

Stratégie d'intégration de batteries solides au sein de structures composites aéronautiques

Strategy for integrating solid batteries into aeronautical composite structures

Frédéric Laurin¹, Juan-Manuel Garcia¹, Florence Saffar¹, Alexander Beutl², Helmut Kuehnelt²

1 : Département Matériaux et Structures, Onera
29 avenue de la Division Leclerc, 92322 Chatillon Cedex, France,
e-mail : frederic.laurin@onera.fr

2 : AIT Austrian Institute of Technology
GmbH, Vienne, Autriche
e-mail : Helmut.Kuehnelt@ait.ac.at

Résumé

Dans le cadre du projet européen SOLIFLY, cet article traite de l'évaluation numérique et expérimentale des performances mécaniques et électriques de différentes structures composites stratifiées intégrant des batteries solides, de l'échelle du coupon jusqu'au niveau d'un panneau raidi. Dans un premier temps, le processus de fabrication de composites stratifiés carbone/époxy contenant des batteries fonctionnelles a été optimisé et les propriétés électriques et mécaniques de coupons élémentaires ont été estimées. Puis, des panneaux raidis multifonctionnels, représentatifs d'applications aéronautiques actuelles, ont été fabriqués et testés pour évaluer les performances résiduelles. Enfin, les limites et les perspectives associées à la production de structures composites multifonctionnelles sont discutées.

Abstract

In the framework of the European project SOLIFLY, the present paper deals with a numerical and experimental evaluation of the residual mechanical performance of composite laminated structures containing battery cells, from the coupon scale to the stiffened panel level. Firstly, the manufacturing process to produce carbon/epoxy laminates with functional battery cells was optimized and the electrical and mechanical properties of elementary coupons were estimated. Then, large multifunctional stiffened panels, representative of current aeronautical applications, were successfully manufactured and tested to evaluate their residual performances. Finally, the limitations and perspectives associated with the production of multifunctional composite structures are finally discussed.

Mots Clés : Batteries solides ; Performances mécaniques ; Performances électriques, structures multifonctionnelles.

Keywords: Solid battery cells; Mechanical performances; Electrical performances, Multi-functional components.

1. Introduction

L'intégration de fonction de stockage d'énergie électrique par l'insertion de batteries solides (SB) au sein de structures composites est considérée comme une technologie, actuellement à faible TRL, susceptible de réduire l'impact du stockage d'énergie sur le poids total d'un aéronef. Jusqu'à présent, les batteries solides ont été principalement étudiées au niveau matériaux [1,2]. L'influence de l'intégration de cellules de batteries solides dans des matériaux composites sur leurs propriétés mécaniques, principalement la rigidité et la résistance, a été étudiée expérimentalement au travers d'essais de traction [3,4], de compression [4,5] ou de flexion [6,7] sur des matériaux composites pertinents pour l'industrie automobile, avec des propriétés mécaniques intermédiaires associées à un cycle de cuisson faible température. Dans le cadre du projet européen CleanSky2 SOLIFLY, cette étude traite de l'évaluation des performances mécaniques de structures composites stratifiées constituées de plis unidirectionnels hautes performances en carbone/époxy, utilisées dans l'industrie aéronautique, au sein desquelles des batteries solides ont été intégrées. Dans un premier temps, le processus de fabrication de plaques stratifiées carbone/époxy avec des batteries fonctionnelles est détaillé dans la section 2. L'évaluation de la performance électrique du coupon multifonctionnel produit est évaluée. Puis, la section 3.1 présente la conception et la fabrication d'un panneau raidi

multifonctionnel. Les panneaux raidis sans cellule de batterie (cas de référence) et avec 20 cellules SB fonctionnelles ont été soumis à une charge de compression afin de déterminer précisément la rigidité globale, la charge de flambage et le mode associé. Les données expérimentales obtenues sur les panneaux avec et sans batteries ont été comparées afin d'étudier les performances résiduelles mais ont également été analysées par simulations numériques par éléments finis afin d'expliquer le scénario de défaillance observé sur ces pièces composites en section 3.2.

