

Sécurité électrique des batteries Lithium-ion utilisant des petits accumulateurs cylindriques

Julien CHAUVIN^{1,2} , Daniel CHATROUX¹ , 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 Grésillé- BP 90406
49004 Angers Cedex 01 France.

RÉSUMÉ – Les accumulateurs à technologies lithium-ion furent initialement développés pour les applications électroniques nomades. En particulier, le format cylindrique 18650 a été le standard pour les ordinateurs portables. Les très bonnes performances en densités d'énergie et de puissance à un coût acceptable ont permis de les envisager pour d'autres applications comme par exemple l'émergence de la voiture électrique performante telle le roadster de TESLA, dont la batterie de 53 kWh était constituée de 6831 de ces accumulateurs lithium-ion au format 18650, associés électriquement en parallèle et en série. Dans cette présentation nous allons indiquer pourquoi l'association de centaines ou de milliers de petits accumulateurs reste une solution industrielle utilisée dans de nombreuses applications. Nous étudierons ensuite l'impact de l'architecture électrique de la batterie en cas de défaut électrique et les contraintes appliquées sur les éléments de sécurité internes des accumulateurs, éléments de sécurité conçus initialement pour les applications électroniques nomades. Ensuite, nous présenterons des « manques » technologiques et pointerons des tests inappropriés dans les normes actuelles concernant la sécurité des batteries. Enfin nous donnerons les premiers résultats de tests pour le tracé de l'aire de sécurité de protections internes des accumulateurs dans des conditions représentatives de la réalité des défauts électriques.

Mots-clés—CID, PTC, ZVS, architecture électrique batterie, surcharge, court-circuit, lithium-ion

1. INTRODUCTION

Les accumulateurs à technologies lithium-ion ont été développés initialement pour les besoins de l'électronique nomade. En 1991, le premier accumulateur lithium-ion a été commercialisé par Sony Corp. pour le caméscope [1]. Dans les années suivantes, le format cylindrique 18650, de 18 mm de diamètre et de 65 mm de long, fut établi comme standard, fabriqué par milliards de pièces sur la planète, pour l'intégration dans les packs batteries des ordinateurs portables. Le lithium-ion possède une densité d'énergie élevée (typiquement supérieure à 150Wh/kg et 300 Wh/L à l'échelle de la cellule à courant faible) qui peut aussi être délivrée en continu à un niveau de puissance élevé : on atteint aisément 100Wh/kg à une densité de puissance de 1kW/kg. Ces caractéristiques techniques ont permis une révolution pour le véhicule électrique. La baisse fulgurante des coûts due au choix stratégique de la Chine a permis son décollage industriel.[2], [3]

Précédemment, les technologies disponibles (plomb-acide, Nickel Cadmium et Nickel métal hydrure) permettaient de réaliser des versions de puissance, mais d'énergie trop limitée, ou des versions typée énergie, apte à délivrer des pics de

puissance pendant quelques secondes mais pas en continu.[4], [5]

Le lithium-ion est la première technologie d'accumulateurs électrochimiques permettant de combiner un couple énergie – puissance permettant de répondre aux besoins d'un véhicule électrique.

Tesla Motors a fait émerger le véhicule électrique très performant en autonomie et en puissance par l'association de plusieurs milliers d'accumulateurs cylindriques 18650 en partenariat avec Panasonic. Par la suite, Tesla a développé des accumulateurs optimisés pour ses applications et a proposés des tailles supérieures telles que le 21700, comme standards réalisables avec les mêmes machines de production.



Figure 1 : accumulateurs au format 18650, batterie d'ordinateur portable, pack de Tesla Model S 400V de 8256 cellules

L'émergence du véhicule électrique s'est faite en une décennie, ce qui est très rapide : les batteries lithium-ion pour cette application sont en constante évolution.

2. BATTERIE A BASE DE CENTAINES OU MILLIERS DE PETITS ACCUMULATEURS

Les batteries des véhicules électriques, sont à l'exception des véhicules Tesla Inc., constitués d'accumulateurs de forte capacité et de grande taille en sachets souples « pouch cells » ou enveloppe rigide parallélépipédiques « prismatiques » [6], [7]. Du fait des larges quantités consommées par le marché automobile, les fabricants de cellules ont conçu des accumulateurs optimisés pour ce type de besoin et les volumes de production sont entièrement dédiés aux constructeurs automobiles et ne suffisent d'ailleurs pas toujours à alimenter tous les acteurs créant ainsi de fortes tensions sur le marché.

Pour les autres applications, soit les concepteurs de systèmes sont aptes à nouer des accords spécifiques, sinon, ils n'ont accès qu'aux petits accumulateurs cylindriques en vente libre. Les petits accumulateurs bénéficient des chaînes de productions mise en place dans le passé et sont donc productibles en grand nombre et à bas coût. Les concepteurs des packs batterie de ces applications doivent alors gérer les aspects de connexion, refroidissement, isolation et sécurité du pack constitué de centaines ou des milliers d'accumulateurs de petite taille associés entre eux.

