



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et
de la communication DETEC

Office fédéral des transports OFT

Programme de mise en œuvre de la stratégie énergétique 2050 des
transports publics (SETP 2050)

Électrification des flottes de bus

Guide pour les compagnies de transport

Rapport final



Christine Schulz-Dübi

Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS) / Busbetrieb Solothurn und Umgebung (BSU)
Tiefenaustrasse 2, 3048 Worblaufen, christine.schulz@rbs.ch

Roman Zürcher

Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS) / Busbetrieb Solothurn und Umgebung (BSU)
Tiefenaustrasse 2, 3048 Worblaufen, roman.zuercher@rbs.ch

Mareike Otte

VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH
Könneritzstrasse 31, DE-01067 Dresden, m.otte@vcdb.de, www.vcdb.de

Jan Schwarzenberger

VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH
Könneritzstrasse 31, DE-01067 Dresden, j.schwarzenberger@vcdb.de, www.vcdb.de

Mentions légales

Éditeur :

Office fédéral des transports OFT

Programme de mise en œuvre de la stratégie énergétique 2050 des transports publics (SETP 2050)
CH-3003 Berne

Direction de Programme
Tristan Chevroulet, OFT

Numéro de projet : P-144

Source

Disponible gratuitement sur Internet
www.bav.admin.ch/energie2050

Pour une meilleure lisibilité, le texte du présent document utilise le masculin générique pour tous les genres.

Seul les auteurs du présent rapport sont responsables du contenu et des conclusions qui y figurent.

Berne, le 14.02.2020 (v. française).

Table des matières

| | |
|--|----|
| Table des matières | 3 |
| Résumé | 3 |
| <i>Compendio</i> | 4 |
| Summary | 4 |
| 1. Situation initiale | 4 |
| 2. Objectif du travail | 5 |
| 3. Approche de la recherche et état actuel des connaissances | 5 |
| 4. Résultats | 5 |
| 5. Discussion | 15 |
| 6. Conclusions et recommandations | 15 |
| Liste des abréviations et des symboles | 17 |
| Bibliographie | 17 |

Résumé

Au cours des prochaines années, l'électromobilité s'imposera de plus en plus dans les petites et moyennes compagnies de bus, ce qui représente d'importants défis financiers et opérationnels pour ces dernières. Les entreprises « *Regionalverkehr Bern-Solothurn* » (RBS) et « *Busbetrieb Solothurn und Umgebung* » (BSU) ont relevé ce défi et démontrent quelles sont les étapes concrètes à franchir pour transformer intégralement leurs flottes de bus diesel en un parc de bus électriques. Ces conclusions ont été résumées dans un guide séparé mis à disposition de tous les milieux intéressés comme outil de transfert de connaissances.

Ce guide offre une synthèse claire de la situation actuelle des véhicules et des technologies de recharge. De plus, il montre quelles sont les étapes à franchir pour définir le concept de recharge approprié. Il émet en outre des recommandations quant au dimensionnement de l'infrastructure de recharge au dépôt de bus ou aux bornes de recharge sur l'itinéraire et par rapport aux modules de logiciels à intégrer au système informatique pour garantir en tout temps la disponibilité de chaque bus électrique. Un modèle de cahier des charges pour les entreprises de transport simplifie l'acquisition des véhicules et de l'infrastructure de recharge nécessaire. La partie « *Évaluation économique* » illustre finalement les coûts générés par ce progrès technologique par différents scénarios. En se basant sur les données concrètes des flottes de bus de RBS et de BSU, il est ainsi possible d'effectuer une analyse écologique et d'évaluer l'importance des coûts externes.

Compendio

Nei prossimi anni la mobilità elettrica si diffonderà sempre più anche tra le piccole e medie imprese di autobus, ponendole di fronte a una grossa sfida sul piano operativo e finanziario. Le aziende di trasporto Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS) e Busbetrieb Solothurn und Umgebung (BSU) hanno raccolto questa sfida e illustrano i passi concreti da compiere per una conversione integrale del parco veicoli dal diesel all'elettrico.

È stata redatta una guida, destinata agli ambienti interessati, che fornisce un utile quadro degli elementi basilari dei veicoli e delle tecnologie di ricarica, descrivendo le fasi di lavoro necessarie per giungere alla scelta del modello di ricarica più adeguato. Sono inoltre state formulate raccomandazioni per il dimensionamento dell'infrastruttura supplementare di ricarica necessaria nei depositi degli autobus, o lungo le autolinee, e raccomandazioni riguardo ai moduli software di cui bisogna dotare l'ambiente di sistema IT per poter garantire in ogni momento la disponibilità dell'intera flotta elettrica. È stato altresì sviluppato un modello di capitolato d'oneri che facilita alle imprese di trasporto l'acquisizione dei veicoli e dell'infrastruttura di ricarica occorrente. Nella parte dedicata alla valutazione economica, infine, sono esposti i costi della tecnologia in funzione di diversi scenari. L'applicazione di queste cifre consente, sull'esempio del parco autobus di RBS e BSU, di condurre una valutazione ecologica e di determinare i costi esterni.

Summary

Over the next few years, electric mobility will increasingly find its way into small and medium-sized bus companies, which will present major operational and financial challenges for these companies. The "Regionalverkehr Bern-Solothurn" (RBS) and the "Busbetrieb Solothurn und Umgebung" (BSU) have taken up this challenge and explain what concrete steps have to be taken to transform entirely their diesel bus fleet into an electric bus fleet. These findings are summarised in a separate guideline, which is available to all interested parties for knowledge transfer.

The guide provides a good overview of the current fundamentals of vehicles and charging technologies and presents the necessary steps to select the right charging concept. In order to guarantee the availability at all times of every e-bus, the guide provides recommendations regarding the dimensions of the additional charging infrastructure at the bus depot or of the charging points along the bus route and which software modules must be bundled with the existing IT system landscape. A model specification sheet shall help simplify the procurement of vehicles and of the necessary charging infrastructure. Finally, the "*economic evaluation*" section presents various scenarios which illustrate the costs generated by this technological progress. The figures of the example of the RBS and BSU bus fleets allow to carry out an ecological analysis and to assess the significance of external costs.

1. Situation initiale

Bern-Solothurn (RBS) et Busbetrieb Solothurn und Umgebung (BSU) sont deux entreprises qui opèrent sur la grande région de Berne-Soleure et qui disposent chacune d'une flotte de bus diesel comprenant plus de 40 véhicules. Dans les années à venir, les deux entreprises envisagent de remplacer leurs bus diesel par des bus électriques afin de pouvoir atteindre leurs propres objectifs climatiques.

