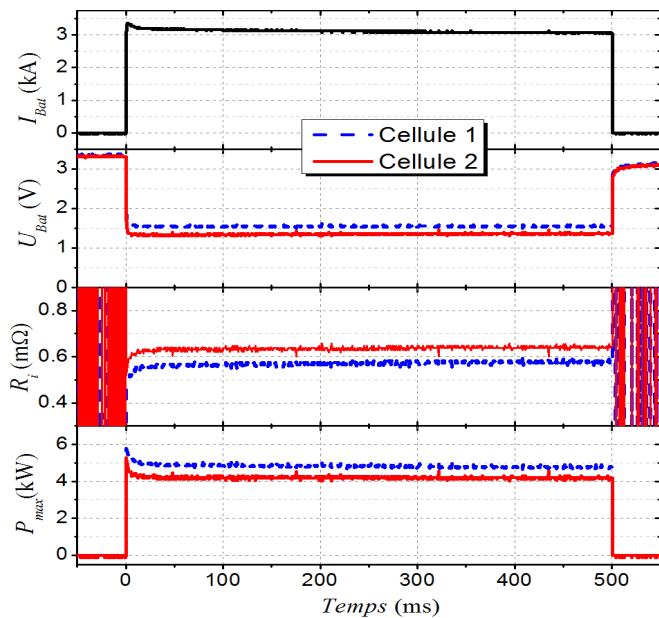


Fig.3 Résultat du test à courant impulsionnel et à 25 °C avec deux cellules LFP mises en série pour déterminer la puissance maximale délivrable.

Pour décrire la figure 3 il est nécessaire de mentionner que les cellules du même type peuvent avoir une tolérance notable qui dépend surtout des lots de fabrication, c'est-à-dire des numéros de séries des composants. Les cellules testées ici ont des numéros de série différents. Il est aussi important de mentionner que le courant  $I_{Bat}$  atteint une valeur de crête immédiatement après l'enclenchement du circuit (3,4 kA). Après ce pic il redescend exponentiellement jusqu'à une valeur quasi continue (3,1 kA) à 500 ms. Ce comportement résulte d'un effet capacitif aux électrodes des batteries qui est dû à la génération d'une capacité de double-couche (double-layer-effect). La valeur de cette capacité dépend essentiellement de la construction des électrodes [5]. C'est pour cette raison qu'on obtient une puissance transitoire qui est plus grande au début. Pour quelques applications techniques qui exigent de très courtes impulsions de puissance ce phénomène pourrait être intéressant. Pourtant, dans le cas d'une application avec des impulsions plus longues, cet effet joue un rôle moindre. Par conséquent on s'est uniquement référé à l'état de courant continu à la fin de l'impulsion (500 ms) pour déterminer les valeurs fixes pour  $R_i$  et  $P_{max}$ .

Pendant l'impulsion les tensions  $V_{Bat}$  à l'anode et cathode des deux cellules tombent de la valeur du circuit ouvert (3,3V) jusqu'à 1,5 V c'est-à-dire 1,35 V. Comme le montrent les graphiques ci-après, les valeurs de  $R_i$  et  $P_{max}$  calculées après

500 ms s'élèvent pour les deux cellules à 570  $\mu\Omega$  / 630  $\mu\Omega$  respectivement à 4,7 kW / 4,3 kW. Grâce aux dimensions des composants, la densité de puissance volumétrique a pu être déterminée à 12,7 kW/l et à 11,7 kW/l pour la cellule la moins forte. En s'appuyant sur les diagrammes de Ragone on peut constater que cette valeur maximale en densité de puissance entre nettement dans le domaine des supercondensateurs ou des machines tournantes (volants d'inertie) avec des valeurs comprises entre 5 et 20 kW/l [4].