En effet, malgré leurs avantages majeurs en terme de densité d'énergie et de puissance les accumulateurs lithium-ion présentent un risque majeur en terme de sécurité : l'emballement thermique.[8]–[10] Dans cette situation, une succession de réactions exothermiques surviennent au sein de l'accumulateur pouvant mener à la combustion, voire l'explosion de celui-ci.[11], [12] Les interactions entre les couples électrolyte – cathode, électrolyte-anode et cathode-anode sont à l'origine de ces réactions d'emballement, en complément du design de la cellule et des choix de ses constituants « passifs ».[13]

La question relative à la sécurité vis-à-vis du format d'accumulateur reste ouverte aujourd'hui : doit-on plutôt choisir des accumulateurs de grande taille optimisés par le fournisseur et dont la sécurité est optimisée par lui, ou choisir des petits accumulateurs pour pouvoir optimiser la sécurité à l'échelle du pack, par exemple, pouvoir mettre des barrières physiques limitant la propagation d'accumulateurs à accumulateurs.

Face à cet état des lieux, aujourd'hui, on observe que la solution d'association d'un nombre important de petits accumulateurs cylindriques standards peut être utilisée dans les situations suivantes :

- La capacité de la batterie est de l'ordre de quelques ampères-heures à quelques dizaines d'ampères-heures (outillage électroportatif, vélo à assistance électrique, petite mobilité).
- L'encombrement alloué à la batterie est de géométrie complexe.
- La quantité de batteries produites ne permet pas d'intéresser et d'avoir accès aux accumulateurs de l'automobile à coût compétitif.
- Il est souhaité d'avoir plusieurs sources d'approvisionnement totalement compatibles pour ne pas être dépendant d'une unique référence d'un unique fournisseur.
- Les accumulateurs cylindriques de petites tailles sont ceux à coût les plus faibles disponibles pour l'application.
- Le fournisseur de la batterie possède ou investit dans une ligne de fabrication d'accumulateurs cylindrique, à l'image des Gigafactory de Tesla.

3. GESTION DE LA SECURITE

La protection électrique des accumulateurs à technologie lithium-ion consiste principalement à protéger ceux-ci en termes de tension et de courant afin de rester dans la zone de sécurité du système électrochimique. En ce qui concerne la tension, les cellules doivent être maintenues dans les plages de tension minimales et maximales recommandées (généralement 2,5 V et 4,2 V respectivement pour les accumulateurs avec cathodes de type nickel-cobalt-manganèse (NMC) ou nickel-cobalt-aluminium (NCA) et anodes en graphite).[14], [15] Cela permet d'éviter que les cellules ne soient surchargées ou surdéchargées ce qui peut conduire à leur dégradation voire à leur emballement thermique. C'est le système de gestion de la batterie (ou battery management system, BMS) qui est considéré comme l'élément central de la sécurité, qui assure ces fonctions.[16]–[18] Le BMS doit en premier lieu surveiller toutes les tensions de tous les étages d'accumulateurs en série pour les maintenir dans la plage de tension de sécurité, comme présenté en figure 2. Le BMS

assure également d'autres fonctions, mais qui ne sont pas des fonctions de sécurité :

- Équilibrage des étages d'accumulateurs en série.
- Limitation des puissances à la charge et la décharge selon les conditions de charge et de températures.
- Gestion du conditionnement thermique.
- Fourniture d'indicateurs d'état (état de charge SOC, état d'énergie SOE, état de santé SOH).

Ce sont des fonctions d'optimisation de l'énergie stockée, de limitation du vieillissement ou opérationnelle, mais non de sécurité.

Cependant, bien que le BMS soit un élément central de la sécurité, il n'est pas suffisant. Pour assurer la sécurité électrique du système complet d'autres mesures doivent être prise concernant l'architecture électrique générale.

Pour une application véhicule ou stationnaire de forte énergie, l'architecture électrique utilise un grand nombre d'accumulateurs en série pour atteindre le niveau de tension désiré, et en parallèle pour disposer de l'énergie stockée et pouvoir fournir le niveau de puissance requis.

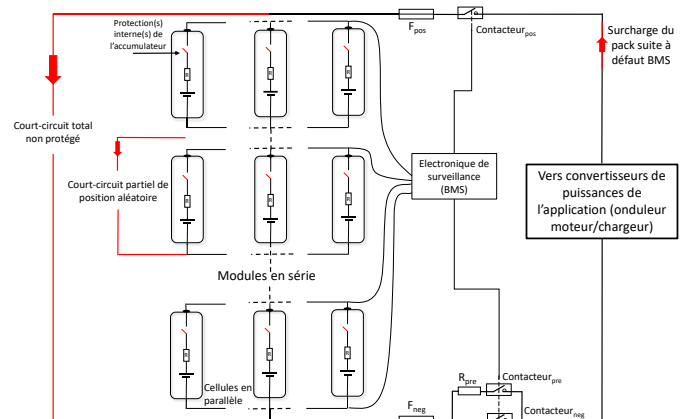


Figure 2 : Représentation simplifiée d'une architecture électrique de batterie Lithium-ion

Les éléments principaux de sécurité sont :

- Régime de type réseau IT. La batterie ainsi que toute l'architecture électrique véhicule est isolée de la masse, de la carrosserie. Ainsi, on peut continuer de fonctionner (rouler) après le premier défaut.
- Équipotentialité des masses (carrosserie, châssis ...).
- Contrôleur permanent d'isolement (CPI) pour signaler le premier défaut.
- Dispositif de sectionnement pour intervention sur véhicule en maintenance ou après accident.
- Contacteurs pour isoler le pack batterie à l'arrêt.
- Contacteur de précharge pour permettre la reconnexion du pack (précharge des condensateurs du réseau avant fermeture des contacteurs).
- Fusibles pour interrompre les courants de court-circuits.

