

UNE BATTERIE DE BORD PLUS LÉGÈRE ET COMPACTE

Les Chemins de fer fédéraux suisses (CFF) envisagent de remplacer progressivement les accumulateurs au plomb qui assurent l'alimentation électrique dans les trains. Les nouvelles batteries devraient être nettement plus légères et compactes tout en disposant d'une durée de vie plus longue. Un modèle fonctionnel élaboré par la Haute école spécialisée bernoise (BFH), en collaboration avec la CFF satisfait à ces exigences et fait désormais office de référence pour l'appel d'offres.



Lea Steurs des CFF (Gestion et établissement des procès verbaux de l'essai) et Christian Vögtli de la BFH testent le modèle fonctionnel sur le train régional DPZ. Photo: CFF

L'intégralité du réseau ferroviaire CFF d'environ 3200 kilomètres est équipé de lignes électriques. Ces lignes alimentent les trains qui circulent entre Bâle et Chiasso, entre Genève et Sankt Margrethen, en tension alternative 15 kV. Malgré la liaison directe avec le réseau de transmission, chacun des environ 3500 trains, wagons voyageurs, rame composée ou locomotive, requiert une ou même plusieurs batteries. Les batteries alimentent le réseau de bord des trains en situations d'urgence mais également en cas de brèves coupures de courant, ce qui survient lors de l'exploitation normale sur les voies ou lors du changement dans les gares. Le réseau de bord fournit l'énergie nécessaire pour l'éclairage, les portes et les systèmes d'information des passagers. La batterie est un système important pour la sécurité dans la mesure où elle assure le fonctionnement des freins de voie électromagnétiques et intervient dans les situations d'évacuation.

Jusqu'à présent, les CFF utilisent principalement des accumulateurs au plomb 36 V de 334 kg chacun (2 x 18V). Il s'agit de 2000 t que la flotte complète des trains doit transporter et qui augmentent proportionnellement la consommation énergétique. Les CFF veulent désormais remplacer les accumulateurs au plomb par de nouvelles batteries. Elles devraient être plus légères et plus efficaces grâce à la nouvelle technologie ainsi que plus économique, au-delà de leur cycle de vie. La réduction des coûts de cycle de vie (LCC) et

l'utilisation durable avec des ressources précieuses sont les principales motivations pour ce changement technologique. Le développement d'une telle batterie est exigeant car elle doit pouvoir être incorporée sans ajustement particulier dans l'environnement existant des wagons. Mi-2014, les CFF ont initié le projet «Nouvelle technologie de batterie CFF». Le Centre BFH-CSEM Stockage d'énergie de Bienne participe en tant que partenaire. Il s'agit d'un institut collectif de la Haute école spécialisée bernoise (BFH) et du Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM), créé en 2015. L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) soutient le projet dans le cadre de son programme pilote et de démonstration.

Contribution à une exploitation efficace de l'électricité

Trois ans après le lancement du projet, le modèle fonctionnel de la batterie est disponible. Il répond aux exigences techniques d'une batterie CFF moderne tout en permettant les différentes options de réalisation. «Cette batterie fait office d'objet technique de référence pour l'appel d'offres prévu en 2018. Environ 2200 wagons de voyageurs et locomotives plus anciens devraient être équipés de cette nouvelle batterie à moyen terme», affirme le chef de projet CFF Ueli Kramer. Pour l'instant, la nouvelle batterie est donc conçue pour la modernisation de wagons plus anciens avec un système de bord de 36 volts. À long terme, elle pourrait être utilisée dans



