



Le développement de batteries pour l'exigeant marché de l'e-aviation

La technologie des batteries au lithium peut-elle répondre à toutes les exigences de l'avion électrique de demain ? A mesure que la charge électrique du bus des nouveaux avions augmente, le système de batteries doit répondre à des exigences de plus en plus difficiles à satisfaire. Cet article présente les percées et les stratégies technologiques lithium-ion en cours d'élaboration, non seulement pour répondre aux exigences de performance mais aussi aux besoins de fiabilité, de disponibilité, de maintenabilité et de sécurité.

Rodolphe Boulais

Saft America Inc.

Augmentation de la charge électrique des bus avion

L'augmentation de la charge électrique du bus d'avion est observée dans l'aviation traditionnelle [1]. Les avions, de plus en plus hybrides électriques ou entière-

ment électriques, dépendent désormais partiellement ou complètement d'un système de batteries pour leur puissance et leur propulsion. Aujourd'hui des systèmes de batteries aviation répondent à ces besoins. Les systèmes de batteries certifiables fournissent une alimentation de secours sûre et fiable, des démarrages

des auxiliaires de puissance (APU) à certaines alimentations hybrides pour les hélicoptères, les avions classiques, les jets civils et militaires. Des batteries basse tension aux systèmes de batteries haute tension, les systèmes au lithium ne sont pas nouveaux dans l'aviation. Plus de 10 millions d'heures [2] de vol ont été effec- ●●●

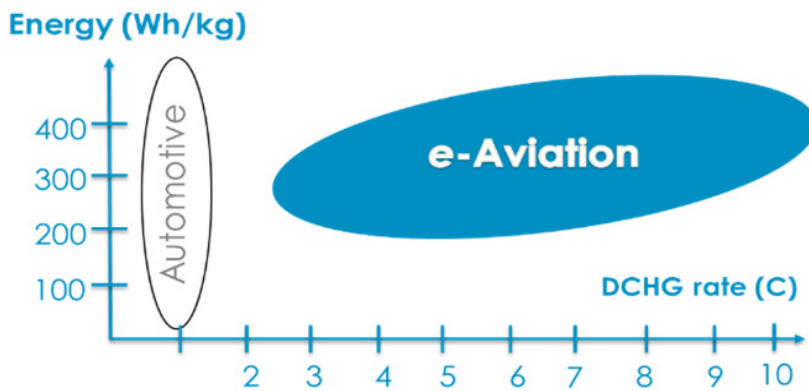


Figure 1 : Exigences en matière de puissance de l'e-aviation. En abscisses, le taux de décharge.

“ Les besoins en puissance pour la propulsion de l’e-aviation requis par les nouvelles conceptions d’aéronefs et les nouveaux profils de mission exigent une amélioration de la technologie des batteries.”

●●● tuées à ce jour à l’aide des technologies de batteries lithium-ion Saft [3].

Besoin en énergie de l’e-Aviation; VTOL, CTOL, STOL

Les besoins en puissance pour la propulsion de l’e-aviation requis par les nouvelles conceptions d’aéronefs et les nouveaux profils de mission exigent une amélioration de la technologie des batteries. Cela concerne les avions à décollage et atterrissage verticaux (ADAV ou VTOL en Anglais), les avions à décollage et atterrissage conventionnels (ADAC ou CTOL en Anglais), les avions à décollage et atterrissage courts (DAC ou STOL en Anglais), les avions plus électriques, hybrides électriques ou entièrement électriques, et les drones de transport mais aussi les avions de passagers, pilotés ou autonomes, effectuant des missions courtes ou des vols de moyenne distance. Ces batteries nécessitent une puissance spécifique éle-

vée (exprimée en W/kg), une énergie spécifique élevée (exprimée en Wh/kg) et des capacités de cyclage suffisantes. Bien que la conception des aéronefs et la variabilité du profil de mission remettent en question la conception des systèmes de batteries, ces systèmes doivent démontrer des critères de fiabilité, de disponibilité, de maintenabili-

té et de sécurité (FDMS en français ou RAMS en Anglais) [4] [5] [6] [7] [8] [9] et ce tout au long de leur durée de vie et de celle de l’aéronef.