Le régime IT impose :

- deux contacteurs, i.e. un par polarité, pour isoler électriquement la batterie, n'avoir plus de tension sur les bornes même en cas de défaut d'isolement de celle-ci
- un sectionneur à deux pôles.

- au moins deux fusibles i.e. un par polarité. Ils peuvent être dans le boîtier du sectionneur deux pôles.

Comme on le verra plus loin, la présence de deux fusibles est une approche « minimaliste ». Il est souhaitable d'en ajouter.

Les courants de court-circuit des packs de véhicules électriques peuvent être de plusieurs dizaines de kA. Les fusibles doivent être spécifiés pour le courant continu et avec un pouvoir de coupure en cohérence avec l'usage.

Selon la localisation d'un ou de plusieurs défauts de type court-circuit ou défaut d'isolement ou non arrêt de la charge, les étages d'accumulateurs concernés sont soumis à des centaines d'ampères (charge rapide ou décharge normale) ou milliers (court-circuit interne pack) sous des tensions de dizaines ou centaines de volts. Il faut étudier les répartitions des contraintes sur les accumulateurs dans ces cas et le comportement des protections dont ils sont munis.

4. CAS DE DEFAUTS NON PROTEGES

Les protections listées précédemment ne protègent pas pour tous les types de défauts.

Le schéma de la figure 2 présente deux exemples de défauts de court-circuit non protégés qui sont :

- Un court-circuit de la totalité de la mise en série des accumulateurs en amont des fusibles.
- Un court-circuit d'une partie des étages d'accumulateurs.

De tels court-circuit peuvent être causés par une déformation mécanique suite à un accident ou un double défaut d'isolement par exemple suite à fuite de liquide de refroidissement, ou projection de particules conductrices sur une zone d'isolement électrique par un accumulateur en emballement thermique.

Certains constructeurs automobiles utilisent un troisième fusible placé à « mi-tension » du pack. Il peut traiter le cas de court-circuit de la totalité de la mise en série des accumulateurs en amont des fusibles des deux pôles.

Un court-circuit d'une partie des étages d'accumulateurs est un défaut non traité par une protection additionnelle auxquels les accumulateurs vont être soumis.

On peut donner ici à titre d'exemple des ordres de grandeur pour un pack batterie de 400V et 100 Ah :

- Courant de charge rapide en 20 mn : 300 A.
- Courant de court-circuit de tout ou d'une partie du pack : 3 à 10 kA.
- La tension de la boucle de courant de court-circuit est 400 V.

Le cas de la charge rapide non interrompue peut être dû à un défaut BMS, s'il n'est pas conçu avec redondance.

Pour des systèmes de très forte puissance, il est également possible de mettre en parallèle sur un même bus de tension plusieurs packs batterie. Dans ce cas, des défauts inter-packs peuvent survenir. On peut donner à titre d'exemple des ordres de grandeur pour deux packs batterie disposés en parallèle dont l'un est soumis à un court-circuit d'une partie de la tension (packs de 800V & 100 Ah) :

- Courant de court-circuit dans la zone de court-circuit partiel : 3 à 10 kA.

- La tension de la boucle de courant de court-circuit est celle correspondant au nombre d'étages court-circuités.
- Courant échangé entre les deux packs : 1 à 3 kA.
- La tension de la boucle de courant d'échange entre les packs est celle correspondant au nombre d'étages court-circuités.

Il est à noter que le courant entre les deux packs est dans le sens « décharge » pour le pack qui ne présente pas de défaut et dans le sens « charge » pour les étages de l'autre pack qui ne sont pas court-circuités.

Dans ce cas, le court-circuit partiel donne lieu à un courant de court-circuit de forte valeur pour le groupe des étages d'accumulateurs soumis au court-circuit, et un courant de surcharge de forte valeur pour les autres étages du même pack.

5. PROTECTION INTERNES DES ACCUMULATEURS

Classiquement, les accumulateurs cylindriques de type 18650 sont munis de deux ou trois protections internes.[19], [20]

Ces accumulateurs sont munis d'un CID (Current Interrupt Device) qui déconnecte la borne positive de l'accumulateur lors d'une surpression interne. Une membrane se déforme jusqu'à la rupture de la soudure de connexion. Cette protection est interne à l'accumulateur et la distance d'ouverture est de l'ordre de 0,5 mm comme présenté en figure 3. [21]

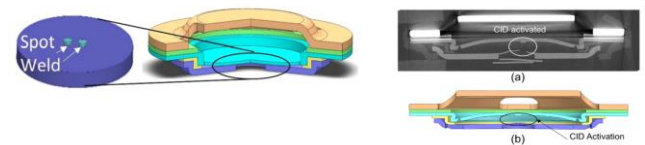


Figure 3 : CID avant activation à gauche et après à droite reproduit et adapté selon [21]

En complément, un disque résistif à coefficient de température positif (PTC – positive temperature coefficient) peut être intégré pour agir tel un fusible réarmable. Ce dispositif ne peut être utilisé que si la résistance additionnelle qu'il amène soit compatible avec le niveau de courant, puissance, demandé à l'accumulateur dans l'application.

