

Optimisation de l'interconnexion des cellules de batteries : répondre aux défis de sécurité

Kévin BERNARDINO, Maxime BABINOT, Thomas FOUET
MERSEN Pontarlier – Rue Claude Chappe, 25300 PONTARLIER

RESUME - En raison des risques d'emballement thermique lié à la chimie des cellules, le stockage des batteries Li-ion est un défi en termes de sécurité. L'interconnexion de ces cellules doit contribuer à la sécurité des batteries, via des bus bars adaptés et optimisés. Dans le cadre de ces travaux, deux stratégies différentes ont été étudiées. La première, préventive, est l'intégration d'une fonction fusible au niveau de chaque cellule, afin de prévenir tout emballement thermique. Les résultats présentés montrent que l'intégration d'une telle fonction est concluante, mais reste un enjeu en termes d'industrialisation. La seconde est la caractérisation de matériaux d'isolations souples résistants à l'emballement thermique et permettant de limiter sa propagation. Des résultats montrant l'efficacité d'une telle solution.

Bus bar, Batterie, Fusible, Cellule, Emballement thermique

1. INTRODUCTION

1.1. Le défi de la sécurité dans les batteries

Les batteries actuelles stockent une quantité d'énergie très importante [1][2], mais non sans risque, en particulier celles basées sur la technologie Li-ion. Des défaillances, tels que les courts-circuits, des surintensités et de l'emballement thermique, peuvent conduire à des incendies dramatiques. La littérature a étudié de façon importante le comportement des cellules Li-ion lors de défaillances ou de fonctionnement abusifs [3][4][5].

1.2. L'interconnexion des cellules

L'interconnexion des cellules, qu'elles soient de type cylindrique, prismatique ou pouch, joue un rôle central dans la gestion de ces risques. Par exemple, une mauvaise conception des interconnexions peut entraîner des surchauffes localisées, augmentant le risque de défaillance.

Sur le marché, on retrouve différentes technologies d'interconnexion des cellules, les deux principales étant d'une part les structures en plastique injecté avec clipsage des composants électriques (bus bars, capteurs, ...), et d'autre part les bus bars laminés, permettant une intégration robuste et compacte de plusieurs fonctions (mécanique, électrique, monitoring) au sein d'un même composant.

La technologie d'interconnexion sur laquelle s'appuie les travaux présentés est la technologie du bus bar laminé [6] : un empilage de films isolants et de conducteurs, créant un composant adapté pour interconnecter plusieurs cellules entre elles (série et parallèle). En Figure 1, un exemple de bus bar

servant à l'interconnexion de cellule cylindriques – Type 21700.



Fig. 1. Exemple de bus bar d'interconnexion de cellules, laminé (film isolant en blanc)

La technologie laminée peut s'adapter au format des cellules utilisée, mais également à l'environnement des cellules, comme présenté en Figure 2.

a)



b)

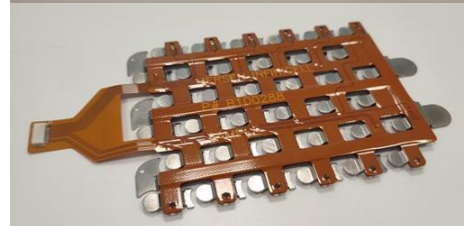


Fig. 2. Exemple de 2 busbars laminés pour l'interconnexion de cellules prismatiques (a) et cylindriques (b)

Les deux exemples présentés en Figure 2 incluent en plus des conducteurs de puissance, reliant les cellules, un circuit de monitoring, qui, relié au BMS, permet un suivi précis des tensions et températures au niveau des cellules.

L'isolant employé est généralement du polyester, mais du polyimide peut également être utilisé, notamment dans les cas de batteries immergés dans l'huile.

De nombreux travaux existent autour des risques associés aux cellules, mais très peu d'études placent les bus bars comme

composants faisant partie intégrante de la stratégie de sécurisation des batteries. Une étude réalisée en 2023 [7] porte sur l'échauffement des bus bars en fonction du métal choisi, et évoque les risques liés à un échauffement trop important et la qualité des soudures aux cellules. Mais l'article ne va pas au-delà. Alors que le bus bar, du fait de sa très grande proximité avec les cellules, peut jouer un rôle majeur dans la prévention et la limitation des défaillances et d'un emballement thermique.