Le passage à des bus électriques s'accompagne de changements technologiques en profondeur. De nombreuses questions se posent, auxquelles il faut apporter des réponses avant même de débuter le processus de transformation. Concrètement, il s'agit de résoudre les problèmes suivants :

- Quel système de bus électrique (recharge complète ou biberonnage) convient le mieux pour telle ou telle ligne de bus ou pour l'ensemble du réseau de bus ?
- Quels processus opérationnels ou quelles interfaces doivent être adaptés ?
- Quelles sont les qualifications dont doit disposer le personnel roulant et celui des ateliers à l'avenir ?
- Quelles doivent être les dimensionnements de l'infrastructure de recharge, combien d'espace requiert-elle et quelles sont les exigences imposées aux capacités de garage et à l'équipement de l'atelier par le passage à une exploitation électrique ?

- Quels critères faut-il prendre en compte lors de la mise au concours d'un système de bus électriques et quels surcoûts faut-il actuellement prévoir par rapport à une flotte de bus fonctionnant entièrement au diesel ?

2. Objectif du travail

Les conclusions obtenues à partir de l'analyse des deux compagnies de bus RBS et BSU sont résumées et publiées dans un guide séparé [1] permettant un transfert pragmatique des connaissances. Le guide formule des recommandations d'action pour les secteurs « *Analyse du réseau et stratégie de recharge* », « *Concept d'infrastructure* », « *Régime d'exploitation* » et « *Soumission* ». Le guide s'adresse à toutes les entreprises de transport intéressées qui sont sur le point de passer à une exploitation avec des bus électriques.

Outre les études purement techniques, les décideurs politiques sont surtout intéressés par les comparaisons de coûts présentées et par les coûts externes concernant les effets environnementaux générés par les bus électriques et les bus traditionnels au diesel.

3. Approche de la recherche et état actuel des connaissances

Les données d'exploitation actuelles des deux compagnies de bus constituent la base des exemples pratiques. Le besoin en énergie, la durée des éventuels temps de recharge aux terminus et la stratégie de recharge la plus adaptée à telle ou telle ligne peuvent être déduits en se basant sur ces données. L'état actuel de la technique en matière de véhicules et d'infrastructure de recharge est également pris en compte.

L'étude est consacrée aux bus électriques équipés de batteries et ne prend pas en considération les supports d'énergie chimiques alternatifs, comme l'hydrogène, le biogaz ou les biocarburants.

Les coûts sont calculés à l'aide de la méthode de la valeur actualisée nette et des données réelles fournies par RBS et BSU. Tous les frais d'investissement et d'exploitation sont intégrés au calcul des coûts pour comparer les bus diesel traditionnels et les bus électriques.

Bien que les systèmes actuellement disponibles sur le marché ne soient pas encore adaptés pour répondre entièrement aux exigences des deux compagnies de bus examinées, on peut toutefois s'attendre à des évolutions technologiques en matière de coûts et d'autonomie à l'avenir. En raison des coûts élevés et de la montée en puissance sur le marché de nouveaux systèmes de bus, on présuppose un passage progressif vers de nouveaux concepts de propulsion. Cela inclut une exploitation provisoirement parallèle avec des bus diesel.

4. Résultats

Les résultats détaillés sont publiés dans le guide [1] (en allemand), qui peut être téléchargé séparément sur le site Internet de l'OFT. Les résultats de l'étude sont résumés dans les sections suivantes :

4.1 Bases technologiques

4.1.1 Conceptions de recharge

Pour les bus fonctionnant sur batterie, l'autonomie dépend en principe de la capacité disponible de stockage d'énergie électrique. Le régime d'exploitation et la stratégie de recharge sont définis par rapport aux caractéristiques de la ligne (longueur de parcours, temps de service, topographie, caractéristiques de conduite, retards etc.). En fonction de la stratégie de recharge et donc de la capacité de la batterie, les bus fonctionnant sur batterie entrent dans la catégorie « *recharge complète* » ou « *biberonage* ».

Les appareils auxiliaires - tels que la climatisation électrique - exercent également une influence significative sur le bilan énergétique.

Système de recharge complète

Si Le véhicule est conçu de manière à pouvoir stocker de l'énergie pour une journée entière on parle de recharge complète (en anglais *overnight charger*). La recharge des dispositifs de stockage d'énergie plus importants, comparé à ceux utilisé pour le biberonnage, s'effectue à des bornes centrales lors des arrêts de l'exploitation et de préférence au garage.

Avantages d'un système de recharge complète :

- Les systèmes de recharge complète ne dépendent pas d'infrastructures de recharge externes leur utilisation est donc plus flexible.
- Les véhicules ne sont pas obligés de respecter des durées minimales de stationnement aux terminus pour pouvoir se recharger. La stabilité de l'exploitation en est améliorée et cela permet selon les circonstances de renoncer à l'utilisation de véhicules supplémentaires.
- La recharge stationnaire lente et à puissance modérée ménage les cellules de stockage et prolonge la durée de vie des accumulateurs.

Inconvénients des systèmes de recharge complète :

- Les autonomies possibles allant de 150 à 250 km sont nettement inférieures à celles des bus diesel. Cela implique de planifier un changement de véhicule pour les parcours plus longs.
- Par rapport aux systèmes de biberonnage, il faut transporter plus de batteries ce qui, dans certaines circonstances, augmente les coûts, réduit la capacité des passagers et s'avère dé-savantageux au niveau environnemental.
- La recharge complète simultanée de plusieurs véhicules au dépôt nécessite une gestion de la charge afin d'éviter les pics de consommation.
- Le courant des vecteurs énergétiques de sources renouvelables est généralement disponible durant la journée et pas durant la phase de recharge nocturne.

Système de biberonnage

Le système de biberonnage (en anglais *opportunity charger*) dispose d'un dispositif de stockage d'énergie plus petit qui n'est pas conçu pour stocker de l'énergie pour toute une journée. Le dispositif de stockage d'énergie doit être rechargeé durant le service sur l'itinéraire. Contrairement au système de recharge complète avec recharge intermédiaire, cela nécessite des puissances de recharge élevées, voire souvent un système dédié (par ex. *borne de recharge*).

Avantages des systèmes de biberonnage :

- L'utilisation de dispositifs de stockage plus petits a des effets positifs sur l'ensemble du véhicule : ils pèsent moins lourd, prennent moins de place et coûtent moins cher.

