

# Catalogue de Mesures visant à Améliorer la Circularité des Batteries Utilisées dans les Bus Électriques



Federal Ministry  
for Economic Cooperation  
and Development

C40  
CITIES

**giz**

Deutsche Gesellschaft  
für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

**icct**  
THE INTERNATIONAL COUNCIL  
ON CLEAN TRANSPORTATION

**ICLEI**  
Local Governments  
for Sustainability



Institute for Transportation  
& Development Policy



ADVANCING  
PUBLIC  
TRANSPORT



WORLD  
RESOURCES  
INSTITUTE

## REMERCIEMENTS

### AUTEURS

Andreas Manhart	Oeko-Institut e.V.
Frederick Adjei	Oeko-Institut e.V.
Viviana Hernández López	Oeko-Institut e.V.
Yifaat Baron	Oeko-Institut e.V.

### RÉVISEURS

Alexander Batteiger	Go Circular Project GIZ
Rohan Shailesh Modi	TUMI E-Bus Mission GIZ

### CRÉDITS PHOTOS

Couverture : WRI Brésil

Illustration 5 : Oeko-Institut e.V.

### SUPPORT

Ce rapport a été élaboré dans le cadre de l'initiative de la TUMI E-Bus Mission, mise en œuvre par la GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH), au nom du Ministère fédéral allemand de la coopération économique et du développement (BMZ). La TUMI E-Bus Mission est une coalition internationale formée par le Conseil international pour un transport propre (ICCT), les Gouvernements locaux pour la durabilité (ICLEI), l'Institut pour les politiques de Transport et de Développement (ITDP), l'Association internationale des transports publics (UITP), le World Resources Institute/Institut des ressources mondiales (WRI) et le C40 Cities, qui vise à accélérer l'adoption de bus électriques d'ici 2025 comme alternative de mobilité urbaine durable en fournissant une assistance technique à 20 villes dans le monde par le biais de groupes locaux et des régionaux et de plans d'assistance technique spécialisés.

Les auteurs tiennent à remercier les organisations suivantes pour leurs contributions : Altero S.A.S, Berliner Verkehrsbetriebe (BVG), Blilious Group, Chilambo General Trade Company, ENEL Colombia S.A., Grupo Retorna Colombia, Innova Ambiental S.A.S E.S.P, Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB), Optibus, Orinoco e-Scrap S.A.S, Recobatt S.A.S, Robert Bosch GmbH, Twaice, Volytica diagnostics.

Remerciements particuliers à tous les acheteurs, décideurs politiques du monde entier qui ont contribué en partageant leurs expériences dans la transition vers une mobilité durable.

Les constatations, interprétations et conclusions énoncées dans ce rapport relèvent de la seule responsabilité des auteurs et ne reflètent ni ne représentent donc l'opinion des organisations qui font partie de l'initiative de mission TUMI E-Bus, ou de toute autre entité publique ou privée.

Copyright © avril 2023 Transformative Urban Mobility Initiative (TUMI)

# Résumé analytique

La croissance démographique et la croissance économique présentent des défis d'urbanisation pour de nombreuses économies en transition. Le secteur des transports est actuellement le deuxième plus grand émetteur de gaz à effet de serre (GES) au monde, le transport routier étant actuellement responsable d'au moins 90 % des émissions du secteur (Ayeter et autres 2020). Les modes de transport à moteur à combustion interne constituent la norme actuelle, mais des efforts intenses de décarbonisation sont propulsés par les véhicules électriques à batterie. Toutefois, ceux-ci ne soulagent pas les défis de la congestion sur les routes publiques. L'utilisation des transports publics utilisant des bus électriques à batterie peut simultanément atténuer ces défis rencontrés à l'échelle mondiale et plus prononcés dans les économies en transition. Alors que des efforts sont déployés pour accroître la part des véhicules électriques dans les transports publics, il est primordial de prendre en compte la circularité et la gestion de la fin de vie de ces technologies lors des phases de planification et d'approvisionnement.

Oeko-Institut e.V. a été mandaté par la GIZ (Agence allemande pour la coopération internationale GmbH) pour le développement d'un catalogue de mesures pour l'inclusion des principes de l'économie circulaire dans la planification et l'approvisionnement des E-Bus/bus électriques. Cette tâche s'inscrit dans le cadre de l'Initiative de la mobilité urbaine évolutive (TUMI) et du projet mondial "TUMIVolt - Mobilité électrique à partir d'énergies renouvelables" pour le compte du ministère fédéral allemand de la Coopération économique et du Développement (BMZ), axé sur la mobilité électrique durable. L'objectif global du projet est de soutenir les gouvernements municipaux et nationaux dans la mise en œuvre durable de solutions de-mobilité électrique.

Le catalogue de mesures est destiné à servir de guide pratique pour les décideurs politiques et les spécialistes des marchés publics dans les économies en transition afin de répondre aux besoins de formulation de politiques, d'appels d'offres relatifs aux marchés publics, d'entretien et d'élimination en toute sécurité des composants non réutilisables/recyclables des bus électriques. Les mesures décrites et discutées sont les suivantes :

- Mesure n°1 : Concentrations réduites de substances nocives
- Mesure n°2 : Dimensionnement approprié des bus et des batteries
- Mesure n°3 : Durabilité et garanties des batteries
- Mesure n°4 : Étiquetage des batteries
- Mesure n°5 : Tests en situation réelle
- Mesure n°6 : Interopérabilité des infrastructures de recharge
- Mesure n°7 : Accès aux données sur le fonctionnement des batteries
- Mesure n°8 : Surveillance et maintenance approfondies des batteries
- Mesure n°9 : Accords de mise hors service basés sur REP
- Mesure n°10 : Encouragement à la réutilisation des batteries
- Mesure n°11 : Gestion rationnelle de la fin de vie de la batterie

Bien que le changement et l'évolution du paysage technologique des bus électriques soient reconnus, une base de spécifications, de clauses d'appel d'offres et de stratégies est fournie pour garantir que les planificateurs et les acheteurs sont conscients des facteurs essentiels à prendre en compte lors des phases de planification, d'approvisionnement, d'exploitation et d'élimination de leur transition vers un transport durable.

# Table des matières

<b>1. Contexte et présentation du projet.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Le concept d'économie circulaire et les bus électriques.....</b>	<b>3</b>
2.1    Circularité et hiérarchie des déchets.....	3
2.2    Le concept de responsabilité élargie du producteur.....	4
2.3    Considérations fondamentales sur les batteries des bus électriques ....	5
2.3.1    Types et conceptions de batteries.....	5
2.3.1    Modèles de charge de batterie.....	6
2.3.2    Défis de fin de vie concernant les batteries de bus électriques.....	7
2.3.3    Économie de la gestion des batteries en fin de vie.....	8
2.4    Gestion générique de fin de vie des batteries d'e-bus.....	9
2.5    Défis liés à la fin de vie de certains autres composants de bus électriques .....	10
2.5.1    Pneus .....	10
2.5.2    Câbles.....	11
2.5.3    Composants électroniques.....	11
2.5.4    Matières plastiques .....	12
2.5.5    Fluides frigorigènes.....	12
<b>3 Mesures pour améliorer la circularité des batteries de bus électriques.13</b>	<b>13</b>
3.1.    Mesure n°1 : Concentrations réduites de substances nocives ...	13
3.2.    Mesure n°2 : Dimensionnement approprié des bus et des batteries.....	15
3.3.    Mesure n°3 : Durabilité et garanties des batteries.....	16
3.4.    Mesure n°4 : Étiquetage des batteries .....	18
3.5.    Mesure n°5 : Tests en situation réelle.....	19
3.6.    Mesure n°6 : Interopérabilité des infrastructures de recharge.....	20
3.7.    Mesure n°7 : Accès aux données de fonctionnement de la batterie .....	22
3.8.    Mesure n°8 : Surveillance et maintenance approfondies des batteries.....	25
3.9.    Mesure n°9 : Accords de mise hors service basés sur REP.....	26
3.10.    Mesure n°10 : Encouragement à la réutilisation des batteries.....	28
3.11.    Mesure n°11 : Gestion rationnelle de la fin de vie de la batterie .....	30
<b>4    Lectures suggérées.....</b>	<b>32</b>
<b>Liste des références.....</b>	<b>33</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 La hiérarchie des déchets en 5 étapes .....	3
Illustration 2 Façons d'intégrer les blocs-batteries dans les conceptions de bus électriques .....	5
Illustration 3 Composition des blocs-batteries de bus électriques (simplifiée).....	6
Illustration 4 Modalité de gestion idéale des batteries de bus électriques .....	10
Illustration 5 Incinération à ciel ouvert – une manière très polluante de traiter les déchets de câbles .....	11

## Liste des tableaux

Tableau 1 Compositions chimiques des batteries lithium-ion couramment utilisées dans les bus électriques.....	6
Tableau 2 Exigences de performances minimales de la CEE-ONU pour les batteries de véhicules électriques.....	17
Tableau 3 Aperçu des normes communes pour la recharge des véhicules électriques .....	21
Tableau 4 Aperçu de publications utiles pour une lecture plus approfondie .....	33

# 1. Contexte et présentation du projet

Des systèmes de transport sains et performants représentent des services publics essentiels et une garantie majeure pour un développement urbain rationnel. Alors que l'utilisation de voitures particulières est encore courante dans les agglomérations urbaines du monde entier, il est de plus en plus évident que ce type de transport motorisé privé a ses limites en raison de l'importance des besoins en espace. Les systèmes de transport public sont beaucoup plus efficaces à cet égard et constituent un outil important pour résoudre les problèmes de congestion. Outre les besoins en espace et les embouteillages, la pollution de l'air par les moteurs à combustion est un problème majeur dans la plupart des zones métropolitaines. Des études scientifiques montrent que la pollution atmosphérique ambiante en milieu urbain est un facteur important de décès liés à la pollution, qui s'élèvent à 6,5 millions par an (Fuller et autres 2022). L'électrification des systèmes de transport urbain est un moyen déterminant d'atténuer ce problème et a été adoptée par les municipalités et les sociétés de transport en commun dans toutes les régions du monde. Elle est largement considérée comme un moyen essentiel pour atteindre l'objectif de développement durable (ODD) n°11 sur les « villes et communautés durables », ainsi que l'ODD n°3 sur « permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous ».

Bien que le recours accru aux autobus électriques présente de multiples avantages, il est également important que les autobus et leurs batteries soient choisis et gérés de la meilleure manière possible afin de garantir que les investissements connexes rapportent le maximum d'avantages aux municipalités, aux sociétés de transport en commun, aux opérateurs ainsi qu'aux utilisateurs et aux sociétés urbaines élargies. Le sujet de la gestion des batteries et de leur fin de vie est également important, car il est de plus en plus évident qu'une mauvaise gestion des véhicules, des déchets électriques et électroniques et des batteries en fin de vie peut avoir un effet préjudiciable majeur sur la santé humaine et compromet déjà en partie les gains en matière de santé, comme ceux provenant d'une amélioration de l'assainissement (Fuller et autres 2022). Les mesures contribuant à une meilleure gestion des produits et des matériaux, pour minimiser l'utilisation des ressources et la production de déchets, et pour prévenir les effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement sont couramment résumées sous le terme d'« économie circulaire ».

Ce catalogue de mesures vise à aider les décideurs en matière d'achat et d'exploitation d'autobus électriques à planifier et à mettre en œuvre les aspects de l'économie circulaire dans ce domaine. Pour ce faire, il présente des aspects liés à la circularité des e-bus et de leurs batteries (chapitre 2) et propose diverses mesures qui peuvent être prises par les municipalités, les centrales d'achat, les sociétés de transport en commun et les opérateurs de bus électriques pour faire progresser l'économie circulaire dans ce domaine. (Chapitre 3).

Le catalogue de mesures est présenté dans un format concis axé sur les principaux concepts et approches sans entrer en profondeur dans les détails technologiques. La portée du catalogue de mesures comporte des aspects de conception et des processus de gestion et de recyclage qui sont actuellement réalisables et établis sur divers marchés pilotes et qui peuvent être mis en œuvre par les sociétés de transport en commun et les gestionnaires de flottes en vertu de conditions-cadres existantes. D'autres stratégies et mesures sont également possibles mais elles ne sont pas couvertes par ce catalogue de mesures. Celles-ci requièrent principalement un changement plus vaste des conditions-cadres, qui est susceptible d'aller au-delà de l'influence des sociétés de transport en commun et des gestionnaires de flotte. Cependant, compte tenu de l'évolution rapide de la technologie des batteries ainsi que de la législation actuellement en cours d'examen par l'UE et d'autres juridictions, il pourrait être avantageux d'inclure les domaines suivants dans les futurs appels d'offres pour des bus électriques :

- Utilisation de batteries à haut contenu recyclé ;
- Utilisation de batteries d'e-bus comme tampon de réseau pendant le stationnement (véhicule à réseau) ;
- Utilisation d'énergie renouvelable pour la recharge des e-bus.

Les mesures décrites peuvent être soit planifiées et mises en œuvre individuellement, soit, si possible, en tant qu'ensemble exhaustif. Dans tous les cas, les conditions-cadres nationales et locales doivent toujours être également prises en compte.

Le contenu de ce catalogue repose sur des études de cas, de la littérature publiée, ainsi que sur des expériences pratiques de diverses sociétés de transport en commun, d'opérateurs d'autobus électriques et d'experts en batteries et en recyclage. Le catalogue de mesures a été élaboré dans le cadre de la mission E-bus TUMI (Transformative Urban Mobility Initiative) financée par le ministère fédéral allemand de la Coopération économique et du Développement et mise en œuvre à travers la Coopération allemande au développement (GIZ GmbH).