En cas de surpression interne trop élevée, un événement s'ouvre pour libérer les gaz (pression supérieure à 20 bars généralement). Cette sécurité empêche l'explosion.

L'événement et le CID sont les protections classiques. Le disque PTC est une protection additionnelle d'usage limitée.

Selon le type de couple cathode/anode au sein d'un accumulateur lithium-ion et les conditions de défaut, les gaz relâchés par l'événement peuvent être enflammés, et être accompagnés de particules conductrices, métalliques et/ou en feu.

6. LIMITES DES NORMES

Les normes pour les accumulateurs lithium-ion sont en premier lieu des normes dédiées au transport de ces accumulateurs individuellement, telles l'UN38.3.[22], [23] Par exemple, ils doivent tolérer un court-circuit accidentel à leurs bornes. En charge, ils doivent pouvoir supporter deux fois leur tension maximal de charge définie par le fabricant (soit généralement 7,2- 7,4V) sous un courant de charge double du courant maximal défini par le fabricant (quelques ampères ou dizaines d'ampères pour les petits accumulateurs cylindriques) sans partir en emballement thermique. Actuellement, au niveau

du pack batterie, les normes n'intègrent pas encore explicitement les règles de conception génériques des produits électriques, telles qu'imposées dans la EN 60664 - 1 « Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension ».

On observe actuellement dans le domaine de la conception des batteries une méconnaissance des contraintes classiques de dimensionnement des objets électriques : niveaux de surtensions requis, dimensionnement des isolements, des distances dans l'air et des lignes de fuite, ainsi que des tests diélectriques. Ces données électriques sont absentes des documentations des produits.

Les normes « produits » concernant les batteries sont en cours d'amélioration et devraient être complétées des normes génériques électriques. Il est à noter qu'elles devraient même être plus complètes et plus exigeantes pour prendre en compte la spécificité de l'application (risque de fuite de liquide de refroidissement non isolant, risque de pollution conductrice en cas de dégagement d'un premier accumulateur qui peuvent dégrader les isolations électriques).

7. REPARTITION DES CONTRAINTES EN CAS DE SURCHARGE OU DE COURT-CIRCUIT

En cas de surcharge ou de court-circuit total ou partiel, non protégé, nous avons indiqués que les ordres de grandeur des courants à ouvrir sont de centaines ou de milliers d'ampères sous plusieurs centaines de volts.

Les travaux les plus aboutis à notre connaissance ont été effectués par la NASA.[24], [25] Les essais abusifs présentés sont alors effectués sur des assemblages croissants de cellules en série, jusqu'à constatation de l'échec des dispositifs de protections intégrés (CID et PTC). Ces tests démontrent l'existence d'une aire de sécurité des protections, sans toutefois analyser la physique des phénomènes du point de vue électrotechnique.

Pour nos études, nous avons choisi une approche consistant à étudier la répartition des contraintes globales en courant et tension sur les accumulateurs, puis de tester ceux-ci selon un schéma électrique représentatif de la réalité, avec le niveau de contraintes auxquelles il est soumis. Trois architectures sont possibles pour l'association en parallèle et en série des accumulateurs du pack batterie présentées en figure 5 :

- Mise en série d'étages d'accumulateurs en parallèle.
- Mise en matrice.
- Mise en parallèle de mise en série.

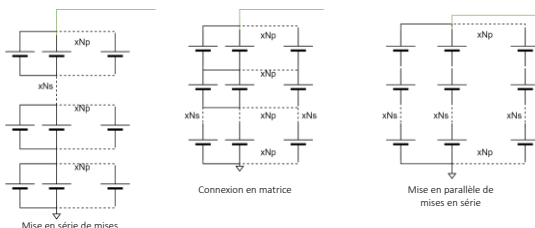


Figure 4 : architectures électriques de batteries

La mise en parallèle de mise en série nécessite un BMS par colonne et une mesure de tension par accumulateur. De ce fait, cette solution est classiquement écartée pour des questions de coût. La mise en matrice est celle qui assure la meilleure

répartition de courant cependant elle est complexe à mettre en œuvre sur de grandes quantités de cellules. La solution la plus utilisée est la mise en série d'étages constitués d'accumulateurs en parallèle. Ces deux dernières architectures ne nécessitent qu'un BMS par étage, limitant ainsi son coût et sa complexité.

Cependant, lorsqu'un défaut survient sur un assemblage d'accumulateurs, plusieurs paramètres rentrent en compte afin d'évaluer les contraintes appliquées sur chacun des accumulateurs. Parmi elles, le choix d'architecture électrique et le fonctionnement des protections intégrées aux accumulateurs sont des éléments cruciaux.

Lors d'un défaut de type surcharge par exemple, un point clé est de savoir si les ouvertures des CID sont synchronisées ou si les instants d'ouverture de ceux-ci sont décalés dans le temps. Ce point n'étant pas documenté dans la littérature de l'état de l'art que nous avons pu obtenir, nous avons fait un essai dédié pour ce point.