2. Eprouvettes stratifiées multifonctionnelles

2.1 Présentation des batteries solides

L'empilement multicouche renforcé (RMS), batterie solide produite par AIT et illustré sur la Fig 1, se compose d'une anode à revêtement conventionnel sur une feuille de Cu et d'une cathode sur une feuille d'Al. L'électrolyte se compose d'un polymère poreux, qui assure la rigidité et la résistance mécaniques, associé à un gel ionique pour la conduction des ions. Les dimensions des batteries RMS ont été fixées à 70 x 80 mm², avec une épaisseur approximative de 600 µm, correspondant à l'épaisseur de trois plis unidirectionnels en carbone/époxy AS4/8552 de grammage 194g/m². AIT a fourni plus de 40 cellules RMS, à quatre électrodes, pour les essais préliminaires et la fabrication des coupons composites élémentaires avec des batteries intégrées. Tous les composants des batteries solides RMS ont été fabriqués en utilisant des technologies déjà utilisées pour la production de batteries conventionnelles pour faciliter leur future industrialisation. Les propriétés mécaniques des batteries RMS ont été déterminées expérimentalement à l'ONERA et peuvent être consultées dans [8]. Un comportement élasto-plastique, associé à un critère d'élasticité de Mises, avec une règle d'écoulement associée et un écrouissage isotrope, est capable de décrire avec précision la réponse non linéaire macroscopique des cellules de la batterie.

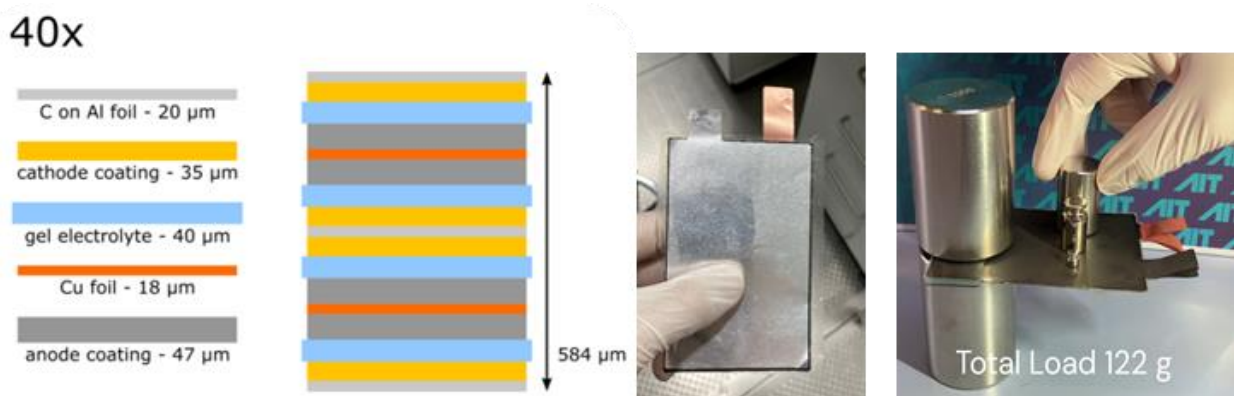


Fig 1. Présentation des cellules de batteries solides RMS produites par AIT

2.2 Fabrication de plaques stratifiées composites contenant des batteries solides

Le matériau de l'étude est l'AS4/8552, pli unidirectionnel (UD) d'un grammage de 194g/m², car (i) il est largement utilisé dans l'industrie aéronautique, et (ii) est très étudié dans la littérature [9]. Afin de préparer la fabrication du démonstrateur final du projet SOLIFLY, un stratifié académique croisé [0/90/0/90₃/0/90/0] a, tout d'abord, été produit avec un processus de drapage manuel spécifique. La taille de la plaque est de 200 x 120 mm² avec une cellule de batterie de dimensions 80x70 mm² introduite dans le pli central 90₃. Pour extraire le courant des batteries, il a été décidé d'utiliser des fils enrobés d'un diamètre $\varnothing=0,75$ mm, et de les coller aux languettes de la batterie avec une pâte à l'argent conductrice. Malgré l'application d'un spray epoxy isolant appliqué sur les batteries solides, des courts-circuits ont été constatés lorsque le prepreg était mis en contact avec les languettes de la batterie lors du drapage manuel. Aussi, les languettes des batteries ont été isolées avec du Kapton, comme montré sur la Fig 2. Pour contrôler la fonctionnalité des batteries pendant le

