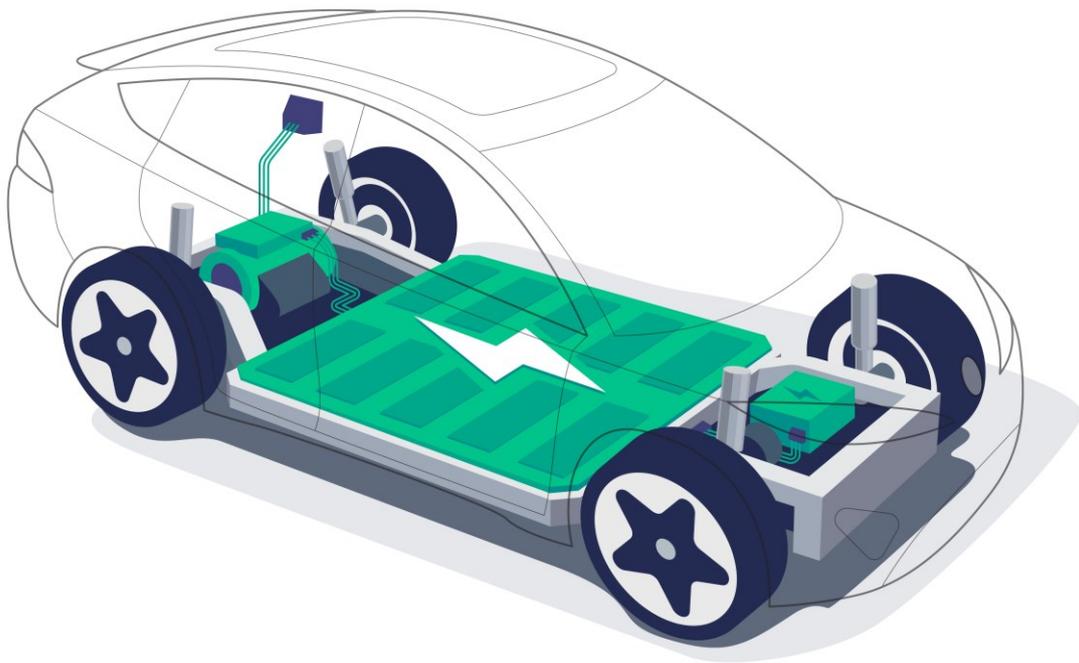


Document de référence, avril 2023

Les batteries de véhicules électriques



Auteur·e·s

Roberto Bianchetti, INFRAS

Hans-Jörg Althaus, INFRAS

Brian Cox, INFRAS

Lucas Truniger, INFRAS

Irina Meyer, INFRAS

Charles Marmy, Empa

Andrin Büchel, Empa

Martin Gasser, Empa

Roland Hischier, Empa

Patrick Wäger, Empa

Direction de projet OFEN

Alois Freidhof, Office fédéral de l'énergie (OFEN)

Comité d'expert·e·s

Dominic Bresser, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

Daniel Christen, Auto Recycling Schweiz

Giovanni D'Urbano, Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Jean-Marc Geiser, Office fédéral de l'énergie (OFEN)

Markus Kramis, EVTEC

Karin Mader, EPER/action de carême

Anette Michel, Association suisse des transports routiers

Stefan Oberholzer, Office fédéral de l'énergie (OFEN)

Jodok Reinhardt, Librec

Christoph Schreyer, Office fédéral de l'énergie (OFEN)

Andrea Vezzini, Haute école spécialisée bernoise

Cette étude a été réalisée à la demande de l'Office fédéral de l'énergie. Les auteur·e·s sont seul·e·s responsables de son contenu. Les informations qu'il contient sont basées sur l'état des connaissances au moment de l'élaboration du rapport (février 2023).

Table des matières

1.	Introduction	4
2.	Généralités	5
2.1	Les batteries lithium-ion	5
2.2	Marché mondial des batteries.....	10
2.3	Ecobilan de l'électromobilité et des batteries.....	15
2.4	Bases légales dans l'Union Européenne	19
3.	Extraction des matières premières	22
3.1	Vue d'ensemble	22
3.2	Impacts sociaux et environnementaux de l'extraction des matières premières	26
4.	Production des batteries	35
4.1	Production de batteries et de leurs cellules	35
4.2	Production des matériaux et composants.....	39
4.3	Consommation de matières premières et d'énergie	41
4.4	Impacts environnementaux de la production	42
5.	Phase d'utilisation des batteries	44
5.1	Dimensionnement des batteries	44
5.2	Longévité des batteries.....	47
5.3	Autonomie des batteries	51
5.4	Risques d'incendie des batteries	53
6.	Fin de vie des batteries	56
6.1	Viellissement et seconde vie des batteries.....	56
6.2	Recyclage des batteries.....	60
6.3	Procédés industriels utilisés dans le recyclage	65
6.4	Aspects économiques du recyclage	68
7.	Références	71
8.	Glossaire et abréviations	80

1. Introduction

La mobilité électrique peut contribuer de manière significative à la réalisation des objectifs de la politique énergétique et climatique suisse. En outre, la demande en véhicules électriques et donc en batteries - qui en est le composant le plus important - est appelée à croître au cours des prochaines années. L'enjeu des batteries de véhicules électriques est donc au cœur de la décarbonisation du secteur de la mobilité.