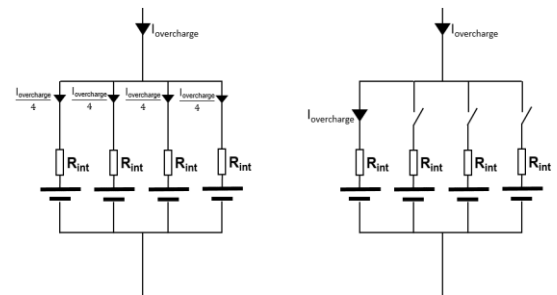


Figure 5 : ouverture synchronisée à gauche et désynchronisée à droite des CID

Si les instants d'ouverture sont suffisamment synchronisés, les contraintes en courant à ouvrir sous le niveau de tension sont répartis sur plusieurs CID en parallèle. Si les instants sont décalés, le dernier CID à ouvrir aura tout le courant à ouvrir sous la tension de la boucle de courant de défaut comme présenté en figure 6.

Les essais de sécurité des accumulateurs et pack lithium-ion nécessitent une zone d'essais spécifique, dédiée, sécurisé et une salle de métrologie située à distance.

Pour les mesures à l'oscilloscope des commutations des protections, une métrologie adaptée a été mise au point [26], avec transmission par des câbles coaxiaux type « 50 ohms » existants. Les mesures de tension sont faites par des sondes basses impédances type « 1500 ohms » et les mesure de courant sont basées sur des capteur à effet Hall à contre réaction de courant.

L'essais pour étudier les instants d'ouverture des CID d'accumulateurs en parallèle a été fait pour trois accumulateurs provenant d'un même lot de fabrication.



Figure 6 : essais de trois accumulateurs en parallèle en surcharge

On observe à l'oscilloscope les instants d'ouverture.

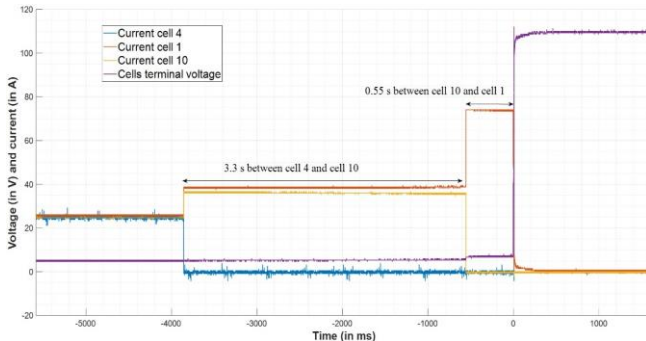


Figure 7 : courants et tensions de la séquence d'ouverture des CID

Initialement, le courant est de 25,3 A par accumulateur.

Le premier CID ouvre le courant de son accumulateur sous la tension des deux autres accumulateurs encore connectés. Son courant se répartit dans ces deux accumulateurs, 36 A pour un accumulateur 10 et 38,7 A pour l'autre.

Le second accumulateur s'ouvre 3,3 secondes plus tard sous la tension du dernier. Ce dernier reçoit alors le courant total de 75 A.

Le dernier accumulateur se déclenche 0,55 seconde plus tard. Il doit alors ouvrir le courant total de 75 A sous la tension totale appliquée de 110 V.

Les deux premiers accumulateurs ont pu se mettre en sécurité. Le dernier est soumis à un arc lors de l'ouverture

Par cet essai, nous avons pu vérifier le décalage temporel des instants d'ouverture des CID, qui est tel que ceux s'ouvrent les uns après les autres, la tension étant limitée à leur borne par les autres accumulateurs encore connectés. Le dernier CID à ouvrir doit par contre ouvrir le courant total sous la tension totale de la boucle de courant.

Ce résultat de temps de décalage s'exprimant en secondes (ou minutes pour des conditions moins contraignantes) est cohérent avec la physique des CID qui est un interrupteur déclenché par la pression interne de l'accumulateur, pression due à la génération des gaz au cours de la vie de l'accumulateur et aux conditions de surcharge.

Ce temps de décalage est à comparer avec le temps d'interruption par le CID qui s'exprime en milliseconde.

Un autre essai a démontré les mêmes temps de décalage d'une mise en série de trois accumulateur. Le premier accumulateur dont le CID s'ouvre doit donc interrompre le courant sous la tension appliquée par la boucle de courant.

Ces essais ont démontré que pour les protections CID :

- Le premier étage de la mise en série qui ouvre doit supporter la totalité de la tension en défaut,
- Le dernier accumulateur d'une mise en parallèle qui ouvre doit ouvrir le courant total,
- Le dernier accumulateur d'une mise en parallèle de l'étage qui ouvre en premier doit ouvrir le courant total sous la tension de la boucle de courant du défaut.

Alors que les accumulateurs sont testés dans les conditions 2C, 2U, en cas de défauts ils peuvent avoir à ouvrir des courants de dizaines, centaines ou milliers d'ampères sous des tensions allant de dizaines à des centaines de volts, selon la taille du pack batterie et de la localisation du défaut.

Les protections des accumulateurs n'étant absolument pas spécifiées en pouvoir de coupure, il est nécessaire d'étudier ce point par des tests adaptés.

