

Tests abusifs d'accumulateurs Lithium-ion à l'échelle du mégawatt

Daniel CHATROUX¹ , Julien CHAUVIN^{1,2} , Laurent GARNIER¹ , Rémi VINCENT¹ , Philippe AZAIS¹ 

¹ Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, 38000 Grenoble, France

² Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie 20, avenue du Grésill- BP 90406
49004 Angers Cedex 01 France.

RESUME – Les défauts électriques sont la cause probable d'environ 40% des feux de batteries lithium-ion. Les travaux publiés à SGE en 2023 ont montré que les cellules d'accumulateurs li-ion doivent être caractérisées en test de sécurité abusif en surcharge à des niveaux de courant correspondant au courant de court-circuit du pack et sous la pleine tension de ce dernier. Pour les petits accumulateurs cylindriques, un banc d'essais dédié a été développé. Ce papier présente les résultats de ces types de tests (échelle du MW) menés sur des accumulateurs de fortes capacités typés véhicules électriques (VE) grâce à la plateforme d'essais F-Lab Volta de Schneider Electric.

Mots-clés— architecture électrique batterie, surcharge, court-circuit, lithium-ion.

1. INTRODUCTION

La présentation plénière de 2020 avait montré l'intérêt technologique majeur du lithium-ion par rapport aux autres technologies d'accumulateurs électrochimiques (fortes densités d'énergie stockée et de puissance délivrée en régime continu), ce qui a rendu possible l'émergence rapide des véhicules électriques [1] : la moitié des autobus achetés en Europe sont aujourd'hui électriques et la croissance des ventes dépasse les prévisions de la Commission européenne [2]. Les premiers camions électriques sont commercialisés et montrent une viabilité techniques liée à leur faible consommation de l'ordre de 2 à 2,5 kWh/100 km/tonne transportée, donc quatre fois moins que les voitures, et une viabilité économique très intéressante liée au kilométrage annuel qui rentabilise rapidement la batterie. Par exemple, pour les Mercedes e-Actros, la charge utile est de 40 tonnes, l'autonomie est de 600 km, bien que la batterie ne soit que de 600 kWh. La batterie li-ion (LiFePO₄ / graphite) est garantie 1 200 000 km et le retour sur investissement annoncé est de l'ordre de quatre ans. Renault Trucks prévoit la moitié de ses ventes en électrique en 2030 et mène une campagne pour faire connaître les vérités techniques et technologiques des camions électriques [3]. Le développement très rapide de ces nouveaux usages amène à des batteries de tailles croissantes, de tensions plus élevées, voire l'utilisation de plusieurs batteries en parallèle.

Par contre, les différentes technologies li-ion présentent toutes un risque de feu dont les conséquences croissent avec la taille de ou des batterie(s). Suite à un défaut interne ou une agression externe, il est possible d'amorcer une succession de réactions chimiques internes irréversibles (et souvent exothermiques) qui se déclenche à des seuils de températures successifs. Cet emballement thermique (ET) est connu sous le nom de « thermal runaway ». Cette problématique est très

étudiée, aux différentes échelles : constituants au sein de la cellule, cellule unitaire, propagation thermique inter-cellules mais très peu sous l'aspect électrique.

Nous avons focalisé nos travaux sur ce dernier point, suite à des expertises d'incidents et le constat que pour les voitures électriques, une part importante, de l'ordre de 40 % de ces feux aurait pour causes des défauts électriques [4]. Il est à noter que les règles métiers du génie électrique et les normes fondamentales de l'électricité sont encore trop peu intégrées dans le domaine de la conception des batteries et des normes associées aux batteries li-ion [5].

2. ARCHITECTURE ELECTRIQUE D'UNE BATTERIE LITHIUM-ION

Classiquement, comme indiqué sur la figure 1, une batterie de véhicule électrique est constituée d'une mise en série d'étages constitués d'accumulateurs connectés potentiellement en parallèle.