Le présent rapport répond à la nécessité de fournir des informations fiables concernant les batteries afin de contribuer à un débat basé sur les dernières connaissances scientifiques. Les principales questions concernant différents aspects de la batterie au long de son cycle de vie sont identifiées et traitées de manière factuelle. Les sources du contenu de ce rapport sont la littérature scientifique (articles à comité de lecture), la littérature grise (autres publications, rapports d'études du monde académique, de l'administration, des ONG ou du secteur privé) ainsi que la documentation technique et les annonces issues des acteurs de l'industrie, pour autant que ces documents répondent aux critères stricts de qualité et de transparence. De plus, le présent rapport a été soumis à l'examen d'un comité interdisciplinaire composé d'expert·e·s du secteur.

Le présent rapport s'adresse principalement aux actrices et acteurs du secteur de la mobilité, à l'administration publique ainsi qu'aux journalistes. Le rapport doit en outre servir de base à de futures mesures de communication de SuisseEnergie. Le document est structuré en modules traitant chacun un élément de la problématique de manière autonome. Ces sujets sont classés en chapitres selon les phases du cycle de vie de la batterie (cf. figure 1). Si nécessaire, d'autres subdivisions sont faites en fonction d'aspects techniques, écologiques, économiques, sécuritaires et sociaux d'un même sujet.

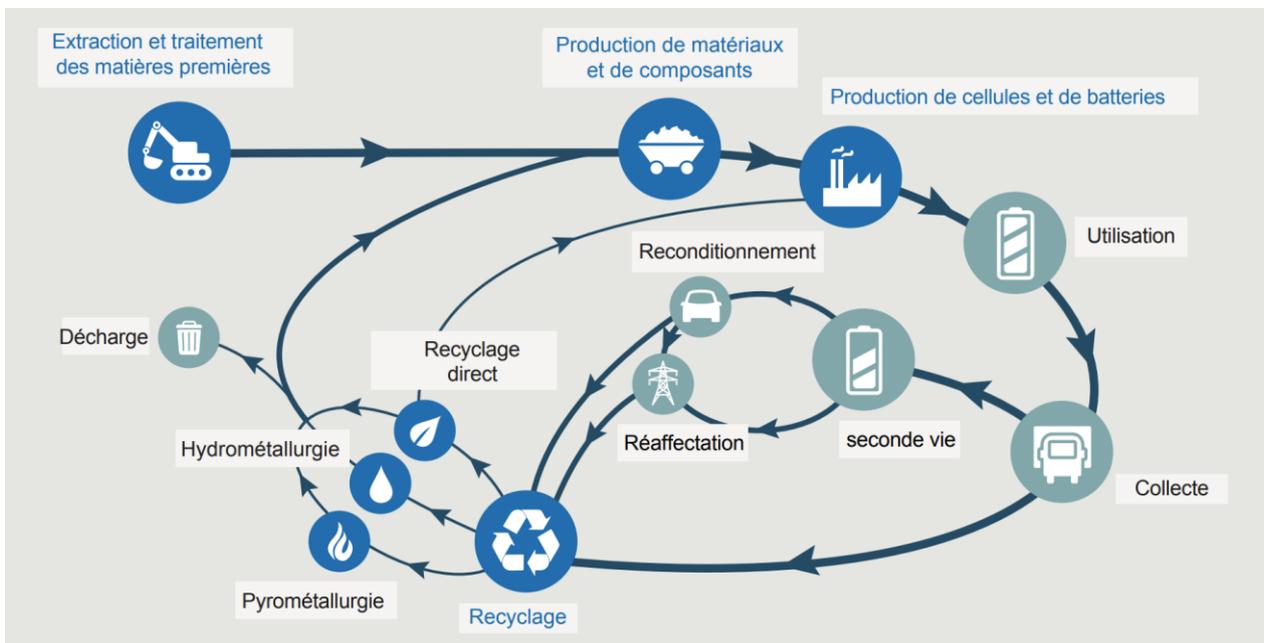


Figure 1: Représentation des différentes phases du cycle de vie d'une batterie (Agora Verkehrswende, 2021). Remarque : graphique adapté par INFRAS ("recyclage direct" au lieu de "recyclage direct de la cathode").

Le chapitre 2 traite de questions d'ordre général qui ne sont pas liées à une phase spécifique du cycle de vie des batteries. Les chapitres 3 à 6 couvrent respectivement les phases du cycle de vie suivantes : extraction des matières premières, production des cellules et de la batterie, utilisation, et fin de vie. Le chapitre 7 recense les références, et le chapitre 8 contient un glossaire des principaux termes et abréviations utilisés.

2. Généralités

2.1 Les batteries lithium-ion

De quoi est constituée une batterie lithium-ion et comment fonctionne-t-elle ?

Dans le présent rapport, le terme "batterie" désigne toujours l'ensemble du système, composé des cellules électrochimiques proprement dites, d'un module de gestion de la batterie, d'un dispositif de refroidissement et d'un emballage et des contacts et câblages électriques. Les termes tels que "capacité", "densité d'énergie" ou "puissance" se réfèrent donc, sauf indication contraire, à la batterie dans son ensemble. Nous nous limitons ici aux batteries lithium-ion rechargeables destinées à alimenter les véhicules électriques.

Les batteries sont le plus souvent modulaires. Plusieurs cellules sont connectées ensemble pour former des modules qui, avec un dispositif de refroidissement et éventuellement un module de gestion de batterie intégré, sont à leur tour combinés pour former une batterie. Les figures 2 et 3 ci-dessous montrent en détail la structure d'un module de batterie et d'une batterie dans son ensemble.