## 2. Le concept d'économie circulaire et les bus électriques

### 2.1 Circularité et hiérarchie des déchets

Le concept d'une économie circulaire vise à maintenir la valeur des produits et des matériaux aussi longtemps que possible, à minimiser l'utilisation des ressources et la production de déchets, et à conserver les ressources dans l'économie une fois que les produits ont atteint la fin de leur cycle de vie (adaptation de (Commission européenne 2015)). Ce concept est largement approuvé et de plus en plus évoqué par les décideurs politiques du monde entier. En opposition avec les concepts traditionnels de gestion des déchets qui se focalisent sur la gestion des déchets générés (recyclage, récupération d'énergie, élimination), l'économie circulaire commence par la conception de systèmes et de produits pour anticiper et soutenir une utilisation durable et efficace des produits, pour soutenir la réparation et la réutilisation et faciliter le recyclage dans la phase de fin de vie.

Bien qu'il existe de multiples manières d'illustrer les approches d'économie circulaire, la hiérarchie des déchets en 5 étapes donne des orientations utiles pour la prise de décisions quotidienne (voir Illustration 1) :

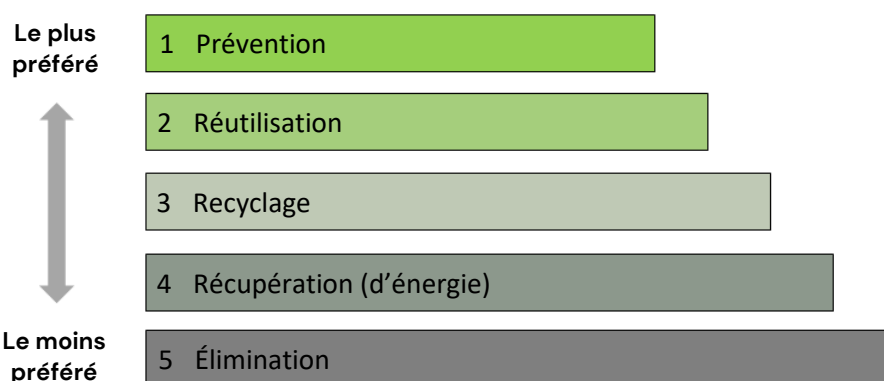


Illustration 1 La hiérarchie des déchets en 5 étapes

Source : Oeko-Institut

Cela indique essentiellement que l'économie circulaire va au-delà de la gestion des déchets et que les efforts visant à prévenir la production de déchets et à permettre la réutilisation doivent être prioritaires sur la gestion traditionnelle des déchets. Nous encourageons à utiliser cette systématique comme concept sous-jacent pour les décisions concernant l'approvisionnement et la gestion des bus électriques. Des mesures appropriées à ce sujet sont présentées au chapitre 3.



## 2.2 Le concept de responsabilité élargie du producteur

Le concept de responsabilité élargie du producteur (REP/EPR) est étroitement lié aux approches d'économie circulaire. Ceci implique que les entreprises qui mettent des produits sur un marché national pour la première fois sont responsables de l'organisation et du financement d'une gestion de fin de vie respectueuse de l'environnement. Si les principes de la REP ont été traduits en législation contraignante pour divers groupes de produits tels que les équipements et emballages électriques et électroniques dans diverses juridictions, ils s'appliquent également aux véhicules : Dans l'Union européenne, par exemple, les producteurs et les importateurs de véhicules sont tenus de respecter l'intégralité (ou une partie importante) des coûts pour s'assurer que les véhicules hors d'usage sont livrés aux installations de traitement agréées, ou pour gérer un programme de reprise gratuit pour les consommateurs (Union européenne 2000). En outre, la directive européenne sur les batteries précise que les batteries de VE (classées comme « batteries industrielles ») doivent être reprises gratuitement par les producteurs pour les acheminer vers des installations de gestion des déchets respectueuses de l'environnement (Union européenne 2006b).

Dans ce contexte, il faut considérer que la valeur à la casse des bus électriques en fin de vie pourrait être fortement influencée par les exigences de transport et de recyclage sûrs des batteries (Slattery et autres 2021). En particulier dans les endroits où il n'y a pas de solutions de guichet unique pour la gestion des batteries en fin de vie (réutilisation/réaffectation/recyclage), ces coûts de transport peuvent être assez élevés et peuvent entraîner une valeur nette des véhicules et des batteries nettement négative<sup>1</sup>. Ceci pourrait peser lourdement sur les municipalités et/ou les sociétés de transport en commun s'ils ne sont pas pris en charge par d'autres acteurs. En conséquence, il est recommandé de définir clairement les responsabilités en matière de gestion de la fin de vie des autobus électriques et des batteries déjà en phase d'approvisionnement et de conclure des accords selon lesquels les fournisseurs de véhicules (producteurs ou importateurs) acceptent cette responsabilité et prennent en charge toutes les tâches et tous les coûts connexes. (Voir section 3.9).

---

<sup>1</sup> Une valeur nette négative indique que les coûts totaux d'une gestion écologiquement rationnelle de la fin de vie sont supérieurs à la valeur résultant de la réutilisation (des composants) et de la récupération des matières premières (voir également la section 2.3.3).

## 2.3 Considérations fondamentales sur les batteries des bus électriques

L'aspect des bus électriques à batterie (BEB) ressemble généralement largement à celui des bus conventionnels avec un châssis en acier, des vitres et des aménagements intérieurs en métal et en plastique (poignées, sièges...). Cependant, la transmission et ses dispositifs auxiliaires diffèrent par :

- Un ou plusieurs blocs-batteries pour véhicules électriques (parfois aussi appelés « batteries de traction ») ;
- Un moteur électrique ;
- Des composants électriques et électroniques, notamment d'autres dispositifs auxiliaires tels que le port de charge et les câbles.

En termes de qualité et de durabilité des produits, les batteries méritent une attention particulière car le contenu énergétique des batteries détermine largement l'autonomie des bus électriques. Les aspects liés à la durabilité, à la maintenance et à la faisabilité de la réutilisation/réaffectation des batteries ont une influence significative sur la durée de vie totale de la batterie et, par conséquent, sur la circularité et la structure des coûts à long terme du déploiement des bus électriques.

Les batteries des BEB sont soit intégrées dans le plancher du véhicule, dans un compartiment à l'arrière du bus, soit montées sur leur toit (voir Illustration 2). La conception sur le toit est la plus courante dans les BEB modernes. Il est à noter que les blocs-batteries représentent près de 40 % des coûts de fabrication des e-bus (Rapport Linker 2021).

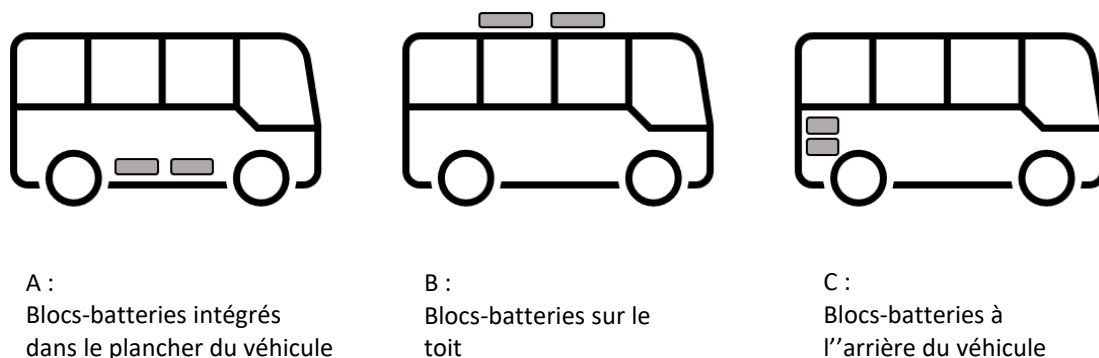


Illustration 2 Façons d'intégrer les blocs-batteries dans les conceptions de bus électriques

Source : Oeko-Institut

### 2.3.1 Types et conceptions de batteries

Les bus électriques sont alimentés par des batteries Li-ion, les formules chimiques NMC et LFP dominant clairement le marché. Alors que les batteries NMC présentent des densités d'énergie plus élevées et permettent un kilométrage plus élevé par poids de batterie (voir Tableau 1), les facteurs de coût favorisent à l'heure actuelle clairement les batteries LFP. Ces avantages de coût sont principalement dus aux matériaux de cathode, qui représentent une part importante du coût de production des cellules de batterie Li-ion (Avicenne energy 2019). Le lithium, le cobalt et le nickel sont de loin les matériaux de batterie les plus chers, avec des

prix sur le marché mondial allant de 8 000 à 80 000 USD/t pour le lithium<sup>2</sup>, de 30 000 à 80 000 USD/t pour le cobalt et de 15 000 – 35 000 USD/t pour le nickel (DERA 2022), ce qui explique pourquoi les batteries LFP sans cobalt et sans nickel sont nettement moins chères.

Chimie de la batterie		Matériaux de cathodes	Densités d'énergie spécifiques (blocs-batteries)
NMC	Oxyde de lithium-nickel-manganèse-cobalt	Li, Ni, Mn, Co	150 – 260 Wh/kg
LFP	Lithium-fer-phosphate	Li, Fe, P	90 – 180 Wh/kg

Tableau 1 Compositions chimiques des batteries lithium-ion couramment utilisées dans les bus électriques  
Source : (Université de la batterie 2021 ; Wunderlich-Pfeiffer 2022 ; electrive.net 2022)

Ces facteurs de coût, combinés aux prix élevés des matières premières et aux récentes améliorations des densités d'énergie LFP, ont conduit à une augmentation rapide de la part de marché mondiale des batteries LFP de 5 % en 2019 à environ 40 % en 2022 dans toutes les applications de batteries Li-ion (Wunderlich-Pfeiffer 2022).

Les BEB sont généralement équipés de batteries dont le contenu énergétique oscille entre 60 et 564 kWh (Gao et autres 2017 ; Miaja et autres 2022), ce qui, selon la formule chimique de la batterie choisie, requiert des blocs-batteries d'un poids total oscillant entre 400 kg et 3 200 kg par bus. Les batteries de bus électriques se composent de divers modules, qui sont à nouveau assemblés à partir de diverses cellules (voir Illustration 3). Chaque batterie (communément appelée "batterie" d'un véhicule) est équipée d'un système de gestion de batterie (BMS). Les blocs-batteries comportent également un système de contact, un boîtier de protection et un système de gestion thermique (avec par exemple des pièces en aluminium ou des systèmes d'eau qui absorbent et éliminent la chaleur générée). Les cellules sont souvent prismatiques, mais peuvent également utiliser des conceptions prismatiques ou cylindriques.

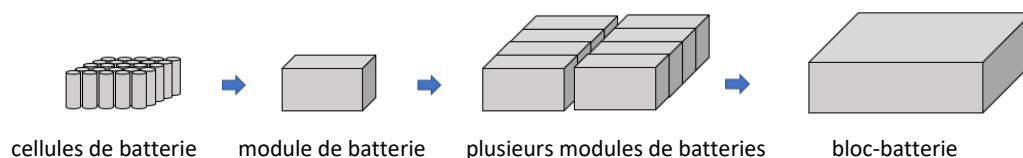


Illustration 3 Composition des blocs-batteries de bus électriques (simplifiée)

Source : Oeko-Institut

### 2.3.1 Modèles de charge de batterie

Il existe deux manières principales de charger les batteries des BEB, lesquelles peuvent également être utilisées en combinaison :

- Le chargement de nuit : Les bus sont connectés à une infrastructure de recharge dans un dépôt de bus pendant l'inactivité (généralement tard dans la nuit).
- Chargement sur route : Les autobus sont rechargés pendant leur opération à des bornes/stations de recharge distinctes telles que des points d'inflexion qui permettent de courtes périodes de charge fixe. Ce type de « charge rapide » requiert généralement un taux de puissance élevé allant jusqu'à 400-500 kW (Gao et autres 2017).

<sup>2</sup> Carbonate de lithium, 99 % Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

De plus, les bus électriques présentent généralement une capacité de freinage régénératif de sorte que l'énergie cinétique est partiellement reconvertie en énergie électrique lors des opérations de freinage.

### 2.3.2 Défis de fin de vie concernant les batteries de bus électriques

Une gestion bien planifiée et contrôlée de la fin de vie des batteries Li-ion – notamment une longue phase d'utilisation et la promotion d'applications de seconde vie – est requise pour diverses raisons :

- Tous les types de batteries Li-ion contiennent divers composants qui peuvent avoir des impacts négatifs considérables sur la santé humaine et l'environnement s'ils ne sont pas gérés correctement (par exemple, rejetés dans l'environnement). En conséquence, les batteries Li-ion en fin de vie sont classées comme déchets dangereux dans de nombreux pays. Les mesures de réduction des déchets (par exemple, la réutilisation) et le recyclage respectueux de l'environnement sont des stratégies de réponse clés dans ce domaine.
- Les batteries Li-ion contiennent des matières premières considérées comme essentielles pour le développement économique et l'expansion des technologies d'énergie verte. Ceci comprend le lithium, le graphite, le nickel, le cobalt et le cuivre<sup>3</sup> (voir également le Tableau 1). Une longue utilisation des batteries réduit le besoin de production de nouvelles batteries et par conséquent la demande de matières premières. Après leur fin de vie définitive, un recyclage est requis pour récupérer un maximum de matières premières intégrées<sup>4</sup>.
- Les batteries Li-ion usagées et en fin de vie sont associées à des risques d'incendie. Les cellules de batterie avec une charge résiduelle peuvent surchauffer, s'enflammer et même exploser après des dommages. Ce risque est également appelé « emballement thermique » des batteries et peut survenir des jours, voire des semaines après un dommage. Les risques d'incendie liés aux batteries Li-ion usagées et en fin de vie constituent une préoccupation majeure des gestionnaires de déchets et des recycleurs du monde entier. Comme les BEB contiennent des blocs-batteries assez volumineux (voir section 2.3.1), l'auto-inflammation des cellules individuelles peut se propager et provoquer des incendies de batterie assez importants.
- Lors de l'utilisation de batteries dans les bus électriques, la capacité de la batterie diminuera avec le temps jusqu'à ce qu'elle ne convienne plus à la conduite du véhicule. Cependant, ces batteries peuvent encore présenter une "durée de vie" suffisante pour permettre leur utilisation dans d'autres applications, telles que des systèmes de stockage d'énergie fixes pour des applications de puissance inférieure, par exemple, le stockage d'énergie renouvelable générée à partir de l'énergie solaire, éolienne, etc. Une telle utilisation de seconde vie peut aider à maximiser la durée d'utilisation des ressources de la batterie et contribue ainsi à l'efficacité et à la circularité des ressources.

