

# Interaction entre la gestion de la charge et le vieillissement de la batterie

Comment un bon système de gestion de charge peut prolonger durablement la durée de vie de la batterie

Philipp Sinhuber, Aix-la-Chapelle

Le système de batterie est le "cœur" de tout bus électrique : il ne définit pas seulement les caractéristiques techniques, mais influence également de manière déterminante les coûts. Ainsi, avec une part pouvant atteindre un tiers des coûts d'acquisition, un système de batterie est de loin le composant le plus cher d'un bus électrique. De plus, la durée de vie des solutions actuelles est encore limitée, de sorte que les entreprises de transport doivent prévoir au moins un remplacement de la batterie pour la durée d'utilisation d'un bus électrique.

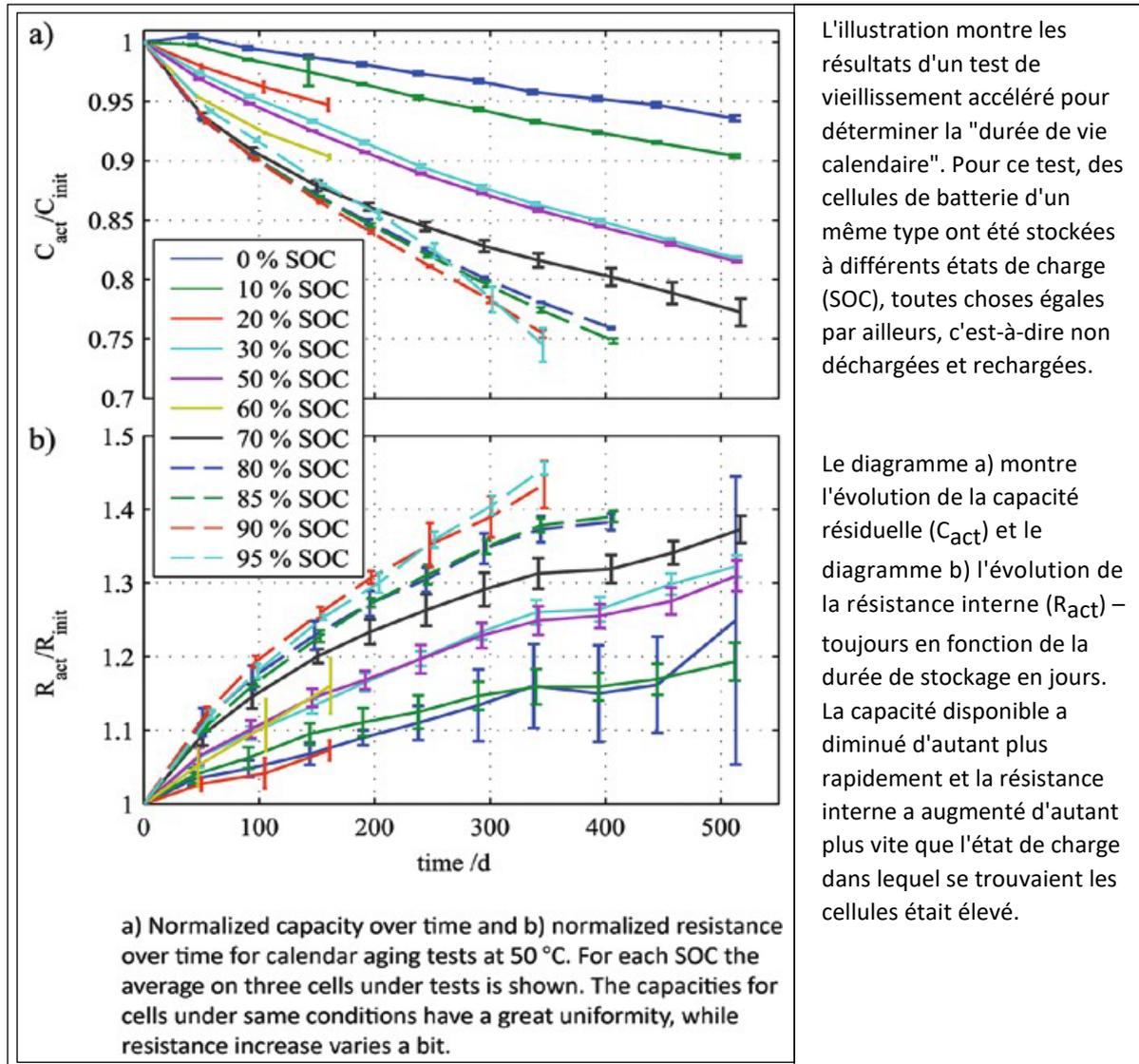
C'est pourquoi il est essentiel pour les entreprises de transport de créer des conditions optimales aussi bien pendant le trajet que pendant la charge et d'exploiter les systèmes de batterie de la manière la plus douce possible. La planification et la commande des processus de charge incombent au système de gestion de la charge (« load management system », ou LMS). L'interaction entre le LMS et le système de gestion des véhicules, qui fait partie du système de gestion d'exploitation (SGE), est également très importante. Ainsi, les durées de charge doivent toujours être prises en compte lors de l'affectation des véhicules aux rotations et aux stations de recharge afin d'obtenir des résultats optimaux.