Inconvénients des systèmes de biberonnage :

- Les puissances de recharge élevées sollicitent davantage les accumulateurs, ce qui peut avoir un effet négatif sur leur durée de vie.
- Pour garantir la sécurité de l'exploitation, il faut prévoir certains temps de recharge aux terminus des lignes. Ces temps de séjour au terminus permettent souvent de compenser les retards et doivent être prolongés en conséquence afin de permettre une recharge suffisante pour fournir l'autonomie nécessaire aux véhicules.
- Il faut installer des bornes de recharge supplémentaires sur le réseau de ligne, ce qui a une incidence négative sur les coûts. En outre, il n'est pas possible d'obtenir partout des autorisations pour des bornes de recharge.

- Les modifications a posteriori des projets d'offre ne pourront plus se faire à court terme mais nécessiteront une longue phase de planification. Les systèmes de bus perdent ainsi beaucoup de leur flexibilité actuelle.

Alimentation en énergie

L'alimentation en énergie électrique nécessite un système de contact. Dans le domaine des bus électriques on dispose pour cela des technologies suivantes :

- Recharge conductive stationnaire (par ex. système à bornes ou enfichable, point de recharge via la ligne de contact aérienne)
- Recharge inductive stationnaire (par ex. boucle d'induction)
- Recharge conductive dynamique (par ex. ligne de contact aérienne)
- Alimentation en énergie chimique (par ex. ravitaillement en hydrogène)

Appareil de recharge embarqué

En cas de recharge *enfichable*, l'appareil de recharge sert de couplage entre le raccordement au réseau et le dispositif de stockage d'énergie embarqué. Le câble de recharge permet un raccordement au réseau sans requérir d'infrastructure. Dans la norme IEC 62196, la Commission Électrotechnique Internationale a défini les modes de recharge 1 à 3 pour une recharge CA/CA (décris dans la norme IEC 61851-1) y compris les branchements correspondants pour la recharge conductive des véhicules électriques.

Appareil de recharge externe (système enfichable)

Dans la norme IEC 62196, la Commission Electrotechnique Internationale a également défini le mode de recharge CA/CC y compris les branchements correspondants. Le système enfichable CA/CC est en principe utilisé pour la recharge en arrêt d'exploitation, à savoir la recharge nocturne (*overnight charging*).

En Europe, la recharge rapide CC utilise l'interface de recharge combinée de type 2 (appelée également Combo 2), qui est dotée de deux contacts CC supplémentaires en plus de la connexion habituelle de type 2. La tension de charge maximale pour le connecteur Combo 2 s'élève actuellement à 850 V_{CC}, le courant de recharge maximal à 200 A et la puissance de recharge maximale par conséquent à 170 kW_{CC} (norme IEC 62196-3).

Borne de recharge

En cas d'alimentation en énergie conductive et stationnaire via une *borne de recharge*, le dispositif de stockage d'énergie embarqué est généralement rechargé via des bornes de recharge installées ponctuellement le long de la ligne. La recharge est effectuée le long de l'itinéraire au moment des arrêts planifiés dans l'horaire du véhicule, aux points de rebroussement et/ou aux arrêts (biberonnage). Pour la recharge en arrêt d'exploitation, il faut dans tous les cas prévoir une possibilité supplémentaire de recharge au dépôt, si bien qu'il est pertinent de disposer d'un système uniforme de *bornes de recharge* compatibles.

Les niveaux de tension et de puissance ne sont pas prescrits et varient en fonction du cas de figure. Les paramètres de tension se situent généralement entre 400 V_{CC} et 850 V_{CC}, ce qui permet, du côté de la technique de recharge, de soutenir des tensions de sortie entre 150 V_{CC} et 920 V_{CC} et des puissances de recharge entre 150 kW_{CC} et 600 kW_{CC}.

L'établissement du contact via un pantographe permet d'effectuer le processus de recharge à une puissance élevée de manière entièrement automatique et en très peu de temps. En fonction de la direction du couplage, on différencie les variantes d'exécution suivantes :

- Potence de recharge : pantographe sur le toit du véhicule (en anglais : *on-board bottom-up pantograph*), potence jusqu'à 2,2 m
- Borne de recharge latérale : pantographe installé sur la borne de recharge, établissement du contact sur le côté du véhicule

- Potence de recharge à pantographe abaissable : pantographe installé sur la borne de recharge (en anglais : *off-board top-down pantograph*), potence jusqu'à 2,5 m

4.1.2 Dispositifs de stockage d'énergie électrochimiques

À l'heure actuelle, les bus électriques sont principalement dotés de dispositifs de stockage d'énergie dont il existe deux types d'accumulateurs, différenciés par leur composition chimique, à base de lithium-titanate (LTO) ou de lithium-fer-phosphate (LiFePO₄). Indépendamment de la chimie des cellules, ces dispositifs sont équipés de batteries à haute performance ou à haute énergie.

Dans les conditions d'exploitation, l'autonomie de ces dispositifs de stockage d'énergie est actuellement encore limitée à environ 150 à 200 km. On peut supposer que l'autonomie augmentera encore légèrement à l'avenir mais il ne faut pas s'attendre à des avancées extraordinaires en la matière. On peut escompter des autonomies plus importantes grâce à des prolongateurs d'autonomie (*range extenders*), qui peuvent fournir de l'énergie supplémentaire via des systèmes de piles à combustible. De tels systèmes ne seront probablement pas commercialisables avant 2024.

4.2 Profil d'exigences

Pour élaborer un profil d'exigences, il faut procéder à un relevé complet des données avec toutes les exigences spécifiques aux clients. Cela permet de dresser un état des lieux complet (flotte, infrastructures) ainsi que d'enregistrer des données de base économiques, d'exploitation et de circulation qui servent de paramètres pour les études énergétiques et économiques. Ces données ne peuvent pas être analysées manuellement, il faut utiliser des logiciels spécialisés pour cette étape d'analyse.

En plus des données prévisionnelles (plans de réseau de lignes, horaires graphiques et données de parcours), l'analyse nécessite également des données effectives. Pour déterminer le profil de conduite et la courbe de dénivelé, il faut mesurer les conditions quotidiennes d'exploitation réelles des lignes afin de pouvoir calculer tous les paramètres nécessaires en conditions réelles de circulation et d'exploitation pour les parcours sélectionnés. Pour la conception de l'infrastructure de recharge, des systèmes de recharge en route, les données réelles de retard sont également importantes : celles-ci doivent être obtenues de préférence à partir des systèmes de télésurveillance et d'acquisition de données.