<sup>3</sup> Le nickel et le cobalt ne sont pas utilisés dans tous les types de batteries Li-ion.

<sup>4</sup> Une récupération parfaite de toutes les matières premières intégrées n'est pas possible principalement en raison de compositions de matériaux complexes et de problèmes d'entropie. Les recycleurs se concentrent généralement sur la récupération du cuivre, du cobalt et du nickel en tant que principaux vecteurs de valeur des batteries lithium-ion, mais, en fonction des processus appliqués, peuvent également être en mesure de récupérer une partie de l'aluminium et du lithium intégrés. D'autres matériaux tels que le manganèse et le graphite sont généralement perdus lors du recyclage des batteries Li-ion (Brückner et autres 2020).

### 2.3.3 Économie de la gestion des batteries en fin de vie

Une bonne gestion de la fin de vie peut être motivée par une combinaison de quatre facteurs principaux :

- 1) La valeur de réutilisation des batteries ou de certains de leurs composants
- 2) La valeur des matières premières récupérées lors du recyclage
- 3) Les obligations légales de mener une saine gestion de fin de vie
- 4) D'autres obligations de mener une gestion saine de la fin de vie (par exemple, par des partenaires sous contrat)

Dans ce contexte, les aspects suivants doivent être pris en compte :

- La future **valeur de réutilisation** des batteries usagées de véhicules électriques est sujette à de multiples incertitudes. À ce jour, les opérations de réutilisation et de réaffectation sont souvent confrontées à de multiples conceptions<sup>5</sup> de batterie différente, à un accès insuffisant aux données sur l'état de santé de la batterie et à des problèmes liés à la sécurité des produits de seconde vie (Zhu et autres 2021). Bien que les opérations de réutilisation et de réaffectation puissent permettre une certaine marge de profit à l'avenir, cela n'a pas encore été prouvé à plus grande échelle
- La **valeur matérielle** des batteries de véhicules en fin de vie se limite souvent à quelques métaux récupérables, principalement le cuivre, le cobalt et le nickel. La tendance aux formules chimiques des cellules LFP (voir section 2.3.1) signifie également que ces batteries ont une valeur matérielle considérablement réduite qui ne permet pas, pour l'heure, de couvrir les coûts des procédés de recyclage. En conséquence, les recycleurs facturent des droits d'entrée pour les batteries LFP, à titre indicatif tournant autour de 2 000 €/t (Manhart et autres 2022). Le lithium n'est contenu qu'en concentrations relativement faibles et n'est pas récupéré dans la plupart des procédés de recyclage existants (Brückner et autres 2020 ; Sojka et autres 2020).
- **Le transport et le stockage sûrs** des batteries de véhicules électriques en vue de leur réaffectation et de leur recyclage sont associés à des efforts et à des coûts considérables. Comme décrit dans la section 2.3.2, les risques d'incendie et d'explosion sont considérables. Stimulés par divers incidents, des organismes nationaux et internationaux ainsi que des compagnies de transport et d'assurance sont sur le point d'élaborer des directives et des réglementations pour le transport des batteries de véhicules électriques usagées et en fin de vie. Alors que la logistique inverse s'adaptera sûrement à la croissance des volumes et au durcissement des exigences en matière de sécurité, les frais connexes sont susceptibles d'être substantiels, en particulier lorsque les batteries requièrent de longues distances de transport (Slattery et autres 2021) et/ou des déplacements au-delà des frontières internationales. Dans ce dernier cas, une notification conformément à la procédure de consentement préalable en connaissance de cause de la Convention de Bâle est également requise, ce qui peut être associé à des efforts et des retards administratifs considérables (Prevent & StEP 2022).

Il faut donc considérer qu'une gestion écologiquement rationnelle de la fin de vie sera probablement associée à des coûts nets. La mise en œuvre des mesures de ce catalogue peut contribuer à réduire les efforts et les coûts pour les municipalités et les sociétés de

---

<sup>5</sup> Parfois, même la conception ne permet pas de retirer les modules ou les cellules de batterie.

transport et à garantir que la charge correspondante est prise en charge par les acteurs fournissant des autobus électriques et des batteries en accord avec le concept de Responsabilité élargie du producteur (voir section 2.2)

## 2.4 Gestion générique de fin de vie des batteries d'e-bus

L'illustration 4 donne un aperçu général d'une modalité de gestion idéale des batteries de bus électriques :

- Après l'acquisition des e-bus, un entretien régulier des bus et des batteries est effectué pour permettre une longue phase de première utilisation. Par rapport à la maintenance des bus conventionnels, les bus électriques requièrent moins d'efforts en termes d'inspections physiques et de maintenance, mais davantage en termes de surveillance/suivi et d'équilibrage des batteries, qui peuvent se réaliser via un accès à distance aux données.
- Une fois que les batteries ont atteint une capacité restante et une puissance de sortie trop faibles pour le fonctionnement du bus, les blocs-batteries sont retirés, emballés en toute sécurité et expédiés à un centre agréé de test et de traitement de batteries.
- Idéalement, la société réceptrice dispose de suffisamment d'informations du système de gestion des batteries sur l'historique et l'état de santé de la batterie et peut prendre des décisions éclairées sur l'utilisation ultérieure des batteries et des modules. Les blocs-batteries et les modules réutilisables sont utilisés pour les solutions de stockage de seconde vie (également appelées « réaffectation »). Les autres modules et composants de batterie sont envoyés au recyclage.
- Après plusieurs années d'utilisation en seconde vie, les batteries n'ont plus de valeur de réutilisation pertinente et sont également envoyées au recyclage.
- Le recyclage débute généralement par un démontage manuel des plus grands blocs-batteries. Le traitement ultérieur est effectué dans des conditions sûres dans un environnement clos, notamment les contrôles de poussière et d'émissions. La plupart des procédés de recyclage impliquent un prétraitement mécanique où les modules et les cellules de batterie sont déchiquetés et triés en principales fractions de sortie, à savoir l'acier, le cuivre, l'aluminium, les plastiques et la masse noire.
- L'aluminium, le cuivre et la masse noire sont envoyés à des processus de fusion et/ou d'affinage qui génèrent des matières premières pour la production industrielle.

En plus des points susmentionnés, les batteries usagées et en fin de vie doivent également être déchargées avant le traitement. Cette décharge peut s'effectuer soit avant l'expédition (au moment où les batteries sont retirées de la flotte de bus), soit comme une première étape de gestion avant le démontage. Dans tous les cas, la décharge et le démontage des batteries de bus électriques sont des opérations à haute tension et ne doivent être effectués que par du personnel qualifié.

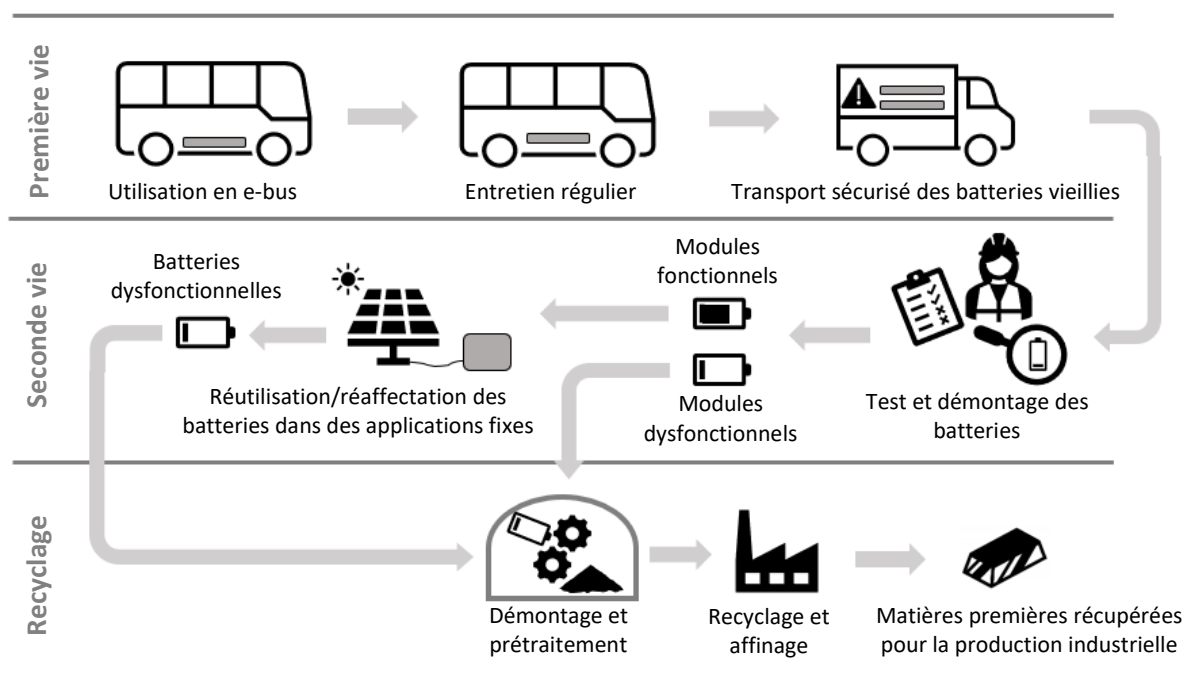


Illustration 4 Modalité de gestion idéale des batteries de bus électriques

Source : Oeko-Institut

## 2.5 Défis liés à la fin de vie de certains autres composants de bus électriques

### 2.5.1 Pneus

Les pneus de voitures et de bus usagés et en fin de vie constituent un flux de déchets largement non résolu dans de nombreux pays et régions du monde. Tandis que certains pneus de voiture usagés peuvent trouver une seconde utilisation (par exemple, les pare-battages de bateaux, la production de meubles), les options de recyclage sont limitées à quelques options de décyclage/downcycling<sup>6</sup> telles que la production de tapis. Dans le pire des cas, les pneus usagés sont brûlés à l'air libre, soit pour réduire les volumes de déchets, soit pour récupérer la maille d'acier intégrée qui sera vendue à des usines de recyclage d'acier. De telles pratiques sont très polluantes et devraient être clairement découragées/interdites.

Les pneus ont une valeur calorifique très élevée et peuvent servir de combustible issu de déchets (RDF) dans les procédés industriels. Assez couramment, les pneus usagés sont utilisés pour alimenter les fours de cimenterie. Cette modalité de gestion (récupération d'énergie) se situe au deuxième niveau le plus bas de la hiérarchie des déchets (voir section 2.1) et contribue généralement à remplacer le charbon comme principal combustible dans la production de ciment. Si cette modalité de gestion est choisie, il faut s'assurer que les profils d'émission des fours à ciment sont conformes aux bonnes pratiques nationales et internationales et peuvent faire face à de tels changements dans la composition du combustible.

<sup>6</sup> Le terme « downcycling/décyclage » décrit les opérations de recyclage qui conduisent à un matériau de qualité inférieure.

### 2.5.2 Câbles

Les câbles ont des noyaux métalliques (principalement en cuivre ou en aluminium) et sont isolés avec du plastique. Le type de plastique pour l'isolation varie considérablement, mais se compose souvent de PVC ou de PE avec également l'application de divers additifs. La plupart des marchés de la ferraille demandent aux fournisseurs de livrer le noyau métallique libéré, sans aucun reste d'isolant. Bien que cette isolation en plastique puisse être retirée par des moyens mécaniques (par exemple, épiluchage, décapage, granulation et tri), les opérations connexes sont laborieuses ou requièrent des investissements en machines. Ainsi, les opérateurs du secteur informel ont parfois recours à l'incinération à ciel ouvert des câbles. Cette incinération à ciel ouvert génère une pollution considérable, notamment la formation et l'émission de polluants organiques persistants (POP) très dangereux. Une telle génération de POP vaut particulièrement pour les câbles isolés avec du PVC contenant du chlore.



Illustration 5 Incinération à ciel ouvert – une manière très polluante de traiter les déchets de câbles  
Source : Oeko-Institut

### 2.5.3 Composants électroniques

Les composants électriques et électroniques contiennent un large éventail de matériaux et de substances, dont beaucoup ont des propriétés dangereuses. Les composants électroniques tels que les cartes de circuits imprimés à microprocesseurs ont des concentrations importantes de cuivre et de métaux précieux et sont donc recherchés par les ferrailleurs et les recycleurs. En général, il est important que les composants électriques et électroniques ne soient pas éliminés ou recyclés dans des opérations non contrôlées, ce qui est assez polluant et également inefficace en termes de récupération des matières premières.