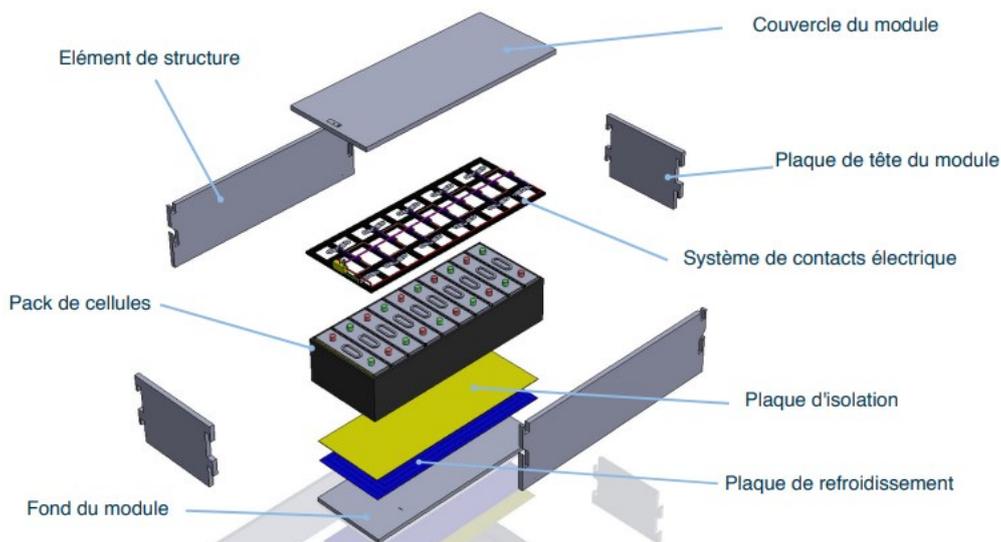


Figure 2: Structure d'un module de batterie (RWTH Aachen, 2022b).



Figure 3: Structure d'une batterie dans son ensemble (RWTH Aachen, 2022b).

Cependant, de plus en plus de batteries ne sont plus fabriquées à partir de modules, mais directement composées de cellules intégrées aux éléments structurels du véhicule. Cela permet de réduire le poids et le coût des véhicules électriques, mais augmente la difficulté du recyclage de la batterie, car celle-ci ne peut plus être retirée aussi facilement.

Le cœur d'une batterie est la cellule électrochimique. Elle se compose de deux électrodes et d'un électrolyte. L'électrode positive est appelée cathode, tandis que l'électrode négative est appelée anode. Les batteries lithium-ion se caractérisent par le fait que des ions de lithium (atomes de lithium chargés positivement) sont échangés entre les électrodes lors du processus de charge et de décharge. Par conséquent, l'anode et la cathode doivent toutes deux être en mesure d'emmagasiner des ions de lithium. Un séparateur qui laisse passer les ions de lithium, mais pas les électrons, est placé entre les deux électrodes. L'électrolyte permet aux ions de lithium de passer de la cathode à l'anode lors de la charge et de l'anode à la cathode lors de la décharge.

La figure 4 illustre schématiquement la structure d'une cellule ainsi que ses formes les plus courantes. Dans le cas des cellules cylindriques, des rubans de cellules sont enroulés et emballés dans une gaine rigide, généralement en acier. Dans le cas des cellules de type "Pouch" ou prismatiques, plusieurs couches de cellules sont empilées les unes sur les autres. La principale différence entre les cellules "Pouch" et les cellules prismatiques réside dans le fait que ces dernières sont placées dans une coque rigide, tandis que les cellules "Pouch" sont emballées dans des membranes étanches.