8. PROPOSITION DE CONDITIONS D'ESSAIS REPRESENTATIVES

Nous avons pu observer expérimentalement que le test de surcharge tel qu'indiqué par les normes, c'est-à-dire en appliquant deux fois la tension et deux fois le courant nominal de la cellule est non représentatif de la réalité. Pour cela des essais de surcharge de plus haute tension et de plus fort courant sont nécessaires. Le schéma en figure 9 représente une alimentation de laboratoire à gauche connectée à un accumulateur à droite où la résistance interne et l'interrupteur qui constitue le CID sont représentés. C'est de cette façon qu'est réalisé l'essai abusif de surcharge conformément aux normes de test.

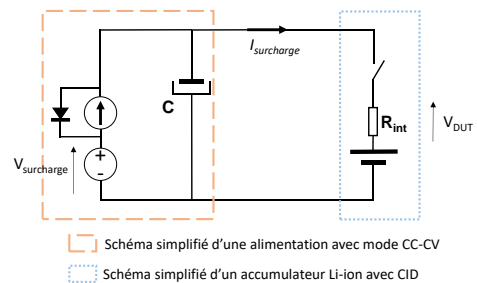


Figure 8 : schéma de test tel qu'indiqué dans les normes

L'alimentation de laboratoire est une source de tension jusqu'à un niveau de courant défini. A l'atteinte de ce courant, elle régule en courant et la tension est celle imposée par la charge sous ce courant. Lors de la phase de surcharge, l'alimentation limite en courant. La tension à ses bornes est celle de l'accumulateur. Le condensateur de sortie de filtrage de l'alimentation est donc chargé à la tension de l'accumulateur.

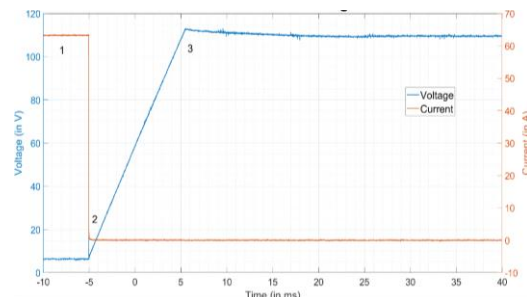


Figure 9 : tension et courant de l'ouverture du CID selon le schéma proposé par les normes batteries

Lors de l'ouverture du CID, ici pour des conditions de 63 A de courant de surcharge et une tension de 110 V, on voit que le CID ouvre sous la tension de l'accumulateur, en ZVS, du fait de

l'assistance à l'ouverture apporté par le condensateur qui met 10 ms à se charger. Ces étapes sont respectivement présentées par les phases 1, 2 et 3 de la figure 10.

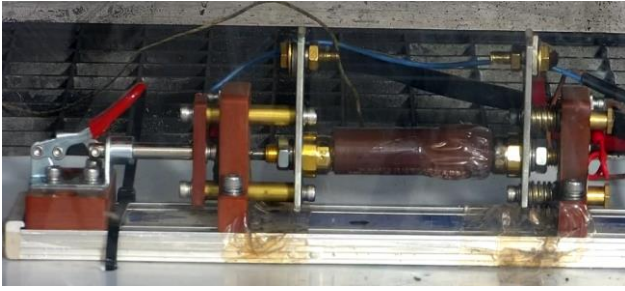


Figure 10 : vue de l'accumulateur après le test de surcharge (110 V, 63 A)

L'essai n'a eu aucune conséquence en externe de l'accumulateur.

Dans le pack batterie, le schéma réel de la boucle de courant est une source de tension imposée qui est celle imposée par l'électrochimie de tous les accumulateurs en série et une résistance représentative de toutes les résistances internes des accumulateurs et des câblages.

La figure 11 correspond donc à un essai réaliste :

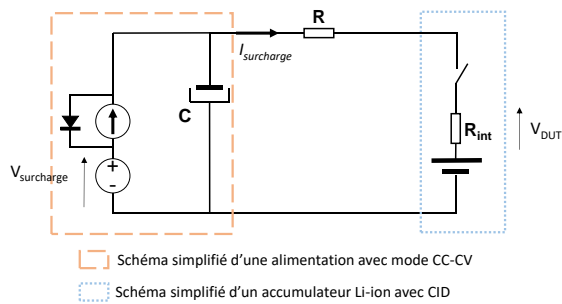


Figure 11 : schéma proposé représentatif de la réalité des boucles de courant de défaut

On aura alors une ouverture de type commutation dure, hard-switching et non aidée (ZVS).

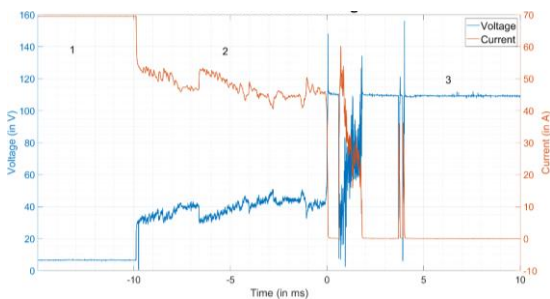


Figure 12 : tension et courant de l'ouverture du CID selon le schéma représentatif proposé

La figure 12 montre l'ouverture du CID (1), avec un plateau de tension caractéristique d'une arc établi (2), puis plusieurs tentatives d'ouverture du courant avec oscillations avant interruption définitive du courant (3). L'interruption définitive du courant est due à l'emballement thermique de l'accumulateur, et donc, à sa destruction, présentée par la figure 13.