L'article suivant explique tout d'abord les processus de vieillissement des batteries et décrit les fonctions et les avantages d'un LMS en ce qui concerne ce vieillissement.

## Causes possibles du vieillissement des batteries de bus électriques

Presque tous les bus électriques sont équipés de batteries au lithium. Le vieillissement des batteries est influencé par différents facteurs : Les tensions dues à des états de charge élevés et à des températures élevées entraînent généralement un vieillissement plus rapide que les tensions moyennes ou les températures modérées. La tension et la température sont des grandeurs physiques qui décrivent le contenu énergétique d'un système. Plus le contenu énergétique est élevé, plus les réactions parasites qui y sont liées se produisent rapidement dans le système. Cela peut par exemple conduire à ce que des porteurs de charge (ions lithium) soient liés et ne soient plus disponibles pour la réaction électrochimique proprement dite. De plus, des couches de couverture peuvent se développer sur les matériaux actifs. Les cellules de la batterie perdent ainsi de la capacité tandis que leur résistance interne augmente, même si la batterie n'est ni chargée ni déchargée. On parle ici de "durée de vie calendaire", car la durée est limitée même si la batterie n'est pas utilisée du tout.

Toutefois, si la batterie vieillit en raison de la charge et de la décharge, on parle de "vieillissement cyclique" ou de "durée de vie cyclique". La dilatation des matériaux actifs change pendant la charge et la décharge, ce qui entraîne des contraintes mécaniques et finalement l'usure des matériaux actifs. Ce phénomène est comparable à un morceau de métal qui est fréquemment plié dans un sens et dans l'autre : Plus les flexions sont importantes, plus le matériau se fatigue rapidement à l'endroit de la flexion. Selon la profondeur de la cyclisation - et en fonction de la technologie des cellules - on peut retirer et recharger la capacité environ 800 à 5000 fois jusqu'à ce que la batterie atteigne la fin de sa vie. C'est ce que l'on appelle "l'équivalent d'un cycle complet". En revanche, le titanate de lithium (LTO), un matériau actif pour l'électrode négative, présente un travail volumétrique nettement inférieur à celui du graphite, le matériau "classique" de l'anode. Les cellules correspondantes peuvent donc atteindre deux à cinq fois plus d'équivalents de cycles complets.



L'illustration montre les résultats d'un test de vieillissement accéléré pour déterminer la "durée de vie calendaire". Pour ce test, des cellules de batterie d'un même type ont été stockées à différents états de charge (SOC), toutes choses égales par ailleurs, c'est-à-dire non déchargées et rechargées.

Le diagramme a) montre l'évolution de la capacité résiduelle ( $C_{act}$ ) et le diagramme b) l'évolution de la résistance interne ( $R_{act}$ ) – toujours en fonction de la durée de stockage en jours. La capacité disponible a diminué d'autant plus rapidement et la résistance interne a augmenté d'autant plus vite que l'état de charge dans lequel se trouvaient les cellules était élevé.