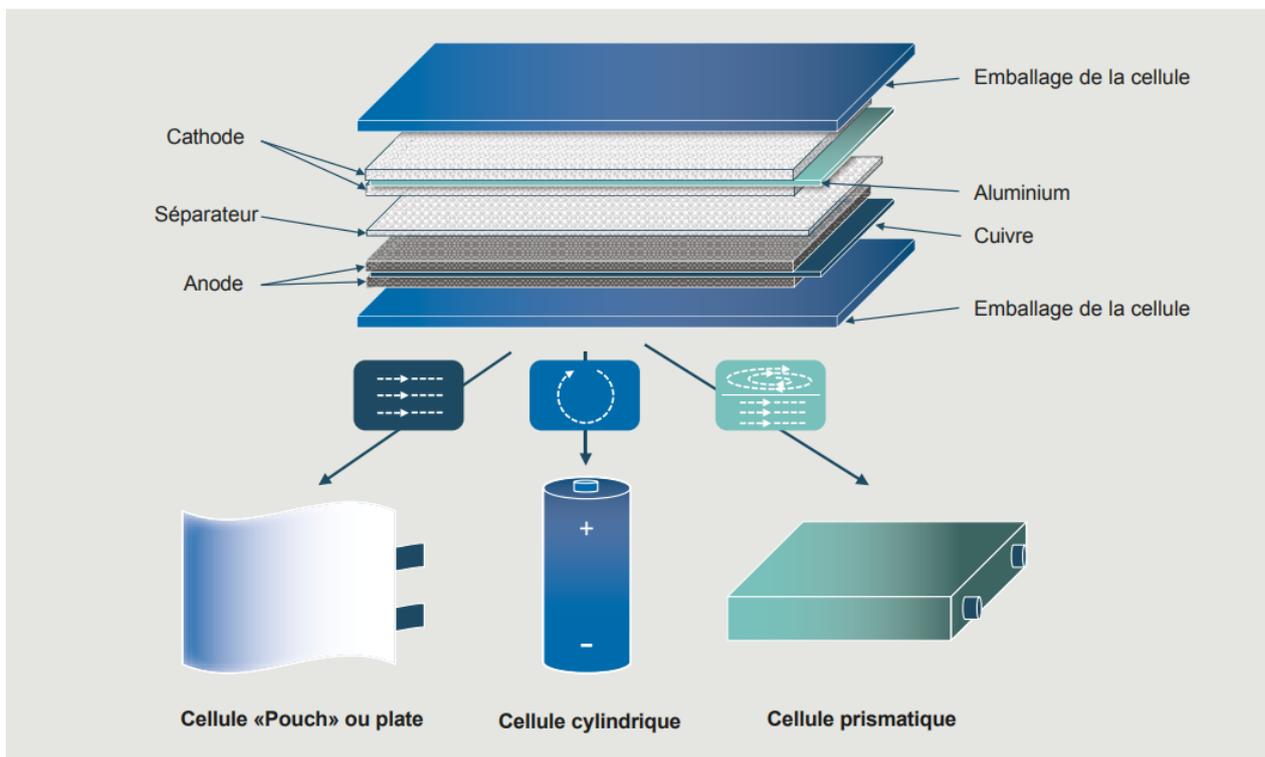


Figure 4: Illustration schématique de la structure d'une cellule de batterie lithium-ion (Agora Verkehrswende, 2021).

Le couple de matériaux que forment l'anode et la cathode détermine en grande partie les propriétés des cellules et donc de la batterie :

- L'anode des batteries lithium-ion est généralement en graphite. Cependant, il est également possible d'utiliser du titanate de lithium ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$; LTO), ce qui augmente la densité de puissance, au prix d'une réduction de la tension de la cellule et la densité d'énergie. Du fait de cette caractéristique, les batteries LTO peuvent stocker moins d'énergie par kilogramme que les batteries à anodes de graphite, mais se chargent et se déchargent très rapidement.
- Il existe de nombreux types de cathodes pour les batteries lithium-ion. Les principaux matériaux utilisés sont les oxydes de lithium-nickel-manganèse-cobalt (NMC), les oxydes de lithium-nickel-cobalt-aluminium (NCA) et le phosphate de lithium et de fer (LFP). Les cathodes NMC et NCA peuvent contenir des proportions très variables des différents métaux qui les composent.
- Les électrolytes les plus courants sont des solutions organiques de sels de lithium. Une alternative répandue consiste à utiliser des polymères perméables aux ions lithium dans les batteries lithium-polymère. Il existe aussi des électrolytes céramiques solides (d'oxydes ou de sulfures). Cette technologie est actuellement en cours de développement, notamment en combinaison avec du lithium métallique. Dans ce dernier cas, on parle de batteries solides.

Le tableau 1 ci-dessous indique la quantité de métaux contenus dans les batteries les plus répandues. Chaque batterie contient plusieurs kilogrammes de métaux qui, dans l'idéal, peuvent être récupérés par recyclage (voir chapitre 6.2).

Tableau 1: Caractéristiques et quantités des matériaux dans une batterie moyenne de différents types.

Élément	Masse moyenne par batterie ¹				
	NMC811	NMC532	NMC622	NCA+	LFP
Chimie de la cathode (Type de batterie)	(Nickel 80%, Manganèse 10%, Cobalt 10%)	(Nickel 50%, Manganèse 30%, Cobalt 20%)	(Nickel 60%, Manganèse 20%, Cobalt 20%)	Oxide de Nickel-Cobalt -Aluminium	Phosphate de fer lithié
Lithium Li	5 kg	7 kg	6 kg	6 kg	6 kg
Cobalt Co	5 kg	11 kg	11 kg	2 kg	0 kg
Nickel Ni	39 kg	28 kg	32 kg	43 kg	0 kg
Manganèse Mn	5 kg	16 kg	10 kg	0 kg	0 kg
Graphite C	45 kg	53 kg	50 kg	44 kg	66 kg
Aluminium Al	30 kg	35 kg	33 kg	30 kg	44 kg
Cuivre Cu	20 kg	20 kg	19 kg	17 kg	26 kg
Acier	20 kg	20 kg	19 kg	17 kg	26 kg
Fer Fe	0 kg	0 kg	0 kg	0 kg	41 kg
Masse de la batterie	169 kg	190 kg	180 kg	159 kg	209 kg

¹ Batterie de traction moyenne de 60 kWh de 2020. Les matériaux dans l'électrolyte, le liant, le refroidissement, le séparateur et le boîtier de la batterie ne sont pas inclus (Bhutada, 2022b).

Quelles types de batteries (chimies de cathode) existent aujourd'hui, quelles sont leurs caractéristiques et quelles sont les perspectives d'avenir ?

Les batteries de type NMC, NCA et LFP sont aujourd'hui les plus utilisées pour les véhicules électriques. Ces trois types de cathodes sont presque toujours combinés avec des anodes en graphite, à l'heure actuelle.

Batteries de type NMC et NCA

Les batteries de type NMC et NCA ont des caractéristiques similaires en termes de densité d'énergie et de puissance. Cependant, comme elles ont une densité d'énergie importante, elles présentent un risque accru de surchauffe et d'incendie si elles sont endommagées. Lors de l'utilisation de ces batteries, il est donc nécessaire d'avoir un dispositif de refroidissement performant.

En combinaison avec des anodes de graphite, on atteint aujourd'hui des densités d'énergie de l'ordre de 200 Wh/kg². Grâce à leur densité de puissance élevée, ces types de batteries peuvent aussi être chargés très rapidement. Dans les batteries actuelles de 800 V, l'énergie nécessaire pour parcourir 100 km peut être chargée en 5 minutes environ.