Les niveaux d’exigences de performance de l’e-aviation sont très différents du reste des marchés de la mobilité électrique. Lorsque le véhicule électrique terrestre remet en question son système de batteries en termes d’énergie spécifique (Wh/kg) et également de densité d’énergie volumique (Wh/l), l’avion électrique lui se concentre sur la puissance spécifique (W/kg) et la densité d’énergie spécifique (Wh/kg). A noter que le rapport de puissance par rapport à la capacité de la batterie au rythme d’une heure est exprimé par le régime C1. L’éventail des exigences de performance est lié aux missions et aux conceptions des avions électriques (VTOL pur, VTOL ailé, CTOL ou STOL) comme l’illustre la figure 1.

Les performances des systèmes de batteries sont au cœur du défi de l’e-aviation. Les besoins en puissance spécifique élevée (W/kg) peuvent être sept à dix fois supérieurs à la capacité nominale de la batterie (7 à 10 C1) pendant les phases de décollage et d’atterrissage (y compris la réserve d’urgence obligatoire), tandis qu’une énergie spécifique élevée (Wh/kg) est nécessaire pendant la partie croisière.

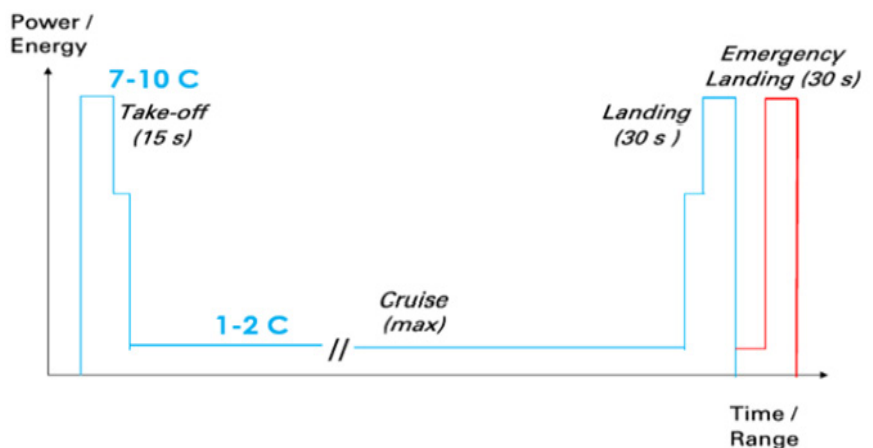


Figure 2 : Exemple de profil de charge de vol e-VTOL (avion à décollage et atterrissage verticaux).

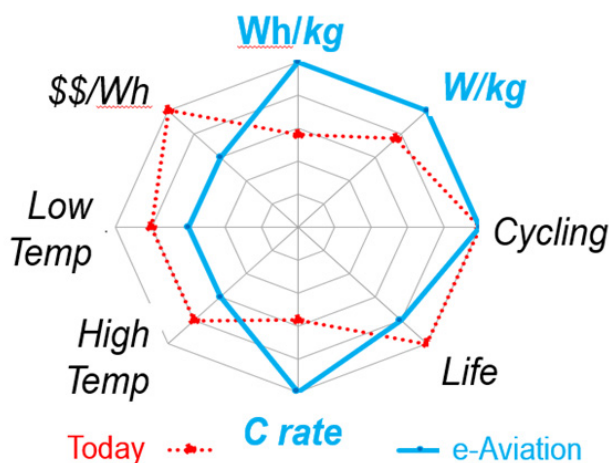


Figure 3 : Performances (en rouge) et besoins (en bleu) des batteries lithium-ion.

Systèmes de batteries pour l'e-aviation

Les batteries lithium-ion [10] produites industriellement d'aujourd'hui répondent à certaines exigences, mais pas à toutes (figure 3). La densité énergétique, la puissance et le taux de décharge doivent encore être améliorés pour répondre aux besoins de l'e-aviation. Les avancées dans le développement de la technologie lithium-ion devraient pouvoir subvenir aux besoins de l'industrie aéronau-

tique et répondre aux exigences de l'e-aviation.