Cet article se propose d'étudier la façon dont un bus bar laminé peut améliorer la sécurité d'une batterie, grâce à deux approches nouvelles et complémentaires :

- l'intégration d'une « fonction fusible » au niveau de chaque cellule, isolant une cellule défectueuse très rapidement avant qu'un emballement thermique puisse survenir.
- l'intégration au bus bar d'un matériau résistant en température et limitant la propagation d'un emballement thermique via les conducteurs du bus bar.

2. PREVENTION PAR L'INTEGRATION D'UNE « FONCTION FUSIBLE »

L'intégration d'une fonction fusible au niveau de chaque cellule est une façon d'isoler une cellule avant qu'elle ne s'emballe. Communément réalisée par wire bonding [8], cette fonction peut également être réalisée par soudure d'un composant fusible, ou par découpe dans le conducteur d'une section réduite dimensionnée pour fondre au courant souhaitée. Cette dernière solution commence à émerger, et a notamment été étudiée en 2022 par l'université de Zagreb [9].

2.1. Dimensionnement d'une fonction fusible

Une fonction fusible correspond à un rétrécissement local de la section de passage du courant. Par effet Joule, lorsque le courant est trop important, la température du métal va atteindre la température de fusion, provoquant la coupure du circuit. Le dimensionnement de cette section 'réduite' est clé : il convient que l'échauffement ne soit pas trop important lors d'un passage de courant nominal ou maximal, mais que la section fonde rapidement au-delà d'une certaine intensité.

Dans le cadre de ces travaux, les cellules de références sont des cellules cylindriques de format 21700, pouvant accepter au maximum un courant de 50A en cas de décharge rapide. Le courant de coupure a été fixé à 100% de ce courant maximum, soit 100A. En phase de charge rapide, le courant nominal maximum définie pour cette cellule est de 20A.

La Figure 3 montre un schéma du bus bar d'interconnexion (identique à la Figure 1), avec les différentes zones de connexion aux cellules (représentés en pointillés rouges), et l'éprouvette conçue pour les essais et intégrant une section réduite (rectangle jaune).

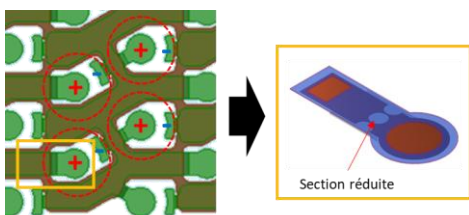


Fig. 3. Drawing of laminated bus bar and related fuse sample

La conception à l'aide d'un outil de modélisation numérique (Comsol Multiphysics) a été réalisée en prenant en compte 2 conditions d'utilisation :

- Un fonctionnement en conditions de charge rapide, à 20A
- Un cas de défaillance, avec un passage de courant de 100A dans le conducteur

L'optimisation par simulation a permis de définir une conception avec un conducteur en cuivre, où le courant est réparti entre deux branches de section 130x70µm (soit 0,018mm²), tel que présenté Figure 4.

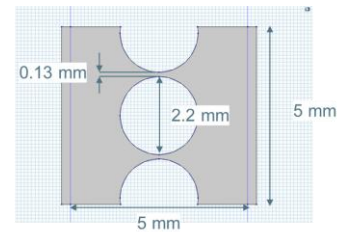


Fig. 4. Schéma de la section réduite proposée dans le cadre de cette étude

L'étude thermique, réalisée à 20A a pour but d'évaluer l'échauffement du bus bar en utilisation normale, afin de ne pas sur-contraindre les isolants.

La simulation a été réalisée dans un premier temps avec une température ambiante de 85°C, et sans refroidissement de la section réduite, simulant ainsi un cas très défavorable (Figure 5a). Une seconde simulation a été réalisée, cette fois-ci en faisant l'hypothèse d'un refroidissement de la zone sur une face (Figure 5b).

a) @20A, sans refroidissement – Tmax: 135°C



b) @20A, avec refroidissement sur une face (80°C) – Tmax: 105°C



Fig. 5. Comparaison des simulations de passage de courant (20A) avec et sans refroidissement du conducteur

Sans refroidissement, la température maximum au niveau de la section réduite est de 135°C, stabilisée après environ 300s. Cette température est trop élevée pour un bon fonctionnement, car elle va provoquer un échauffement des conducteurs et des cellules, ce qui n'est pas souhaitable. Le risque est également un vieillissement prématuré de l'isolant autour du busbar.