Batteries de type LFP

Les batteries de type LFP avec des anodes de graphite ont des densités d'énergie nettement plus faibles que les batteries NMC ou NCA. En revanche, elles sont thermiquement plus stables et leur gestion thermique est moins exigeante, ce qui permet d'avoir une plus grande densité de cellules dans la batterie. La densité d'énergie des batteries LFP, bien qu'inférieure à celle des batteries NMC ou NCA, atteint aujourd'hui, avec environ 160 Wh/kg, des valeurs satisfaisantes pour l'électromobilité. Les batteries LFP sont également parfaitement adaptées à la charge rapide. Le contenu en énergie utilisable et la puissance de toutes les batteries diminuent lorsque la température baisse, mais cet effet est plus prononcé pour les batteries LFP.

Batteries de type LMO et LCO

D'autres matériaux de cathode, comme le dioxyde de manganèse-lithium (LMO ou LMS) ou le dioxyde de cobalt et de lithium (LCO ou LiCoO₂), ne sont pratiquement plus utilisés pour les batteries de véhicules électriques. La batterie d'origine de la Nissan Leaf était en effet de type LMO, mais les véhicules électriques modernes nécessitent des batteries ayant une densité d'énergie plus élevée. La batterie de type LMO ne contient pas de cobalt, un élément coûteux, et est donc potentiellement moins chère, mais sa densité d'énergie est plus faible. La batterie LCO, en revanche, présente une densité d'énergie élevée, mais est principalement utilisée dans les appareils électroniques portables tels que les smartphones. Elle a toutefois une longévité relativement faible et est relativement chère. Ces deux matériaux de cathode ne seront probablement pas très utilisés à l'avenir pour les véhicules électriques.

Batteries de type LMNO

En revanche, les cathodes à oxyde de manganèse et de nickel (LMNO) pourraient être utilisées dans la mobilité électrique. Il s'agit de cathodes sans cobalt qui présentent tout de même une densité d'énergie élevée. Les coûts des matériaux de ces batteries pourraient être plus faibles en raison de l'absence de cobalt, dont les problèmes liés à l'extraction pourraient aussi être évités. Toutefois, la résistance au cyclage (diminution de la capacité au fil des cycles de charge et de décharge) de ces batteries est encore trop faible pour une utilisation dans la mobilité électrique.

Batteries de type LTO

Les cathodes NMC, mais surtout les cathodes LFP, souvent utilisées en combinaison avec des anodes lithium-oxyde de titane (LTO). On parle alors de batteries LTO. Celles-ci ne sont toutefois pratiquement pas utilisées pour la mobilité électrique individuelle, car leur densité d'énergie est trop faible et leur prix au kWh stocké relativement élevé. Les quelque 5% de parts de marché des batteries LTO concernent surtout le secteur des bus, en raison de leur bonne capacité de charge rapide.

² Cette valeur s'applique à la batterie dans son ensemble. La densité d'énergie des cellules (sans la gestion de la batterie, le refroidissement, les contacts, etc.) est supérieure d'environ 50%.

Batteries avec anodes de silicium

Le silicium est une alternative aux matériaux d'anode les plus courants. En effet, les anodes de silicium peuvent absorber 9 fois plus d'ions lithium et d'électrons par unité masse que le graphite, ce qui permet d'atteindre une densité d'énergie bien plus élevée. Malheureusement, le silicium se dilate lorsqu'il absorbe des ions de lithium, ce qui affecte négativement la longévité de la batterie. Si ce problème parvient à être résolu, les batteries à anode de silicium présenteraient une densité d'énergie supérieure d'environ 50% à celle d'une batterie équivalente à anode de graphite. Un autre avantage d'un tel développement serait de substituer le graphite, qui est considéré comme un matériau critique. Certaines batteries commerciales actuelles contiennent jusqu'à 5% de silicium.

Batteries au sodium

Les batteries au sodium utilisent du sodium au lieu du lithium. Le sodium est disponible en abondance et bon marché comme matière première (il est notamment présent dans le sel de cuisine). Ces batteries permettent l'utilisation d'autres types d'électrolyte, et peuvent ainsi fonctionner de manière fiable à des températures très basses. La longévité limitée des batteries au sodium et surtout leur faible densité d'énergie empêchent toutefois leur utilisation à grande échelle à l'heure actuelle. Ces batteries sont actuellement développées, entre autres, par CATL, l'un des plus grands fabricants de batteries au monde. En 2021, CATL les a introduites sur le marché et prévoit désormais de mettre en place une filière pour leur production à l'échelle industrielle d'ici fin 2023.

Les résultats de recherche actuellement menées aux États-Unis sur la composition de nouveaux électrolytes ont démontré, lors de tests en laboratoire, une longévité nettement améliorée. Les principales incertitudes concernant l'adoption de batteries au sodium sont la marge de progression des processus de production de ces matériaux, ainsi que le temps nécessaire à la mise en place d'une filière de production à l'échelle industrielle (AIE, 2022).

Batteries solides

Le lithium métallique peut également être utilisé comme anode, par exemple en combinaison avec des cathodes de type NMC. Une combinaison avec du soufre ou même de l'air est également possible, ce qui réduirait le coût des matériaux. Dans tous ces cas de figure, on obtient une densité énergétique très élevée. Cependant, la grande réactivité du lithium exige une construction très sophistiquée de la batterie afin de garantir une longévité et une sécurité de fonctionnement élevées. Le lithium métallique en tant qu'anode est notamment intéressant pour la fabrication de batteries solides, car un électrolyte solide offre une meilleure protection contre les courts-circuits dans la cellule de la batterie. Ainsi, les batteries solides sont considérées comme très prometteuses en termes de densité énergétique, qui pourrait être supérieure d'environ 70% à celle des meilleures batteries lithium-ion actuelles (AIE, 2022).