drapage, la tension de la batterie est mesurée alors que le courant est imposé et fixé à 10mA. L'utilisation de Kapton est une solution pragmatique pour isoler électriquement la cellule du composite, bien que l'adhérence entre le Kapton et le composite soit faible, ce qui constitue une limite de la méthodologie proposée, discuté en section 3.2.

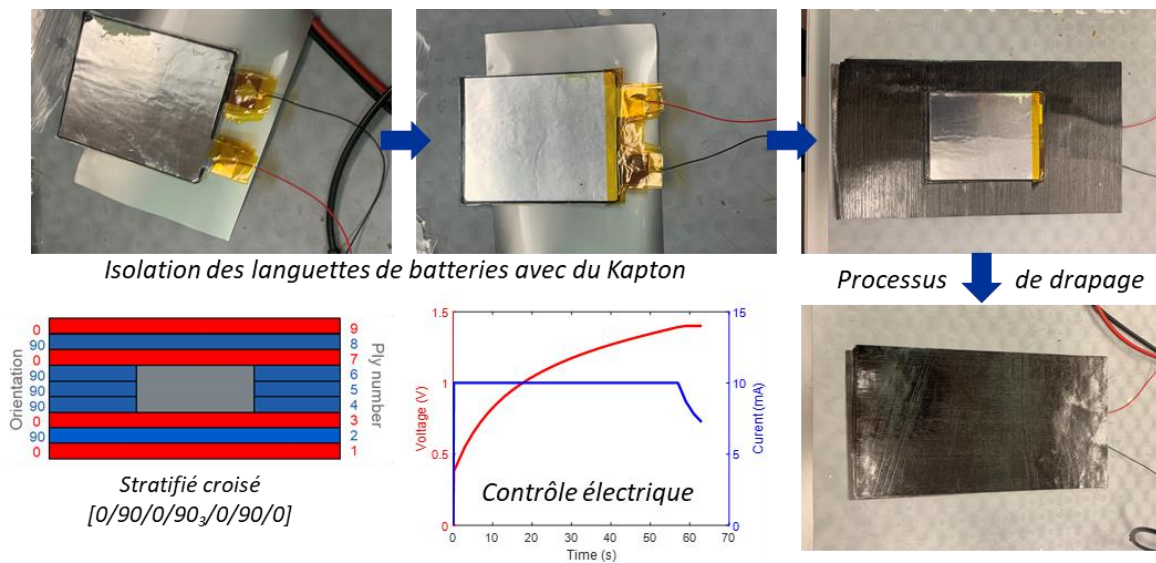


Fig 2. Protocole de drapage et d'intégration de batteries solides au sein d'une plaque composite stratifiée

De plus, il a été nécessaire d'adapter le cycle de cuisson du matériau composite afin d'éviter la détérioration des performances électriques de la batterie. En effet, la température du cycle de cuisson doit être réduite pour éviter la fusion de l'électrolyte de la batterie (de 180°C à 130°C) et la pression appliquée doit également être réduite de 7 à 2 bars pour éviter l'éjection du gel ionique contenu dans l'électrolyte. Une cuisson en deux étapes a été choisie. Tout d'abord, une cuisson à 110°C est effectuée durant 8 heures, afin de préserver les éléments de la batterie et de précurer la matrice 8552. Puis, un cycle de post-cuisson à une température de 130°C est effectué durant 10 heures, pour atteindre le taux de polymérisation fabricant et obtenir les propriétés mécaniques nominales du composite. La durée des cycles de polymérisation et de post-polymérisation a été estimée par simulation, à l'aide des modèles développés par Nelson et Garstka présentés dans [8]. La durée totale du cycle de cuisson est d'environ 18 heures et pourrait constituer un problème pour le transfert de cette technologie à l'industrie aéronautique.