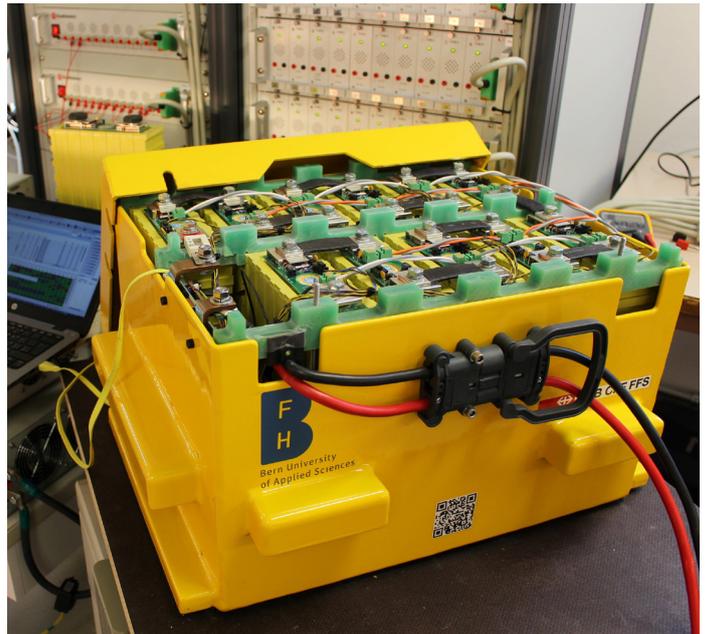
Le train de voyageurs EW4 dispose de deux faisceaux de batterie 36 V parallèles, actuellement installés dans quatre récipients comprenant chacun une batterie au plomb 18 V. Photo: CFF

une forme adaptée dans des wagons plus récents dont le système de bord est alimenté avec 110 V. Les connaissances acquises à partir du modèle fonctionnel 36 volts sont appliquées dans un projet correspondant actuellement en cours chez un partenaire industriel.

La robustesse passe avant la densité énergétique maximale

La nouvelle batterie compte parmi les nombreuses mesures auxquelles les CFF recourent en vue de réduire les frais d'électricité et d'exploitation à moyen terme. En 2012, le conseil d'administration des Chemins de fer a approuvé un programme visant à augmenter l'efficacité énergétique. D'ici 2025, les CFF souhaitent économiser chaque année 600 gigawattheures (GWh) en énergie électrique et fossile. Cela correspond à 20% de la consommation énergétique (ou à la consommation annuelle de 150 000 foyers de quatre personnes). Si cet objectif ambitieux devait être atteint, les trains des CFF pourraient à l'avenir fonctionner exclusivement avec de l'énergie renouvelable, sans énergie nucléaire. Ce faisant, l'efficacité énergétique n'est qu'une motivation parmi d'autres. La principale motivation est d'augmenter la fiabilité ainsi que la réduction des coûts de cycle de vie du système d'accumulateur grâce à la prolongation de la durée de vie.

Le type de batterie susmentionné est sollicité sporadiquement et dans une mesure relativement faible dans le quotidien des



Le modèle fonctionnel conçu au centre BHF-CSEM Stockage d'énergie de Bienne se compose de onze batteries lithium-ion et dispose d'une capacité de stockage de 6.5 kWh. Photo: BFH

CFF. Le train FLIRT (RABe523xxx), utilisé entre autre pour le transport régional, en est un bon exemple: la batterie fournit l'énergie pendant environ cinq minutes (env. 570 Wh) lors de la mise en service matinale du train (équipement). Au cours de la journée, la batterie intervient typiquement 18 fois brièvement.

POIDS RÉDUIT D'UN TIERS

Le modèle fonctionnel conçu par la BFH se compose de onze cellules de batterie lithium-phosphate de fer (LiFePO₄). Chaque cellule est équipée d'une platine de raccordement qui permet, entre autres, de déterminer la température de la cellule. Le système de gestion de batterie (BMS) assure la commande et la surveillance.

Le modèle fonctionnel tolère une tension de charge située entre 39 et 45 Volts. Cette flexibilité est indispensable car la tension de charge du réseau de bord, dans le sens des caractéristiques de charge des batteries au plomb, varie sur cette plage en fonction de la température. La nouvelle batterie pèse un tiers du poids de l'accumulateur au plomb (110 au lieu de 334 kg) et dispose de la moitié du volume (60 au lieu de 120 l). Les développeurs souhaitent remplacer le récipient en acier résistant au feu afin de réduire encore le poids. Ce faisant, la protection contre les incendies est prioritaire, d'autant plus que les batteries lithium-ion ont déjà fait les gros titres à maintes reprises pour cause d'incendie. «Ces incidents étaient rarement dus aux cellules en soi mais à une trop grande sollicitation et à une surcharge du système. Dans notre cas, le risque d'incendie est contrôlable car la charge électrique et la performance du système ne sont pas critiques», souligne l'ingénieur en développement Christian Vögli. «Le BMS assure la sécurité d'exploitation en premier lieu. D'ailleurs, avec leur densité énergétique modérée et leur sécurité intrinsèque, les cellules lithium-phosphate de fer utilisées se comportent de manière extrêmement stable, même en cas de mauvaise utilisation, ce qui réduit également le risque d'incendie.» Finalement, les fournisseurs de batterie seront responsables d'assurer les prescriptions de l'appel d'offres prévu, indépendamment de la technologie appliquée. BV