La seconde simulation (Figure 5b) montre qu'avec un refroidissement adapté des cellules et du busbar, il est possible de limiter la température de la section réduite à 105°C maximum, ce qui est compatible avec l'utilisation d'isolants électriques standards, limité à 105°C.

Le comportement en cas de surcharge a été également étudié. Un courant de 100A est injecté dans la section réduite, et la température ainsi que le temps d'ouverture du circuit sont relevés. La Figure 6 montre l'évolution de la température et des pertes en fonction du temps.

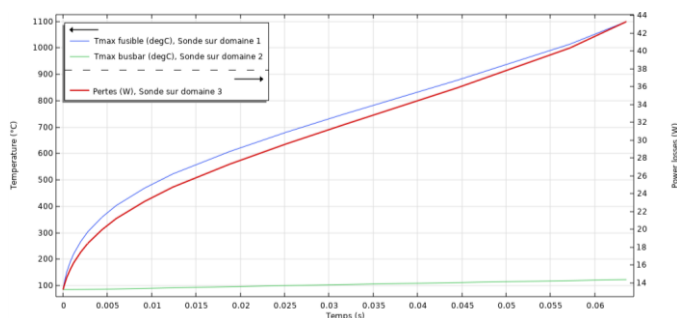


Fig. 6. Température et pertes lors d'un passage de 100A, en fonction du temps

La simulation montre qu'un temps de coupure très faible est obtenu (environ 60ms), avec une fusion du cuivre (à 1085°C) atteinte très localement dans la section réduite, sans échauffement significatif du reste du busbar, comme le montre la Figure 7.

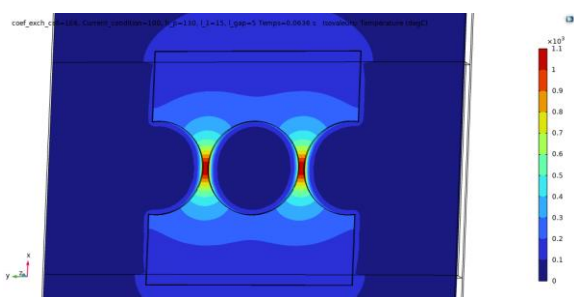


Fig. 7. Simulation d'une surcharge (100A). Image prise à 60ms.

Ces résultats montrent qu'il est possible de dimensionner une section réduite ayant un échauffement limité en conditions de charge/décharge normales, mais pouvant couper le circuit très rapidement en cas de défaut.

2.2. Essais de validation

La corrélation du modèle numérique avec des essais de court-circuit a été nécessaire. Pour ce faire, des éprouvettes ont été réalisées et ont subi des tests de court-circuit à 100A. Les essais sont réalisés sur des échantillons avec 2 matériaux d'isolation différents utilisés, que l'on nommera Matériau 1 et Matériau 2 (Figure 8).



Fig. 8. Eprouvettes pour essais de surcharge et d'échauffement, avec différents isolants protégeant la fonction fusible.

Les essais sont réalisés à température ambiante. Un générateur de courant injecte le courant, et des capteurs de courant et de tension monitorent le comportement de la section réduite. Il est alors possible de mesurer le temps de coupure (Figure 9).

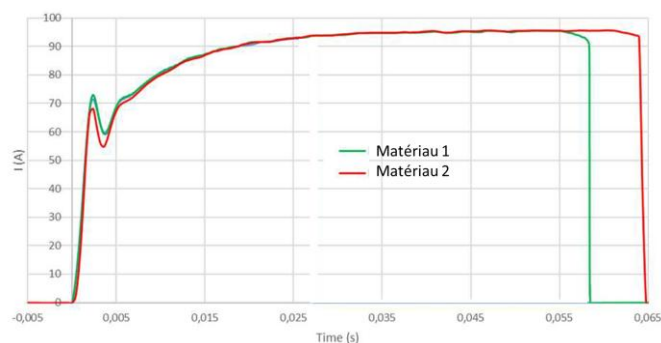


Fig. 9. Suivi du courant en fonction du temps lors d'un test de surcharge (100A).