Afin de pouvoir calculer les valeurs de besoin en énergie en fonction du trajet et du temps, il faut tenir compte des besoins spécifiques d'exploitation (intervalles d'entretien, trajet en direction et en provenance du dépôt, temps de rebroussement, retards, nombre de passagers), de circulation et de topographie (nombre d'arrêts par kilomètre, proportion de temps à l'arrêt, vitesse moyenne selon la classification SORT).

La configuration des véhicules doit répondre aux prescriptions légales et ne pas dépasser le poids total ni le poids par essieu. Il faut soupeser les avantages et les inconvénients des moteurs intégrés au moyeu de roue ou des moteurs centraux. Les installations d'air conditionnée ou de chauffage ont une influence importante sur l'autonomie. C'est pourquoi il faut répondre à ces questions avant de procéder à l'acquisition.

4.3 Analyse du réseau et stratégie

L'analyse du parcours et l'établissement du bilan énergétique constituent l'étape la plus importante pour émettre des recommandations en vue de l'électrification progressive de la flotte de bus, car cela permet de définir toutes les valeurs de base pour les autres étapes de l'étude.

Le besoin en énergie nécessaire sur les parcours définit les paramètres suivants :

- Configuration du système (stratégie de recharge)
- Conception du véhicule (composants de traction, système de stockage d'énergie)
- Conception et localisation de l'infrastructure de recharge
- Alimentation en énergie, notamment au dépôt de bus
- Le cas échéant, véhicules supplémentaires et capacités de garage nécessaires
- Frais d'investissement et d'exploitation

L'analyse des données de parcours transmises par le mandant est effectuée à cette fin. Généralement, il s'avère que les parcours peuvent être attribués et catégorisés selon des critères précis. Ainsi, dans

de nombreux cas, il est possible de choisir et d'analyser des parcours représentatifs afin d'obtenir une synthèse cohérente de l'ensemble des parcours. Au final, il ne s'agit pas de définir un système optimal pour chacun des parcours mais de trouver, dans le cas idéal, un consensus par rapport à une configuration de système uniforme qui couvre tous les cas de figure possibles en exploitation régulière (ainsi que, dans une certaine mesure, les cas de pannes/cas particuliers).

Le regroupement et l'évaluation dynamique des résultats doit autoriser une approche itérative permettant d'établir une configuration de système réalisable pour tous les parcours examinés. Dans la mesure où cela s'avère nécessaire et opportun pour améliorer la faisabilité, des variantes technologiques (par ex. différentes tailles de dispositifs de stockage et puissances de recharge) sont recommandées, ainsi que des indications pour optimiser la planification des parcours.

4.4 Conception de l'infrastructure

Les résultats de l'analyse du réseau exercent une influence considérable sur la conception de l'infrastructure de recharge. Les systèmes de biberonnage nécessitent une infrastructure de recharge sur le réseau de l'itinéraire ainsi qu'au dépôt de bus, tandis que pour les systèmes de recharge complète, l'infrastructure de recharge doit être exclusivement installée et dimensionnée en conséquence au dépôt de bus. La conception englobe dans un premier temps la puissance de raccordement au réseau électrique. L'alimentation électrique de base de l'infrastructure de recharge ainsi que cette dernière en tant que telle doivent être conçues avec des postes de conversion et de transformation à partir du raccordement au réseau. Le garage de véhicules avec les points de recharge fait également partie de la conception.

Conception du raccordement au réseau du dépôt de bus

Les bus sont rechargés après leur arrivée au dépôt. Dans l'exemple de RBS et BSU, tous les scénarios de recharge partent du principe que les bus électriques rentrent au dépôt une fois qu'ils ont terminé leur service sur la ligne afin d'être nettoyés, lavés puis garés. En moyenne, il faut compter 30 minutes entre l'arrivée au dépôt et le stationnement du bus, à savoir la première possibilité pour une recharge.

Avant la sortie du dépôt de bus, il faut préconditionner l'habitacle du véhicule et, de temps à autre, équilibrer la batterie en branchant une alimentation électrique externe. Entre la fin du processus de recharge en tant que tel et la sortie du dépôt, il faut donc à nouveau compter un certain temps qui ne peut pas être utilisé pour la recharge. Le pré-conditionnement et l'équilibrage requièrent environ 30 minutes.

Ainsi on déduit une heure de tampon du total de la durée de séjour au dépôt (durée de séjour = heure d'arrivée moins heure de sortie). Le temps restant que le bus électrique passe au dépôt peut être utilisé pour la recharge.

Les durées de séjour et donc de recharge résultent directement des données de parcours. Après son arrivée, le bus est rechargé complètement à l'aide d'une puissance définie puis réattribué au même parcours. Pour les systèmes de recharge complète, le besoin en énergie est calculé en multipliant les données de consommation supposées par le parcours indiqué. Pour évaluer le besoin en énergie, on ne se base pas sur la capacité maximale de la batterie mais uniquement sur ce qui est nécessaire pour effectuer le parcours. Si les besoins en énergie dépassent la capacité de la batterie, il faut plusieurs bus en exploitation réelle (ou des bus équipés de prolongateurs d'autonomie) mais cela n'influencerait que faiblement l'évaluation du besoin en énergie du dépôt de bus. Pour les systèmes de biberonnage, ce n'est pas la prestation quotidienne parcourue qui est déterminante, mais le trajet parcouru depuis la dernière recharge intermédiaire.

La simulation des processus de recharge se fait à l'aide des scénarios suivants :

- Recharge échelonnée avec puissance fixe : la recharge par bus commence immédiatement après l'arrivée au dépôt, sans compter le temps de garage, avec une puissance déterminée, et se termine une fois que la capacité maximale de la batterie est atteinte. La puissance peut être librement choisie. Pour simuler le besoin en énergie, des calculs sont effectués avec une puissance de recharge de 50 kW, de 100 kW et de 150 kW par bus.
- Recharge uniforme pendant le temps de stationnement : la recharge par bus s'effectue à une puissance uniforme qui est nécessaire en moyenne sur l'ensemble du temps de recharge disponible.

Les calculs effectués sur les exemples des deux compagnies de bus RBS et BSU démontrent qu'il faut répartir uniformément la recharge sur le temps de stationnement pour pouvoir recharger tous les véhicules dans ce laps de temps tout en minimisant les pics de consommation. Compte tenu des pertes d'environ 10 % dans la chaîne de l'alimentation en énergie (en partant du raccordement au réseau de moyenne tension jusqu'à la sortie de l'appareil de recharge au niveau de la prise), la puissance de raccordement requise pour une électrification complète s'élève aussi bien chez BSU que chez RBS à 1,5 MW.