Fig. 1 : Résultats d'un test de vieillissement typique pour des cellules de batterie (type de cellule : Sanyo UR18650E, matériau de cathode : NMC, matériau d'anode : graphite), réalisé à l'ISEA de la RWTH Aachen.

## Influencer le vieillissement de la batterie

Pour ralentir le plus possible le vieillissement de la batterie, on peut d'abord essayer de maintenir les paramètres susmentionnés – à savoir la température, la tension, l'état de charge et la cyclisation – à un niveau aussi bas que possible. Un « stockage au réfrigérateur » promettrait donc la plus longue durée de vie. Cependant, étant donné que l'objectif de la batterie est d'absorber puis de fournir de l'énergie pour la propulsion et les équipements auxiliaires et que le fonctionnement est toujours prioritaire, un tel "stockage au réfrigérateur" n'est pas possible. Il existe néanmoins des degrés de liberté qui peuvent être utilisés – notamment grâce à un système de gestion de la charge approprié – pour exploiter les batteries avec le moins de contraintes possibles. Afin de minimiser le vieillissement calendaire, les bus peuvent par exemple être chargés le plus tard possible et seulement jusqu'à ce qu'ils soient suffisamment chargés pour la rotation suivante, ce qui ne nécessite pas forcément une charge de 100 pour cent. Ainsi, les batteries ne se trouveraient que le moins longtemps possible dans des états de charge élevés.

La puissance de charge exerce toujours une influence sur le vieillissement de la batterie. Un courant de charge élevé entraîne par exemple un réchauffement de la batterie. Si le système de refroidissement n'est pas conçu de manière adéquate et que la température n'est pas répartie de manière uniforme, certaines parties du pack de batteries vieillissent particulièrement vite. La qualité du pack de batteries et du système de refroidissement est donc ici déterminante. Il existe sur le marché différents systèmes de refroidissement ainsi que différentes qualités de système de batterie.

Aux terminaux, la recharge s'effectue souvent à une puissance élevée. Les durées de charge sont alors d'environ cinq à quinze minutes. Si la qualité du système de batterie est suffisante, il n'est pas nécessaire de réduire la puissance de charge pour de tels processus. Dans ce cas, la priorité doit être donnée à la garantie du bon fonctionnement de l'exploitation. Mais si la charge est effectuée de nuit au dépôt, on dispose souvent de plus de temps et donc de plus de flexibilité, et le courant de charge pourrait être réduit en conséquence.

La cyclisation de la batterie, et donc la profondeur des cycles, devrait donc être fonction des besoins d'exploitation du bus. En cas de planification et de conception solides du système de bus électrique - c'est-à-dire que la capacité de la batterie est prévue pour le pire des cas - la cyclisation est de toute façon modérée en temps normal, car le pire des cas ne se produit que rarement. Il n'est

généralement pas judicieux de raccourcir les circuits et donc d'augmenter les besoins en véhicules ou d'accepter d'autres inefficacités d'exploitation dans le seul but d'aplanir la cyclicité de la batterie.



### À propos de l'auteur

**Philipp Sinhuber**, l'un des directeurs d'EBS ebus solutions GmbH, est responsable, avec son équipe d'ingénieurs et de développeurs de logiciels, des algorithmes de prévision de la consommation d'énergie et de planification des phases de charge dans IVU.suite. Ces algorithmes veillent à ce que les bus électriques soient chargés avec ménagement, de manière fiable et rentable. Lorsqu'il était à l'université RWTH d'Aix-la-Chapelle, il a mené des recherches pendant plus de six ans dans le domaine de la technologie des systèmes de batterie pour les bus électriques. Depuis 2015, il conseille les entreprises de transport dans le cadre de la transition vers les bus électriques avec la société ebusplan GmbH.