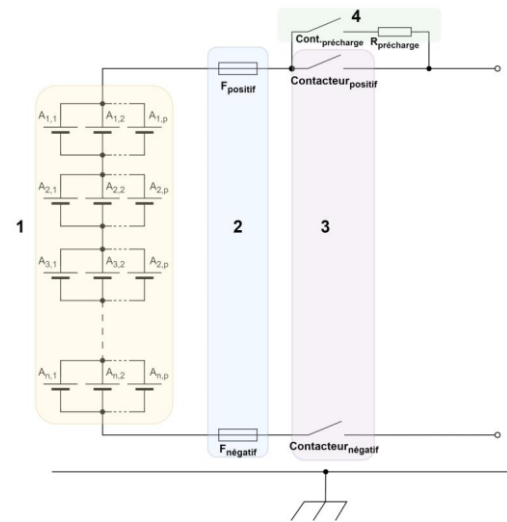


Figure 1: architecture électrique standard d'une batterie de véhicule électrique

Cette architecture est choisie pour simplifier l'électronique de surveillance en tension des accumulateurs. Aux bornes de la mise en série, des fusibles protègent vis-à-vis du court-circuit externe. La batterie et son réseau électrique étant en régime IT, il y a obligation de protéger chaque polarité par un fusible (2, figure 1). Dans le cas d'une batterie commerciale n'ayant qu'un fusible sur le pôle +, l'ajout par l'intégrateur d'un fusible sur l'autre pôle, préférentiellement au plus près de la connectique de la batterie, est obligatoire.

Des contacteurs (3, figure 1) associés à un circuit de pré-charge (4, figure 1) permettent la déconnexion de la batterie à l'arrêt du véhicule et sa reconnexion ultérieure.

Une cause de feu de batterie est le court-circuit en amont des fusibles, aux bornes d'une partie ou de la totalité des accumulateurs en série, comme illustré sur la figure 2. Dans ce cas, ce ne sont que les constituants internes des accumulateurs mis en série ou leurs connexions qui peuvent ou non couper le courant de court-circuit. Un exemple de cause est un double défaut d'isolement vis-à-vis d'une pièce mécanique conductrice commune, soit suite à des isolement électriques sous-dimensionnés, soit suite à des fuite d'un liquide de refroidissement conducteur. Outre le respect des distances dans l'air et des lignes de fuite selon la norme EN-60664, la conception devrait inclure le maintien de l'isolement en cas de fuite de liquide de refroidissement et en cas d'emballement d'un ou plusieurs accumulateurs (projection d'électrolyte, particules conductrices enflammées ou non selon la chimie ...).

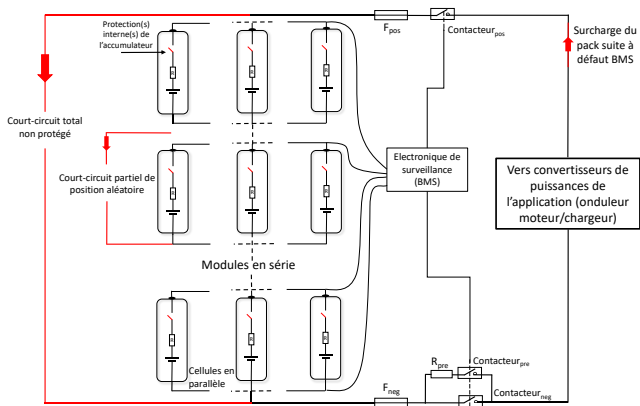


Figure 2 : Exemples de courts circuits non protégés par les fusibles

Dans le cas de plusieurs batteries en parallèle, comme pour les camions électriques, le court-circuit partiel de la mise en série au sein d'un pack se traduit par un courant de court-circuit de ces accumulateurs (sens décharge), mais peut aussi provoquer un courant de surcharge des autres accumulateurs de cette mise en série (sens charge) provenant de la ou des batterie(s) en parallèle.

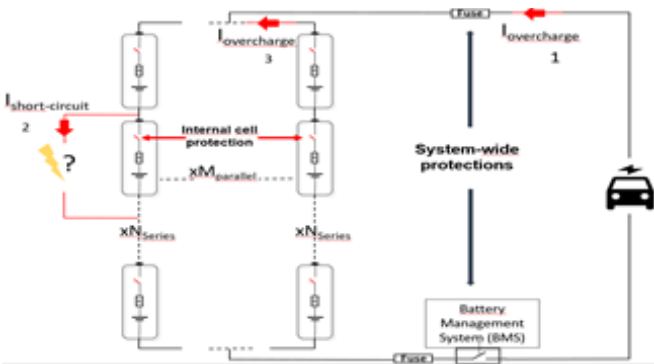


Figure 3 : cas de deux batteries en parallèle, avec courant d'échange entre batteries lors du court-circuit partiel d'une des batteries.

La figure 3 présente des cas de défauts possibles : surcharge suite à défaut du BMS ou contacteurs collés (1), court-circuit interne d'un pack (2), courant d'échange entre packs amenant à un courant de surcharge très élevé dans les accumulateurs de la première batterie non soumise au court-circuit. Il est à noter que les défauts électriques peuvent amener à des feux très rapides et violents puisque tous les accumulateurs impliqués dans la boucle du courant de défaut peuvent partir en ET simultanément.