Conception des installations de moyenne tension dans le dépôt de bus

En termes de protection incendies, il faut planifier l'installation de moyenne tension (installation de distribution, transformateurs, électrotechnique) dans des espaces séparés du reste du dépôt de bus. Dans le domaine de la moyenne tension, on peut dans un premier temps faire la différence entre un poste de transfert nécessaire et un ou plusieurs postes de transformation.

Un poste de **transfert** sert dans un premier temps de poste de raccordement au réseau d'alimentation. Étant donné que le raccordement se fait via le réseau de moyenne tension, une installation de moyenne tension constitue l'élément principal du poste de transfert. L'installation de distribution doit être admise, standardisée et assemblée en usine. La conception de l'installation de distribution doit intégrer des paramètres comme la redondance et la rentabilité. L'installation doit être en mesure d'assurer une recharge fiable des batteries de bus. En fonction de la configuration souhaitée, le poste de transfert requiert une surface de 14 à 86 m². Dans la mesure du possible, le poste de transfert devrait être installé à proximité de la rue afin de faciliter le raccordement au réseau de moyenne tension et l'accès de l'exploitant du réseau.

En cas de séparation spatiale du poste de transfert et des postes de transformation, il faut distribuer la puissance dans le dépôt de bus à l'aide d'un réseau à moyenne tension. Il s'agit d'acheminer le niveau de tension maximum au plus près du point de recharge afin de minimiser la perte de puissance. Ce réseau peut être élaboré avec une ou plusieurs lignes de dérivation ou un ou plusieurs anneaux. Il est à noter qu'une structure en anneau offre de nets avantages par rapport à des lignes de dérivation en matière de redondance. En fonction des emplacements du poste de transfert et des postes de transformation, il s'agit de franchir des distances pouvant aller jusqu'à 200 m.

Un **anneau à moyenne tension** occupe deux champs dans l'installation de distribution du poste de transfert afin que l'anneau puisse être alimenté par deux côtés. Les transformateurs nécessaires pour alimenter les appareils de recharge en aval sont raccordés via des sous-stations. Celles-ci contiennent une installation de distribution permettant de fermer l'anneau ainsi qu'une sortie pour le transformateur. Le transformateur et l'installation de distribution correspondante constituent un poste de transformation. Un anneau peut comprendre plusieurs postes de transformation. Il peut être exploité en tant que « *boucle ouverte* » ou « *boucle fermée* ».

En mode « ouvert », la boucle est ouverte d'un côté à un poste de transformation, afin que des postes de transformation puissent être alimentés respectivement à partir d'un champ de sortie du poste de transfert. La protection est assurée par les panneaux d'interrupteurs dans le poste de transfert et peut donc être qualifiée de relativement simple. En cas d'erreur, l'appareil de protection correspondant du poste de transfert se déclenche et déconnecte non seulement la section défectueuse mais également la section qui fonctionne correctement jusqu'à l'endroit où l'anneau est ouvert. L'indicateur de court-circuit permet de localiser la section défectueuse et de la mettre hors circuit par la suite. La ligne en anneau est alors fermée à l'endroit ouvert précédemment afin que tous les transformateurs fonctionnant correctement puissent continuer à être exploités. Les opérations de couplage diminuent la disponibilité de l'installation.

Afin d'améliorer la disponibilité, il est possible d'exploiter l'anneau en mode « fermé », ce qui augmente cependant les coûts. Pour cela, chaque poste de transformation doit être doté d'appareils de protection alignés sur les autres appareils de protection. Il est ainsi possible d'obtenir une sélectivité permettant de continuer à exploiter les postes de transformation fonctionnant correctement. Pour cette option, il faut utiliser des disjoncteurs dans les installations de distribution qui peuvent être allumés ou éteints à distance.

Un **poste de transformation** est constitué d'un bâtiment fixe qui comprend un transformateur de moyenne tension, une installation de distribution de moyenne tension ainsi qu'une distribution de basse tension. Le transformateur convertit la moyenne tension ($U_N = 16 \text{ kV}$) en basse tension ($U_N = 400 \text{ V}$, ou

en une tension adaptée aux appareils de recharge). L'installation de distribution de moyenne tension permet de boucler le transformateur dans l'anneau à moyenne tension. La distribution de basse tension achemine la puissance vers les appareils de recharge.

Un poste de transformation compact nécessite une surface de 5 à 8 m² sans compter l'accès.

Afin d'atteindre les meilleurs rendements avec de faibles besoins en refroidissement et une longue durée de vie malgré un taux d'utilisation complet de la technique de recharge, les transformateurs ne devraient pas fonctionner à pleine puissance mais au maximum à 80 % de leur puissance nominale.

Une variable importante dans la conception de l'alimentation électrique est le choix de la puissance des transformateurs. Les grands transformateurs coûtent moins cher et prennent moins de place que plusieurs petits. Bien que les défaillances d'un transformateur soient extrêmement rares, celles-ci affectent cependant plus d'appareils de recharge. Si l'on utilise une tension standard 400 V_{3CA}, il est intéressant d'utiliser les transformateurs du réseau public qui disposent de puissances allant de 630 à 1600 et parfois même jusqu'à 2500 kVA.

Conception de la technique de recharge dans le dépôt de bus

Indépendamment de la conception de recharge adoptée (recharge complète ou biberonnage), il faut partir du fait que chaque bus électrique a besoin, durant la pause d'exploitation nocturne, d'un dispositif de recharge conventionnel sur son installation de garage. Si chaque place de stationnement de bus électrique ne bénéficiait pas d'une possibilité de recharge, cela augmenterait les besoins en garage et toutes les places de recharge devraient être accessibles indépendamment les unes des autres. Les puissances de charge habituelles pour une recharge en dépôt se situent entre 50 à 150 kW ; des puissances plus basses nécessitent des temps d'immobilisation trop longs pour le présent cas de figure, des puissances plus élevées affectent trop fortement la batterie et les points de contact.

En plus de la puissance de charge, la configuration technique des bornes de recharge constitue également un facteur important pour les coûts. Différentes options peuvent être envisagées, qui se diffèrent en termes de complexité, de coûts et de flexibilité. Les différentes possibilités de composition de l'infrastructure de recharge peuvent être différencierées selon différents aspects.