## Exigences d'un LMS pour les bus électriques

Un LMS commence par commander les chargeurs - généralement selon le protocole OCPP (Open Charge Point Protocol) - et leur donne des limites supérieures de puissance dans lesquelles les chargeurs négocient et gèrent les processus de charge réels avec le véhicule. Ce faisant, le LMS répartit la puissance de manière à atteindre différents objectifs durs et souples. Recharger tous les bus à temps pour leur prochaine utilisation et ne pas surcharger un composant ou le raccordement au réseau électrique sont par exemple des objectifs durs. De même, le respect d'une fenêtre de blocage, pendant laquelle la charge ne peut pas être effectuée ou seulement à faible puissance, est un objectif dur. En revanche, minimiser la puissance de pointe afin de réduire les frais de réseau à payer par l'entreprise de transport est un objectif souple.

Un bon LMS connaît les véhicules utilisés et leurs batteries ainsi que l'infrastructure de recharge utilisée. Il peut donc prédire les durées de charge et adapter spécifiquement les phases de charge, ce qui permet d'augmenter les potentiels d'optimisation. Les phases de charge peuvent être réduites et les tampons ainsi que les redondances peuvent être planifiés plus consciemment – aux endroits où cela est judicieux.

Sur cette base, un bon LMS offre aux entreprises de transport la possibilité de régler le pilotage des phases de chargement spécifiquement pour l'exploitation des bus. A ce niveau, il existe de grandes

différences entre les villes et les communes, cantons ou départements. Une entreprise de transport a peut-être besoin de plus de tampons et de réserves en raison des processus d'exploitation dans le dépôt qu'une autre entreprise de transport, pour laquelle la réduction des pics de charge joue un rôle nettement plus important. Un bon LMS rassemble donc les différentes influences et optimise les plans de chargement en fonction des conditions marginales locales spécifiques que l'utilisateur peut configurer.

Dans un souci de rentabilité, les raccordements au réseau électrique dans les dépôts ne sont généralement pas dimensionnés pour la charge simultanée de tous les véhicules. La ressource de la puissance de charge est donc limitée et doit être attribuée en priorité. Pour maximiser la stabilité opérationnelle, il faut tenir compte des besoins de charge et de l'heure de départ. Le LMS reçoit du système de gestion du dépôt (SGD) les heures de départ des bus et les états de charge minimum nécessaires à chaque fois, et sait ainsi quelle quantité d'énergie doit être rechargée et combien de temps durerait la recharge. Le LMS doit en outre tenir compte des bus qui se trouvent encore sur le trajet et recevoir pour cela du SGD une prévision de l'état de charge attendu à l'entrée du dépôt. En outre, le SGD doit savoir combien d'énergie le bus consomme et combien d'énergie est éventuellement rechargée aux terminus ("charge occasionnelle"). Un bon LMS est donc entièrement intégré dans l'environnement du système et surtout spécifique à l'application - c'est-à-dire taillé sur mesure pour l'exploitation du bus, qui est par exemple très différente de l'exploitation d'une aire de repos sur l'autoroute ou d'un parking.

## Fonctionnalité LMS pertinente pour les batteries

Dans le système général décrit ci-dessus, la batterie joue également un rôle important. Par exemple, non seulement l'habitacle doit être préconditionné avant le départ, mais aussi en partie la batterie elle-même. Ceci est également contrôlé par le LMS et peut être planifié par le planificateur via le SGD. En outre, le LMS doit également fournir de la puissance pour d'autres consommateurs auxiliaires pendant la charge ainsi que pour l'équilibrage (« balancing »). Cet équilibrage des tensions des différentes cellules du système de batterie est nécessaire de temps en temps pour toutes les batteries au lithium afin de maintenir la batterie dans un état performant et d'éviter un vieillissement inutile. Certaines batteries nécessitent pour cela une alimentation électrique par le chargeur.

Les figures 2 et 3 ci-dessous montrent un exemple schématique pour trois bus. Le marqueur « AN » représente les arrivées à la station de recharge correspondante. Le marqueur « AB » symbolise en revanche la nouvelle sortie de dépôt ultérieure. La hauteur des barres colorées indique la puissance de charge attribuée au véhicule (par le LMS), tandis que la largeur indique la durée de cette attribution de puissance. Les blocs symbolisent une forme simplifiée de la « chargingSchedulePeriod » selon l'OCPP et les courbes noires indiquent l'évolution attendue de l'état de charge.