La capacité mondiale actuelle de production de batteries solides est estimée à moins de 2 GWh par an, soit environ 0,5% du marché mondial, et se concentre sur les électrolytes de polymères. Cette capacité devrait augmenter considérablement, notamment avec l'arrivée sur le marché de batteries solides utilisant des électrolytes d'oxyde et de soufre entre 2025 et 2030. Le marché futur des batteries solides est estimée à 15-55 GWh en 2030 et à 40-120 GWh en 2035, ce qui reste faible (environ 1%) par rapport au marché total des batteries lithium-ion (1-6 TWh vers 2030 et de 2-8 TWh en 2035). En conséquence, les batteries lithium-ion à électrolyte liquide domineront toujours le marché à court et moyen terme et il faudra probablement un certain temps avant que les batteries solides ne deviennent une technologie majeure sur le marché mondial (Fraunhofer ISI, 2022).

2.2 Marché mondial des batteries

A quoi ressemble le marché mondial des batteries, et quelles sont ses évolutions attendues?

Les batteries utilisées actuellement pour la mobilité électrique sont presque exclusivement de type lithium-ion avec anodes de graphite et électrolyte liquide ou à base de gel. Concernant les cathodes, dont la composition chimique détermine en grande partie les propriétés de la batterie, divers matériaux sont utilisés. Les cathodes à base de nickel et de cobalt, comme les oxydes de lithium-nickel-manganèse-cobalt (NMC) et les oxydes de lithium-nickel-cobalt-aluminium (NCA), dominent le marché des batteries en 2021. La part globale de la demande de matériaux cathodiques s'élevait à environ 75% (voir figure 5 et figure 6). Ces deux dernières années, les batteries au phosphate de fer et de lithium (LFP) ont également connu une forte croissance, atteignant une part de 25% de la demande de matériaux cathodiques fin 2021. Selon certaines prévisions actuelles, ce chiffre pourrait même atteindre 40% à la fin de l'année 2022 (Bloomberg Hyperdrive, 2022), en raison notamment de la forte croissance de la mobilité électrique en Chine. Tesla et Mercedes utilisent également des batteries LFP sur certains modèles, tandis que Volkswagen et Ford ont annoncé l'utilisation de batteries LFP pour 2023 (IEA, 2022).

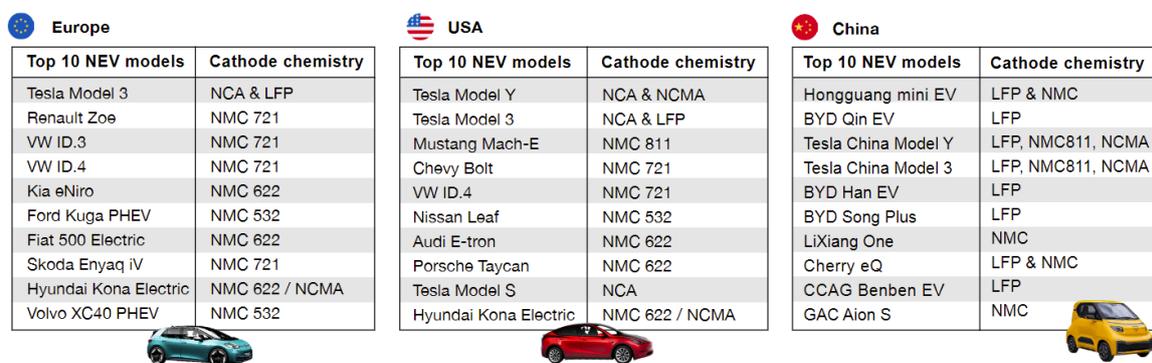


Figure 5: Aperçu des modèles de voitures électriques les plus vendus et leur type de cathode dans l'UE, aux États-Unis et en Chine en 2021 (Cobalt Institute, 2022).

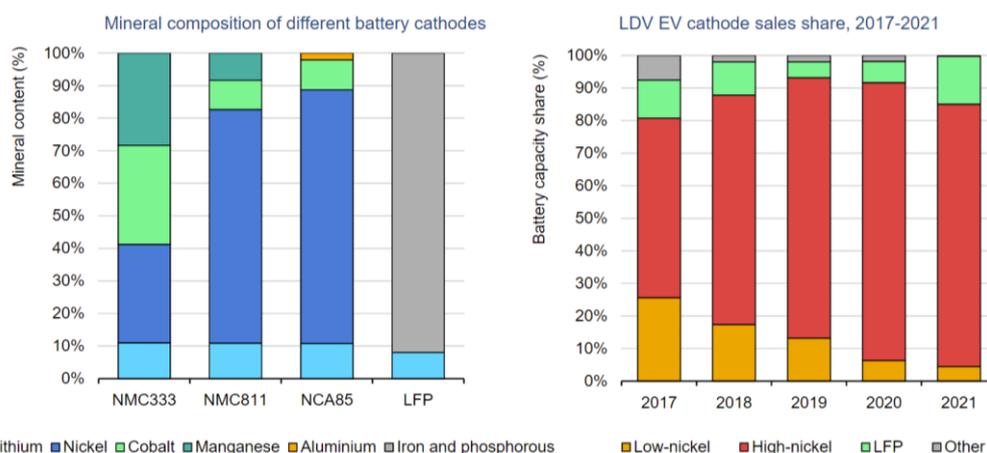


Figure 6: Composition en matériaux de différents types de cathodes (à gauche) et contribution de chaque type à la capacité globale des batteries (à droite) jusqu'en 2021 (AIE, 2022). LDV : light-duty vehicle (voitures particulières et véhicules utilitaires légers).

Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la demande mondiale de batteries pour véhicules électriques a doublé en 2021 par rapport à 2020, pour atteindre une capacité totale de 340 GWh (voir figure 7), ce qui représente plus des deux tiers de la production totale de batteries de toutes sortes (y compris les batteries stationnaires et les appareils électroniques). Cette évolution est principalement due aux ventes de voitures électriques. La Chine est le plus grand marché mondial avec près de 200 GWh. Viennent ensuite l'Europe avec environ 80 GWh et les États-Unis avec 40 GWh. Les voitures de tourisme représentent globalement plus de 80% de la demande en batteries pour véhicules électriques, suivies par

les bus avec environ 8%. En Suisse, la demande en batteries pour véhicules électriques s'élève à environ 2,8 GWh en 2022.³

En ce qui concerne la demande future en batteries, il existe dans la littérature de nombreuses prévisions émanant de divers instituts de recherche. Celles-ci indiquent que d'ici 2030, la demande de batteries lithium-ion sera multipliée par 10. L'AIE représente évolution de la demande par deux scénarios. Dans le scénario STEPS, la demande mondiale de batteries pour véhicules électriques atteindra 2,2 TWh d'ici 2030⁴, tandis que le scénario APS⁵ anticipe une demande de 3.5 TWh à la même année (voir Figure 8). Cela signifierait une multiplication de la production de 2021 par plus de six dans le scénario STEPS et par dix dans le scénario APS d'ici 2030. Pour parvenir à un tel niveau de production, il faudrait construire 52 gigafactories (d'une capacité de production de 35 GWh par an) supplémentaires dans le scénario STEPS, ou 90 gigafactories dans le scénario APS (voir également le chapitre 4.1). Cela impliquerait un accroissement massif de l'extraction de matières premières telles que le lithium, le cobalt ou le graphite.

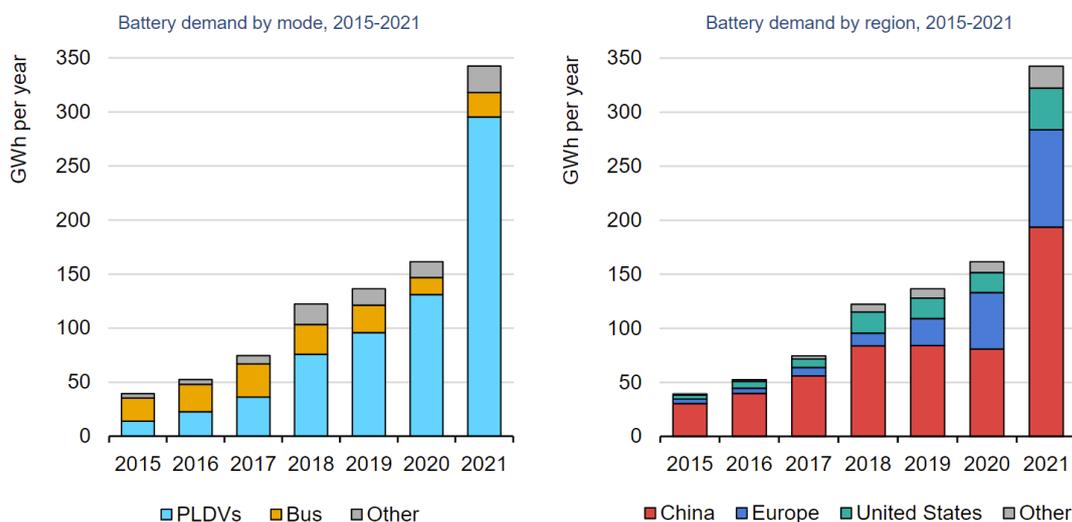


Figure 7: Demande mondiale de batteries de traction 2015–2021 (IEA, 2022). PLDV: passager light-duty vehicle (voiture de tourisme). Par région : il s'agit du pays dans lequel la voiture circule.

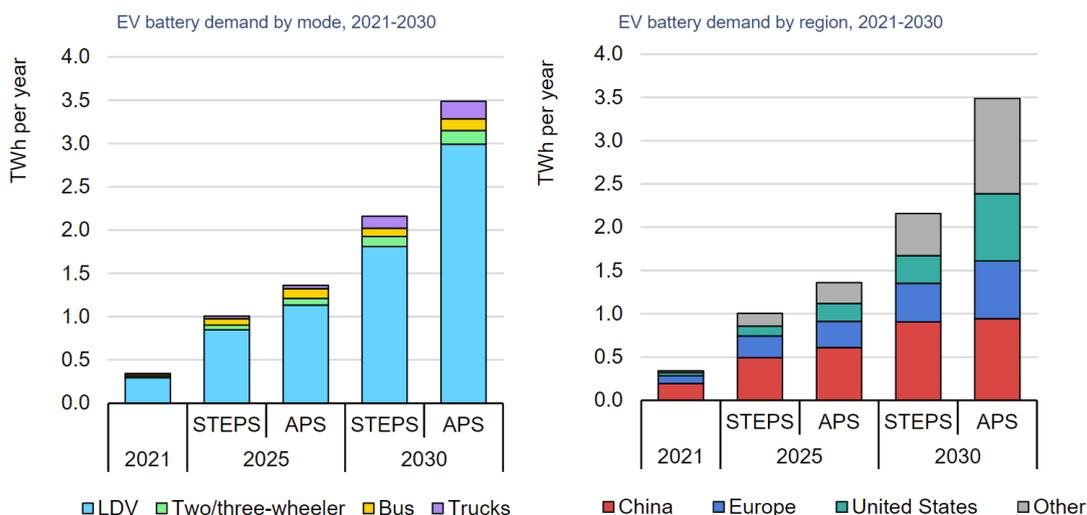


Figure 8: Demande mondiale de batteries de traction d'ici 2030 (IEA, 2022). STEPS = Stated Policies Scenario; APS = Announced Pledges Scenario; LDV = light-duty vehicle.