3. PRECEDENTES ETUDES

Les accumulateurs peuvent intégrer des barrières de sécurité telles le Current Interrupting Device (CID) pour les petits accumulateurs cylindriques ou encore certains de leurs constituants pouvant jouer un rôle de fusible (sans la fiabilité associée), tels des clinquants de connexion. Cependant, ceux-ci ne sont pas spécifiés pour assurer la protection d'une batterie et leur pouvoir de coupure éventuel n'est ni connu ni spécifié.

L'étude la plus approfondie sur le comportement des constituants internes des accumulateurs a été menée par la NASA [6]. Un impact du nombre d'étages mis en série, donc de la tension est pressentie, mais ces essais sont des observations globales sur une batterie complète sans mesures électriques sur les accumulateurs, et donc sans étude des limites en pouvoir de coupure des constituants de ces accumulateurs.

L'instrumentation électrique de tels essais est très délicat. D'une part, opérer à l'échelle d'un pack complet, pour des successions d'essais, a un coût prohibitif. D'autre part, instrumenter électriquement tous les accumulateurs du pack, est à la fois très complexe techniquement et à très fort coût (destruction potentielle du matériel de mesure à proximité d'un départ de feu).

La méthodologie proposée dans les présents travaux (thèse de Julien Chauvin) vise à étudier la répartition des contraintes en courant et tension au sein des accumulateurs lors du défaut, puis de soumettre à un seul accumulateur instrumenté finement les contraintes représentatives obtenues. Lors d'une première phase [7], il a été démontré que pour la surcharge de petits accumulateurs, les CID ouvraient avec de forts décalages temporels. Dans ce cas, les contraintes ne sont absolument pas réparties. Les CID des premiers accumulateurs à ouvrir coupent le courant sous quelques volts, sous la tension des accumulateurs en parallèle qui n'ont pas encore ouvert. Ensuite, le dernier accumulateur de la mise en parallèle du premier étage à ouvrir le courant doit interrompre la totalité du courant sous la totalité de tension de la boucle. Un premier tracé de « l'aire de sécurité » de ces CID avait été proposé. Pour cette première phase, une métrologie de mesure de tension et courant à distance avait été proposée et un banc d'essais à l'échelle de 1200 A sous 92 V avait été développé. Lors des études du court-circuit, il a montré que les clinquants internes à l'accumulateur se comportent comme des fusibles qui assurent, ou non, la coupure du courant selon les accumulateurs choisis et leur association au sein de la batterie [8].

4. METHODOLOGIE

Sur la base des précédents travaux, nous avons défini une méthodologie :

- Etude de l'architecture pour estimer l'ordre de grandeur du courant de défaut et de la tension à ouvrir
- Test des accumulateurs sous des tensions et courants représentatifs pour connaître le pouvoir de coupure des protections internes éventuelles et/ou les constituants de l'accumulateur
- Etudier la répartition des contraintes en courant/tension sur les protections des accumulateurs en série et/ou en parallèle, selon la synchronisation temporelle ou non des protections ou constituants tentant de couper le courant.

Le banc d'essais doit se comporter comme pack batterie, c'est-à-dire être équivalent à une source de tension avec une résistance série physique dimensionnée pour la puissance mise

en œuvre : le test direct consistant à connecter une alimentation stabilisée à l'accumulateur à tester n'est pas représentatif puisque les condensateurs de sortie de l'alimentation agissent comme un réseau d'aide à la commutation. On a une commutation ZVS, alors que dans la réalité, c'est en « commutation dure » que la protection doit ouvrir.

5. BATTERIES LITHIUM-ION POUR L'AUTOMOBILE

Après des premières réalisations de batteries pour les voitures électriques en associant en série et en parallèle des milliers d'accumulateurs cylindriques développés initialement pour les ordinateurs portables (comme Tesla), aujourd'hui, de nombreux constructeurs préfèrent associer seulement en série des accumulateurs ayant la capacité totale du pack batterie, ou des étages constitués seulement de deux accumulateurs en parallèle. Pour nos essais, nous avons sélectionné des accumulateurs représentatifs de ce marché (tableau 1).

Tableau 1. Accumulateurs utilisés, marché : VE ou PHEV

Fabricant	Référence	Capacité (Ah)	Format (type ou mm)	Protections électriques
Samsung DI	PHEV	37	Prismatic PHEV2	OSD
Samsung DI	94Ah	94	Prismatic BEV2	OSD, NSD
LG Energy	JP3	64	Pouch 16,1*100*353	Non
LG Energy	E63B	63	Pouch 14,5*100*301	Non

Pour le test de ces accumulateurs pour le défaut de type court-circuit, nous avons calculé qu'il faut appliquer à l'accumulateur en test des courants de 7000 A sous 400 V au moins.