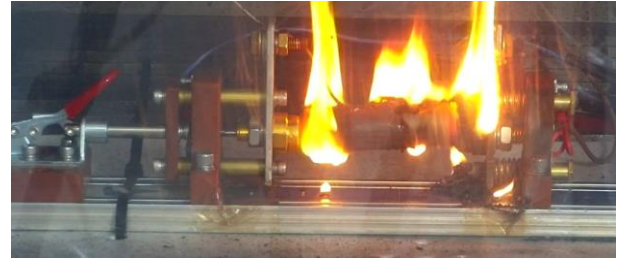


Figure 13 : accumulateur à l'issue de l'essai de surcharge représentatif proposé (110 V, 70 A).

La valeur de résistance est déterminée par le courant d'essai souhaité Eq. (1) :

$$R = \frac{V_{surchage} - V_{DUT}}{I_{surchage}} - R_{int} \quad (1)$$

Où :

- $V_{overcharge}$ est la tension de test
- $I_{overcharge}$ le courant de test
- V_{DUT} la tension de l'accumulateur
- R_{int} la résistance interne de l'accumulateur

Il est à noter que cette résistance doit être de technologie fortes puissance et énergie du fait des tension et courant mis en jeux.

9. AIRE DE SECURITE DES CID

Le schéma de test proposé et la métrologie de mesure à distance développée ont permis de commencer à tracer une aire de sécurité pour une première référence d'accumulateur. Des essais de surcharge de courant et de tension variables ont été réalisés sur 8 cellules de même référence.

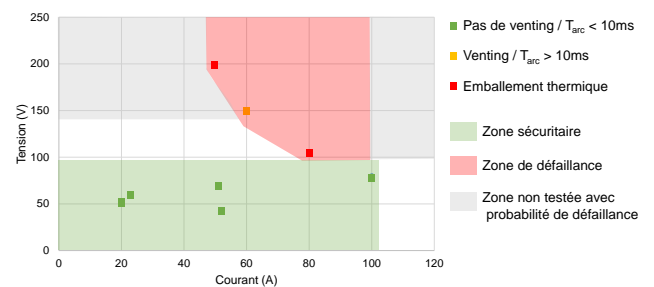


Figure 14 : premier tracé d'aire de sécurité suite à la campagne d'essais

On observe une zone de sécurité en vert où l'accumulateur reste intègre sans relâcher de gaz et où le CID ouvre le courant en moins de 10 millisecondes.

Cette zone verte correspond à une tension inférieure à 100 volts. On peut supposer que pour les niveaux de courants testés, la tension est insuffisante pour maintenir l'arc du fait des chutes de tension cathodique et anodiques imposées par celui-ci.

Pour des tensions supérieures, on observe l'ouverture de l'événement et venting (dégagement des gaz) ou l'emballement thermique de la cellule. La durée d'arc dépasse dans ces cas, 10 ms.

10. REMERCIEMENTSS

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

11. CONCLUSIONS

Les accumulateurs lithium-ion en format cylindrique étaient utilisés dans toutes les batteries d'ordinateurs portables il y a quelques années, puis leur association par milliers en série et parallèle a permis d'industrialiser les batteries des premiers véhicules électriques de hautes performances. Cette solution d'association d'un grand nombre de ces petits accumulateurs cylindriques pour réaliser une batterie est encore choisie aujourd'hui pour des critères de coût, disponibilité ou intégration dans la place disponible dans des applications où l'utilisation ou l'approvisionnement de cellules de grosse capacité est impossible.

Pour la sécurité de ces batteries, le BMS assure les fonctions de surveillance de la tension, du courant et des températures des accumulateurs. L'architecture électrique assure quant à elle, la protection électrique vis-à-vis des défauts externes. En cas de défaut interne au pack batterie, par exemple, court-circuit interne en amont des sécurités électriques, les accumulateurs concernés vont être soumis aux contraintes de courant et de tension du système (centaines ou milliers d'Ampères, centaines de volts). Leurs éventuelles protections internes de type CID vont alors devoir couper le courant dans ces conditions.

Cependant, ces protections ne sont pas forcément synchronisées lors de leur ouverture ce qui a pour conséquence que :

- Le premier étage de la mise en série qui ouvre doit supporter la totalité de la tension en défaut.
- Le dernier accumulateur d'une mise en parallèle qui ouvre doit ouvrir le courant de défaut total.
- Le dernier accumulateur d'une mise en parallèle de l'étage qui ouvre en premier doit ouvrir le courant total sous la tension de la boucle de courant du défaut

Les accumulateurs ne sont absolument pas spécifiés vis-à-vis des pouvoirs de coupure de leurs protections internes. Il est donc nécessaire de réaliser des tests représentatifs sur les cellules en amont de la conception du pack. Les niveaux de tension et de courant à traiter sont d'ordre de centaines de volts et centaines ou milliers d'ampères, selon la taille du pack batterie et la localisation du défaut.

La méthodologie, telle qu'indiquée dans les normes, basée sur une alimentation de laboratoire amène à une ouverture de courant à tension nulle (ZVS) non représentative de la réalité qui peut donner un faux sentiment de sécurité.

Nous avons proposé un schéma de test représentatif de la réalité et démarré un tracé d'aire de sécurité pour une première référence d'accumulateur et des courants représentatifs.