La capacité de la technologie lithium-ion à prendre en charge le vol élec-

trique est bien prouvée par les nombreux démonstrateurs électriques qui volent aujourd'hui. Cependant, des systèmes de batteries fiables, disponibles, maintenables et sûrs sont encore en cours de développement. Les technologies lithium-ion révolutionnaires avec une densité d'énergie spécifique élevée comme « Gen-3B » [11], avec 350 Wh/kg [12] sont actuellement au niveau de maturité technologique de six (ou TRL-6) autrement dit au niveau d'un système prototype. La technologie dite « Solid-state, Gen-4A », intrinsèquement sûre et en cours de développement, sera à un niveau de développement similaire TRL-6, d'ici 2023. Des niveaux de densité énergétique plus élevés de 430 Wh/kg grâce à la technologie « Solid-state, Gen-4B » [13] devraient être à TRL-6 en 2025 (figure 4). Les nouvelles technologies lithium-ion permettront le

“ Les avancées dans le développement de la technologie lithium-ion devraient pouvoir subvenir aux besoins de l'industrie aéronautique et répondre aux exigences de l'e-aviation. ”

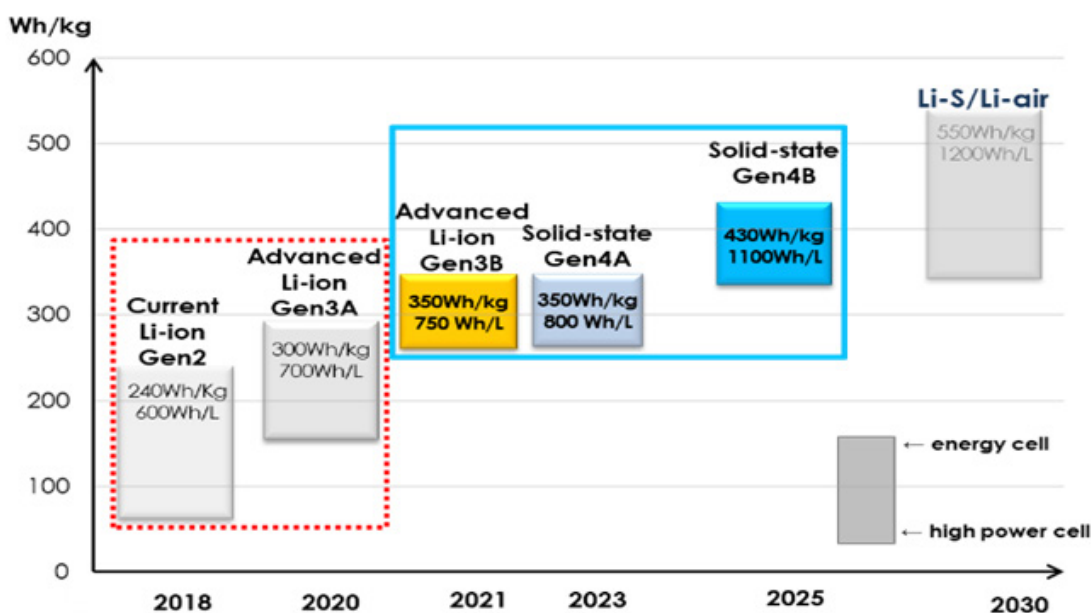


Figure 4 : Plan de développement des technologie lithium-ion.

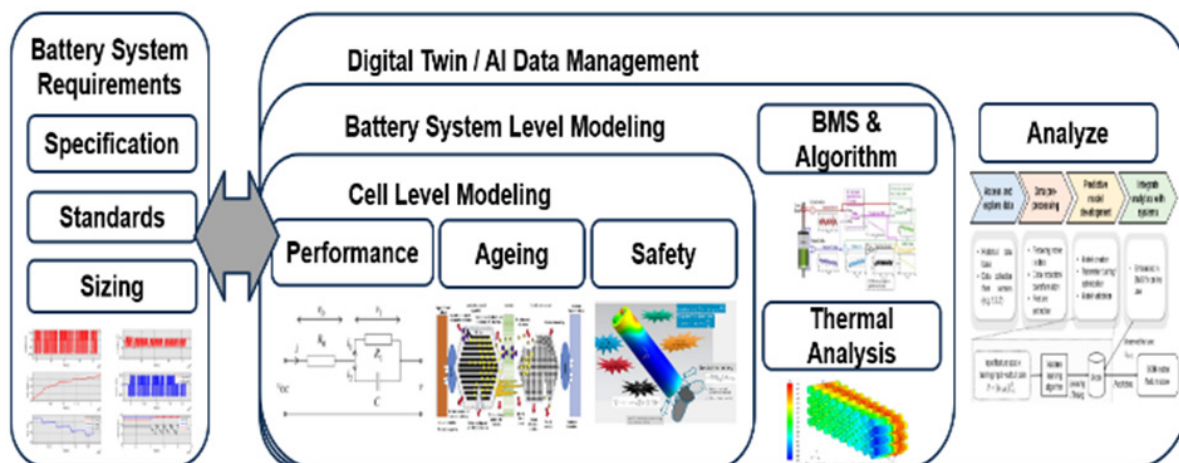


Figure 5 : Processus de conception et de développement du système de batterie.