6. PLATEFORME F-LAB VOLTA DE SCHNEIDER ELECTRIC

La plateforme F-Lab Volta de Schneider Electric est dédiée aux essais de matériels électrotechniques de basse, moyenne et haute tension. Nous avons utilisé les installations consacrées aux essais de pouvoir de coupure (pôle puissance). Les installations disponibles utilisent trois alternateurs de chocs (2 x 600 MVA et 1 x 2500 MVA) permettant de réaliser les essais de court-circuit jusqu'à 2000 V_{DC} et 200 000 A, soit 400 MW.



Figure 4 : un des alternateurs de test de la plateforme FC-Lab de Schneider

Le fonctionnement du banc de puissance est résumé par le schéma illustré en Figure 5.

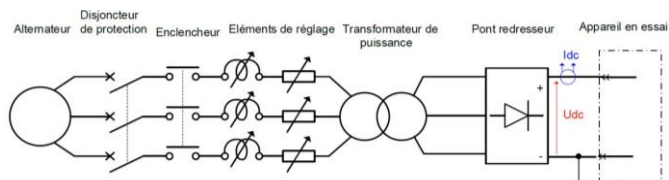


Figure 5 : Schéma de l'installation de test

L'établissement et la coupure du courant de test s'effectuent en haute tension, comme le réglage de sa valeur par des résistances et de sa rampe de croissance par des inductances. Un transformateur permet d'obtenir la basse tension et un pont de diodes de redresser le courant. La sécurité des opérateurs est assurée par la mise en court-circuit et à la terre des pôles de tests. Outre les mesures de tension et de courant aux bornes de l'équipement en cours de test, la salle est équipée de caméras standard et rapide.

7. DÉCHARGE DES ACCUMULATEURS

Le comportement électrique des constituants internes des accumulateurs est très peu dépendant de l'état de charge (variation de l'ordre de quelques volts en fonctionnement nominal) : le test sur des accumulateurs déchargés à 0 V est donc représentatif et les tests en sont simplifiés :

- la connexion peut s'effectuer sur les pôles mis en courts-circuits et à la terre sans devoir ajouter un interrupteur commandé à distance dimensionné à 7 kA.
- le risque d'ET est diminué, donc les essais peuvent s'enchaîner sans délai d'attente et de nettoyage.

Nous avons vérifié que la décharge à 0 V n'a qu'une influence négligeable sur la résistance interne des accumulateurs.

8. TEST DE FUSIBLES EN REFERENCE

Pour avoir une référence sur les données temporelles et les énergies mises en jeux dans une protection de type fusible, nous avons choisi de tester en premier lieu un fusible de type « automobile » (réf. : BC6000A de PEC, donné pour 225 A, une tension de 450 V et un pouvoir de coupure de 16 kA, figure 6).

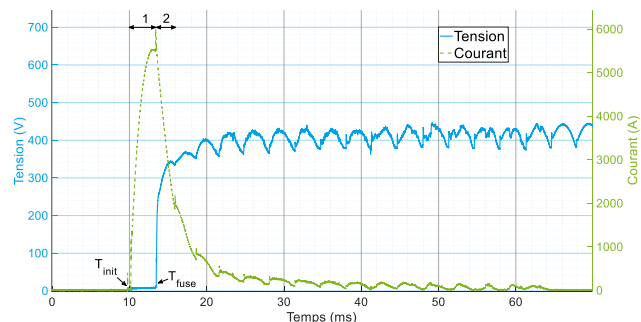


Figure 6 : évolution de la tension et du courant à l'ouverture du fusible PEC BC6000A, lors de l'essai

Après l'établissement du courant à T_{init} on observe la croissance du courant, jusqu'à l'instant T_{fuse} où la tension se met à croître, puis elle rattrape la tension appliquée par le banc de test. Le courant décroît alors jusqu'à son annulation.

La technologie et la physique du fusible permettent d'expliquer les formes d'onde observées. Tel qu'observé sur la Figure 7, le fusible présente deux zones de sections réduites, prévues pour fondre.