vement lorsque le train passe sur une section exempte d'alimentation électrique et de frein d'appui (aiguilles de protection au niveau des changements de réseau électrique); dans ce cas, le réseau de bord puise 150 Wh de la batterie pendant environ une minute. Lors de la mise hors service du train le soir, la batterie fournit encore une fois env. 1800 Wh pendant environ vingt minutes. La batterie est rechargée après chaque sollicitation. Tandis que la batterie d'une voiture électrique doit disposer d'une densité énergétique maximale, le profil spécifique de la batterie CFF de l'impose pas.

Un BMS contrôle le processus de charge

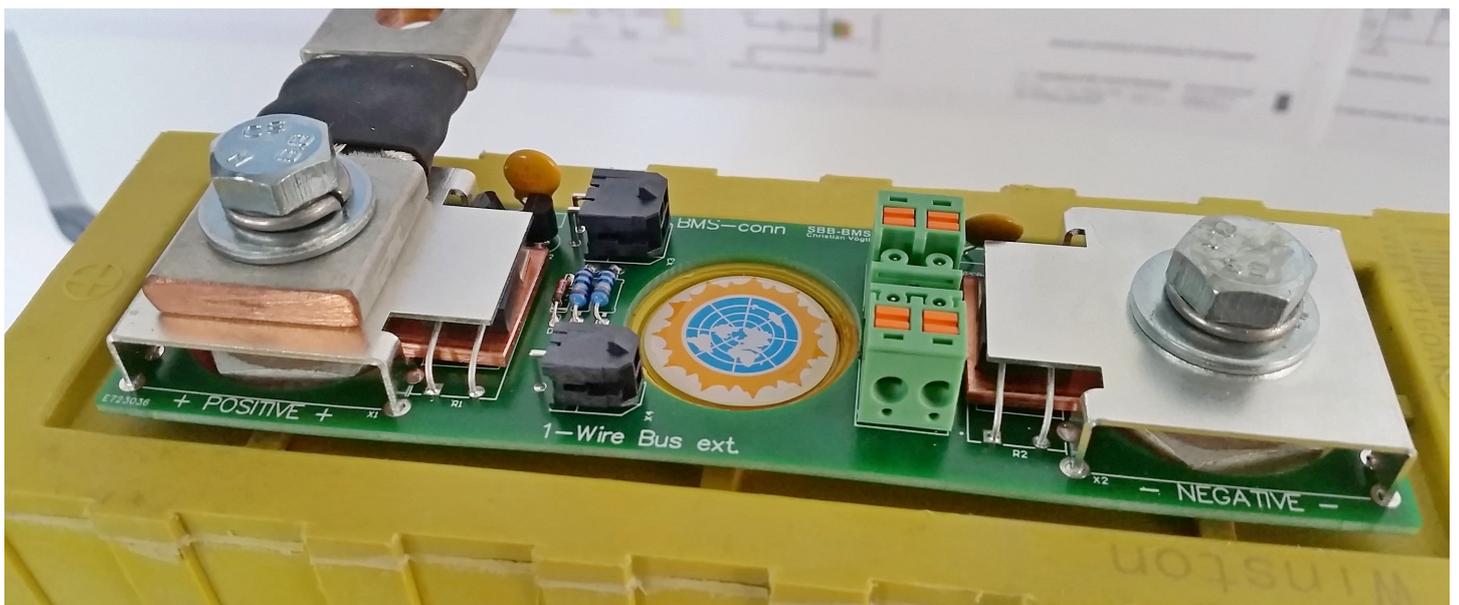
Il est nettement plus important que la batterie résiste à des fortes vibrations et fonctionne de manière fiable, même en cas de température pouvant atteindre -20°C . La batterie conçue par la BFH en étroite collaboration avec les CFF mise sur la technologie lithium-phosphate de fer. La stabilité chimique de cette composition garantit un haut niveau de sécurité et une longue durée de vie. Comme l'accumulateur au plomb utilisé jusqu'à présent, la capacité de stockage permet d'assurer un fonctionnement d'urgence du véhicule pendant trois heures, même dans les conditions les plus défavorables. Concernant le modèle fonctionnel, cela correspond à une capacité de 6.5 kWh à l'état neuf.