- développement de systèmes de batteries intrinsèquement sûrs.

Processus de conception et de développement du système de batteries

Le processus de conception et de développement des systèmes de batteries est complexe. Il prend du temps, et nécessite des investissements importants. C'est pourquoi, si nous voulons que la conception résultante réponde aux objectifs, il est très important de revoir les exigences de l'avion et de sa mission ainsi que les normes de l'industrie existantes ou en cours de création [7] [8] [14], et de dimensionner le système de batteries en tenant compte des besoins de l'utilisateur.

Une collaboration étroite entre les centres d'expertise de l'entreprise (figure 5), l'avionneur et les experts de l'industrie est donc primordiale. Il est nécessaire de tirer parti des progrès de la technologie informatique en termes de modélisation, de simulation, d'intelligence artificielle et d'analyse susceptibles de fournir de nouvelles solutions et des conceptions de pointe en un temps record. De même, pour assurer une conception sûre, fiable et certifiable, il est aussi nécessaire de bénéficier de l'expérience et de l'expertise

“ Il est nécessaire de tirer parti des progrès de la technologie informatique en termes de modélisation, de simulation, d'intelligence artificielle et d'analyse susceptibles de fournir de nouvelles solutions et des conceptions de pointe en un temps record. ”

de chacun, et de se souvenir des leçons apprises pour valider les modèles. L'entreprise Saft, par exemple, utilise régulièrement le supercalculateur privé le plus puissant au monde de son actionnaire TotalEnergies pour effectuer des

modélisations. Ce calculateur permet d'accélérer le processus de validation de conception en permettant la simulation rapide de scénarios complexes et l'analyse des données associées. Ces étapes sont nécessaires pour développer des

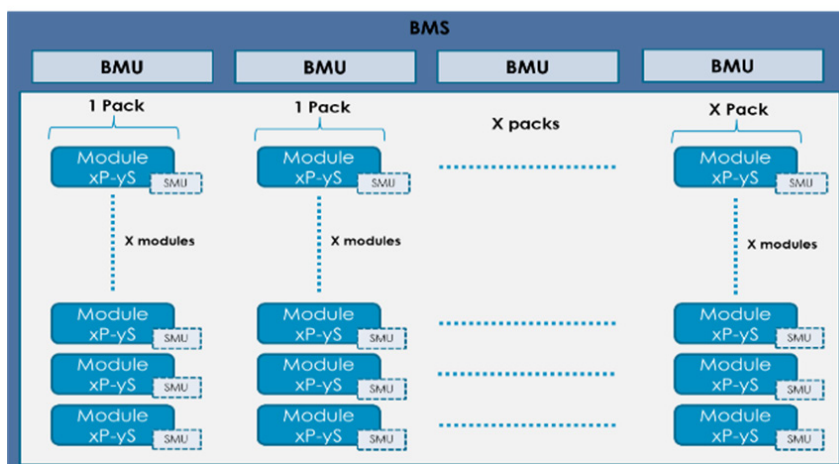


Figure 6 : Schéma fonctionnel du système de batteries modulaire.