Borne de recharge sur l'itinéraire

En raison des caractéristiques du biberonnage, il faut disposer d'une puissance de charge aussi élevée que possible durant le bref temps de rebroussement afin de transmettre des quantités d'énergie suffisamment élevées. La puissance s'élève à environ 300 à 450 kW. Pour un rendement de 90 %, cela nécessite donc une puissance de raccordement de 390 à 500 kW. Il faut s'assurer de disposer de cette puissance de raccordement au terminus pour pouvoir bénéficier d'une recharge fiable. Si cette puissance de raccordement ne peut pas être garantie sur le lieu concerné, il faut installer un dispositif stationnaire de stockage d'énergie pouvant fournir la puissance supplémentaire en cas de besoin.

À titre d'exemple : un point de recharge rapide d'une puissance de sortie de 350 kW et un point de recharge plus lent nécessitent environ 14 m² d'espace pour l'infrastructure de recharge (transformateur et appareil de recharge).

4.5 Concept opérationnel

Le concept opérationnel englobe la conception de l'architecture du système informatique prévu pour le pilotage et le contrôle intelligent de tous les processus concernant l'exploitation des bus dans le dépôt pendant les pauses d'exploitation ainsi que pendant les temps de service à l'extérieur du dépôt. Un système de gestion de la recharge des bus électriques doit constituer le cœur du système informatique dont les fonctions sont dédiées spécifiquement aux bus électriques.

Exigences en termes d'acquisition et d'exploitation

En plus des auxiliaires électroniques utilisés actuellement tels que les systèmes de télésurveillance et d'acquisition de données ou les systèmes de planification de la conduite et des parcours, l'introduction

de bus électriques requiert d'autres systèmes pour optimiser les processus qui doivent être intégrés dans la cartographie des systèmes prévue.

Lors de l'intégration de systèmes spécifiques aux bus électriques il faut, dans la mesure du possible, choisir des logiciels, composants et interfaces standardisées ou standardisables et ne pas créer de solutions isolées. Cela permet de maintenir les frais de développement et d'entretien à un minimum ; l'exploitation peut mieux profiter des évolutions futures et il est possible de garantir une plus grande compatibilité avec d'autres systèmes, disponibles actuellement ou à l'avenir sur le marché.

Il est conseillé de ne pas définir, acquérir et configurer la cartographie des systèmes informatiques comme un système global mais individuellement. Il y a plusieurs raisons à cela :

- L'ensemble des exigences à fixer ne peut pas être assuré par un seul système standard et un tel système global n'existe pas sur le marché. En contrepartie, il existe des prestataires spécialisés et expérimentés pour les systèmes individuels. Ainsi chaque système peut optimiser son domaine et transmettre cette optimisation.
- Grâce à la modularité, chaque système peut réagir indépendamment aux changements ou être adapté en conséquence. Les informations traitées gardent la même structure et livrent des résultats correspondants.
- En fonction de la complexité souhaitée ou nécessaire, il faut ajouter ou enlever différents systèmes.
- Séparer les systèmes et prévoir une exploitation isolée ou manuelle augmente la sécurité de l'exploitation. Si un système partiel tombe en panne, une exploitation limitée reste possible.
- La répartition permet d'acquérir et de remplacer des sous-systèmes sur plusieurs périodes, d'introduire les systèmes progressivement, de réduire la complexité et à partir des expériences, de tirer des conclusions utiles afin de mieux gérer la gestion de la recharge à l'avenir.

Cela représente toutefois un investissement plus important lors de la configuration du système :

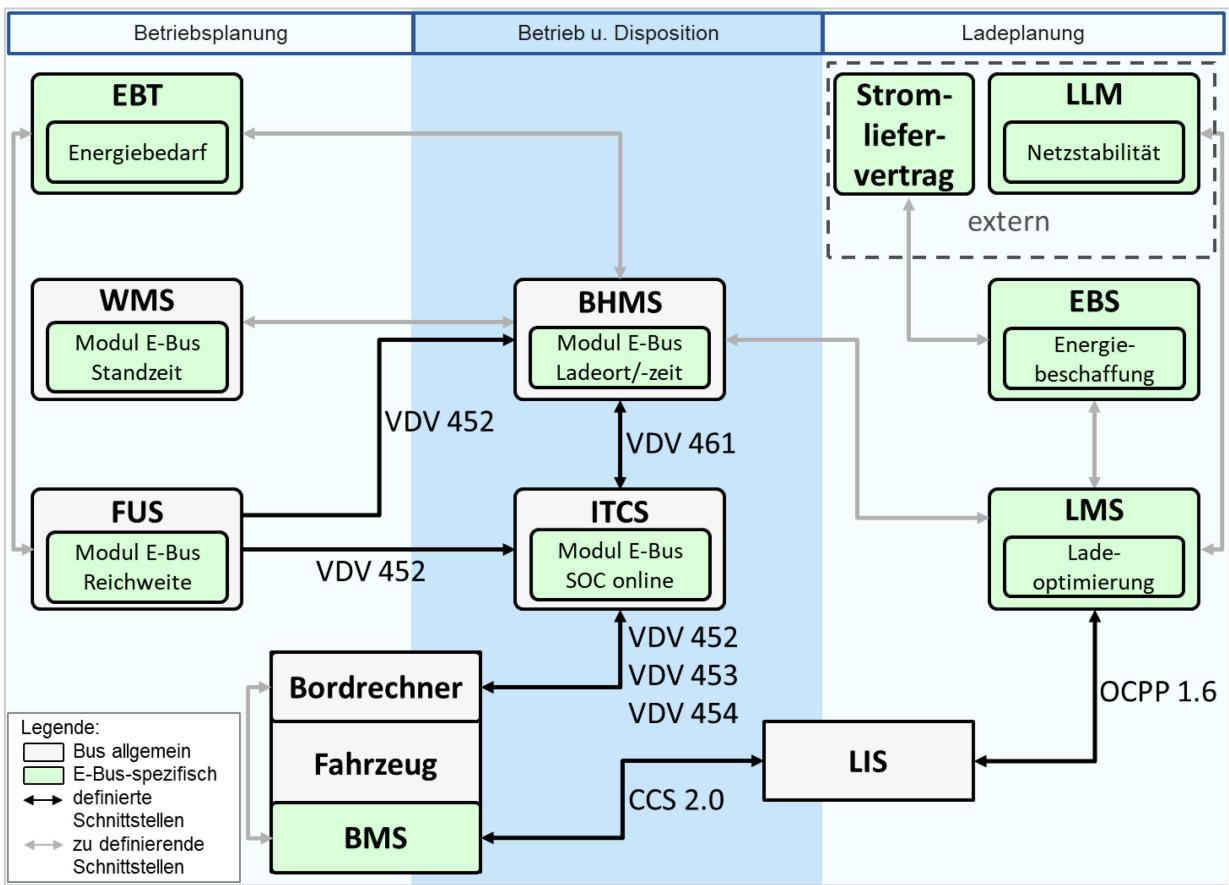
- L'établissement d'interfaces pour l'échange de données représente un investissement important. Cet échange est cependant obligatoire pour les systèmes afin d'assurer une communication impeccable entre eux. Pour le fournisseur du système, l'investissement d'adaptation spécifique au client se limite à l'harmonisation des systèmes entre eux et à l'intégration des données locales spécifiques (par ex. technique de recharge et bus utilisés).
- La possibilité d'une rétroaction de l'optimisation constitue un investissement élevé. La rétroaction servirait au calcul par itération des données entrantes et sortantes à remettre aux interfaces système.