Un système de gestion de batterie (BMS) propre assure la commande et la surveillance du modèle fonctionnel. Le BMS

DÉFIER LES BASSES TEMPÉRATURES

Pour garantir une longue durée de vie, les batteries lithium-phosphate de fer doivent être rechargées délicatement, notamment lorsque les températures atteignent -20°C . Pour relever ce défi, les développeurs de la BFH ont tenté plusieurs approches: d'une part, les cellules spéciales choisies tolèrent très bien les basses températures; les tests réalisés dans le laboratoire du centre BFH-CSEM Stockage d'énergie l'ont démontré. Et d'autre part, un chauffage électrique pour cellules à été incorporé. Il permet d'augmenter la température de la masse de la batterie par les bornes (700 W pendant une heure) avec un rendement thermique de 20 Kelvin. Enfin, le modèle fonctionne avec un convertisseur DC-DC qui permet une recharge contrôlée, ralentie et ainsi délicat jusqu'à 800 W, indépendamment du courant de charge fixe sot par le réseau de bord.

Toutes ces mesures ne sont pas nécessaires pour l'exploitation pratique de la batterie en cas de températures hivernales. Les responsables du projet soulignent que deux des trois mesures permettent d'obtenir la durée de vie et la disponibilité souhaitées. L'avenir montrera de quelle manière la batterie CFF fabriquée en série sera en mesure d'assurer la capacité de recharge visée en cas de basses températures. BV



Platine de raccordement d'une cellule de batterie isolée: elle dispose de raccords pour la mesure de la température et de la tension ainsi que pour le chauffage de la cellule. Photo: BFH



Présentation du modèle fonctionnel auprès de l'Union des transports publics. En arrière-plan, un train régional DPZ équipé d'une batterie au plomb comme celles utilisées jusqu'à présent. Photo: CFF

assure, entre autres, la recharge de la batterie après chaque prélèvement d'énergie dans le respect des besoins et des ressources. Il régule le processus de charge pour que la batterie puisse fournir au moins 2 kWh d'énergie, c'est-à-dire la quantité nécessaire requise pour répondre aux exigences d'un fonctionnement de secours en cas de panne de réseau. L'éclairage, par exemple, reste ainsi disponible pendant trois heures. En raison des propriétés chimiques, la batterie doit toujours être entièrement chargée lorsque la température ambiante est élevée, notamment quand elle est neuve. Grâce à la commande optimisée et à la faible sollicitation électrique, la batterie devrait pouvoir durer au moins douze années à l'avenir. Les accumulateurs au plomb utilisés jusqu'à présent doivent être remplacés à titre préventif après cinq à sept ans. «Comme la nouvelle batterie a une durée de vie deux fois plus longue, les frais d'acquisition plus élevés peuvent être amortis dans un délai raisonnable», affirme Christian Vögtli, ingénieur en développement à la BFH.