Les résultats ont montré une coupure du circuit à des temps inférieurs à 65ms, conforme aux prédictions des simulations.

De plus, des essais d'auto-échauffement à 5A et 20A (représentatifs de profils de charge différents) ont été réalisés sur d'autres éprouvettes, afin de valider l'échauffement au niveau de la section réduite.

Ces essais ont été réalisés dans une enceinte thermostatée à 85°C, comme pour les simulations réalisées précédemment. L'échantillon a également été placé sur une masse inertielle, afin de simuler un refroidissement lors de l'essai.

3 thermocouples sont placés sur l'échantillon, afin de suivre la température lors de l'essai. Au niveau de la section réduite, les températures atteintes sont :

Avec 5A : 85°C (donc pas d'échauffement)

Avec 20A : 104°C (en accord avec les simulations)

Ces résultats ont mis en évidence des échauffements conformes aux simulations, ainsi qu'une non-dégradation des isolants autour du fusible.

L'ensemble de ces résultats ont montré qu'il était possible de concevoir, prédire le comportement par simulation, et caractériser une section réduite permettant de protéger une cellule d'une surcharge.

Ces travaux ont mis en évidence l'importance de prendre en compte l'environnement autour du busbar et des cellules dans le dimensionnement et la caractérisation de la fonction fusible.

Un point critique reste la fiabilité et la durée de vie de cette solution, ou la section réduite peut être un point faible mécanique. Ces travaux doivent être poursuivis pour caractériser la résistance aux vibrations et en utilisation de ces géométries.

3. REDUIRE LA PROPAGATION D'UN EMBALLEMENT THERMIQUE

Le préventif n'étant pas toujours suffisant, d'autres approches sécuritaires sont possibles. Parmi elles, une solution a consisté à apposer en surface du bus bar laminé un film souple résistant aux températures extrêmes d'un emballement thermique, et limitant l'échauffement des conducteurs et la propagation de la chaleur par ces derniers.

3.1. Des matériaux spécifiques

Une cellule Li-ion partant en emballement thermique dégagera une flamme puissante accompagné de particules d'alumine (Figure 10). Les températures peuvent atteindre des valeurs supérieures à 1 000°C [10].



Fig. 10. Emballage thermique d'une cellule 21700[2]

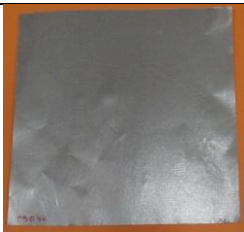
Des solutions de protection à base de matériaux inorganiques (mica ou silicone, généralement [11]) ont été investiguées.

Ces solutions doivent être isolantes électriques, afin de ne pas créer de courts-circuits supplémentaires et avoir une certaine souplesse pour épouser la forme du bus bar laminé.

L'objectif de cette étude a été de comparer différents matériaux d'épaisseurs et de structures différentes et d'évaluer leurs performances thermiques et électriques.

Parmi ces matériaux, certains à base mica trame fibre de verre, de laine en fibre céramique, ou un hybride organique/inorganique (Tableau 1).

Tableau 1. Exemples de matériaux testés pour leur résistance à la flamme.

	Référence	Photo	Composition et épaisseur
a)	Matériau 1		Mica + Trame en fibre de verre (200μm)
b)	Matériau 2		Mica + Trame en fibre de verre (200μm)
c)	Matériau 3		Fibre céramique (2mm)
d)	Matériau 4		Hybride organique/ Inorganique (300μm)

Il est à noter que ces matériaux ont des épaisseurs différentes, ce qui rend la comparaison entre les différents matériaux plus délicate.

3.2. Des performances diverses face à des tests exigeants

Pour chaque matériau, un test représentatif d'un emballage thermique a été réalisé, projetant une flamme à 1300°C pendant 60s, avec des particules d'alumine (Figure 11).



Fig. 11. Dispositif de test à la flamme avec projection d'alumine

Pour réaliser l'essai de flamme, une torche CastoDyn DS-8000 a été utilisée, montée sur un robot permettant un contrôle très précis de la distance entre l'échantillon et la torche. Les particules d'alumine sont de taille comprise entre 15 et 63μm, projetées à un débit de 30g/min.