La répartition, présentement décrite, des différentes composantes fonctionnelles et ce faisant de l'agencement précis des solutions logicielles ne doit pas être considérée comme une spécification rigide. La priorité consiste à établir une solution adaptée à l'ensemble de la compagnie de bus.

En principe, tous les systèmes doivent pouvoir être exploités indépendamment les uns des autres et si nécessaire être alimentés manuellement en données. Lors de la phase d'introduction, cela vaut particulièrement pour la gestion de la recharge si, lors de son installation, les autres systèmes informatiques ne sont pas encore configurés pour l'exploitation de bus électriques. Cela vaut également en cas d'erreur ou de panne d'un ou plusieurs systèmes qui empêcherait la fiabilité du fonctionnement automatique d'autres systèmes.

En outre, chaque système doit permettre une exploitation parallèle de bus électriques et diesel pendant la période de transition jusqu'à l'exploitation entièrement électrique du trafic de bus chez RBS et BSU.

L'illustration suivante montre un aménagement envisageable de l'ensemble de la cartographie des systèmes informatiques, qui, mis à part la recharge des bus électriques, planifie, pilote et contrôle également les autres processus du dépôt de bus et de l'utilisation des véhicules.



La cartographie des systèmes comprend les modules suivants :

- OCE : outil de calcul de l'énergie
- SGA : système de gestion de l'atelier
- SCR : système de conduite et de planification des parcours
- SGD : système de gestion du dépôt
- ITCS : système de télésurveillance et d'acquisition de données de l'exploitation
- SGB : système de gestion des batteries
- IR : infrastructure de recharge
- SGR : système de gestion de recharge
- SAE : système d'alimentation en énergie
- GLPC : gestion locale des pics de consommation

En ce qui concerne l'exploitation avec des bus électriques, le système de gestion de recharge, le système d'alimentation en énergie et le système de gestion du dépôt sont considérés comme des systèmes centraux. Ces modules, y compris les interfaces, sont explicités en détail dans le guide [1].

4.6 Soumission

Pour l'introduction des bus électriques, il est important de respecter toutes les normes pertinentes pour les systèmes (lois, directives, ordonnances) et en particulier celles qui influent sur l'exploitation et la sécurité de l'exploitation desdits bus. Les principaux règlements et documents techniques et d'exploitation de l'Union des entreprises de transport allemandes (*Verband Deutscher Verkehrsunternehmen – VDV*) ainsi que les documents des organisations professionnelles concernant les bus électriques ont été utilisés en complément. Il convient de tenir compte des documents suivants :

- *VDV-Mitteilung Nr. 2319 : Bewertung von E-Bus-Konzepten aus der Sicht von Planung und Betrieb* (en allemand uniquement, évaluation de conceptions de bus électriques du point de vue de la planification et de l'exploitation)
- *VDV Schrift 260 : EBUS-Infrastrukturen/Ladestellen* (en allemand uniquement, infrastructures / bornes de recharge pour bus électriques)
- *VDV-Schrift 230/1 : Rahmenempfehlung für elektrisch betriebene Stadt-Niederflur-Liniенbusse (E-Bus)* (en allemand uniquement, recommandation-cadre pour bus de ligne électriques à plancher surbaissé – bus électrique)
- *VDV-Schrift 825 (12/05) : Auswirkungen alternativer Technologien im Liniibus auf Betriebshöfe und Werkstätten* (en allemand uniquement, effets des technologies alternatives pour bus de ligne sur les dépôts et ateliers)
- *VDV-Mitteilung Nr. 8002 : Hinweise zur Einführung von Hybridbussen aus Sicht der Instanthalaltung* (en allemand uniquement, indications pour l'introduction de bus hybrides du point de vue de la maintenance)
- *BGI/GUV-I 8686 : Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen* (en allemand uniquement, qualifications nécessaires pour les travaux sur des véhicules dotés de systèmes à haute tension)

Pour les futures mises au concours de bus électriques il est possible de se baser sur un modèle de cahier des charges [1] qui a été divisé comme suit :

- Bases
- Données techniques (dimensions, masses)
- Châssis
 - Direction
 - Roues, axes
- Freins
- Carrosserie
- Portes
- Équipement intérieur
- Poste de travail du conducteur
- Installation d'alimentation
- Gestion de la traction et de l'énergie
 - Air conditionné, chauffage
- Technique de haute tension
 - Dispositif de stockage d'énergie
 - Interface de recharge
- Équipements d'information
- Interfaces de données
- Conditions de garantie
- Estimation des dépenses de réparation

4.7 Évaluation économique

La considération des coûts est effectuée sur la base de la méthode de la valeur actualisée nette. Sont considérés l'ensemble des frais d'investissement (véhicule, composante de la traction, dispositif de stockage d'énergie, infrastructure de recharge y compris les frais de construction, établissement du raccordement au réseau local d'alimentation en énergie) et le renouvellement nécessaire des dispositifs de stockage de l'énergie de traction à intervalles réguliers en tenant compte des frais de rémunération de capital. En outre, la considération des coûts englobe l'ensemble des frais d'exploitation (frais de carburant et d'énergie, AdBlue, le cas échéant mazout, l'entretien et la maintenance, la réserve de véhicules étalée dans le temps). La justification des frais d'exploitation se base sur les prestations kilométriques. Pour des indications concernant le montant des frais d'investissement des principaux groupes de frais, cf. guide [1].

5 Discussion

Les explications et recommandations du présent rapport final et du guide [1] se basent sur l'état actuel de la technique. Vu que le changement technologique en matière d'électromobilité continuera, a priori, à évoluer très rapidement dans les années à venir, ces déclarations techniques détaillées devront être remises en question ultérieurement. La systématique du procédé de passage aux bus électriques devrait cependant rester stable.