#### 2.4. Conditions de test et détermination de la capacité de référence

Les tests décrits constituent la base des tests de série dans le but de constater des dégradations éventuelles au niveau de  $R_i$  ou de la capacité des cellules stressées. La résistance interne  $R_i$  peut être comparée directement avec des résultats de tests. Au niveau de la capacité il faut déterminer une valeur de référence qui sera comparée avec celle mesurée après la série de tests. Cette capacité a été déterminée le plus précisément possible en utilisant un chargeur de batteries (CCCV) et en tenant compte de paramètres identiques comme le courant de charge/décharge (0,1 C / 0,2 C), le courant de fin de charge/décharge (0,01 C / 0,05 C) et la tension de fin de charge/décharge (3,55 V / 2,5 V).

#### 2.5. Résultats des tests de l'extraction de courant impulsionnel aux cellules LFP

Avec une extraction de charge d'approximativement 100 % (DOD : Depth of discharge) on a pu générer au total 53 impulsions de courant à 500 ms. La série a été arrêtée lorsque la tension en circuit ouvert d'une cellule est descendue en-dessous de 3,1...3,0 V, ce qui signifie quasiment la fin de charge (cf. figure 10). Les résultats de tests ont été traités afin d'obtenir un calcul de la charge d'extraction c'est-à-dire de l'énergie fournie, montrés en figure 4. Sur la courbe supérieure figurent les courants maximaux en fonction du nombre d'impulsions. Les valeurs atteignent 3,1 kA lors des premières impulsions jusqu'à 2,2 kA à la fin. Dans l'encadré se trouve la charge accumulée pour toutes les impulsions, et, comparée avec la charge de référence (22,3 Ah) cela représente quasiment 100 %. Il est à noter que la capacité résiduelle, mesurée à la fin des tests a été prise en compte (1,5 Ah). Cela signifie qu'à peu près la même charge a pu être extraite des cellules avec laquelle elles étaient chargées.

Concernant la puissance fournie par les deux cellules, les valeurs varient entre 4,7 kW / 4,3 kW au début et 2,8 kW / 2,4 kW à la fin. Encore une fois, dans l'encadré se trouve les chiffres de l'énergie accumulée lors de toutes les impulsions. Comparé avec l'énergie de référence (64 Wh / condition 0,2 C) ça représente un rendement énergétique d'environ 48 % pour la première cellule, et de 41 % pour la seconde cellule. Il est important de noter qu'en cas d'adaptation, le rendement énergétique ne dépassera pas la barre des 50 %.

Au niveau des résistances internes il a été observé une augmentation de 570  $\mu\Omega$  / 630  $\mu\Omega$  au début allant jusqu'à 856  $\mu\Omega$  / 932  $\mu\Omega$  à la fin.

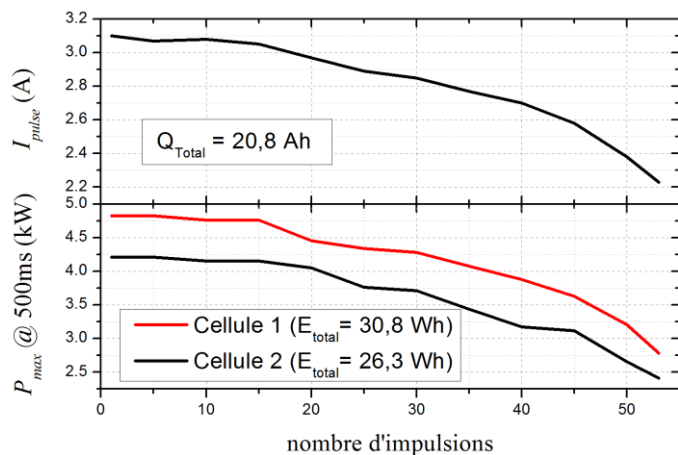


Fig.4 Comportement du courant c'est à dire de la puissance en fonction de nombre des impulsions pour une décharge quasiment complète (DOD≈100 %) des deux cellules LFP.

### 2.6. Comparaison de capacité et résistance interne (SOH: State of health)

Après les tests, on a déterminé la capacité des cellules de la même façon que décrite au chapitre 2.4 et on a obtenu les valeurs suivantes (avant/après tests) :

- Cellule 1 (22,30 Ah / 22,36 Ah)
- Cellule 2 (22,32 Ah / 22,54 Ah).