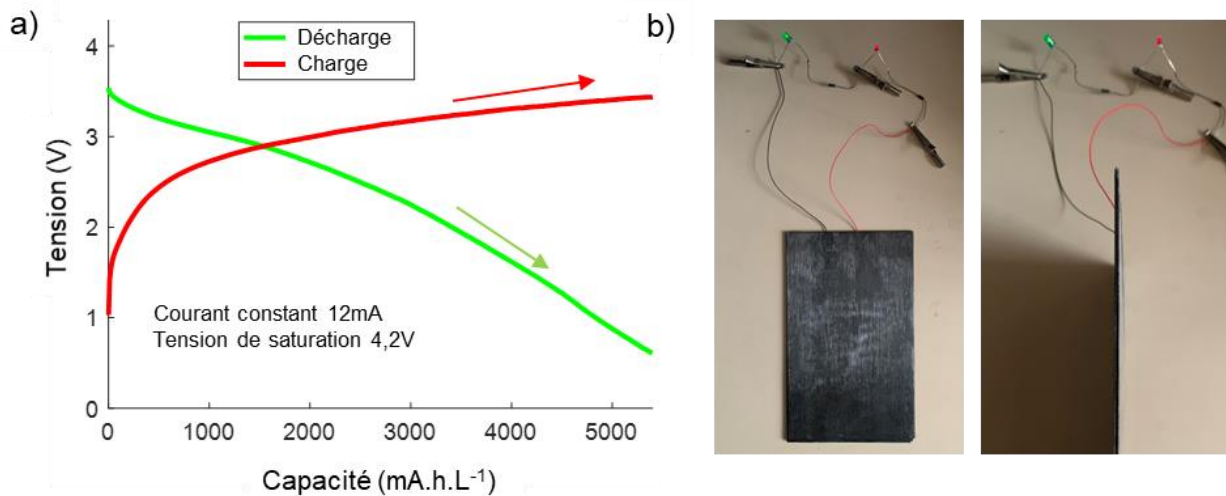


Fig 3. a) Cycle de charge/décharge de la plaque composite multifonctionnelle, b) éclairage de deux LEDs connectées à la plaque composite d'épaisseur 1,2mm durant plusieurs minutes.

Après fabrication, la batterie a été chargée pendant 20 heures avec un courant constant de 12 mA et à une tension de saturation de 4,2 V. Deux jours plus tard, une nouvelle charge a été effectuée avec, à nouveau, un courant constant de 12 mA. Lorsque la limite supérieure de tension de 4,2 V a été atteinte, la cellule a été déchargée à un courant constant fixé à -12 mA. La Fig 3a montre l'évolution de la tension pendant la charge et la décharge en fonction de la capacité de l'éprouvette. La plaque composite multifonctionnelle fabriquée permet de fournir suffisamment d'énergie électrique pour alimenter quelques LED pendant plusieurs minutes, voir Fig 3b, et présente des performances électriques similaires à la littérature [2]. Toutefois, les profils de charge/décharge sur la plaque composite avec une batterie indiquent un problème d'isolation électrique de la batterie, malgré l'usage du Kapton, ce qui constitue un axe d'amélioration important à ce travail.

3. Panneau raidi composite multifonctionnel

3.1 Fabrication du panneau raidi

Tout d'abord, la conception du panneau raidi de référence (sans batterie) a été effectuée en considérant un certain nombre de contraintes pratiques, à savoir : (i) une première charge de flambement élevée afin de mesurer facilement la raideur initiale du panneau, (ii) un régime de post-flambement important afin de pouvoir arrêter l'essai après flambage, (iii) une fabrication aisée du panneau sans batterie, qui se complexifiera avec l'intégration de batteries solides. Dans la conception d'un tel démonstrateur, trois leviers ont été considérés : (i) les dimensions de la peau (longueur, largeur et épaisseur), (ii) le nombre et la position des raidisseurs et (iii) la forme des raidisseurs. L'étude numérique a été réalisée à l'aide du code d'éléments finis Abaqus/standard. Des éléments coques multicouches, bien adaptés aux grandes structures composites minces, ont été considérés à la fois pour la peau et les raidisseurs. Le mode de flambement est obtenu par la méthode des valeurs propres de Lanczos.