Cette étude met l'accent sur les batteries de bus, d'autres énergies alternatives ont été mises en parenthèses. Pour les entreprises de TP qui, en plus de flottes de bus diesel, exploitent également des réseaux de tramway ou de trolleybus, ces recommandations ne sont que moyennement valables car cette étude a exclu des possibilités techniques supplémentaires telles que les systèmes « *in motion charging* » (recharge en marche à partir de la ligne de contact).

Les contributions de tiers n'ont pas été considérées dans le calcul des frais, vu qu'elles ne sont pas encore institutionnalisées dans toute la Suisse. Des montants de contributions pourraient cependant aider à baisser les investissements de départ élevés pour les systèmes de bus électriques. Pour l'instant, les coûts de l'électromobilité sont encore nettement plus élevés que ceux des bus diesel. Cela s'explique également par le fait que l'apparition des bus électriques sur le marché est relativement récente. Dans les années à venir, la probabilité d'une chute des prix des systèmes de bus électriques est cependant élevée. Au niveau politique, on décèle par ailleurs des tendances à créer des incitations d'encouragement de l'électromobilité qui pourraient donner un coup de pouce supplémentaire à cette technologie. Parallèlement, le prix du diesel devrait plutôt augmenter en raison de la baisse des subventions actuelles et de l'extraction de plus en plus complexe de sa ressource de base qu'est le pétrole.

6 Conclusions et recommandations

L'électrification d'une flotte de bus diesel impose des exigences élevées aux entreprises de transport concernées, aussi bien du point de vue technique en matière de conception et d'acquisition dans un premier temps qu'au niveau de l'exploitation une fois le passage aux bus électriques effectué. Contrairement à une exploitation avec des bus conventionnels, l'exploitation et l'entretien d'infrastructures de recharge ainsi que la gestion de la technique de haute tension et de ces dangers constitueront de nouvelles thématiques importantes. Le présent guide [1] fournit une bonne base aux entreprises de transports pour approfondir l'étude de cette nouvelle technologie et élaborer les bases techniques au niveau de leur exploitation.

Afin d'assurer une compatibilité de tous les systèmes d'une compagnie de bus, l'électromobilité ne doit pas être abordée sous l'angle d'un seul véhicule ou d'une seule ligne mais nécessite généralement une vue d'ensemble englobant les véhicules, l'infrastructure de recharge et les systèmes informatiques (y c. les interfaces) pour l'ensemble du réseau de lignes. Dans certaines circonstances, il faut également impliquer des entreprises de transport voisines afin de pouvoir partager certaines bornes de recharge (sur l'itinéraire). Vu que ces études demandent un investissement important, il faut que ces travaux commencent en temps utile.

La formation du personnel roulant et du service des réparations doit également être planifiée à l'avance. L'introduction de bus électriques entraîne des conséquences importantes pour le personnel de l'atelier notamment, et celle d'une technologie à haute tension dans les ateliers des modifications significatives du profil professionnel. À l'avenir, cela représente davantage de travaux électriques pour les collaborateurs de l'atelier et moins de travaux de révision mécanique. Il convient d'accorder à temps une grande attention à cet aspect.

La fixation et le respect des normes sont importants. En outre, la limitation à un minimum de systèmes partiels simplifie ultérieurement l'exploitation et l'entretien. Lors de l'acquisition de véhicules et de systèmes de recharge, il faut par ailleurs veiller à convenir avec les fournisseurs une livraison dans le cadre d'un contrat d'entreprise, qui règle également l'entretien des véhicules et de l'infrastructure de recharge sur toute la durée d'intervention.

La question de la réussite financière du passage à une exploitation avec des bus électriques reste en suspens. Les calculs effectués à partir des prix actuels du marché montrent que l'acquisition et l'exploitation de bus électriques requièrent des moyens financiers supplémentaires par rapport à une flotte de bus fonctionnant entièrement au diesel. Contrairement à l'Allemagne, la Suisse n'offre pas encore de

mesures d'encouragement pour les bus électriques, ce qui induirait une réduction substantielle des prix et favoriserait une percée de l'électromobilité. La rétrocession de l'impôt sur les huiles minérales utilisées comme carburant, qui s'élève à 58 centimes par litre, est un facteur d'influence significatif. Si un jour ces mesures d'encouragement indirectes devaient être supprimées pour les véhicules diesel et si de nouvelles taxes incitatives sont introduites sur des vecteurs d'énergie non renouvelables, l'utilisation de bus électriques deviendrait également intéressante financièrement. D'ici là, il appartient aux commanditaires de prestations de TP de fournir des incitations équilibrées.

* * *

Liste des abréviations et des symboles

| | |
|------|--|
| BGI | <i>Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit</i> (informations/prescriptions des caisses mutuelles allemandes en matière de sécurité et de santé au travail) |
| BSU | <i>Busbetrieb Solothurn und Umgebung AG</i> (compagnie de bus de la région soleuroise) |
| CA | Courant alternatif (<i>alternating current - AC</i>) |
| CC | Courant continu (<i>direct current - DC</i>) |
| CHF | Francs suisses |
| GLPC | Gestion locale des pics de consommation |
| GUV | <i>Gemeindeunfallversicherungsverbände</i> (associations allemandes d'assurance contre les accidents de la commune) |
| IEC | Commission électrotechnique internationale |
| IR | Infrastructure de recharge |
| ITCS | Système de télésurveillance et d'acquisition de données de l'exploitation |
| kV | Kilovolt |
| kVA | Kilovoltampère |
| kW | Kilowatt |
| LTO | Accumulateur à base de lithium-titanate |
| MW | Mégawatt |
| OCE | Outil de calcul de l'énergie |
| OFT | Office fédéral des transports |
| RBS | <i>Regionalverkehr Bern-Solothurn AG</i> (<i>entreprise ferroviaire régionale entre Berne et Soleure</i>) |
| SAE | Système d'alimentation en énergie |
| SCR | Système de conduite et de planification des parcours |
| SGA | Système de gestion de l'atelier |
| SGB | Système de gestion des batteries |
| SGD | Système de gestion du dépôt |
| SGR | Système de gestion de recharge |
| SORT | <i>Standardized on-road test cycles</i> (cycle d'essai normalisé de l'UITP portant sur la consommation énergétique des bus) |
| TP | Transports publics |
| V | Volt |
| VDV | <i>Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V.</i> (Union des entreprises de transport allemandes) |

Bibliographie

- [1] M. Otte, J. Schwarzenberger, M. Quassowski, C. Schulz, R. Zürcher: *Leitfaden Flottenelektrifizierung für Busbetriebe*, 2019.