#### 2.5.4 Matières plastiques

Les pièces et composants en plastique sont utilisés dans de nombreuses parties des bus, en particulier pour l'intérieur (par exemple, revêtement intérieur, sièges, coussin). Alors que de nombreux types de plastique peuvent théoriquement être bien recyclés, il existe de nombreux problèmes pratiques pour le faire dans des applications concrètes :

- De nombreux plastiques utilisés sont enrobés ou mélangés, ce qui rend une bonne séparation des polymères difficile, voire impossible.
- Les additifs tels que les produits ignifuges peuvent limiter l'utilisation de plastiques recyclés et créer des obstacles à l'utilisation de plastiques recyclés.
- Les véhicules en fin de vie sont démontés ou broyés en mettant l'accent sur la récupération des métaux. Les matériaux moins précieux se retrouvent dans la soi-disant « fraction légère de broyage », qui se compose d'une grande variété de matériaux couramment utilisés uniquement pour la récupération d'énergie (le cas échéant).

Néanmoins, certains matériaux peuvent présenter un potentiel de recyclage considérable. Entre autres, les pièces intérieures en plastique des véhicules sont souvent fabriquées à partir d'ABS-PC, qui est un polymère technique très précieux. En outre, les pièces telles que les pare-chocs sont généralement fabriquées en PP. Dans le cas où ces matériaux peuvent être récupérés sous une forme pure et ne sont pas contaminés par des produits ignifuges ou d'autres additifs critiques, ils pourraient présenter un potentiel de recyclage considérable. Des potentiels similaires pourraient également exister pour les éléments en polyamide (PA) tels que les tapis et les housses de siège.

#### 2.5.5 Fluides frigorigènes

Tous les climatiseurs utilisent des réfrigérants. Alors que les réfrigérants anciens et appauvrissant la couche d'ozone ont été interdits à l'échelle mondiale, les substituts couramment utilisés ont toujours un très fort potentiel de réchauffement climatique lorsqu'ils sont libérés de manière incontrôlée. Le R134a, par exemple, présente un potentiel de réchauffement climatique 1430 fois plus élevé que le CO<sub>2</sub>. Les fuites de réfrigérant des systèmes de climatisation sont très courantes et peuvent se produire pendant le fonctionnement normal, les accidents ou la mise hors service, de sorte que, dans la plupart des scénarios de cycle de vie, une émission complète de réfrigérants doit être supposée<sup>7</sup>. Les bus publics courants contiennent environ 10 kg de R134a (BMU & UBA 2011), ce qui signifie qu'une émission complète a un impact sur le réchauffement climatique équivalent à environ 10 t de CO<sub>2</sub> par bus. Des substituts ayant un potentiel de réchauffement climatique nettement inférieur sont facilement disponibles et comprennent le R1234yf et le CO<sub>2</sub>. Dans l'Union européenne, l'utilisation de réfrigérants dans la climatisation des véhicules est limitée aux substances dont le potentiel de réchauffement global n'est pas supérieur à 150 fois celui du CO<sub>2</sub> (Union européenne 2006a). Il est donc recommandé de viser les e-bus qui utilisent exclusivement ces substituts respectueux du climat (voir section 3.1).

---

<sup>7</sup> Supposer une émission totale peut même être une estimation prudente car les réfrigérants sont généralement rechargés lors de l'inspection et de la maintenance. Par conséquent, les émissions du cycle de vie d'un autobus peuvent être importantes.

### 2.5.6 Autres polluants

Les véhicules peuvent contenir un certain nombre d'autres substances préoccupantes, qui peuvent être rejetées dans l'environnement pendant ou après le traitement de fin de vie. En réaction, l'Union européenne a proscrit l'utilisation de certaines substances dangereuses, en particulier les métaux lourds que sont le plomb, le mercure, le cadmium et le chrome hexavalent dans les véhicules. L'interdiction permet certaines dérogations telles que l'utilisation de certaines concentrations de métaux lourds dans les alliages et le plomb dans les batteries au plomb-acide. Les dérogations sont révisées périodiquement (Union européenne 2000).

## 3 Mesures pour améliorer la circularité des batteries de bus électriques

### 3.1. Mesure n°1 : Concentrations réduites de substances nocives

Quoi ?	Conception et utilisation d'autobus à teneur réduite en substances dangereuses
Pourquoi ?	Les substances dangereuses peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement, en particulier pendant la phase de fin de vie. De plus, ces substances constituent souvent des obstacles à un recyclage de haute qualité.
Pertinence politique	Haute : Les réglementations et les interdictions de substances sont plus efficaces lorsqu'elles sont imposées et appliquées par le biais du cadre juridique national

L'acquisition de bus électriques offre la possibilité de sélectionner des modèles qui entraînent des concentrations réduites de substances nocives et facilitent la gestion de la fin de vie dans ce domaine. En raison de la législation contraignante de l'Union européenne<sup>8</sup> et de certaines autres juridictions, le marché mondial des véhicules a déjà développé des solutions pour fabriquer des véhicules largement exempts de métaux lourds comme le cadmium, le plomb, le mercure et le chrome hexavalent, et avec climatisation sans gaz à effet de serre puissants (voir sections 2.5.5 et 2.5.6).

L'encadré n°1 propose un texte pour l'approvisionnement en autobus électriques reposant largement sur les réglementations établies pour les véhicules de tourisme dans l'Union européenne, de sorte que de nombreux fabricants d'autobus électriques devraient déjà être familiarisés avec les exigences connexes. Il convient de noter que les exigences de l'encadré n°1 ne s'appliquent pas uniquement aux autobus électriques, mais peuvent également être utilisées pour d'autres véhicules, notamment les véhicules de tourisme et les véhicules équipés d'un moteur à combustion conventionnel.

<sup>8</sup> Les exigences relatives aux réfrigérants reposent sur la directive européenne 2006/40/CE relative aux émissions des systèmes de climatisation des véhicules à moteur (directive MAC). Les autres exigences relatives aux substances reposent sur la directive européenne 2000/53/CE relative aux véhicules hors d'usage (directive VHU).

## Encadré n°1 : Projet de critères pour l'achat d'autobus électriques avec des concentrations réduites de substances nocives

La climatisation des bus doit utiliser un réfrigérant dont le potentiel de réchauffement global ne dépasse pas 150 équivalents CO<sub>2</sub>.

De plus, les autobus électriques ne contiendront pas de plomb, de mercure, de cadmium ou de chrome hexavalent. Des dérogations sont possibles pour :

- Le plomb en tant qu'élément d'alliage dans les applications suivantes :
  - L'acier pour machines et composants en acier galvanisé par immersion à chaud contenant jusqu'à 0,35 % de plomb en poids
  - Les alliages d'aluminium avec une teneur en plomb de jusqu'à 0,4 % de plomb en poids
  - Les alliages de cuivre contenant jusqu'à 4 % de plomb en poids
- Le plomb et les composés du plomb dans les composants suivants :
  - Le plomb dans les batteries au plomb-acide
  - Le plomb dans les soudures à température de fusion élevée (c'est-à-dire les alliages à base de plomb contenant 85 % en poids ou plus de plomb)
  - Les composants électriques et électroniques qui contiennent du plomb dans un verre ou une céramique, dans un composé à matrice de verre ou de céramique, dans un matériau vitrocéramique ou dans un composé à matrice vitrocéramique
  - Le plomb dans les matériaux céramiques diélectriques à base de PZT des condensateurs faisant partie de circuits intégrés ou de semi-conducteurs discrets
- Le chrome hexavalent dans les applications suivantes :
  - Le chrome hexavalent en tant qu'agent anticorrosion du système de refroidissement en acier au carbone dans les réfrigérateurs à absorption jusqu'à 0,75 % en poids dans la solution de refroidissement :
    - conçu pour fonctionner entièrement ou partiellement avec un chauffage électrique, ayant une puissance électrique utilisée moyenne  $\geq 75$  W dans des conditions constantes de marche ;
    - conçu pour fonctionner pleinement avec un système chauffant non électrique.

Si d'autres dérogations pour l'utilisation du plomb, du mercure, du cadmium ou du chrome hexavalent sont nécessaires, elles doivent être spécifiées dans l'offre, y compris une justification technique pour chaque dérogation sollicitée. Une dérogation ne peut être accordée que s'il est expliqué de manière convaincante que la substitution aurait soit des effets négatifs sur la sécurité du produit, soit créerait davantage de dommages environnementaux.

### 3.2 Mesure n°2 : Dimensionnement approprié des bus et des batteries

Quoi ?	Acquérir des modèles de bus électriques adaptés aux réalités locales
Pourquoi ?	Veiller à ce que le ou les modèles d'e-bus soient adaptés aux exigences locales afin de garantir une utilisation à long terme
Pertinence politique	Faible : Le dimensionnement approprié des bus électriques et des batteries dépend des conditions et des demandes locales et ne peut être déterminé au niveau politique central.

Le contenu énergétique de la batterie détermine l'autonomie d'un BEB : plus la capacité est importante, plus la distance qu'un bus peut parcourir sans charge supplémentaire est longue. Une longue phase d'utilisation des e-bus permet d'éviter de manière significative la production de nouveaux véhicules de transport et est conforme au concept de prévention des déchets qui a la plus haute priorité dans la hiérarchie des déchets (voir section 2.1). En raison des implications coûteuses des batteries (voir section 2.3.1), il faut éviter le surdimensionnement des batteries. Néanmoins, le sous-dimensionnement représente également un risque, car une capacité de batterie sous-dimensionnée peut avoir un impact significatif sur la fonctionnalité du bus : les bus qui ne peuvent pas accomplir une journée complète de fonctionnement peuvent requérir l'achat de capacités de bus de secours, voire un remplacement intégral.

En termes de capacité de batterie et de kilométrage du bus, les aspects suivants doivent être pris en compte lors de la phase d'acquisition :

- Les conditions météorologiques chaudes et froides ont des impacts sur les performances et le kilométrage du BEB. Ceci est dû, entre autres, au chauffage ou au refroidissement électrique requis de la cabine des passagers (Wang et autres 2020). Par temps froid (-5 °C à 0 °C), la réduction peut atteindre 38 % (Henning et autres 2019) avec des effets similaires sous de fortes chaleurs. De plus, la charge de la batterie consomme davantage de temps par temps chaud, ce qui peut effectivement limiter l'efficacité de la recharge en cours de route (McGuffie 2021).
- Les besoins en énergie et l'autonomie dépendent également du terrain sur lequel un bus est utilisé. Dans un environnement plat, les BEB atteignent généralement une autonomie plus élevée que sur un terrain vallonné (Wang et autres 2020).
- Les capacités de la batterie se dégradent avec le temps. Les véhicules (ou leurs batteries) sont généralement remplacés lorsque la capacité est tombée nettement en dessous de 80 % de sa valeur d'origine. Cela signifie que la portée du bus se réduit également au fil du temps à environ 70 % à 80%.
- Sur la base d'études disponibles, il peut être démontré que des manœuvres de véhicule instables et imprévisibles telles que celles rencontrées dans les embouteillages entraînent une diminution de l'état de santé attendu de la batterie. (Wang et al. 2020). Des couloirs dédiés réservés aux autobus peuvent donc non seulement accroître la qualité de service des systèmes de transport public, mais également soutenir de longues durées de vie des batteries.

Tous les facteurs ci-dessus peuvent faire en sorte que les bus fonctionnent en deçà de leur autonomie et de leur kilométrage prévu. Ces scénarios négatifs peuvent être atténués par une ou plusieurs des mesures suivantes :

- Spécifier les exigences d'exploitation réelles (plages de température, terrain, poids supplémentaire comme les passagers, etc.) dans les dossiers d'appel d'offres et exiger des soumissionnaires qu'ils garantissent un kilométrage de BEB défini pour les conditions données et une période de temps prédéfinie (voir également l'encadré n°2).
- Utiliser les nouveaux BEB pour les lignes plus longues et plus gourmandes en énergie. Une fois la capacité de la batterie dégradée, ils peuvent être déplacés vers des itinéraires plus courts et moins énergivores.

### Encadré n°2 : Exemple de bonne pratique – exigences de qualité pour les e-bus dans la ville de Leipzig

La ville de Leipzig (Allemagne) travaille sur une transition progressive de sa flotte de bus vers des bus électriques à batterie. Les bus sont achetés, détenus et exploités par le Leipziger Verkehrsbetriebe, qui est une agence de transport appartenant à la municipalité. Dans sa stratégie d'appel d'offres, la Leipziger Verkehrsbetriebe exige que les fournisseurs garantissent que les bus et leurs batteries atteignent les exigences de performances minimales pendant dix ans d'exploitation constante. Au lieu d'utiliser uniquement des indicateurs de performance indirects (par exemple, au moins 80 % de la capacité restante de la batterie après un nombre défini d'années), les spécifications des appels d'offres et des contrats exigent que les bus électriques puissent – après dix ans de fonctionnement constant dans les conditions données à Leipzig – couvrir encore une distance de 80 km avec une seule charge de batterie. Les 80 km découlent des conditions d'exploitation typiques à Leipzig, qui utilise une combinaison de recharge en dépôt et en route. D'autres conditions d'exploitation à Leipzig sont également précisées dans les dossiers d'appel d'offres, notamment des informations sur le terrain et les plages de températures prédominantes. Dans le cas où un ou plusieurs e-bus fournis ne satisfont pas à cette exigence, le fournisseur est contractuellement tenu de fournir une solution telle que le remplacement de la batterie.