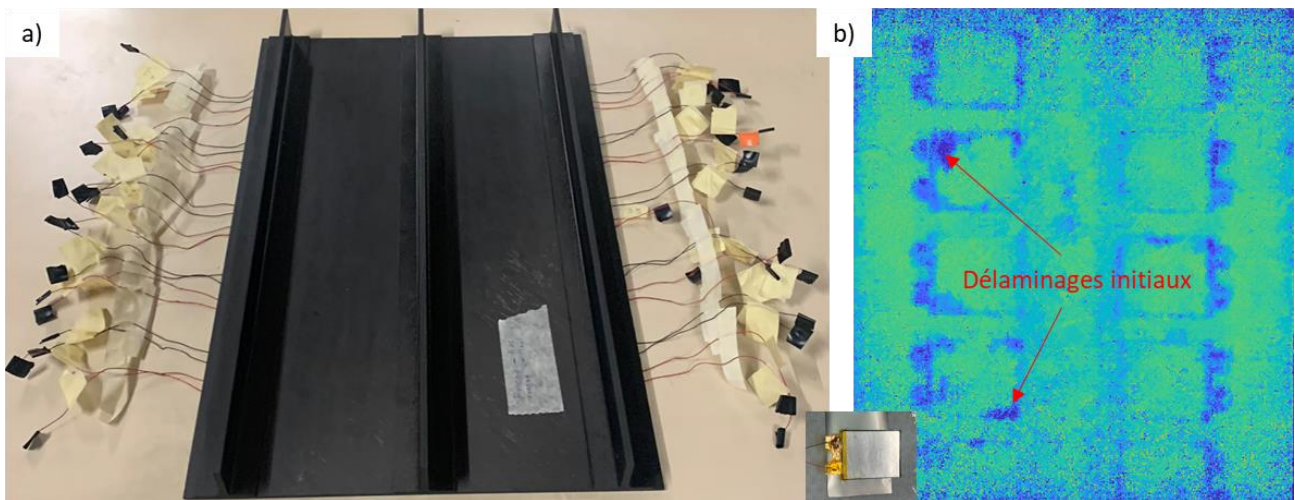


Fig 4. a) Panneau raidi multifonctionnel, b) thermographie infrarouge pour détecter les défauts initiaux

La séquence d'empilement de la peau et des raidisseurs est similaire et correspond à un stratifié quasi-isotrope 16 plis $[(45/90/-45/0)_2]_s$, déjà étudié dans le cadre du projet SOLIFLY sur éprouvettes élémentaires. En considérant l'ensemble des contraintes mentionnées précédemment, les panneaux auront une longueur de 600mm, une largeur de 400mm. La taille des 20 batteries devant être introduites dans la peau entre les raidisseurs étant de $80 \times 70 \times 0,54 \text{ mm}^3$, le nombre de raidisseurs en T, forme choisie pour simplifier le processus de fabrication, est de 3, comme illustré sur la Fig 4a. La distance entre les raidisseurs et celle entre les raidisseurs extérieurs et les bords libres de la peau ont été optimisées par simulations éléments finis afin d'obtenir un flambement uniquement dans la zone centrale du panneau.

Les deux panneaux raidis, avec et sans batteries solides, ont été fabriqués en sous-traitance par Florian Madec Composites (FMC). La peau et les raidisseurs en T ont été co-cuits pour obtenir une bonne adhérence entre les différentes parties du démonstrateur. Le cycle de cuisson appliqué au panneau de référence correspondait au cycle de cuisson recommandé par Hexcel, alors que celui du panneau avec les 20 batteries (voir Fig 4b) correspond à celui développé pour les coupons élémentaires (section 2.2). Après fabrication, la performance électrique de chaque batterie dans le panneau a été évaluée, en utilisant le protocole mentionné précédemment, et 80% des cellules sont fonctionnelles. Le poids total du panneau multifonctionnel n'a été augmenté que de 59,5 g, par rapport au panneau de référence pesant 2,265 kg. De plus, les deux panneaux raidis ont été contrôlés par thermographie infrarouge active. Un flash a été généré par une lampe et la diffusion de chaleur a été enregistrée par une caméra infrarouge. Après traitement, les languettes des batteries sont clairement visibles en raison de l'introduction du Kapton qui a, par ailleurs, induit deux délaminages initiaux non négligeables.