Les mesures ne permettent pas de constater de dégradation au niveau de la capacité.

Les cellules ont ensuite été rechargées pour répéter les mêmes tests dans le but de constater une dégradation éventuelle de  $R_i$ . La figure 5 montre une comparaison de l'impulsion numéro 5 du premier et du deuxième cycle de décharge. On ne peut pas différencier les courbes au niveau des résistances internes, ce qui signifie qu'il n'y a aucune dégradation jusqu'à cet instant.

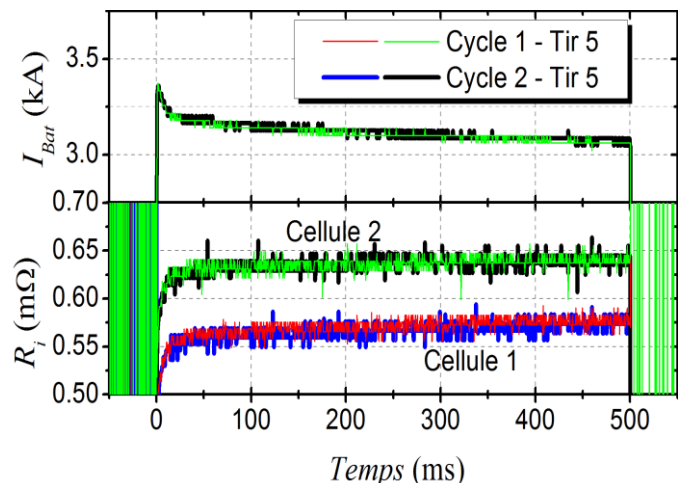


Fig.5 Comparaison de l'impulsion numéro 5 du premier (courbes rouges et vertes) et deuxième (courbes bleues et noires) cycle de décharge à 25°C.

Ce résultat est cependant non représentatif pour des déclarations techniques concernant la décomposition et la durée de vie des cellules subissant les contraintes décrites ici. Il existe quelques articles constatant des pertes drastiques de la capacité sous la contrainte de forts courants et surtout avec des cycles de décharges (DOD) de 100 % [6, 9, 10]. Dans ce contexte, il est à mentionner que des recherches sur la durée de vie sont en cours dans le cadre d'une coopération de l'ISL avec l'université de Pise. Des résultats plus détaillés avec ce type de cellule LFP

sont attendus prochainement. Pour conclure les résultats déjà obtenus, on peut dire que les cellules testées ont la capacité de livrer de très fortes puissances impulsives bien que ce mode d'opération ne devrait pas être appliqué très souvent. Pourtant, pour certaines applications rares (applications militaires) il est nécessaire d'être en mesure de générer très brièvement de fortes puissances afin que l'utilisation des batteries dans ce mode soit une possibilité intéressante par rapport aux systèmes existants (par exemple avec une combinaison batteries + supercondensateurs).

### 3. CONCEPTION D'UNE BATTERIE MODULAIRE

En se basant sur les résultats décrits et après l'achat de 200 cellules LFP de ce type, on a commencé à construire une batterie de forte puissance. Cette batterie va servir de source d'énergie primaire dans le cadre d'expériences à puissance élevée à l'ISL. Il s'agit à titre d'exemple de la charge rapide des générateurs capacitifs par intermédiaire d'un convertisseur de puissance [11] ou de la charge d'un générateur inductif à fort champ magnétique.

La batterie est composée d'un système modulaire constitué jusqu'à présent de 10 modules à 20 cellules. Cette modularité permet une grande flexibilité en vue d'une adaptation d'un circuit expérimental avec la source d'énergie. Le concept de la modularité se fait par une mise en série / parallèle de plusieurs modules sous forme de lignes et de colonnes dans une armoire à étagères présentée en figure 6.