### 3.3 Mesure n°3 : Durabilité et garanties des batteries

Quoi ?	Veiller à ce que seules des batteries de haute qualité soient utilisées dans les bus électriques
Pourquoi ?	Les batteries de haute qualité ont une durée de vie plus longue, nécessitent des remplacements moins fréquents et sont plus économes en ressources et donc plus économiques
Pertinence politique	Haute : Des exigences minimales en matière de durabilité peuvent être intégrées dans la législation nationale sur les batteries et/ou les véhicules

Si la Mesure n°2 incite à fournir des bus de haute qualité, il n'est pas exclu que les soumissionnaires présentent des solutions de moins bonne qualité en termes de batteries, tout en acceptant des remplacements d'équipements plus fréquents souvent aux frais de l'acheteur. Bien qu'une telle stratégie puisse suivre certaines considérations d'ordre économique étroites, elle est bien évidemment en conflit avec les principes de l'économie circulaire et a des effets secondaires négatifs sur l'économie et la société au sens large (voir chapitre 2). Pour prévenir efficacement l'utilisation de batteries inférieures aux normes, des exigences minimales de durabilité peuvent être introduites dans les dossiers d'appel d'offres.

Les critères de durabilité minimale pour les batteries de véhicules électriques (notamment celles des bus électriques) ont été élaborés par la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe (CEE-ONU) en 2022 et sont résumés dans le Tableau 2.

Âge/kilométrage du véhicule	État énergétique certifié <sup>9</sup>
Du début de vie à 5 ans ou 100 000 km, selon la première éventualité	80%
Véhicules de plus de 5 ans ou 100 000 km, et jusqu'à la première éventualité de 8 ans ou 160 000 km	70%

Tableau 2 Exigences de performances minimales de la CEE-ONU pour les batteries de véhicules électriques

Source : (UNECE 2022)

Néanmoins, le niveau d'ambition actuel des exigences de la CEE-ONU ne convient pas comme exigence minimale pour les batteries<sup>10</sup> des bus électriques. Les données des producteurs et des utilisateurs de bus électriques indiquent que des durées de vie > 10 ans sont possibles avec les batteries et les e-bus existants (MassTransit 2015 ; Aamodt et autres 2021). Les progrès technologiques et la concurrence entre fabricants continueront d'augmenter encore la durée de vie et la qualité des batteries. Il est donc recommandé de stipuler des exigences de performance et de durabilité plus ambitieuses dans les dossiers d'appel d'offres et les contrats ; à titre indicatif pour environ 12 à 15 ans d'exploitation d'e-bus. Cela devrait se baser sur les informations actuelles de l'industrie portant sur les garanties et les spécifications de performances des batteries des principaux fournisseurs. Si aucun critère sur la base d'informations commerciales ne peut être obtenu, les critères minimaux de l'encadré ci-dessous peuvent être utilisés comme point de départ<sup>11</sup>.

### Encadré n°3 : Projet de critères pour l'achat d'autobus électriques équipés de batteries durables

Le fournisseur doit veiller à ce que l'état énergétique certifié (SOCE) des batteries d'e-bus soit conforme aux exigences de performance minimales suivantes ou meilleur :

Âge/kilométrage du véhicule	État énergétique certifié
Du début de vie à 6 ans ou 400 000 km, selon la première éventualité	80%
Véhicules de plus de 6 ans ou 400 000 km, et jusqu'à la première éventualité de 10 ans ou 500 000 km	70%

Le fournisseur doit fournir des preuves de conformité par le biais de protocoles de test indépendants conformément aux méthodes et procédures de vérification définies dans le Règlement technique mondial des Nations Unies sur la durabilité des batteries des véhicules pour véhicules électriques.

<sup>9</sup> "État énergétique certifié" (SOCE) désigne la performance énergétique de la batterie utilisable mesurée ou embarquée à un moment précis de sa durée de vie, exprimée en pourcentage de l'énergie utilisable de la batterie certifiée (UNECE 2022).

<sup>10</sup> Des critères révisés de la CEE-ONU/UNECE adaptés aux batteries de bus électriques pourraient être disponibles à l'avenir. En conséquence, la consultation des informations de la CEE-ONU/UNECE pourrait être utile lors de l'élaboration des critères de durabilité et de garantie des batteries.

<sup>11</sup> Une brève étude de marché réalisée en 2023 indique que les fabricants de véhicules électriques ont déjà commercialisé leurs produits avec des garanties de 6 à 12 ans et kilométrage illimité ; par conséquent, les chiffres minimaux présentés sont facilement réalisables par l'industrie (MassTransit 2015).

### 3.4 Mesure n°4 : Étiquetage des batteries

Quoi ?	Veiller à ce que les batteries d'e-bus portent des étiquettes et des codes QR fournissant des informations sur les caractéristiques de la batterie aux tiers engagés dans la réutilisation/la réaffectation et la gestion de fin de vie.
Pourquoi ?	Un accès facile aux informations sur les caractéristiques des batteries peut favoriser une prise de décision éclairée dans la gestion de fin de vie.
Pertinence politique	Haute : L'étiquetage des batteries est plus efficace lorsqu'il est appliqué uniformément sur tous les types de véhicules électriques. Le meilleur moyen d'y parvenir passe par des normes de l'industrie combinées à des rôles obligatoires pour appliquer ces normes.

Les entreprises qui récupèrent des batteries de véhicules surutilisées et en fin de vie ont besoin d'informations sur leurs caractéristiques pour prendre des décisions significatives sur les modalités de traitement et de gestion, contribuant ainsi à optimiser la gestion de fin de vie.

Les informations spécifiques de la batterie peuvent être fournies par le producteur de manière à ce que tout tiers puisse y accéder facilement. Cet aspect a déjà été repris par de nombreux forums et initiatives et est abordé sous le mot-clé « passeport de batterie ». Bien qu'il n'existe pas encore de format établi pour un tel passeport de batterie, la Californie commencera à exiger des véhicules électriques immatriculés à partir de 2026 que les batteries soient étiquetées avec un identifiant numérique (code QR) qui renvoie à des informations en ligne sur la chimie de la batterie (type de cathode et d'anode), fabricant, date de fabrication, tension minimale et puissance nominale (Code des règlements de la Californie 2022). Une approche similaire est adoptée par le Projet de règlement européen sur les batteries et pourrait prévoir un étiquetage obligatoire des batteries avec de tels codes QR d'ici 2027 (Commission européenne 2020). De plus, la Chine dispose déjà (et prévoit d'étendre) d'exigences en matière d'étiquetage des batteries de véhicules électriques (Bej et autres 2022).

Bien qu'un tel étiquetage puisse être un outil utile pour appuyer la gestion en fin de vie, les systèmes ne sont pas encore établis de manière uniforme. Néanmoins, il peut être exigé que les producteurs d'autobus électriques fournissent des informations sur les batteries sous une forme aisément accessible (voir encadré n°4).

## Encadré n°4 : Projet de critères pour l'étiquetage des batteries de bus électriques

Le producteur devra équiper tous les blocs-batteries d'une étiquette / d'un identifiant numérique bien visible et accessible (par exemple, un code QR) lié à un site Web de données contenant des informations sur au moins les caractéristiques suivantes de la batterie :

- la chimie de la batterie (type de cathode et d'anode)
- le fabricant
- la date de fabrication
- la tension minimale, maximale et moyenne
- la puissance nominale

Le site Web conservera les informations pendant au moins 15 ans à compter de la date de fabrication et celles-ci seront rendues accessibles au public sans frais ni procédure d'enregistrement.

L'étiquetage et les informations fournies doivent en outre être alignés sur les formats industriels courants à cette fin, y compris la taille, la conception et l'emplacement des étiquettes, ainsi que le format de la fourniture de données numériques. Des informations sur d'autres caractéristiques de la batterie doivent également être fournies via le système conformément aux pratiques établies et aux exigences légales.

### 3.5 Mesure n°5 : Tests en situation réelle

Quoi ?	Essais de prototypes de bus électriques avant les décisions d'achat finales
Pourquoi ?	Veiller à ce que le ou les modèles d'e-bus soient adaptés aux exigences locales afin de garantir une utilisation à long terme.
Pertinence politique	Faible : Les tests en situation réelle visent à tester l'adéquation du véhicule à un contexte local spécifique. Les approches politiques centralisées ont ici des effets limités.

La Mesure n°2 souligne déjà la nécessité pour les bus de répondre aux besoins locaux et d'être capables de fonctionner avec robustesse dans l'environnement donné. Alors que de nombreux aspects connexes peuvent et doivent être spécifiés dans les dossiers d'appel d'offres (par exemple, les longueurs et les caractéristiques des itinéraires, les modes de charge, les plages de température ambiante), il existe de nombreux aspects et caractéristiques des bus qui peuvent être négligés dans le processus, mais qui pourraient s'avérer être pertinents pour les opérations quotidiennes, tels que le nombre de passagers et les bagages supplémentaires. Dans ce contexte, les sociétés de transport en commun et les opérateurs peuvent viser à tester de nouveaux modèles de bus électriques avant de passer commande. Dans la plupart des situations, les producteurs ne seront – pour des raisons compréhensibles – disposés à accorder des essais routiers que dans des conditions contrôlées (sans passagers, pas en opération de routine), une pratique qui peut déjà révéler de nombreux aspects pratiques de l'adéquation des bus et appuyer grandement la sélection de modèles appropriés comme décrit dans la section 3.2. Dans le cas où un plus grand nombre d'autobus doivent être acquis, les producteurs peuvent également accepter des tests en situation réelle dans l'exploitation quotidienne.



### Encadré n°5 : Exemple de bonne pratique – test de prototypes de bus en Inde

En Inde, cinq grandes villes (Delhi, Calcutta, Surat, Bangalore et Hyderabad) ont uni leurs efforts pour se doter de bus électriques. Dans ce « Grand Challenge », un nombre total de 5 450 bus électriques ont été achetés dans le cadre d'un appel d'offres. Si ce volume important a permis une réduction significative des prix unitaires, il a également permis d'introduire de nouvelles exigences d'appel d'offres. Entre autres, le processus d'appel d'offres a envisagé une étape intermédiaire au cours de laquelle les trois candidats fournisseurs les mieux notés ont été invités à fournir des prototypes pour des tests en situation réelle. Les résultats de ces tests ont été utilisés dans la sélection finale du fournisseur (Modi 2022).

Un appel d'offres comparable de suivi à grande échelle pour l'exploitation de bus électriques a été publié en 2022 (6 465 e-bus) et un autre est prévu pour 2023 (~ 5 000 e-bus)

### 3.6 Mesure n°6 : Interopérabilité des infrastructures de recharge

Quoi ?	Assurer l'interopérabilité de l'infrastructure de recharge avec différents modèles d'e-bus
Pourquoi ?	Les systèmes de recharge interopérables peuvent être utilisés pour une grande variété de modèles de bus électriques et ont donc généralement une longue durée de vie, ce qui favorise la conservation des ressources et la réduction des coûts à long terme.
Pertinence politique	Haute : Les autorités peuvent réglementer l'interopérabilité des interfaces et des protocoles de charge au niveau central (national).

Dans de nombreux cas, l'achat d'autobus électriques et la fourniture d'infrastructures de recharge font l'objet d'un appel d'offres global, du moins dans la phase initiale du déploiement d'e-bus dans un lieu donné. Bien que cette stratégie d'acquisition présente de nombreux avantages, il est important de considérer que les systèmes de recharge doivent être conçus de manière à pouvoir également être utilisés pour les modèles de bus électriques d'autres fabricants susceptibles de compléter la flotte ultérieurement. Sans infrastructure de recharge interopérable, une flotte de bus électriques pourrait dépendre d'un nombre très limité de fournisseurs de bus électriques, ou être contrainte d'installer une infrastructure de recharge parallèle pour d'autres modèles de bus électriques. Il est donc très important d'installer une infrastructure de recharge interopérable.

Pour ce faire, une agence de transport / un gestionnaire de flotte doit d'abord décider du type de recharge qu'il/elle souhaite appliquer dans une certaine ville et choisir principalement parmi les options suivantes :

- Fiche de charge (conductrice)/charge de pantographe/charge d'inductance
- Recharge au dépôt / recharge au dépôt + recharge en route

Lorsque l'infrastructure physique est déjà en place, les aspects suivants doivent être pris en compte :

- Types et méthodes de recharge (Conduction : CA/CC ou Inductive)
- Puissance de sortie

- Interfaces de charge de la station de charge/borne de recharge et de l'e-bus (prises, entrées, faces de connecteur)
- Protocole de communication entre le chargeur et la batterie des bus électriques

La prise des bornes de recharge existantes doit correspondre à la prise de la nouvelle flotte. Au contraire, l'infrastructure devrait être adaptée pour assurer un fonctionnement continu dans les nouveaux et les anciens bus. Compte tenu de ces aspects, des critères d'interopérabilité doivent être spécifiés dans les dossiers d'appel d'offres. Lorsque l'infrastructure de recharge est en place, l'offre doit inclure des obligations de fournir les convertisseurs et adaptateurs ou modifications nécessaires pour assurer l'interopérabilité et la compatibilité avec la flotte. Ces critères doivent faire référence aux normes et standards internationaux relatifs aux interfaces utilisateur, ainsi qu'au protocole de communication de chargement. Le tableau suivant donne un aperçu des normes et standards communs dans ce domaine.