En temps normal, la ligne aérienne de contact alimente le réseau de bord des wagons en convertissant la tension alternative de 15 kW en tension continue de 42 V sur différents niveaux de conversion. Les batteries au plomb utilisées jusqu'à maintenant sont raccordées en permanence au réseau

de bord et sont toujours sous tension. La nouvelle batterie fonctionne différemment: quand elle est entièrement chargée, elle peut, par exemple, être temporairement séparée du réseau de bord. C'est avantageux lorsque la tension de la batterie séparée baisse légèrement en raison dudit effet de relaxation. Cela augmente la durée de vie de la batterie. Pour découpler la batterie du réseau de bord, on utilise un commutateur à semi-conducteur spécial; il s'agit d'une caractéristique essentielle de l'innovation. Grâce au commutateur à semi-conducteur, la batterie est toujours opérationnelle: en cas de panne du réseau de bord, par exemple en raison d'une coupure, le commutateur permet le flux d'énergie dans le réseau de bord immédiatement et sans intervention active de la commande. Il permet également de réguler l'état de charge en fonction de la saison et des besoins.

Le modèle fonctionnel conçu à Bienne ouvre une nouvelle perspective en termes de maintenance. Aujourd'hui, les batteries doivent être contrôlées tous les six mois (par ex. l'absence de fumigation) et leur date d'expiration doit être contrôlée visuellement. À l'avenir, ces contrôles pourraient devenir superflus grâce à une analyse automatique de «l'état de santé» de la batterie par le BMS (State of Health/SoH) et par la communication à intervalles réguliers des valeurs par

GSM au centre de service (ou au moins par un affichage bien visible sur la batterie). Les batteries ne devront plus être remplacées par prévention comme c'est le cas aujourd'hui mais uniquement lorsque leur State of Health ne leur permet plus de répondre aux exigences.

Base pour l'approvisionnement sur le marché

À l'origine, les CFF avaient prévu de construire plusieurs prototypes et de les tester dans le service ferroviaire en vue de construire la batterie eux-mêmes. L'entreprise y a renoncé depuis. «D'une part, la progression des connaissances pour les questions techniques serait disproportionnée par rapport aux dépenses engendrées pour une exploitation pilote. D'autre part, les CFF s'efforcent d'acquérir des produits modulaires dans des conditions favorables sur le marché au lieu d'intervenir en tant que fabricant», affirme le chef de projet CFF Ueli Kramer. La nouvelle batterie doit désormais être commandée avec les spécifications requises auprès de fournisseurs industriels expérimentés. «Le modèle fonctionnel nous a permis d'acquérir les connaissances, l'expérience et ainsi les spécifications nécessaires pour élaborer un système apte à fonctionner dans les trains et conforme au dernier état de la technique», affirme Kramer. «Tout fabricant peut appliquer les meilleures technologies disponibles pour ses produits et adopter les approches et les idées du modèle fonctionnel afin d'obtenir les spécifications déterminées.» Finalement, d'autres compagnies ferroviaires nationales et internationales pourraient bénéficier du développement des CFF pour travailler à la modernisation de leurs systèmes de batterie.

- Ueli Kramer (ueli.kramer@sbb.ch), chef de projet pour la gestion de l'énergie et directeur du centre de compétence batterie CFF, et Christian Vögtli (christian.voegtli[at]bfh.ch), ingénieur en développement au centre BFH-CSEM Stockage d'énergie de Bienne, communiquent des **informations** concernant le projet.
- Pour la part de l'OFEN, le Dr. Men Wirz (men.wirz[at]bfe.admin.ch), section Cleantech, et Roland Brüniger (roland.brueeniger[at]brueniger.swiss), directeur du programme de recherche de l'OFEN sur les technologies de l'électricité, communiquent également des **informations** concernant le projet.

- Vous trouverez d'autres **articles spécialisés** concernant les projets phares et de recherche, les projets pilotes et les démonstrations dans le domaine des technologies de l'électricité sur www.bfe.admin.ch/CT/electricite.

PROJETS PILOTES, DE DÉMONSTRATION ET LES PROJETS PHARES

Le développement du modèle fonctionnel pour une batterie CFF compte parmi les projets pilotes et de démonstration avec lesquels l'Office fédéral pour l'énergie (OFEN) soutient l'application économique et rationnelle de l'énergie et encourage l'utilisation des énergies renouvelables. L'OFEN soutient des projets pilotes, de démonstration et des projets phares avec 40% des dépenses imputables non amortissables. Des requêtes peuvent être déposées à tout moment.

- www.bfe.admin.ch/pilotdemonstration
- www.bfe.admin.ch/leuchtturmprogramm