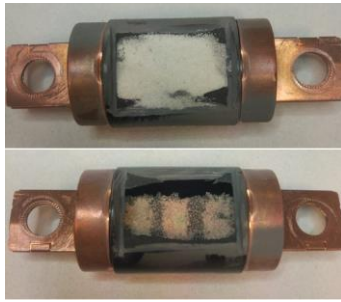


Figure 7 : Ouverture du fusible PEC BC6000A après essais

La période de T_{init} à T_{fuse} , est appelée « pré-arc », les zones de section réduites chauffent, puis à T_{fuse} , la fusion de ces zones donne lieu à l'apparition de deux arcs. La montée rapide de la tension est due à l'apparition de ces deux tensions d'arc en série. Ensuite, ces arcs se refroidissent par diffusion de la chaleur par les parties cuivre restantes de fortes sections, et par la fusion du sable de silice qui les entourent. Ceci fait augmenter la tension d'arc. Lorsque celle-ci atteint la tension du générateur, le courant commence à décroître dans le circuit jusqu'à annulation.

Le fusible agit rapidement, il coupe à 5,5 kA le courant, avant l'atteinte du courant de court-circuit prévu à 7 kA. L'ondulation de la tension à 300 Hz est due au redressement de la tension triphasée par six diodes sans filtrage. Le paramètre utilisé pour caractériser le fusible dans la phase de pré-arc est l'« I^2t », représentatif de l'énergie à apporter pour faire fondre le matériau fusible dans la zone de section restreinte (tableau 2).

Tableau 2. Résultats de la caractérisation menée sur le fusible PEC BC6000A

$d_{pré-arc}$ (ms)	Courant crête (A)	I^2t (kA ² s)	Energie (kJ)
3,35	5 500	65,8	0,108

Un arc présente une chute de tension anodique, une chute de tension cathodique et entre les deux un canal de plasma résistif. Selon les matériaux, les chutes de tension anodique et cathodique donnent un global de 20 à 30 V de chute de tension aux électrodes. Dans le canal de plasma, la chute de tension est très faible, de l'ordre de 3 V/mm. L'air est un très bon isolant et a une tenue diélectrique supérieure à 3 kV/m. Lorsqu'un arc est amorcé, la chute de tension dans le plasma dans l'air n'est que de l'ordre de 3 V/mm, c'est pourquoi, les disjoncteurs utilisent la fragmentation d'un arc en plusieurs en série dans la chambre de coupure, et que les fusibles ont une succession de zones fusibles en série, séparées par une partie qui ne doit pas fondre. On a alors une somme de chutes de tension anodiques et cathodiques.

Un autre fusible (Littlefuse SPFJ125) a été testé de même. Prévu pour 1000 V et 125 A (application : photovoltaïque), il utilise deux rubans en parallèle avec 9 zones fusibles en série sur chaque ruban. La tension à l'ouverture a été de l'ordre de 1000 V. C'est le fusible définit la surtension à l'ouverture par la somme de ses tensions d'arcs.

9. TEST DES ACCUMULATEURS DE TYPE « POUCH »

Pour minimiser la masse de l'accumulateur, celui-ci peut être encapsulé dans un simple sachet souple. Ce format appelé « pouch » doit être maintenu en compression en fonctionnement. Pour ce format, pour les essais, deux plaques maintiennent la pression, et les clinquants des pôles + et - sont pincés, comme indiqué sur la figure 8.

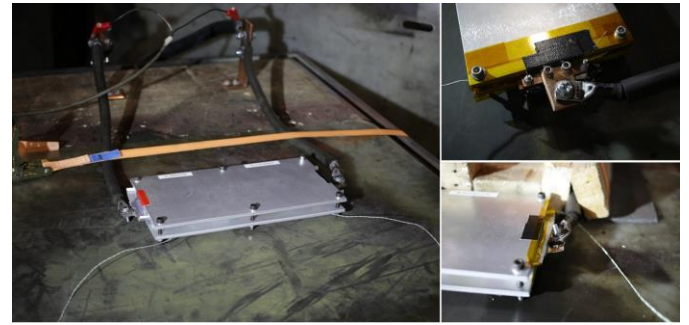


Figure 8 : Compression mécanique et raccordement électrique des cellules "pouch"

Sur le premier essai de l'accumulateur E63B, on observe une coupure du courant, mais suite à une augmentation lente de la tension (figure 9).