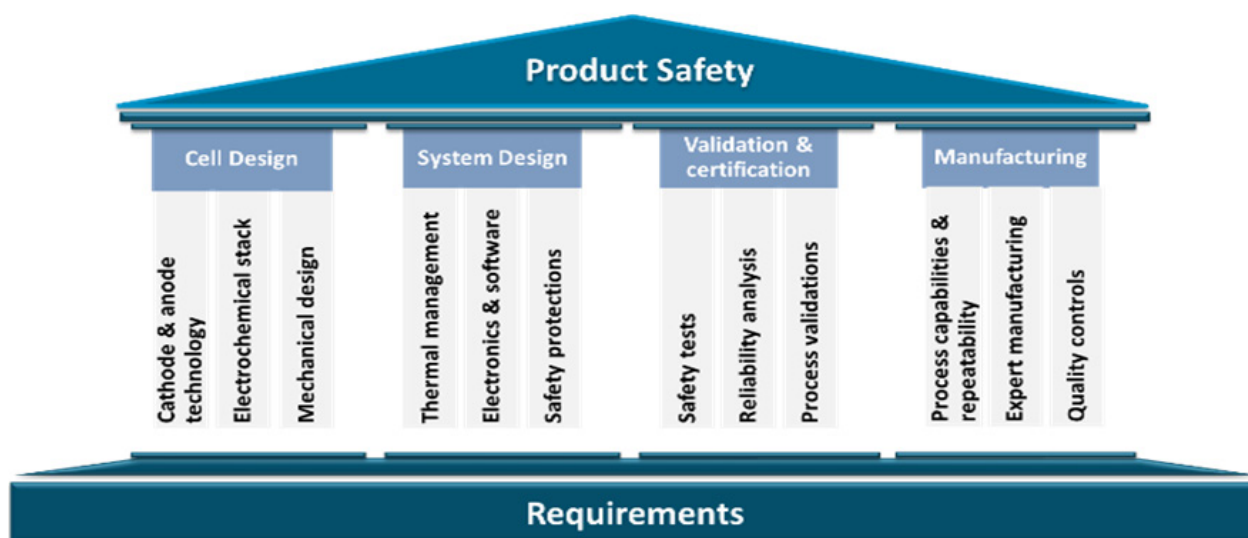


Figure 7 : Les 4 piliers des exigences de sécurité du système de batteries lithium-ion.

systèmes de batteries sûrs, fiables et certifiables.

La conception de systèmes de batteries modulaires peut être une stratégie pour répondre au marché de l'e-aviation. Les modules de systèmes de batteries évolutifs pour haute tension ou haute puissance permettent une production en grand volume avec une refonte et une réingénierie réduite. Dans de tels modules, les cellules sont regroupées dans des sous-modules équipés d'unités de mesure de source (ou SMU), de gestion thermique et de fonctions de sécurité. Les sous-modules sont ensuite séparés et/ou mis en parallèle selon les besoins de l'application et équipés de systèmes modulaires de surveillance des batteries (ou BMS) (figure 6).

Une structure mécanique finalise l'assemblage. Le module maître de gestion de la batterie (ou MBMM) est ajouté pour harmoniser les sous-modules en ajoutant également des fonctions de sécurité redondantes. La conception modulaire standardise le matériel et les logiciels, ce qui offre une fiabilité et des niveaux de maintenabilité accrus. Grâce à la redondance et aux capacités d'isolation intégrées, les systèmes de batteries modulaires offrent un plus grand niveau

de fiabilité, de disponibilité, de maintenance et de sécurité (FDMS ou RAMS).

La sécurité est la priorité numéro un de l'aviation

Pour remplir cette exigence de sécurité, les systèmes de batteries pour e-aviation doivent être conçus dès le départ avec les règles en vigueur. La clef de la certification de conception consiste à avoir la capacité de formuler et de valider une technologie de cellule, de l'intégrer dans un système de batteries complet, tout en assurant une fabrication à long terme.

Les piliers de sécurité, représentés sur la figure 7, illustrent les considérations de sécurité intégrée :

- le premier pilier tient compte de la *technologie au lithium* utilisée pour ses caractéristiques de sécurité mécaniques et électriques intégrées ;

- le deuxième pilier représente la *conception du système de batteries*, y compris la gestion thermique, les composants électroniques et les logiciels ;

- le troisième pilier se concentre sur le *processus de vérification et de validation* des caractéristiques de chaque concep-

L'auteur

Rodolphe Boulais : est le responsable technique, Produits aéronautiques émergents pour la division Aviation, systèmes de stockage d'énergie et mobilité de Saft. Au cours des



30 dernières années, il a occupé divers postes dans l'industrie des batteries : ingénieur qualité, superviseur de fabrication, ingénieur de projet et ingénieur d'application. Rodolphe a contribué à diverses branches de l'industrie, des transferts de technologie et des améliorations de processus à la conception de batteries pour les projets de marché des véhicules électriques, des télécommunications et de l'aviation. De double nationalité française et américaine, Rodolphe est titulaire d'un Bachelor of Sciences de l'université américaine de Valdosta et de l'université de Montpellier II en France. Il est membre actif de la VFS (Vertical Flight Society).

tion. Le quatrième et dernier pilier assure la *capacité et la répétabilité* des processus de fabrication.