Les températures en face avant et arrière sont monitorées. L'objectif est que la température sur la face opposée à la flamme soit la plus faible possible, et à minima inférieur à la température de fusion des conducteurs (660°C dans le cas de conducteurs en aluminium).

Les résultats montrent que certains matériaux conservent leur intégrité, là où d'autres s'effritent et perdent leur isolation électrique. Cette différence est même visible sur des matériaux très similaires mais de fournisseurs différents (Matériau 1 et Matériau 2), comme le montre les résultats présentés Figure 12.

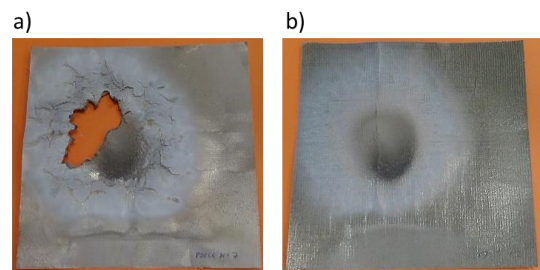


Fig. 12. Comparatif de 2 matériaux résistants à l'emballage thermique, le Matériau 1(a) ayant échoué au test, contrairement au Matériau 2 (b)

Un des critères de succès est le non-transpercement du film par la flamme, ainsi que la conservation d'une tenue diélectrique.

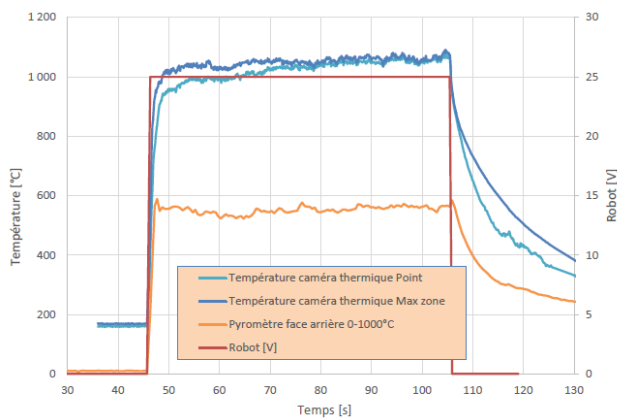
a) Matériau 3 b) Matériau 4



Fig. 13. Résultats de l'essai de flamme pour les matériaux 3 et 4

Le second critère de succès est la température mesurée sur la face opposée à la flamme, devant être inférieur à 660°C. Cette température va dépendre de la résistance thermique du matériau, mais aussi de son épaisseur. La Figure 14 montre l'évolution de la température pendant le test, pour les matériaux 2 (200μm d'épaisseur) et 3 (3mm d'épaisseur). Les courbes bleues montrent la température côté flamme. La courbe orange correspond à la température côté opposé à la flamme.

a) Température en fonction du temps d'essai pour le Matériau 2 (base mica – 0,2mm d'épaisseur)



b) Température en fonction du temps d'essai pour le Matériau 3 (base céramique – 3mm d'épaisseur)

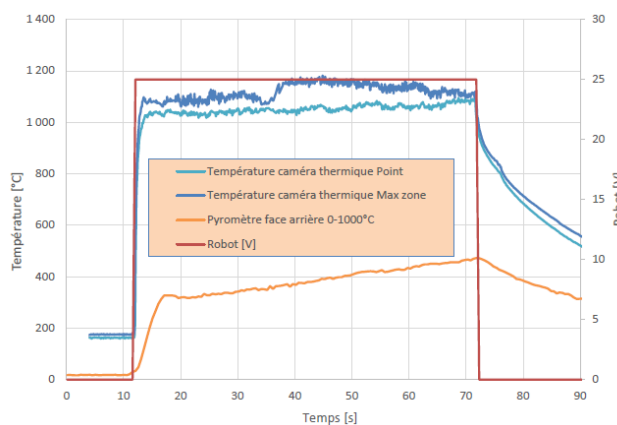


Fig. 14. Evolution de la température sur la face opposée à la flamme, pour les Matériaux 2 (a) et 3 (b)

Il a pu être montré que dans la plupart des cas, pour les matériaux testés, la température maximale côté opposé à la flamme ne dépasse pas les 600°C. Dans le cas de matériaux épais (comme le Matériau 3), la température est logiquement plus faible (entre 350 et 450°C), avec une augmentation progressive de la température pendant l'essai.