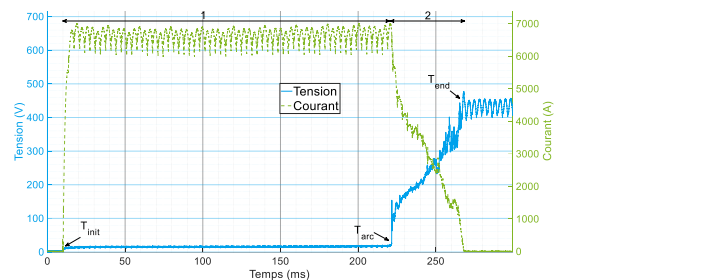


Figure 9 : Tension et courant de l'accumulateur E63B lors de l'essai



Figure 10 : Observation à la caméra rapide du test de l'accumulateur E63B

Pour cet exemple d'essai, notre analyse est la suivante : la borne de l'accumulateur s'est comportée comme un fusible, ce qui a permis à celle-ci et au fil de connexion d'être projetés par les forces électromagnétiques (figure 10). La montée en tension traduit en fait l'augmentation de la tension aux bornes de l'arc due à l'éloignement de la connexion par la force électromagnétique. Cet essai est donc non représentatif du cas d'un accumulateur au sein dans un pack batterie. Ce même artefact a été reproduit sur l'essai de la cellule JP3. Un autre essai de cette cellule a été réalisé avec les bornes bridées mécaniquement. L'oscillogramme est présenté en Figure 11.

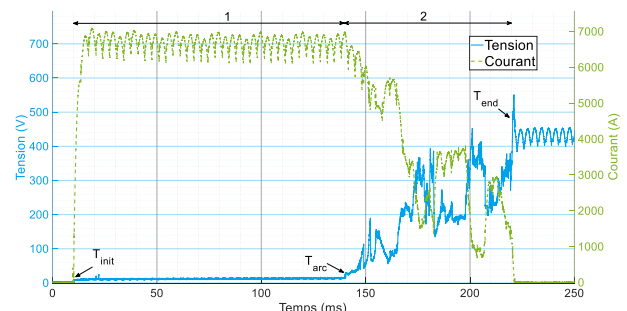


Figure 11 : essai de l'accumulateur JP3 de LG-Chem avec les câbles bridés mécaniquement

Au moment de l’amorçage de l’arc (T_{arc}) le front de tension est, cette fois, de seulement de 40 V, comme classiquement pour un arc établi et non une centaine de volts comme lors des essais où le câble était projeté. Ensuite, nous pouvons observer que la forme d’onde est plus chaotique avec des variations (dv/dt) pouvant atteindre plusieurs centaines de volts par millisecondes. Ce comportement plus erratique de la tension d’arc traduit que les câbles se sont peu déplacés et que les variations de tensions d’arc sont majoritairement dues aux variations de puissance nécessaires pour faire fondre ou évaporer les matériaux rencontrés.

Tableau 3. Caractéristiques des différentes phases

Phase de pré-arc			
$d_{pré-arc}$ (ms)	Courant crête (A)	I^2t (kA²s)	Energie (kJ)
130	7 100	574	10,3
Phase d’arc			
d_{arc} (ms)	Puissance moyenne (kW)	Energie (kJ)	
80	550	43	

Par rapport au fusible automobile testé, la phase de pré-arc dure 40 fois plus longtemps et l’énergie apportée est cent fois supérieure (tableau 3). Cela est représentatif de la quantité de matière à amener à la température de fusion avant apparition de l’arc. Cela laisse supposer que tout le clinquant est concerné et non seulement une zone dédiée de section réduite.

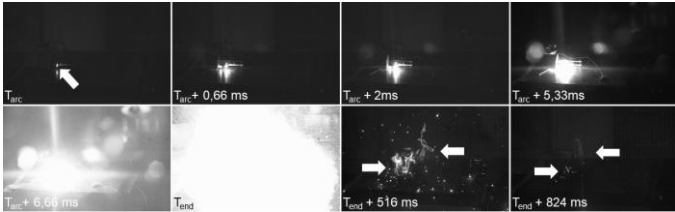


Figure 12 : Images issues de la caméra rapide (3 000 images/seconde) durant l'essai de court-circuit de l'accumulateur JP3 avec câbles bridés ($I_{max} = 7\ 100$ A, 400 V)

Sur les images en caméra rapide (figure 12) nous pouvons observer que l’amorçage de la phase d’arc est dû à la fonte du collecteur positif de l’accumulateur. A T_{arc} , il est en effet possible d’observer une lueur (indiquée par une flèche) au niveau de ce pôle de l’accumulateur (le plus rapproché de la caméra). Cette lueur augmentera en intensité jusqu’à $T_{arc} + 6,66$ ms, moment à partir duquel le rayonnement devenu trop lumineux, sature le capteur de la caméra rendant impossible les observations jusqu’à la décroissance du phénomène, une fois l’arc électrique interrompu. En effet, à partir de T_{end} , soit 79,81 ms après le début de l’arc et comme l’indique l’oscillogramme, l’intensité du rayonnement lumineux décroît. Suite à cette phase d’arc, il faudra attendre environ 516 ms supplémentaires avant que les flammes et les projections libèrent le champ de vue. À cet instant ($T_{end} + 516$ ms), il est possible d’observer, que des flammes sont également présentes au niveau de la borne négative de l’accumulateur (indiqué par des flèches) laissant présager que les deux collecteurs de l’accumulateur ont agi en fusible. Le même constat est confirmé par l’observation des images de la caméra générale (figure 13) : nous pouvons en effet observer à partir de $T_0 + 166,7$ ms la présence de flammes aux deux pôles de l’accumulateur.