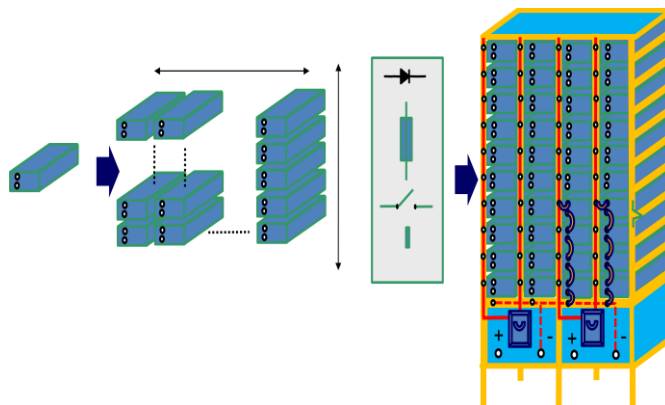


Fig.6 Schéma de la mise en série / parallèle des modules de la batterie intégrée dans une armoire à étagères avec des connexions de modules actifs. Toutes les colonnes sont protégées par la combinaison d'une diode, d'un fusible et d'un contacteur électromécanique (dessin au milieu).

La connexion entre les modules en série se réalise à l'aide de broches de contact amovibles. Les modules de colonnes sont connectés aux dispositifs de sécurité et sont mis en parallèle avec une sortie commune. Une photo de l'armoire est représentée en figure 7. La construction a été dimensionnée pour des mises en série de 12 modules et des mises en parallèle de 8 modules. En principe, une intégration de 96 modules au total serait possible.





Fig.7 Photo de la batterie avec les modules à 20 cellules intégrés dans une armoire à étagères. En bas, on peut voir les fusibles pour chaque colonne et la sortie commune avec des câbles de fort courant (en rouge).

En se référant aux spécifications de la fiche technique des cellules ainsi qu'aux résultats expérimentaux, les valeurs suivantes sont réalisables (avec 10 modules):

- Gamme de tension (circuit ouvert) 66 V.....660 V
- Gamme de Capacité 20 Ah...160 Ah
- Courant max. (DC) 4 kA
- Courant max. (2 sec) 10 kA
- Courant max. (500 msec) > 20 kA
- Puissance maximale (500 ms) > 700 kW

En ce qui concerne la puissance maximale de la batterie, les valeurs de tests par interpolation des résultats s'élèveraient entre 860 kW et 940 kW avec tous les modules connectés. Mais en tenant compte des tolérances des cellules et des premiers tests aux modules, une valeur de plus de 700 kW peut être confirmée avec certitude.

Un système de sécurité est établi pour chaque colonne (mise en série) de la batterie. Ce système consiste tout d'abord en une diode de protection. Cela veut dire que chaque colonne connectée à des modules est séparée des autres colonnes. Dans le cas d'un court-circuit extérieur, le courant d'une colonne ne dépasse pas une valeur entre 3 à 3,5 kA, ce qui est dû à la limitation induite par les résistances internes des cellules LFP. De plus, chaque colonne est pourvue d'un contacteur électromécanique qui permet de disjoncter des courants à cette hauteur. La figure 8 montre les deux composants sur la photo de gauche. Cependant, dans le cas d'une éventuelle défaillance du contacteur, chaque colonne est protégée par un fusible de haute puissance (figure 8 à droite).



Fig.8 Dispositifs de sécurité consistant en une diode de protection, un contacteur électromécanique (photo gauche) et un fusible de fort courant (photo droite). Ces dispositifs de sécurité sont établis pour chaque colonne.

Les caractéristiques d'ouverture en fonction du temps et du courant prospectif sont montrées en figure 9 pour différentes valeurs des inserts de fusible. Au final, le fusible doit être adapté pour une ouverture d'un circuit avant que le courant de défaut ne dépasse les limites en temps, ce qui deviendrait critique pour les batteries.