Standard/Norme	Description
<b>Connecteurs, Entrées, Fiches</b>	
IEC 62196	Série de normes internationales pour les fiches et les prises pour la recharge de véhicules électriques
SAE J1772	Norme nord-américaine pour les connecteurs électriques pour véhicules électriques maintenue par SAE International: Coupleur de charge conductrice pour véhicule électrique SAE.
GB/T 20234	Norme nationale chinoise pour l'ensemble de connexion pour la charge conductrice des véhicules électriques.
CHAdeMO	Norme japonaise de charge CC pour véhicules électriques.
<b>Chargeur intégré, équipement d'alimentation des véhicules électriques (EVSE)</b>	
IEC 61851	Norme internationale pour les systèmes de charge conductive pour véhicules électriques
GB/T 27930	Norme chinoise pour la charge des câbles de batterie des véhicules électriques
<b>Communication EV à EVSE</b>	
ISO 15118	Norme internationale sur les véhicules routiers - Interface de communication véhicule-réseau (charge/décharge bidirectionnelle)
DIN SPEC 70121	Spécification technique allemande sur la communication numérique entre une borne de recharge CC VE et un véhicule électrique pour le contrôle de charge du CC dans le système de charge combiné
DIN SPEC 70122	Spécification technique allemande sur les tests de conformité pour la communication numérique entre une borne de recharge CC VE et un VE pour le contrôle
GB/T 27930	Norme chinoise sur les protocoles de communication entre le chargeur conducteur externe et le système de gestion de la batterie
<b>Systèmes de transfert de puissance sans fil (WPT)</b>	
IEC 61980	Norme internationale sur les systèmes de transfert de puissance sans fil (WPT) pour véhicules électriques
GB/T 38775	Normes nationales chinoises pour la charge inductive ou sans fil
<b>Communication EVSE vers le système de gestion des bornes de recharge (CSMS)</b>	
IEC 63110	Norme internationale définissant un protocole de gestion des infrastructures de recharge et de décharge des véhicules électriques (en cours de développement)
OCPP	Protocole Open Charge Point Protocol (OCPP)

Tableau 3 Aperçu des normes communes pour la recharge des véhicules électriques

Source : Adaptation de Vector Informatik GmbH

### Encadré n°6 : Exemple de bonne pratique – Interopérabilité des infrastructures de recharge en Israël

À partir de l'année 2030, Israël a stipulé que tous les nouveaux bus destinés au transport public devront être entièrement électriques. Les bus à moteur diesel représentent actuellement moins de 1 % du nombre total de véhicules dans le pays, cet objectif est donc tout à fait réalisable. Le ministère israélien de la protection de l'environnement et le ministère des transports et de la sécurité routière ont coordonné leurs efforts pour atteindre cet objectif grâce à une combinaison de réglementations et de normes. L'un des piliers importants de leur stratégie était de parvenir à l'interopérabilité des infrastructures de recharge pour les véhicules publics et privés. Le gouvernement a élaboré des normes obligatoires reposant sur les exigences de charge CC de l'UE CCS de type 2 et le protocole Open Charge Point Protocol (OCPP) pour la communication entre les bornes de recharge et les véhicules électriques. L'utilisation de normes et réglementations déjà existantes et acceptées contribue à la mise en application des règles d'importation et d'immatriculation des véhicules. Pour soutenir davantage l'adoption des e-bus, le ministère des Transports exploite des bornes/stations de recharge en dépôt pour les flottes municipales et les flottes d'e-bus privées moyennant un droit. Des modèles commerciaux basés sur la recharge en dépôt sont également présents à la fois pour les flottes d'autobus électriques publics et pour les particuliers, quelle que soit la marque du véhicule. Bien que cette approche réussisse à réaliser l'interopérabilité, une carence de la politique nationale est le passage à 100 % aux bus électriques sans garantir de disponibilité suffisante des bornes de recharge. Cette situation a conduit à de nouveaux e-bus inutilisés et actuellement entreposés, ce qui équivaut à des pertes de rentabilité pour les opérateurs de flotte publics et privés.

### 3.7 Mesure n°7 : Accès aux données de fonctionnement de la batterie

Quoi ?	Veiller à ce que les fabricants d'e-bus accordent l'accès aux données de fonctionnement de la batterie
Pourquoi ?	Les données de fonctionnement de la batterie sont essentielles pour permettre une surveillance approfondie de l'état de santé de la batterie et pour diverses mesures concernant la maintenance et l'extension de la durée de vie de la batterie.
Pertinence politique	Haute : Les décideurs politiques peuvent introduire des règles obligatoires pour les fabricants de batteries et les fournisseurs de véhicules électriques afin d'accorder l'accès aux données opérationnelles de la batterie.

Les données et les connaissances sur le niveau de performance réel et l'historique des batteries de bus électriques constituent une condition préalable essentielle pour une bonne gestion des bus électriques et de leurs batteries, notamment les questions liées aux points suivants :

- Un bus est-il suffisamment adapté pour desservir un certain itinéraire ?
- Quand et comment une batterie doit-elle être entretenue/conditionnée ?
- Quelle est la durée de vie résiduelle prévue d'une batterie ?
- Que peut-on faire pour prolonger la durée de vie de la batterie et garantir un fonctionnement sûr ?

- Si ou quand un changement de batterie est économique et durable ?
- La batterie fonctionne-t-elle conformément aux garanties convenues ?
- Quelle est la valeur résiduelle d'une batterie et convient-elle à une application de seconde vie ?

Tandis que les opérateurs et les chauffeurs de bus peuvent généralement surveiller l'état de charge (SOC) (par exemple, sur un écran dans le poste de conduite ou via un accès numérique à distance), les informations sur l'état de santé (SOH) ne sont pas toujours accessibles aux opérateurs et aux utilisateurs. De plus, les données SOH fournies peuvent être agrégées, ce qui limite la capacité de l'utilisateur à obtenir un aperçu complet pour répondre pleinement aux questions ci-dessus.

Il est donc important que les producteurs d'e-bus accordent l'accès aux données de diagnostic de la batterie à leurs clients, notamment le droit de transmettre l'accès à ces données à des tiers indépendants (par exemple, des prestataires de services pour le diagnostic de la batterie, la maintenance et la réutilisation/réaffectation). Cet accès aux données doit être sollicité dans le cahier des charges de manière non équivoque, en précisant le type de signaux auxquels donner accès, leur unité physique, leur précision et leur fréquence. En outre, les formats de données et les interfaces doivent être précisés pour garantir que les données puissent être consultées avec du matériel accessible au public (unités télématiques) et analysées avec des logiciels accessibles au public.

Il est également recommandé que tout manquement au respect des exigences connexes fasse l'objet d'un recours et/ou de compensations financières.

## Encadré n°7 : Projet de texte d'approvisionnement sur l'accès aux données de diagnostic des batteries

Les fournisseurs doivent permettre une surveillance continue des données de diagnostic de la batterie comme spécifié dans le tableau ci-dessous et donner au client un accès complet à ces données. Cela inclut également le droit du client d'étendre l'accès à ces données à tout tiers désigné par le client.

Signal	Unité	Résolution de valeur	Résolution temporelle
Courant de la batterie au fil du temps	A	0,1 A	≤ 1 s
Tension de la batterie au fil du temps	V	0,1 V	≤ 1 s
Température de la cellule (moy/min/max) au fil du temps	°C	0,1°C	≤ 10 s
Tension de la cellule (moy/min/max) au fil du temps	V	0,001 V	≤ 1 s
État de charge de la batterie (SoC) au fil du temps	%	0,1 %	≤ 10 s
Débit de charge accumulée	As	0,1 As	≤ 60 s

Les signaux indiqués dans le tableau doivent être échantillonnés en continu pendant le fonctionnement et la charge et fournis dans un format numérique compatible avec le logiciel accessible au public. Tous les signaux doivent être synchrones dans le temps. Tous les signaux doivent être mis à disposition via une interface de sortie standard telle que CAN ou FMS.

Les informations complémentaires suivantes sur la batterie doivent être mises à la disposition du client lors de l'achat :

- Nom du fournisseur de la batterie
- Énergie nominale du bloc-batterie (en kWh)
- Chimie des cellules de batterie
- Modèle ou numéro de série de la batterie
- Topologie et câblage de la batterie :
  - Capacité nominale des cellules (en Ah)
  - Tension nominale des cellules (en V)
  - Nombre de modules par bloc-batterie
  - Nombre de cellules par module

### 3.8 Mesure n°8 : Surveillance et maintenance approfondies des batteries<sup>12</sup>

Quoi ?	Veiller à ce que les données de fonctionnement de la batterie soient utilisées pour une surveillance/un suivi et une maintenance de haute qualité des batteries d'e-bus
Pourquoi ?	Une surveillance et une maintenance de haute qualité peuvent prolonger considérablement la durée de vie de la batterie
Pertinence politique	Faible : Les mesures de surveillance et de maintenance des batteries relèvent de la sphère des exploitants de flottes d'autobus électriques et ne peuvent pas être réglementées au niveau central.

Les exigences en matière de durabilité des autobus électriques et des batteries peuvent être précisées lors de la conception et prises en compte dans les spécifications de l'appel d'offres, comme suggéré dans la Mesure n°3. Par ailleurs, une bonne surveillance et un bon entretien des batteries ont également une grande influence sur la durée de vie totale des batteries et contribuent généralement à prolonger la première durée de vie bien au-delà des périodes de garantie accordées.

Ce potentiel peut être exploité en surveillant les données de fonctionnement (voir Mesure n°7) et en utilisant ces informations pour des diagnostics de batterie sophistiqués. Sur la base de ces efforts axés sur les données, diverses mesures peuvent être prises pour prolonger la durée de vie des batteries, notamment la planification et la conduite de l'équilibrage des cellules et l'échange de certains modèles ou cellules.

Lors de la planification de la surveillance et de la maintenance des batteries, il est important d'opter pour une structure organisationnelle qui incite à un service de haute qualité et qui encourage le prestataire de services à favoriser une longue durée de vie des batteries (sans compromettre la sécurité et la qualité). Cet objectif peut être atteint par le biais de l'une des options suivantes :

- L'e-bus en tant que service : Les opérateurs ne sont pas propriétaires des bus électriques et des batteries mais ont un accord contractuel avec un fournisseur qui se charge également des batteries. Dans un tel contexte, il est généralement également de l'intérêt du fournisseur que les bus électriques et les batteries soient minutieusement suivis et entretenus.
- Accords spéciaux de surveillance et d'entretien : Les opérateurs peuvent choisir de faire appel à un tiers spécialisé dans le diagnostic et la maintenance des batteries. Les dispositions contractuelles devraient être adaptées de manière à ce que le prestataire de services retire des avantages concrets d'un bon service, notamment en prolongeant la durée de vie<sup>13</sup> des batteries. Il convient de noter que la plus grande partie de la surveillance et de l'entretien peut s'exécuter à distance grâce à l'accès aux données de fonctionnement de la batterie. En conséquence, l'accès à ces données constitue une condition préalable importante (voir Mesure n°7).

<sup>12</sup> Enel X 2023.

<sup>13</sup> Bien que ces services soient également proposés par de nombreux fournisseurs d'autobus électriques, leur véritable intérêt réside souvent dans la vente d'autobus et peut être moins prononcé dans l'atteinte de durées de vie nettement supérieures aux périodes de garantie contractuellement convenues.

### Encadré n°8 : Exemple de bonne pratique – L’e-bus sous forme de service démontré en Italie

Dans les villes italiennes de Rome, Turin et Iglesias, un projet est actuellement en cours pour promouvoir l’électrification des transports publics grâce à un modèle de bus électrique sous forme de service (Enel X 2023). À travers un partenariat privé, les autorités de la ville ont externalisé la mise en place d’un service d’e-bus. Cela comprend des études de faisabilité et de coûts/bénéfices, des options de financement pour la fourniture de véhicules, l’installation d’infrastructures de recharge, l’opérationnalisation d’itinéraires et l’entretien des véhicules et des batteries. La numérisation des systèmes de billetterie/tickets et l’utilisation de l’analyse des données pour se focaliser sur la décongestion des itinéraires les plus fréquentés garantissent aux citoyens une meilleure expérience des transports publics. Bien que cela soit évidemment profitable au partenaire privé, les autorités municipales peuvent s’assurer, grâce à la privatisation, que les experts en électromobilité sont impliqués dans la transition du secteur des transports. Avec un plan de développement des capacités locales intégré, l’expertise peut être développée au fil du temps pour garantir la continuité des opérations lorsque le contrat avec le fournisseur de services privé expire, et que les bus électriques sont restitués au bureau local des transports publics (Sustainable Bus 2022).

### 3.9 Mesure n°9 : Accords de mise hors service basés sur REP

Quoi ?	Veiller à ce que les coûts et les efforts d’une saine gestion de fin de vie ne retombent pas sur les municipalités, les sociétés de transport en commun ou les exploitants d’autobus. La responsabilité élargie des producteurs garantit que les efforts et les coûts d’une bonne gestion de fin de vie doivent être couverts par les producteurs.
Pourquoi ?	Une bonne gestion de fin de vie des batteries peut être associée à des coûts additionnels. En outre, la réalisation de bonnes solutions de fin de vie pour les batteries requiert un savoir-faire spécifique qui ne fait pas partie des compétences de base des exploitants d’e-bus.
Pertinence politique	Haute : La responsabilité élargie des producteurs est mieux présentée par le biais de systèmes obligatoires à l’échelle nationale qui obligent les producteurs et les importateurs à prendre les mesures appropriées pour reprendre et gérer de manière rationnelle les déchets découlant de leurs produits.

Comme indiqué dans la section 2.2, la responsabilité élargie du producteur représente un moyen essentiel pour garantir que les responsabilités et les coûts liés à la bonne gestion de la fin de vie des batteries ne reposent pas sur les utilisateurs de ces batteries. Ceci est particulièrement pertinent, car une bonne gestion de la fin de vie des batteries de bus électriques peut être associée à des coûts nets, ce qui – pour de nombreux opérateurs de flottes d’autobus – constituera un changement de paradigme par rapport à une situation où les anciens bus pourraient toujours être vendus pour un prix positif (voir également la section 2.3.3).

Dans les pays où les systèmes de REP pour les batteries de véhicules électriques sont déjà développés à maturité, les sociétés de transport en commun et les opérateurs peuvent se référer aux obligations légales existantes des producteurs et exiger que des dispositions adéquates soient prises pour que les batteries soient recueillies et gérées par des moyens fournis et financés par le producteur ou l'importateur (des e-bus)<sup>14</sup>.