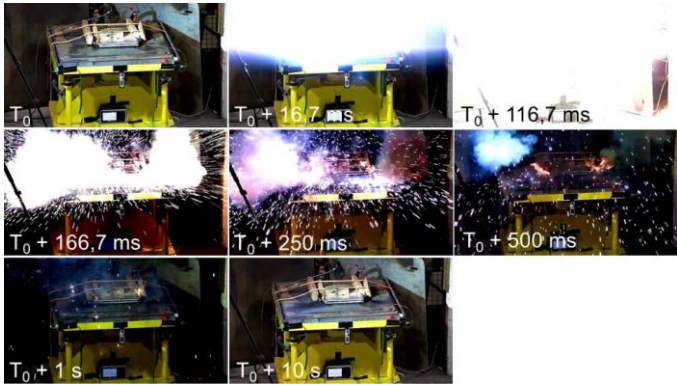


Figure 13 : Images extraites d'une vidéo (60 images par secondes) de l'accumulateur JP3 avec câbles bridés pendant l'essai.

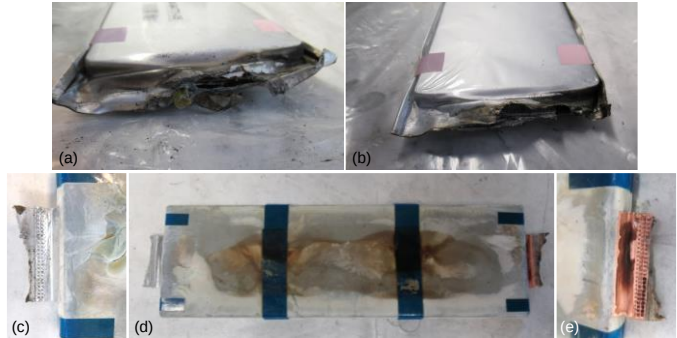


Figure 14 : Photographies de l'analyse post-mortem de l'accumulateur JP3 avec câbles bridés. (a) Enveloppe au niveau du pôle négatif et (b) positif. (c) Bobineau de l'accumulateur sans enveloppe présentant la dégradation des collecteurs positif et négatif

Une analyse post-mortem a pu être réalisée sur l’accumulateur, dont les clichés sont présentés à la figure 14. Nous pouvons tout d’abord observer que l’arc électrique a fait fondre le sachet de l’accumulateur sur plusieurs centimètres de large tant sur la borne négative (a) que positive (b).

Au niveau des électrodes (d), nous pouvons observer que l’arc électrique a consommé une partie de la matière des collecteurs de courant positif (c) et négatif (e). L’arc s’est interrompu au niveau de la soudure par ultrasons des différents collecteurs de chaque électrode. C’est également au niveau de cette partie que s’effectue le scellement du sachet de l’accumulateur à l’aide d’un adhésif dont une partie est encore visible sur le cliché (e). Une hypothèse est que cette partie qui présente la section de conducteur la plus importante, en plus d’être recouverte d’un matériau isolant supplémentaire, nécessitait plus de puissance pour sa destruction et a pu éteindre l’arc.

10. CONCLUSION

Bien que très peu étudiés jusqu’à présent, les défauts électriques au sein des batteries lithium-ion sont des forts risques, à la fois en occurrence et en gravité. Ils représentent de l’ordre de 40 % des causes de feu de voitures électriques. Contrairement à un défaut interne d’un accumulateur qui peut donner lieu à un phénomène par propagation, un défaut électrique peut amener en emballement thermique tous les accumulateurs impliqués de manière simultanée.

Dans le cas de batteries en parallèle, comme pour les véhicules lourds, l’architecture électrique montre trois risques : le non-arrêt de la charge (par exemple suite à défaut BMS et/ou contacteurs collés), le court-circuit partiel interne en amont des

fusibles et le courant entre batteries en parallèle lors d'un court-circuit interne sur l'une des batteries.

Il est aussi possible d'avoir un court-circuit non protégé entre deux batteries en parallèle ayant chacune un défaut d'isolement, si la règle de positionner un fusible sur chacune des polarités de chaque batterie n'est pas respectée.