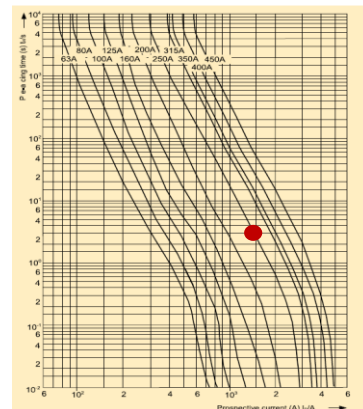


Fig.9 Caractéristiques des différentes valeurs de fusibles à haute tension en fonction du courant prospectif et du temps de fusion. Le point rouge montre l'exemple d'une utilisation d'un fusible de 250 A avec un temps de fusion d'environ 3 s à un courant prospectif de 1500 A.

### 3.1. Modules individuels à 20 cellules

La figure 10 montre un module en construction de 20 cellules LFP mises en série. La tension à la sortie en circuit ouvert est de 66 V et la capacité est de 20 Ah.



Fig.10 Module à 20 cellules LFP avec une surveillance électronique de tension de chaque cellule.

Concernant l'état de charge (SOC: state of charge), ce module est pourvu d'un circuit électronique qui surveille la tension aux bornes de chaque cellule individuelle. Une fin de charge se traduit par une descente de tension inférieure à 3V (voir figure 11). À partir de ce moment, la chute de tension se déroule très rapidement si on continue d'extraire des impulsions de courant de la batterie. La tension de 2,5 V représente un seuil de décharge, et un passage en-dessous de cette valeur risquerait une dégradation irréparable et la formation de dendrites de cuivre à l'anode des cellules. Dans le cas du circuit électronique, un signal optique (LED) permet d'identifier une descente en dessous de 3V d'une cellule individuelle. À ce moment, le module peut être sorti de l'armoire pour être rechargé. Il est à mentionner que cet équipement électronique ne dispose pas d'un équilibrage de tensions ou des charges des cellules comme on peut le trouver pour d'autres systèmes commerciaux (BMS: Battery management system) [12]. L'avantage de ce système artisanal réside dans sa compacité, sa fiabilité et sa consommation d'énergie quasi nulle étant donné que le contrôle d'état de charge se fait manuellement par enclenchement d'un commutateur à bascule.

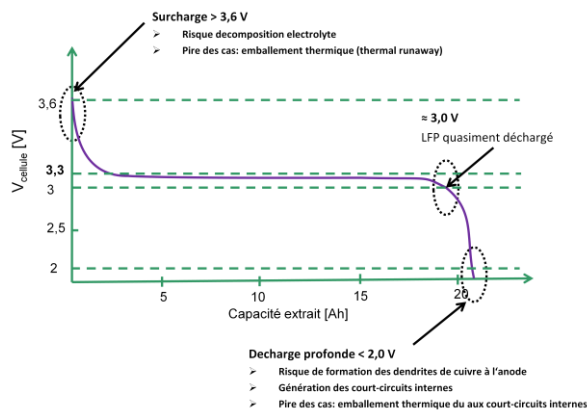


Fig.11 Tension type d'une cellule LFP en circuit ouvert en dépendance de l'état de charge et conditions dangereuses d'une surcharge ou d'une décharge profonde.

### 3.2. Recharge / diagnostic des batteries-modules

Les modules déchargés peuvent être sortis de l'armoire et rechargés individuellement par un dispositif de recharge/diagnostic. Ce dispositif est composé d'un chargeur de puissance (250 W), de cartes de surveillance des cellules (Battery monitoring system) et d'une charge de puissance. La supervision de ces appareils s'effectue par ordinateur au moyen du logiciel Labview. Dès que la tension d'une cellule monte à 3,6 V et risque de dépasser cette valeur (voir figure 11), risquant d'engendrer une destruction par surcharge, le système bascule en mode shunt (by-pass) de la cellule concernée. Dans le système actuel, ce courant de shunt est relativement faible, mais il est prévu à l'avenir de l'augmenter afin d'atteindre plusieurs ampères pour pouvoir effectuer un chargement de puissance. En plus de la possibilité de recharger des modules, ce système permet d'effectuer une analyse précise des cellules sollicitées par des courants d'impulsion.