Il est à noter qu'aujourd'hui, les normes du produit batterie ne reprennent pas explicitement les contraintes des normes génériques de l'électricité et que le savoir-faire de conception est mal connu dans ce domaine technique. Ces deux points sont à améliorer pour limiter les risques de court-circuit électrique par double défaut d'isolement dans les différents mode d'incident ou d'accident auxquels la batterie peut être soumise.

12. REFERENCES

[1] C. Murray, « Fifty Years Later: The Improbable Birth of the Lithium-Ion Battery », *Design News*, 4 novembre 2022. <https://www.designnews.com>
[2] L. Gaines et R. Cuenca, « Costs of lithium-ion batteries for vehicles », ANL/ESD-42, 761281, août 2000. doi: 10.2172/761281.

[3] M. S. Ziegler et J. E. Trancik, « Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline », *Energy Environ. Sci.*, vol. 14, n° 4, p. 1635-1651, 2021, doi: 10.1039/D0EE02681F.
[4] S. Manzetti et F. Mariasiu, « Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, p. 1004-1012, nov. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.010.
[5] T. G. Goonan, « Lithium use in batteries », *US Geol. Surv. Circ.*, vol. 1371, p. 14, 2012.
[6] S. Link, C. Neef, et T. Wicke, « Trends in Automotive Battery Cell Design: A Statistical Analysis of Empirical Data », *Batteries*, vol. 9, n° 5, p. 261, mai 2023, doi: 10.3390/batteries9050261.
[7] « Development perspectives for lithium-ion battery cell formats ».
[8] D. Doughty et E. P. Roth, « A General Discussion of Li Ion Battery Safety », *Electrochem. Soc. Interface*, p. 9, 2012.
[9] Y. Chen *et al.*, « A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards », *J. Energy Chem.*, vol. 59, p. 83-99, août 2021, doi: 10.1016/j.jchem.2020.10.017.
[10] P. V. Chombo et Y. Laounal, « A review of safety strategies of a Li-ion battery », *J. Power Sources*, vol. 478, p. 228649, déc. 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228649.
[11] X. Feng, D. Ren, X. He, et M. Ouyang, « Mitigating Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries », *Joule*, vol. 4, n° 4, p. 743-770, avr. 2020, doi: 10.1016/j.joule.2020.02.010.
[12] Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun, et C. Chen, « Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery », *J. Power Sources*, vol. 208, p. 210-224, juin 2012, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.02.038.
[13] J. Lamb, L. Torres-Castro, J. C. Hewson, R. C. Shurtz, et Y. Preger, « Investigating the Role of Energy Density in Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries with Accelerating Rate Calorimetry », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 168, n° 6, p. 060516, juin 2021, doi: 10.1149/1945-7111/ac0699.
[14] J. Duan *et al.*, « Building Safe Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles: A Review », *Electrochem. Energy Rev.*, vol. 3, n° 1, p. 1-42, mars 2020, doi: 10.1007/s41918-019-00060-4.
[15] R. Korthauer, Éd., *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, 1st ed. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg : Imprint: Springer, 2018. doi: 10.1007/978-3-662-53071-9.
[16] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, A. Hussain, et A. Mohamed, « A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, p. 834-854, oct. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.001.
[17] Y. Xing, E. W. M. Ma, K. L. Tsui, et M. Pecht, « Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles », *Energies*, vol. 4, n° 11, p. 1840-1857, oct. 2011, doi: 10.3390/en4111840.
[18] W. Waag, C. Fleischer, et D. U. Sauer, « Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles », *J. Power Sources*, vol. 258, p. 321-339, juill. 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.02.064.
[19] B. Xu, J. Lee, D. Kwon, L. Kong, et M. Pecht, « Mitigation strategies for Li-ion battery thermal runaway: A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 150, p. 111437, oct. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111437.
[20] B. Xu, L. Kong, G. Wen, et M. G. Pecht, « Protection Devices in Commercial 18650 Lithium-Ion Batteries », *IEEE Access*, vol. 9, p. 66687-66695, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3075972.
[21] W. Li, K. R. Crompton, C. Hacker, et J. K. Ostanek, « Comparison of Current Interrupt Device and Vent Design for 18650 Format Lithium-ion Battery Caps », *J. Energy Storage*, vol. 32, p. 101890, déc. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101890.
[22] V. Ruiz, A. Pfrang, A. Kriston, N. Omar, P. Van den Bossche, et L. Boon-Brett, « A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, p. 1427-1452, janv. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.195.
[23] C. Lin *et al.*, « "Deep-Dive analysis of the latest Lithium-Ion battery safety testing standards and regulations in Germany and China" », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 173, p. 113077, mars 2023, doi: 10.1016/j.rser.2022.113077.
[24] M. A. Manzo *et al.*, « NASA Aerospace Flight Battery Program : Generic safety, handling and qualification guidelines for lithium-ion (Li-ion) batteries vol I », 2010.
[25] M. A. Manzo *et al.*, « NASA Aerospace Flight Battery Program : Generic safety, handling and qualification guidelines for lithium-ion (Li-ion) batteries vol II », 2010.
[26] J. Chauvin, D. Chatroux, L. Garnier, P. Azaïs, et R. Vincent, « High-Frequency Voltage and Current Probes for Measurement at Distance with an Oscilloscope », présenté à PCIM Europe 2023, 2023, p. 1257-1262. doi: 10.30420/566091174.