La figure 2 illustre le cas de la charge non contrôlée. Tous les bus commencent à se charger immédiatement après leur arrivée à la station de recharge. En conséquence, il faut s'attendre à une puissance de pointe élevée dans la plage horaire où les blocs de charge bleu et vert se chevauchent. Les batteries des deux bus du haut sont alors très rapidement chargées à fond (SOC 100 pour cent) et restent longtemps à l'état de charge complète.

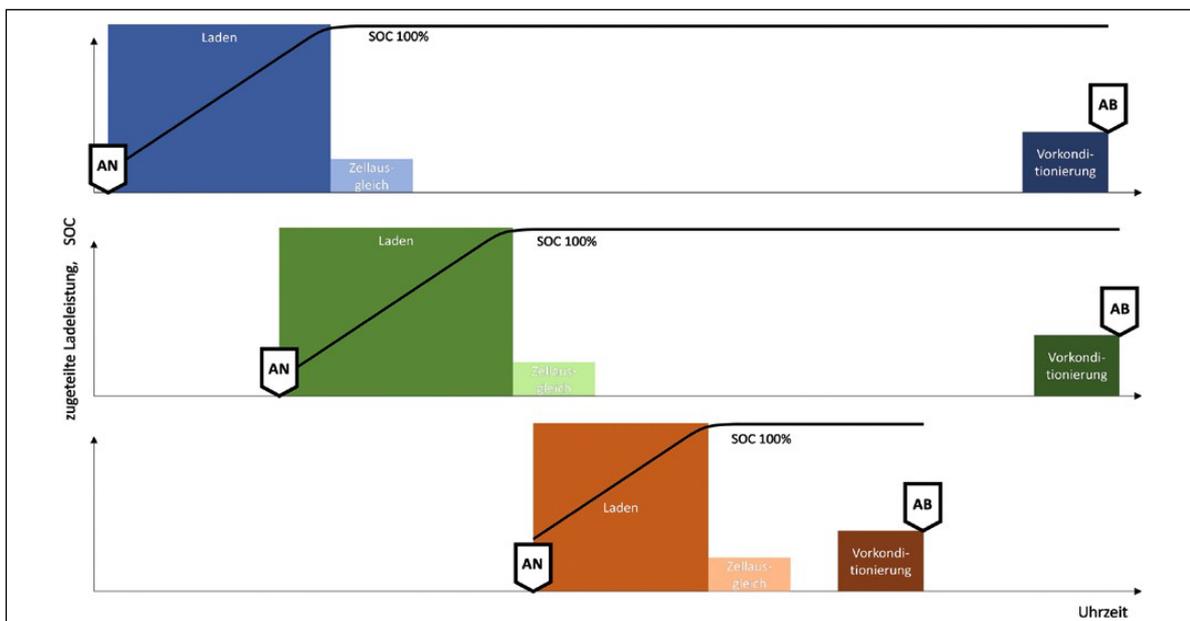


Fig. 2 : Chargement non piloté

La figure 3 montre maintenant le cas avec une planification intelligente des phases de charge. Ici, non seulement la simultanéité est maintenue à un faible niveau pour éviter les pics de charge et la puissance est répartie, mais l'attribution de la puissance aux véhicules est également priorisée en fonction de leurs heures de départ et de leurs besoins de charge. Grâce à une meilleure utilisation des temps d'arrêt, les puissances de charge sont plus faibles. Cela se voit aux blocs plus plats et aux courbes d'état de charge qui augmentent moins rapidement. Cela réduit quelque peu les pertes de l'infrastructure de charge, car les pertes augmentent de manière disproportionnée avec l'augmentation de la charge - par exemple dans les transformateurs, les sous-distributeurs et les lignes d'alimentation. Mais il y a aussi des répercussions sur les batteries : Par exemple, la réduction de la puissance de charge de 120 kW à 60 kW signifie, selon un calcul approximatif, une réduction de moitié du courant de charge. Pour les packs de batteries actuels, qui dépassent généralement les 300 kWh pour les bus individuels, même 120 kW est une faible puissance de charge. Une réduction n'aurait que peu d'influence si le système de batterie est de bonne qualité. En revanche, l'effet selon lequel les batteries n'atteignent l'état de pleine charge que bien plus tard et restent donc moins longtemps à des niveaux de charge élevés peut jouer un rôle important pour le vieillissement de la batterie (fig. 1).