3.2 Performances mécaniques et électriques résiduelles

Les deux panneaux raidis ont été testés à l'aide d'une machine d'essai hydraulique d'une capacité de charge maximale de 500kN. 2 blocs de résine ont été ajoutés aux deux extrémités du panneau, pour intégrer le panneau dans les deux mâchoires en forme de U du dispositif d'essai et pour faciliter le transfert de charge du dispositif d'essai à la peau et aux raidisseurs du panneau. La vitesse de déplacement était égale à 0,5 mm/min afin d'obtenir plusieurs images pendant le chargement avec une durée raisonnable d'essai. Les deux panneaux raidis ont été soumis à une charge de compression, en utilisant différentes techniques de mesure - afin de déterminer avec précision la rigidité globale, la charge de premier flambement et le mode associé - à savoir : (i) 4 capteurs LVDT pour mesurer le déplacement global du panneau, 4 caméras optiques de 2048 x 20248 pixels ont été installées, dont 2 caméras observant la face avant et 2 pour la face arrière du panneau. La corrélation des images numériques (CIN) a été réalisée à l'aide du logiciel commercial Vic3D.

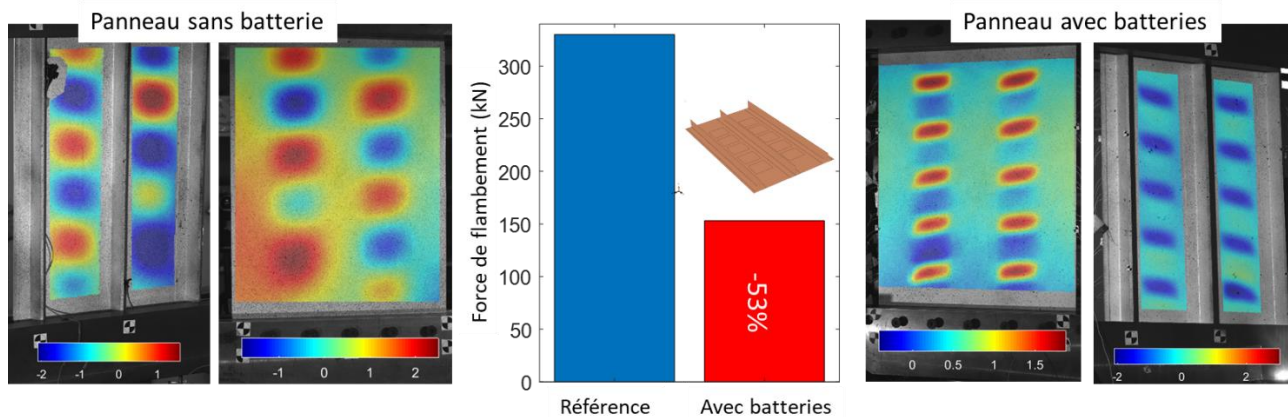


Fig 5. Evaluation de l'influence des batteries solides sur le 1^{er} mode de flambement des panneaux raidis

Les données expérimentales obtenues sur les deux panneaux (avec et sans batteries solides) ont été comparées afin d'étudier les performances résiduelles mécaniques mais ont également été comparées avec des simulations numériques par éléments finis afin d'expliquer le scénario de défaillance observé. L'intégration des batteries n'a pas modifié de manière significative la rigidité globale du panneau (moins de 1%), mesurée à l'aide d'un extensomètre virtuel placé au centre du panneau en utilisant le déplacement mesuré par CIN. Pour le panneau de référence, le mode de flambement est composé de 12 lobes pour une charge de flambement de -330kN. L'analyse de l'essai par éléments finis prévoit le bon mode de flambement et une charge de flambement d'environ -335kN, proche des données d'essais. Cependant, l'introduction de cellules de batterie dans la peau a considérablement réduit la force de premier flambement. En effet, le nombre de lobes de flambement est passé de 12 à