Face à un court-circuit ou une surcharge selon le sens du courant de défaut, en amont des protections électriques, seules les protections internes ou certains constituants des accumulateurs peuvent intervenir.

Une question clé à laquelle il faut répondre est la synchronisation temporelle ou non, des protections des différents accumulateurs dans la boucle de courant. S'il n'y a pas synchronisation, un accumulateur peut avoir à ouvrir l'ensemble du courant de défaut, sous la tension de la boucle de courant de défaut.

Dans une précédente publication sur les petits accumulateurs cylindriques nous avons montré que les Current Interruption Devices (CID) conçus initialement pour ouvrir le circuit en cas de surpression internes sur les applications batterie pour ordinateurs portables ou outils électroportatifs à batterie, ne sont pas synchronisés et que l'aire de sécurité est fortement limitée. Pour cette étude, un banc dédié et une métrologie spécifique avait été développée.

Nous avons ensuite poursuivi les travaux sur les accumulateurs utilisés dans l'automobile, pour lesquels fallait caractériser en « commutation dure » les protections ou constituants internes, à des niveaux de 400 V et 7 kA. Pour cela, une campagne d'essais a été réalisée sur la plateforme Volta FC-Lab de Schneider.

Un premier test a été effectué avec un fusible automobile pour disposer d'une référence en termes de durées des phénomènes, de leur I^2t et de leur énergie. Ensuite deux types d'accumulateurs en sachet souple ont été testés, seulement bridés mécaniquement en compression. La forme d'onde particulière de la montée de la tension à l'ouverture s'explique par la fusion du clinquant de la borne qui permet alors aux forces électromagnétiques d'éjecter le câble de liaison et la connectique à la borne. Le second type d'accumulateur JP3 (LG Energy) a été testé avec ses câbles bridés mécaniquement pour empêcher cette éjection. Dans ce cas, l'apparition de l'arc est visible sur la forme d'onde sous la forme de l'apparition d'une tension de 40 V, puis l'arc présente une tension qui croît et varie de manière

erratique au fur et à mesure de la fusion ou l'évaporation des constituants au contact de l'arc. Les clinquants positif et négatifs fondent tous les deux sous cet arc électrique entretenu.

Les paramètres observés lors du test, durées, I^2t et énergie des différentes phases, ainsi que l'analyse post-mortem des accumulateurs montrent que les clinquants des accumulateurs en sachet souple testés agissent comme des fusibles, mais après des temps, des énergies déposées et des dégradations n'assurant pas la sécurité électrique vis-à-vis du défaut.

Remerciements

Les auteurs remercient David Brun-Buisson, Pierre Balfet, Jérôme Cognard et Kamel Bachir Elezaar et l'équipe du FC-Lab de Schneider Electric pour leur contribution, assistance et disponibilité pour l'ensemble des tests de sécurité menés au cours de cette étude.

Références

- [1] D. Chatroux. Accumulateurs Lithium-ion et véhicules électriques. SGE 2020 - Symposium de Génie Electrique, juil. 2021, Nantes, France. cea-03344278
- [2] T&E « Près de la moitié des bus vendus dans l'UE en 2024 étaient zéro-émission » <https://www.transportenvironment.org/te-france>
- [3] Renault Trucks « 5 idées reçues sur les camions électriques » <https://www.renault-trucks.com/fr/5-idees-recues->
- [4] R. Xiong, S. Ma, H. Li, F. Sun, et J. Li, "To-ward a Safer Battery Management System: A Critical Review on Diagnosis and Prognosis of Battery Short Circuit", iScience, vol. 23, no 4, p. 101010, avr. 2020, doi: 10.1016/j.isci.2020.101010.
- [5] D. Chatroux, J. Chauvin, Electric Insulation Coordination to Prevent Electric Arcs in Lithium-ion Batteries PCIM2024 Nuremberg
- [6] M. A. Manzo et al., « NASA Aerospace Flight Battery Program : Generic safety, handling and qualification guidelines for lithium-ion (Li-ion) batteries vol I and vol II », 2010.
- [7] J. Chauvin, D. Chatroux, L. Gamier, R. Vincent, P. Azaïs, Sécurité électrique des batteries Lithium-ion utilisant des petits accumulateurs cylindriques. SGE 2023 - Symposium de Génie Electrique, juil. 2023, Lille, France. cea-04272180
- [8] J. Chauvin, D. Chatroux, L. Gamier, R. Vincent, et P. Azaïs, « System-scale short-circuit behavior of small cylindrical Li-ion cells », in 2024 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Chicago, IL, USA: IEEE, juin 2024, p. 1-6. doi: 10.1109/ITEC60657.2024.10598967