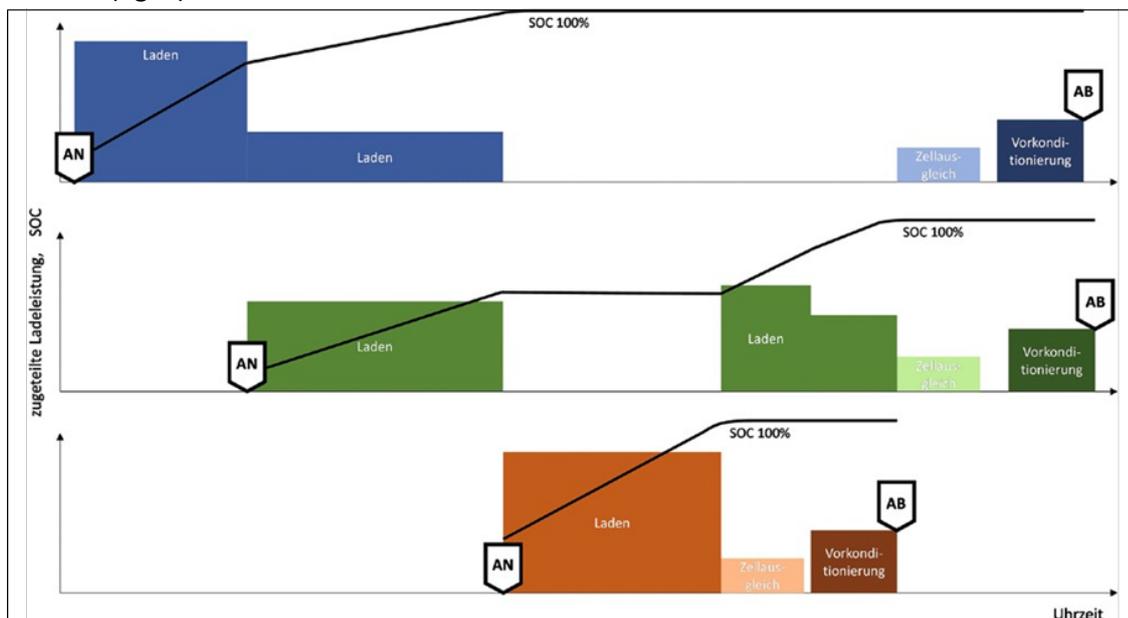


Fig. 3 : Charge avec lissage de la charge, ce qui permet également de ménager les batteries

## Perspectives

En connaissant les besoins de charge, le comportement de charge ainsi que les spécifications de l'entreprise concernant les tampons nécessaires et les objectifs d'optimisation, un bon LMS peut également tenir compte des influences du vieillissement des batteries mentionnées ci-dessus, charger les batteries en les ménageant au maximum et surveiller la progression de la charge.

Si d'autres informations sur l'état du véhicule, comme la température de la batterie, sont ajoutées, des fonctions de sécurité peuvent également être mises en œuvre. Dans le contexte du débat actuel sur les causes et les stratégies de prévention des incendies dans les bus électriques, le LMS pourrait constituer un niveau de sécurité supplémentaire en surveillant la température de la batterie pendant le processus de charge, en plus des mécanismes de sécurité du véhicule et du système de gestion de la batterie. Dans la mesure où les températures des batteries de tous les véhicules sont mises à la disposition du LMS via l'interface de charge, il serait même envisageable d'intégrer la température des batteries dans la planification des phases de charge et de redistribuer la puissance de charge à un stade précoce. Avec une intégration appropriée dans le SGE, il serait même possible d'en tenir compte dans les décisions de planification.

### Bibliographie :

[1] J. Schmalstieg et al./*Journal of Power Sources* 257 (2014), 325 – 334.