Bien que la même approche puisse être adoptée dans les pays sans systèmes de REP existants en spécifiant les responsabilités de fin de vie dans les dossiers d'appel d'offres et les cahiers des charges, il existe un défi majeur lié au fait qu'il s'écoule plusieurs années entre l'achat d'e-bus et la mise hors service : Alors que l'acquisition requiert des critères clairement vérifiables, il est difficile de vérifier si un accord de reprise et de recyclage aura encore des chances de se concrétiser dans 5 ou 10 ans<sup>15</sup>.

En conséquent, le moyen le plus fiable de s'assurer que la gestion de la fin de vie est prise en charge par le producteur est une stratégie d'acquisition qui combine a) l'achat d'autobus, b) la maintenance et c) une bonne gestion de l'équipement en fin de vie. En particulier, l'élément de maintenance garantit que les partenaires contractuels soient présents en matière de mise hors service de la batterie. Dans tous les cas, il est important que la responsabilité d'une bonne gestion de la fin de vie soit clairement précisée dans les accords contractuels – idéalement avec des exigences telles que celles proposées dans la section 3.11.

---

<sup>14</sup> De plus, les dossiers d'appel d'offres et les cahiers des charges peuvent préciser davantage les indicateurs de performance clés pour la gestion de la fin de vie, comme suggéré dans l'encadré n°9.

<sup>15</sup> Les systèmes de REP bien organisés disposent de mécanismes intégrés à cet égard. Dans de tels systèmes, les obligations des producteurs sont gérées par l'entremise d'une ou de plusieurs organisations de responsabilité du producteur (PRO) enregistrées qui conservent des fonds de réserve pour les futures responsabilités de collecte et de recyclage.



## Encadré n°9 : Projet de texte d’approvisionnement sur la mise hors service des batteries basée sur la REP

Le fournisseur assume l’entière responsabilité de la gestion de la fin de vie des batteries après leur première utilisation dans les e-bus.

La responsabilité sera engagée une fois que le propriétaire de l’e-bus et le fournisseur ou un tiers en charge de la maintenance de la batterie concluront conjointement qu’une batterie ne remplit plus sa fonction prévue et ne peut plus être restaurée par des mesures de maintenance conventionnelles (décision de mise hors service).

Dès qu’une ou plusieurs batteries d’e-bus ne peuvent plus remplir leurs fonctions prévues, elles doivent être extraites des véhicules et gérées de manière sûre et responsable conformément aux exigences spécifiées dans la section [lien vers la section correspondante, par ex. tel que spécifié dans l’encadré n°11].

Les responsabilités du fournisseur englobent tous les aspects logistiques, administratifs et financiers liés à ces tâches et doivent être menées en temps opportun et dans les [X] semaines après avoir été informé de la décision de la mise hors service. Les responsabilités du fournisseur peuvent être assumées par l’intermédiaire d’un tiers désigné par le fournisseur, ce qui présuppose que cette entité puisse prouver sa capacité à mener à bien toutes les tâches connexes avec diligence et conformément aux dispositions données.

Le fournisseur doit apporter la preuve qu’il dispose de capacités suffisantes pour satisfaire à cette exigence en [nom de la ville et du pays] et garantir la disponibilité pendant au moins [12] ans à compter de la date de mise en service des e-bus et des batteries. Cette preuve peut se référer à des dispositions adéquates prises auprès d’une Organisation de responsabilité du producteur pour les batteries de véhicules qui est enregistrée en tant que telle en [nom du pays].

### 3.10 Mesure n°10 : Encouragement à la réutilisation des batteries

Quoi ?	Encourager les conceptions de batteries et les modèles commerciaux qui anticipent et prévoient la réutilisation/la réaffectation des batteries après la première application dans les bus électriques.
Pourquoi ?	De nombreuses batteries vieillissantes qui ne conviennent plus à l’alimentation des bus électriques peuvent encore être utilisées dans d’autres applications. Une telle réutilisation ou réaffectation prolonge considérablement la durée de vie des batteries.
Pertinence politique	Moyenne : Les décideurs politiques peuvent encourager les stratégies de réutilisation/réaffectation. Cet objectif peut s’atteindre grâce à des politiques de REP (voir Mesure n°9) qui entraînent des objectifs contraignants pour la réutilisation et la réaffectation des batteries.

La Mesure n°9 sur les accords de mise hors service peut également être étendue de manière à ce que les fournisseurs soient encouragés à planifier déjà des applications de seconde vie pour les batteries en phase de production. Bien que toutes les considérations sur la circularité des batteries d’e-bus parlent d’applications de seconde ou même de troisième vie par le biais de la réutilisation/réaffectation (voir section 2.4), il existe divers défis qui vont au-delà de l’aspect des données de diagnostic de batterie couvert dans la Mesure n°7 :

- Les systèmes de gestion de la température, le boîtier de protection et le BMS sont conçus pour répondre aux besoins des e-bus. Les applications fixes requièrent différents aspects de conception.
- Bien qu'il soit théoriquement possible de construire des batteries répondant aux critères de conception pour les applications mobiles et fixes (« conception pour la réutilisation »), la deuxième phase de vie se situe dans quelques années. Une conception en vue de la réutilisation n'apportera des avantages tangibles au producteur que si un nombre suffisant de ces batteries est donné pour leur réutilisation/réaffectation dans une zone géographique définie (par exemple, un pays), dans un délai raisonnable et à des entités qui coopèrent avec le producteur.

En raison de diverses incertitudes sur les futurs marchés de la seconde vie des batteries, ainsi que de l'absence de normes claires de conception pour la réutilisation, seules quelques entreprises adoptent actuellement de telles stratégies de conception pour la réutilisation<sup>16</sup>.

Dans le domaine des achats, il peut être envisagé d'encourager une telle conception en vue de la réutilisation. Plus précisément, les dossiers d'appel d'offres peuvent tenir compte de cet aspect comme un critère non obligatoire, où les soumissionnaires qui peuvent démontrer de manière crédible qu'ils suivent une stratégie de conception pour la réutilisation reçoivent des crédits supplémentaires et obtiennent une meilleure note par rapport aux soumissionnaires qui ne répondent pas de manière convaincante à cet aspect.

Il est recommandé d'aborder cet aspect étroitement lié aux exigences relatives aux accords de mise hors service basés sur l'EPR/REP (Mesure n°9) et la bonne gestion de la fin de vie des batteries (Mesure n°11).

### Encadré n°10: Projet de texte d'approvisionnement pour encourager la réutilisation des batteries

Les fournisseurs sont encouragés à concevoir des batteries de bus électriques de manière à ce qu'elles puissent être réutilisées/réaffectées après leur première vie en tant que batteries de bus électriques, et à intégrer la réutilisation/la réaffectation dans leur modèle commercial. Les stratégies de conception peuvent impliquer (mais sans s'y limiter) des blocs-batteries pouvant être transférés à d'autres applications de stockage d'énergie sans modification physique, et l'utilisation de systèmes de gestion de batteries permettant l'interopérabilité avec une ou plusieurs applications fixes courantes. Les modèles commerciaux connexes pourraient impliquer (mais sans s'y limiter) des efforts pour reprendre les batteries usagées dans l'intention de les déployer dans des applications de seconde vie telles que le stockage d'énergie fixe.

Le fournisseur doit indiquer s'il suit une ou plusieurs de ces approches et fournir des explications et des concepts sous-jacents, notamment des liens vers des documents et des sites Web pertinents. En outre, le fournisseur doit préciser si ces initiatives

- Sont applicables aux e-bus et aux batteries proposés dans le cadre de cet appel d'offres
- Sont mises en œuvre ou prévues pour le cadre de [nom de la ville et/ou du pays]

<sup>16</sup> Entre autres, Volvo réalise des tests sur la réaffectation de batteries de bus électriques usagées pour des applications solaires fixes (Sustainable Bus/Bus durable 2020)

### 3.11 Mesure n°11 : Gestion rationnelle de la fin de vie de la batterie

Quoi ?	Spécification des indicateurs de performance clés pour veiller à ce que la gestion de la fin de vie des batteries soit réalisée conformément aux bonnes pratiques établies
Pourquoi ?	Pour s'assurer que les batteries utilisateurs et en fin de vie sont gérées en fonction des exigences ambitieuses d'économie circulaire
Pertinence politique	Haute : Une bonne gestion des batteries de véhicules électriques devrait idéalement être réglementée au niveau national de manière à ce que les processus et les voies d'élimination ne répondant pas aux normes soient interdits et effectivement sanctionnés

Une fois que les bus électriques ou leurs batteries sont mis hors service, il est important que cela soit effectué par des entités expérimentées opérant conformément aux bonnes pratiques internationales en matière de santé et de sécurité, de réutilisation et de recyclage. En gros, tout partenaire de gestion de fin de vie prenant en charge des batteries de bus électriques obsolètes doit garantir la séquence de transport, de test, de réutilisation et de recyclage en toute sécurité, comme indiqué dans l'illustration 4. Néanmoins, il n'existe pas de norme internationale définissant le recyclage rationnel des batteries Li-ion. En conséquence, les propriétaires de bus électriques visant à mettre hors service les batteries ne disposent d'aucune indication claire sur la manière d'identifier les bons opérateurs. On peut y remédier en décrivant les indicateurs de performance clés dans les documents contractuels pour les services de gestion de fin de vie (voir Encadré n°9).

Il est important de considérer que le recyclage à part entière des batteries Li-ion n'est établi, pour l'heure, que dans un nombre limité de pays en Asie (par exemple, la Chine, le Japon, la Corée du Sud), en Europe (par exemple, la Belgique, la Finlande, la France, l'Allemagne) et en Amérique du Nord (par exemple, les États-Unis) (Sojka et autres 2020). Alors que des procédés de recyclage sont également mis en place dans des pays tels que l'Inde, l'Afrique du Sud, le Costa Rica, la Colombie et le Brésil, de nombreuses régions du monde manquent encore de capacités connexes, de sorte qu'un bon recyclage dépendra des expéditions à travers les frontières internationales. Par conséquent, les contrats d'élimination des batteries usagées de véhicules peuvent, dans certains cas, s'appuyer sur des sociétés spécialisées dans la gestion internationale des déchets dangereux. Il convient de noter que ces contrats d'élimination des déchets peuvent être associés à des coûts nets (voir également la section 2.3.4). La Mesure n°9 livre quelques indications sur la manière dont ces coûts peuvent être délégués aux producteurs de bus et de batteries.

## Encadré n°11 : Projet d'indicateurs de performance de contrats sur la bonne gestion en fin de vie des batteries de véhicules

Les batteries doivent être ramassées, transportées et traitées conformément aux bonnes pratiques internationales dans tous les domaines connexes, notamment la sécurité incendie, la sécurité routière et la santé et la sécurité au travail.

Toutes les batteries doivent faire l'objet d'une évaluation de leur état de santé en vue de déterminer leur potentiel de réutilisation/réaffectation. Les batteries, les modules de batterie et les cellules de batterie jugés aptes à être réutilisés/réaffectés devront être utilisés en conséquence.

Les batteries, les modules de batterie et les cellules de batterie jugés impropres à la réutilisation/à la réaffectation doivent être recyclés. Le recyclage doit être effectué conformément aux bonnes pratiques internationales et en vue de prévenir efficacement les émissions de substances dangereuses, de récupérer les matières premières intégrées et de réduire les volumes de déchets à éliminer.

Les procédés de recyclage appliqués doivent atteindre au moins une efficacité de recyclage de 50 % (au moins 50 % de la masse de la batterie est recyclée) et permettre la récupération de cuivre, de cobalt et de nickel.

Toutes les étapes réalisées doivent être menées en pleine conformité avec les lois et réglementations nationales et internationales en vigueur.

L'opérateur qui reprend les batteries doit fournir la preuve du respect des exigences énoncées ci-dessus. À tout le moins, l'opérateur fournira la documentation suivante au client :

- Toutes les licences et tous les permis requis par la législation nationale (à fournir avant la reprise des batteries).
- Un certificat de bonne gestion de toutes les batteries reçues. Le certificat doit fournir des informations claires sur la localisation de chaque batterie ou de ses pièces et fractions, les processus de gestion appliqués et les liens avec les opérateurs en aval qui ont repris tout ou partie des matériaux générés (à fournir dans les 3 mois suivant la reprise des batteries).

Notes de bas de page :

- L'efficacité de recyclage de 50 % est une valeur tout à fait réalisable avec les bonnes pratiques actuelles. En Europe, des valeurs minimales obligatoires plus ambitieuses sont prévues (65 % d'ici la fin de 2025, 70 % d'ici la fin de 2030) et combinent également cela avec des niveaux de récupération minimaux spécifiques aux matériaux (par exemple, 50 % pour le lithium et 90 % pour le cobalt, le nickel et le cuivre fin 2027) (Conseil de l'Union européenne 2023).
- La récupération du cuivre, du cobalt et du nickel est bien établie dans les procédés actuels de recyclage des batteries Li-ion. À l'avenir, le lithium pourrait être ajouté à cette liste. Néanmoins, la récupération du lithium n'est pas encore une pratique courante.

## 4 Lectures suggérées

Les références suivantes sont considérées comme des éléments utiles pour planifier des mesures concernant la circularité des batteries de bus électriques.