## 4. CONCLUSION

Dans le cadre des activités de recherche à l'ISL qui incluent la génération des impulsions électriques de forte puissance, on a conçu et construit une batterie de forte puissance à base de cellules du type LiFePO<sub>4</sub> (Lithium FerroPhosphate (LFP)).

Cet article décrit les recherches menées sur les cellules LFP afin de déterminer la puissance maximale livrable. Avec ce type de cellules, on a mesuré lors des tests un courant excédant 3 kA pendant 500 ms. La puissance maximale s'est élevée à 4,7 kW, ce qui correspond à une densité de puissance volumétrique de plus de 12,7 kW/l. Les résultats des tests de série avec au total 53 impulsions de forte puissance ne montrent jusqu'à présent aucune dégradation au niveau de la résistance interne ou de la capacité des cellules.

En se basant sur les résultats décrits et après l'achat de 200 cellules LFP de ce type, on a commencé à construire une batterie modulaire. Actuellement, elle est composée de 10 modules individuels à 20 cellules. Les modules peuvent être mis en série ou en parallèle selon le besoin d'une charge expérimentale. En connectant tous les modules ensemble, la capacité en puissance impulsionnelle de la batterie s'élève à plus de 700 kW (500 ms) avec des courants atteignant environ 20 kA.

Les modules sont pourvus d'un circuit électronique qui surveille la tension aux bornes de chaque cellule individuelle. Les modules déchargés peuvent être sortis de la batterie et peuvent être rechargés individuellement par un dispositif de recharge/ diagnostic qui permet d'effectuer les analyses des cellules.

## 5. REFERENCES

- [1] E. Krempelsauer, « Auf den Akku kommt es an, an der Schwelle zur Elektromobilität », revue "elektor" (www.elektor.de), pp. 32-37, 2009
- [2] SAFT-brochure « Li-Ion Advanced energy storage for new generation AES », Doc.-N° 32027-2-0409, Edition: April 2009
- [3] Matty, T. & Nechev, K. « Li ion energy storage for pulse power applications », 12th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, pp. 237 – 242, 2004
- [4] G. Khalil et al. AVT-166 « Evaluation Criteria for Military Hybrid Electric Vehicles », OTAN-RTO, 11 2012
- [5] D.A. Wetz, B. Shresta, P.M. Novak, « Pulsed Current Limitations of High Power Electrochemical Energy Storage Devices », in Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), 2012 IEEE International, vol., no., pp.288-291, 3-7 June 2012
- [6] F. Herb « Alterungsmechanismen in Lithium-Ionen-Batterien und PEM-Brennstoffzellen und deren Einfluss auf die Eigenschaften von daraus bestehenden Hybrid-Systemen », thèse de doctorat, Université de Ulm, Allemagne, 2010
- [7] IGCT-Datasheet: Part number 5SHY55L4500, Short form catalogue 2012, ABB Switzerland, www.abb.com/semiconductors
- [8] Datasheet HP 601300 LFP 20 Ah, GAIA Akkumulatorenwerke GmbH D-99734 Nordhausen, Germany, 2013, www.gaia-akku.com
- [9] M. Marracci, B. Tellini, O. Liebfried, V. Brommer « Experimental tests for Lithium batteries discharged by high power pulses », International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I<sup>2</sup>MTC), Pisa, IT, May 11-14, 2015
- [10] B. Shresta, P.M. Novak, D.A. Wetz, A.F. Matasso « Evaluation of High C Rate Cycle Induced Aging On Low Impedance Lithium-Ion Batteries using In-Situ Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Analysis », ECS Transactions, 2013
- [11] V. Brommer, O. Liebfried, S. Scharnholz, « Chargeur de condensateurs de forte puissance utilisant des IGCT dans un convertisseur Boost », Symposium de Génie Électrique, juillet 2014, France
- [12] D. Andrea, « Battery Management Systems for Large Lithium-ion Battery Packs », Artech House, Boston, London, ISBN 9781608071050, 2010