Ces quatre piliers garantissent des performances prévisibles, reproductibles et sûres du système de batteries tout au

●●● long de sa durée de vie, et assurent sa disponibilité tout au long de la durée de vie de l'avion. La certification est menacée chaque fois que l'un de ces principaux piliers de sécurité n'est pas pris en compte. L'expérience, nous a montré que la capacité de prescrire une technologie lithium-ion donnée dans un système de batteries ainsi que celle d'assurer le contrôle de ses processus de fabrication sont meilleures lorsqu'elles résident sous

un même toit. La technologie du système de batteries employée et ses conditions de fabrication durables conditionnent la certification du système au niveau de l'avion.

Conclusions

L'augmentation des exigences en matière de profil de charge des bus avions nécessite des technologies de batterie haute

performance. Les technologies avancées de batterie lithium-ion peuvent répondre aux exigences des avions plus électriques et entièrement électriques. Les systèmes de batteries modulaires peuvent répondre aux exigences complexes de l'e-aviation. La technologie des systèmes de batteries lithium-ion sûre et certifiable conditionnera le succès des avions plus électriques et électriques et la réalisation de ce nouveau potentiel de marché. ■

Références

- [1] R. Berger, Aircraft Electrical Propulsion - the Next Chapter of Aviation?, London, 2017, p. 7.
- [2] R. Boulais, «Electric Flight Prepares to Take Off,» Saft International Magazine, vol. 42, p. 26, 2021.
- [3] J. Boyer, «Air power: Why the Newest Fighter Jet Carries Li-ion Batteries,» Saft International Magazine, vol. 41, p. 20, 2020.
- [4] D. J., R. M. A. C. M. Vieira, The Application of Reliability Methods for Aircraft Design Project Management, American Journal of Industrial and Business Management, 2016.
- [5] DOD, MIL-HDBK-217F: Reliability Prediction of Electronic Equipment, 1991.
- [6] SAE, ARP4754A, Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems, December 21, 2010.
- [7] RTCA, DO-254 EUROCAE ED-80, Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware, 2000.

- [8] RTCA, DO-178C, Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification, 2011.
- [9] SAE, ARP4761, Guidelines & Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems & Equipment, 1996.
- [10] Battery 2030, «Inventing the sustainable Batteries of the Future,» p. 23, 2020.
- [11] EMIRI, «Advanced Materials for Clean and Sustainable Energy and Mobility,» p. 25, 2019.
- [12] EMIRI, «Advanced Materials for Clean and Sustainable Energy and Mobility,» p. 27, 2019.
- [13] K. Nechev, «Solid-state technology- the quest for the 'holy grail',» Saft International Magazine, vol. 41, p. 10, 2020.
- [14] RTPC, DO-311A, Minimum Operational Performance Standards for Rechargeable Lithium Batteries and Battery Systems, 2017.

Résumé

De l'augmentation de la charge électrique du bus-avion jusqu'à la dépendance complète à l'énergie électrique pour sa propulsion, la nouvelle génération d'avions plus électrique dépend de plus en plus du système de batteries pour son alimentation. Il ne s'agit plus seulement d'une fonction de support ou de secours d'urgence, le système de batteries devient une source principale à la propulsion. En tant que tels, la technologie des éléments de batteries et le système de batteries associées doivent être fiables, disponibles, maintenables et surtout doivent respecter toutes les normes et réglementations. Les nouveaux systèmes de batteries devront être conçus, testés et fabriqués de manière experte et tenir compte de la disponibilité et de la maintenabilité durable. ■

Abstract

From increasing the electrical load of the aircraft bus to complete dependence on electric power for propulsion, the new generation of more electric aircraft is increasingly dependent on the battery system for power. No longer just a support or emergency backup function, the battery system becomes a primary source of propulsion. As such, the battery cell technology and associated battery system must be reliable, available, maintainable and above all comply with all standards and regulations. New battery systems will need to be expertly designed, tested, and manufactured with availability and sustainable maintainability in mind. ■