Ces résultats montrent qu'un matériau à base de mica (200µm d'épaisseur) est un très bon compromis pour protéger d'un emballage thermique, là où un matériau céramique, plus épais, aura un impact négatif sur l'encombrement et le coût.

4. CONCLUSIONS

Dans cet article, deux approches de sécurisation des busbars d'interconnexion de cellule sont présentées. L'approche consistant à intégrer au niveau de chaque cellule une fonction fusible, dont la coupure permet d'isoler cette dernière, a montré des résultats très satisfaisants, avec un pouvoir de coupure conforme aux attentes, et avec une très bonne corrélation entre la modélisation et les caractérisations. Un enjeu dans la poursuite de cette étude sera la gestion mécanique de ce type de structure, par nature très fragiles.

Une seconde approche a consisté à investiguer des matériaux résistants à l'emballage thermique, et limitant la propagation de la chaleur via le bus bar. A ce titre, les caractérisations effectuées ont montré la résistance thermique de ce type de matériau, et en particulier certains matériaux à base de mica.

La sécurité des batteries se joue à tous les niveaux. Les bus bars laminés ont un rôle très important pour assurer un fonctionnement en toute sécurité des installations utilisant les nouvelles technologies de cellules, tel que, mais pas limité, aux Li-Ion. Ces enjeux seront d'autant plus importants que l'augmentation des tensions dans les batteries, et les fréquences de charge/décharge de plus en plus élevées, entraîne l'apparition de nouvelles contraintes (refroidissement, décharges partielles, ...), qu'il conviendra de prendre en compte.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la Commission Européenne, qui a financé le projet LEVIS, au sein duquel les travaux présentés ont été réalisés, ainsi que les partenaires du projet.

6. REFERENCES

- [1] S. Maddipati, Lingxi Kong, M. Pecht, « Safety Analysis of Lithium-Ion Cylindrical Batteries Using Design and Process Failure Mode and Effect Analysis », *Batteries* 2024, 10(3), 76
- [2] Chandra M.R. Vendra, Ashish V. Shelke, J. E. H. Buston, « Numerical and Experimental Characterization of High Energy Density 21700 Lithium-ion Battery Fires », *Process safety and environmental protection*, vol. 160, p. 153-165, april 2022.
- [3] Y. Jia, B. liu, Z. Hong, « Safety issues of defective Li-ion batteries: identification and risk evaluation », *Journal of Materials Chemistry A*, 25, 2020
- [4] Feng X., Ouyang M., Liu X., Lu L., Xia Y., He X., « Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review », *Energy Storage Materials* 10, p. 246–267, 2018
- [5] X. Wu, K. Song, X. Zhang, « Safety issues in lithium Ion batteries: Materials and cell design », *Frontiers in Energy Research*, 7, July 2019
- [6] Thomas Fouet, Pierrick Gueguen, « Infini-Cell: Bus bar for battery cell interconnection », *PCIM Europe Digital Days* 2021
- [7] O. Mypati, T. Anwaar, D. Mitra et al., « Characterization and modeling of Al and Cu busbar during charging and discharging of Li-ion battery for EV », *Applied Thermal Engineering*, Vol 218, Jan 2023, 119239
- [8] U. Mehrotra, Arthur Brazzle, Mickael Mckeown et al., « Lithium Battery Cell Level Fusing with Aluminum Heavy Wire Bonds », *IMAPS Source Proceedings* 2020(1):9-14, Sept 2020.
- [9] A. Persic, M. Vrazic et al., « Battery package fused bus bar design for cylindrical battery cells », 2022 26th Internal conference electronics
- [10] Vendra CMR, Shelke A v., Buston JEH, Gill J, Howard D, Read E, et al. Numerical and experimental characterisation of high energy density 21700 lithium-ion battery fires. *Process Saf Environ Protect* 2022;160:153–65
- [11] B. Bausch, Sebastian Frankl, et al, « Naturally-derived thermal barrier based on fiber-reinforced hydrogel for the prevention of thermal runaway propagation in high-energetic lithium-ion battery packs », *Journal of energy storage*, Vol 61, May 2023, 106841