	Type de publication	Contenu	Référence
<b>Recyclage industriel des batteries lithium-ion – Examen critique des voies de traitement métallurgiques</b>	Article scientifique	Aperçu détaillé des procédés de recyclage existants pour les batteries Li-ion et leurs spécifications	(Brückner et autres 2020)
<b>Étude comparative des procédés de recyclage des batteries lithium-ion</b>	Article rapport	Bon aperçu de la situation actuelle du recyclage des batteries Li-ion, notamment d’aspects tels que les substances dangereuses. Un bon aperçu également des principaux acteurs du recyclage dans le monde	(Sojka et autres 2020)
<b>Revue internationale sur l’écosystème de recyclage des batteries de véhicules électriques</b>	Rapport	Description des écosystèmes de recyclage des batteries dans divers pays, dont l’Allemagne, l’UE, la Californie (États-Unis), la Chine, le Japon et l’Afrique du Sud	(Bej et autres 2022)
<b>Recherche sur les systèmes techniques des bus électriques à batterie en Chine</b>	Rapport	Analyse des défis et des solutions pour l’achat d’e-bus, les installations de support, l’exploitation, la maintenance et la mise hors service en Chine	(Li et autres 2022)
<b>Écosystème des batteries : Un aperçu global, une analyse des lacunes dans le contexte indien et la voie à suivre pour le développement des écosystèmes</b>	Rapport	Analyse de nombreux aspects concernant les types de batteries, les applications, les normes, la réutilisation, le recyclage, etc. Principalement axée sur l’Inde, mais présente également une forte perspective mondiale	(Mandal et autres 2022)
<b>Durée de vie des batteries de seconde vie : Reste de la vie utile et analyse environnementale</b>	Article scientifique	Livre un aperçu des concepts de réutilisation/réaffectation des batteries	(Casals et autres 2019)
<b>Une étude sur la sécurité des batteries de seconde vie dans les systèmes de stockage d’énergie par batterie</b>	Rapport	Aperçu de l’état d’avancement de la réaffectation des batteries VE et considérations et normes de sécurité connexes	(Christensen et autres 2023)

Tableau 4 Aperçu de publications utiles pour une lecture plus approfondie

Source : Compilation propre

## Liste des références

- Aamodt, A.; Cory, K.; Coney, K. (2021): Electrifying transit: A guidebook for implementing cattery electric buses, 2021. Online available at <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76932.pdf>, last accessed on 13 Mar 2023. Figure 2 1: The 5-step waste hierarchy
- avicenne energy (2019): The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2018-2030, 2019. Online available at [https://rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2019/02/Keynote\\_2\\_AVICENNE\\_Christophe-Pillot.pdf](https://rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2019/02/Keynote_2_AVICENNE_Christophe-Pillot.pdf), last accessed on 13 Jul 2022.
- Ayeter, G. K.; Quansah, D. A.; Adjei, E. A. (2020): Towards zero vehicle emissions in Africa: A case study of Ghana. In: *Energy Policy* 143, p. 111606. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111606.
- Battery University (2021): Types of Lithium-ion. Online available at <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>, last updated on 22 Oct 2021, last accessed on 24 Nov 2022.
- Bej, S.; Zhimomi, T.; Hochfeld, C.; Riehle, E.-B.; Rather, Z.; Bradiya, M. R.; Maity, S. (2022): International review on Recycling Ecosystem of Electric Vehicle Batteries. New Delhi, 2022. Online available at <https://changing-transport.org/publications/review-recycling-ecosystem-electric-vehicle-batteries/>, last accessed on 8 Dec 2022.
- BMU & UBA (2011): Environmentally Sound Alternatives in Mobile Air Conditioning. Federal Ministry for the Environment, Nature Conversation and Nuclear Safety (BMU) and Federal Environment Agency (ed.), 2011. Online available at [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/factsheet\\_mobile\\_air\\_conditioning1.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/factsheet_mobile_air_conditioning1.pdf), last accessed on 7 Dec 2022.
- Brückner, L.; Frank, J.; Elwert, T. (2020): Industrial Recycling of Lithium-Ion Batteries—A Critical Review of Metallurgical Process Routes. In: *Metals* 10 (8), p. 1107. DOI: 10.3390/met10081107.
- California Code of Regulations (2022): Final Regulation Order, Section 1962.6, Title 13, California Code of Regulations, 2022. Online available at <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/barcu/regact/2022/accii/2acciifro1962.6.pdf>, last accessed on 19 Jan 2023.
- Casals, L. C.; García, B. A.; Canal, C. (2019): Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis. In: *Journal of Environmental Management* (232), pp. 354–363. Online available at <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.046>.
- Christensen, P. A.; Mrozik, W.; Wise, M. S. (2023): A Study on the Safety of Second-life Batteries in Battery Energy Storage Systems. Office for Product Safety & Standards (ed.), 2023. Online available at [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/1133213/safety-of-second-life-batteries-in-bess.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1133213/safety-of-second-life-batteries-in-bess.pdf), last accessed on 10 Feb 2023.
- Council of the European Union (2023): Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020. Interinstitutional File: 2020/0353(COD). Brussels.
- DERA (2022): Rohstoff Preismonitor Oktober 2022, 2022. Online available at [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Aktuelles/Monitore/2022/10-22/2022-10-preismonitor.pdf;jsessionid=2AEB7988FE0404ED8EC9B6190FFCF684.2\\_cid321?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Aktuelles/Monitore/2022/10-22/2022-10-preismonitor.pdf;jsessionid=2AEB7988FE0404ED8EC9B6190FFCF684.2_cid321?__blob=publicationFile&v=3), last accessed on 24 Nov 2022.
- Enel X (2023): Trasporto elettrico pubblico: le soluzioni | Enel X. Available online at <https://www.enelx.com/it/it/istituzioni/trasporto-elettrico/elettrificazione-urbana/trasporto-pubblico>, updated on 4/18/2023, checked on 4/18/2023.
- Electrive.net (1 Apr 2022): Gotion High-Tech baut LFP-Zellen mit 210 Wh/kg in Serie, 1 Apr 2022. Online available at <https://www.electrive.net/2022/04/01/gotion-high-tech-baut-lfp-zellen-mit-210-wh-kg-in-serie/>, last accessed on 30 Nov 2022.
- European Commission (2015): Circular Economy Package: Questions & Answers. Online available at [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO\\_15\\_6204](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO_15_6204), last accessed on 23 Nov 2022.
- European Commission (2020): Proposak for a Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020, 2020.
- European Union (2000): Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of-life vehicles, 2000.
- European Union (2006a): Directive 2006/40/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 relating to emissions from air-conditioning systems in motor vehicles and amending Council Directive 70/156/EEC, 2006. Online available at <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0040&from=EN>, last accessed on 8 Dec 2022.
- European Union (2006b): Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC, 2006.

- Fuller, R.; Landrigan, P. J.; Balakrishnan, K.; Bathan, G.; Bose-O'Reilly, S.; Brauer, M.; Caravanos, J.; Chiles, T.; Cohen, A.; Corra, L.; Cropper, M.; Ferraro, G.; Hanna, J. et al. (2022): Pollution and health: a progress update. In: *The Lancet. Planetary health* 6 (6), e535-e547. DOI: 10.1016/S2542-5196(22)00090-0.
- Gao, Z.; Lin, Z.; LaClair, T. J.; Liu, C.; Li, J.-M.; Birky, A. K.; Ward, J. (2017): Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. In: *Energy* 122, pp. 588–600. DOI: 10.1016/j.energy.2017.01.101.
- Henning, M.; Thomas, A. R.; Smyth, A. (2019): An Analysis of the Association between Changes in Ambient Temperature, Fuel Economy, and Vehicle Range for Battery Temperature, Fuel Economy, and Vehicle Range for Battery Electric and Fuel Cell Electric Buses. *Electric and Fuel Cell Electric Buses*, 2019. Online available at <https://www.sustainable-bus.com/wp-content/uploads/2019/12/electric-bus-range-cold-weather.pdf>, last accessed on 24 Nov 2022.
- Li, C.; Wu, Z.; Li, W.; Mu, K. (2022): Research on Technical Systems of Battery Electric Buses in China, 2022. Online available at <https://transition-china.org/wp-content/uploads/2022/12/Research-on-Technical-Systems-of-Battery-Electric-Buses-in-China-4.pdf>, last accessed on 10 Jan 2023.
- Mandal, A.; Dikshit, C.; Singha, H.; Parihar, A.; Tripathy, A.; Mohapatra, P. (2022): Battery Ecosystem: A Global Overview, Gap Analysis in Indian context, and Way Forward for Ecosystem Development. New Delhi, 2022. Online available at [https://changing-transport.org/wp-content/uploads/GIZ\\_Battery-ecosystem-report.pdf](https://changing-transport.org/wp-content/uploads/GIZ_Battery-ecosystem-report.pdf), last accessed on 30 Jan 2023.
- Manhart, A.; Betz, J.; Schleicher, T.; Hilbert, I.; Smit, R.; Jung, H.; Adogame, L.; Olagunju, I.; Clews, A.; Adegun, O. (2022): Management of End-of-life Li-ion Batteries through E-waste Compensation in Nigeria, 2022. Online available at [https://prevent-waste.net/wp-content/uploads/2022/05/Management-of-End-of-life-Li-ion-Batteries-through-E-waste-Compensation-in-Nigeria\\_Feasibility-Study\\_ECoN.pdf](https://prevent-waste.net/wp-content/uploads/2022/05/Management-of-End-of-life-Li-ion-Batteries-through-E-waste-Compensation-in-Nigeria_Feasibility-Study_ECoN.pdf), last accessed on 2 Dec 2022.
- MassTransit (2015): BYD Announces 12 year Battery Warranty. Online available at <https://www.masstransitmag.com/home/press-release/12058920/byd-motors-llc-byd-announces-12-year-battery-warranty>, last accessed on 13 Mar 2023.
- McGuffie, M. (2021): Driving the Shift to Electric Buses in Hot Climates - Battery Electric Buses in the Phoenix Metropolitan Area, 2021. Online available at [https://www.azta.org/images/uploads/event-files/Driving\\_the\\_Shift\\_to\\_Electric\\_Buses\\_in\\_Hot\\_Weather\\_Climates\\_VM\\_PDF.pdf](https://www.azta.org/images/uploads/event-files/Driving_the_Shift_to_Electric_Buses_in_Hot_Weather_Climates_VM_PDF.pdf), last accessed on 24 Nov 2022.
- Miaja, G. G.; Acevedo, H.; Leticia, C. J. (2022): Análisis del monitoreo de desempeño de autobuses eléctricos en la ciudad de México, 2022. Online available at <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/12/Mexico-hvs-ZEBRA-analisis-desempeno-buses-electricos-cdmx-dec22.pdf>, last accessed on 7 Dec 2022.
- Poworks (2020): A Comparison of NMC/NCA Lithium ion Battery and LFP Battery - Poworks. Available online at <https://poworks.com/a-comparison-of-nmc-nca-lithium-ion-battery-and-lfp-battery>, updated on 7/28/2022, checked on 4/18/2023.
- Prevent & StEP (2022): Practical Experiences with the Basel Convention: Challenges, Good Practice and Ways to Improve Transboundary Movements of E-Waste in Low and Middle Income countries, Discussion Paper, 2022. Online available at [https://prevent-waste.net/wp-content/uploads/2022/04/PREVENT-STEP\\_Practical\\_Experiences\\_Basel-Convention\\_discussion-paper-2022.pdf](https://prevent-waste.net/wp-content/uploads/2022/04/PREVENT-STEP_Practical_Experiences_Basel-Convention_discussion-paper-2022.pdf), last accessed on 7 Dec 2022.
- Report Linker (2021): Electric Bus Market, 2021. Online available at [https://www.reportlinker.com/p06180080/Electric-Bus-Market.html?utm\\_source=GNW](https://www.reportlinker.com/p06180080/Electric-Bus-Market.html?utm_source=GNW), last accessed on 24 Nov 2022.
- Slattery, M.; Dunn, J.; Kendall, A. (2021): Transportation of electric vehicle lithium-ion batteries at end-of-life: A literature review. In: *Resources, Conservation and Recycling* 174, p. 105755. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105755.
- Sojka, R.; Pan, Q.; Billmann, L. (2020): Comparative study of Lithium-ion battery recycling processes. ACCUREC Recycling GmbH (ed.), 2020. Online available at <https://accurec.de/wp-content/uploads/2021/04/Accurec-Comparative-study.pdf>, last accessed on 2 Dec 2022.
- Sustainable Bus (2020): Volvo Buses, the focus on reuse of bus batteries. A cooperation with Batteryloop. 14.09.2020, 2020. Online available at <https://www.sustainable-bus.com/news/reuse-bus-batteries-volvo-buses-batteryloop-stena-recycling/>, last accessed on 16 Feb 2023.
- UNECE (2022): United Nations Global Technical Regulation on In-vehicle Battery Durability for Electrified Vehicles, 2022. Online available at [https://unece.org/sites/default/files/2022-04/ECE\\_TRANS\\_180a22e.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2022-04/ECE_TRANS_180a22e.pdf), last accessed on 10 Jan 2023.
- Wunderlich-Pfeiffer, F. (12 Oct 2022): Die Revolution der Natrium-Akkus wird absehbar. In: *golem.de*. 2022, 12 Oct 2022. Online available at <https://www.golem.de/news/akkutechnik-die-revolution-der-natrium-akkus-wird-absehbar-2210-168344.html>, last accessed on 19 Oct 2022.
- Zhu, J.; Mathews, I.; Ren, D.; Li, W.; Cogswell, D.; Xing, B.; Sedlatschek, T.; Kantareddy, S. N. R.; Yi, M.; Gao, T.; Xia, Y.; Zhou, Q.; Wierzbicki, T. et al. (2021): End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries. In: *Cell Reports Physical Science* 2 (8), p. 100537. DOI: 10.1016/j.xcrp.2021.100537.