20 et la charge de flambement a été divisée par un facteur 2, comme illustré sur la Fig 5. Cette diminution est due à la présence des délaminages initiaux observés précédemment. En effet, l'introduction des délaminages initiaux dans le modèle éléments finis permet de décrire la modification du mode de flambage et explique la baisse des performances mécaniques. Il est donc essentiel d'inclure les défauts initiaux induits par l'introduction de batteries solides dans la structure composite dans la simulation afin de prévoir la charge de flambement résiduelle. Il convient également de noter que les cellules sont toujours fonctionnelles après l'application d'une charge de compression élevée (plus de 18 tonnes en régime post-flambé), et que les performances électriques restent inchangées avant, pendant et après le chargement.

4. Conclusion

Plusieurs développements intéressants pour l'intégration de batteries solides au sein de structures composites aéronautiques ont été proposés dans le cadre du projet SOLIFLY. Tout d'abord, AIT, en collaboration avec l'université de Vienne, a mis au point une batterie solide consistant à renforcer mécaniquement les composants actifs d'une cellule de batterie en s'appuyant sur des processus de fabrication de cellules de batterie bien établis et industrialisable. Pour démontrer la pertinence de la technologie développée dans le projet SOLIFLY, un panneau raidi multifonctionnel a été produit contenant 20 cellules de batterie solide, et a été testé en compression. Des performances mécaniques prometteuses ont été obtenues, et peuvent encore être améliorées en retravaillant l'isolation électrique des batteries et l'adhésion composite/batterie. En tant que perspectives, l'intégration de batteries solides dans des structures composites sandwich est étudiée dans le cadre du projet européen MATISSE, en partenariat avec notamment Pipistrel, pour produire un composant d'aile composite multifonctionnelle, de type wingtype.

Références

- [1] H. Kuehnelt, A. Beutl, F. Mastropiero, F. Laurin, S. Willrodt, A. Bismarck, M. Guida, F. Romano, Structural Batteries for Aeronautic Applications—State of the Art, Research Gaps and Technology Development Needs, *Aerospace* 9 (2022) 31.
- [2] L.E. Asp, M. Johansson, G. Lindbergh, J. Xu, D. Zenkert, Structural battery composites: a review, *Funct Compos Struct* (2019) 042001.
- [3] K. Pattarakunnan, J. Galos, R. Das, A.P. Mouritz, Tensile properties of multifunctional composites embedded with lithium-ion polymer batteries, *Compos. Part A*. 136 (2020)
- [4] S.M. Shalouf, J. Zhang, C.H. Wang, Effects of mechanical deformation on electric performance of rechargeable batteries embedded in load carrying composite structures, *Plast. Rubber Compos.* 43 (2014)
- [5] P. Attar, J. Galos, A.S. Best, A.P. Mouritz, Compression properties of multifunctional composite structures with embedded lithium-ion polymer batteries, *Compos. Struct.* 237 (2020) 111937.
- [6] T.J. Adam, G. Liao, J. Petersen, S. Geier, B. Finke, P. Wierach, A. Kwade, M. Wiedemann, Multifunctional Composites for Future Energy Storage in Aerospace Structures, *Energies* 11 (2018).
- [7] P. Ladpli, R. Nardari, F. Kopsaftopoulos, F.-K. Chang, Multifunctional energy storage composite structures with embedded lithium-ion batteries, *J. Power Sources* 414 (2019) 517–529.
- [8] F. Laurin, A. Mavel, F. Saffar, A. Beutl, H. Kühnelt, Experimental and numerical evaluation of residual mechanical performance of carbon/epoxy laminated coupons after integration of solid battery cells for aeronautical applications, *Compos. Sci. Technol.* 247 (2024) 110384.
- [9] A.H. Baluch, O. Falcó, J.L. Jiménez, B.H.A.H. Tijs, C.S. Lopes, An efficient numerical approach to the prediction of laminate tolerance to Barely Visible Impact Damage, *Compos. Struct.* 225 (2019) 111017.