³ Estimation en considérant une capacité moyenne de 70,7 kWh par batterie. Seuls les véhicules électriques purs ont été pris en compte (les voitures hybrides plug-in ne sont pas pris en compte).

⁴ Le Stated Policies Scenario base ses prévisions sur des mesures et initiatives actuellement mises en oeuvre.

⁵ Le Announced Pledges Scenario se base sur les mesures et initiatives annoncées par les États et suppose que les engagements climatiques des gouvernements du monde entier seront mis en œuvre intégralement et dans les délais.

Les véhicules électriques sont actuellement plus chers à l'achat que les véhicules à combustion. Cependant, le prix des batteries a fortement baissé au cours de la dernière décennie en raison d'économies d'échelle et de densités énergétiques plus élevées. Cela rend les véhicules électriques plus attractifs (voir figure 9). La baisse des prix a toutefois ralenti au cours des dernières années. Le point de parité des coûts, où l'achat d'un véhicule électrique moyen coûtera le même prix qu'un véhicule à combustion moyen, sera atteint vers 2026 (BloombergNEF, 2022b). Les véhicules des catégories compactes et citadines atteindront probablement le point de parité des prix plus tard.

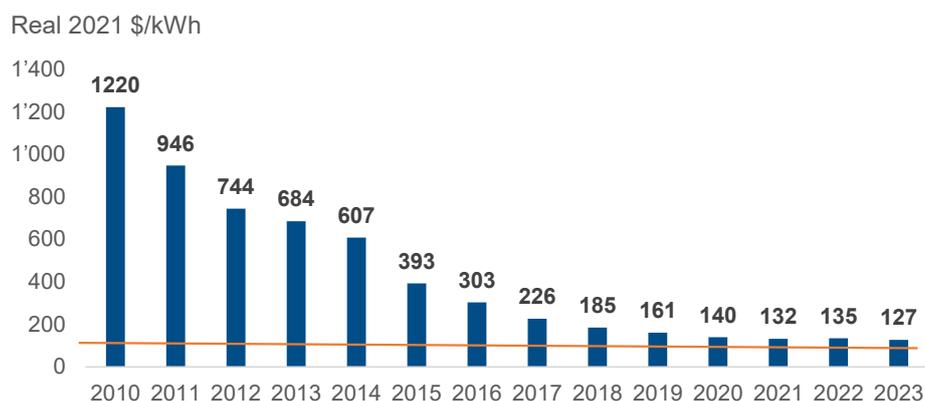


Figure 9: Prix moyens historiques et projetés par kWh pour les packs et les cellules de batteries (BloombergNEF, 2022b). Graphique INFRAS. La courbe orange indique le prix de la batterie à partir duquel les véhicules électriques atteignent la parité de prix avec les véhicules à combustion.

En 2021, les prix des cellules de batterie ont diminué jusqu'à environ 100 \$/kWh (cf. figure 10). Pour une batterie complète, cette valeur atteint environ 132 \$/kWh (Bhutada, 2022a). En raison de la hausse considérable des prix de l'énergie et des matières premières, les prix des cellules ont de nouveau augmenté en avril 2022 pour atteindre 145-175 \$/kWh. C'est la première fois depuis 2010 que ce prix a augmenté (electrive, 2022), entraînant une hausse du prix des batteries d'environ 2% en 2022 (BloombergNEF, 2022b).

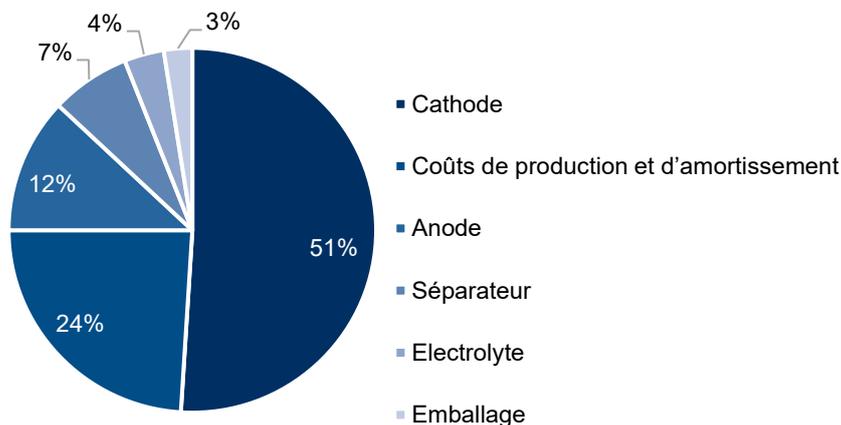


Figure 10: Répartition du prix des cellules par composant. Graphique INFRAS. Source : Bhutada (2022a).

La forte demande de batteries pour véhicules électriques entraîne une augmentation considérable de la demande de métaux nécessaires à leur fabrication (voir Figure 11, Figure 12 et Figure 13). Entre début 2021 et mai 2022, les prix du lithium ont été multipliés par plus de sept, ceux du cobalt et du nickel doublés (les prix de ces deux derniers métaux ont ensuite nettement diminué jusqu'à fin 2022).



Figure 11: Valeur du cobalt, un matériau de batterie, sur le marché des matières premières de 2017 à 2022, en USD par tonne (Tradingeconomics, 2022a).

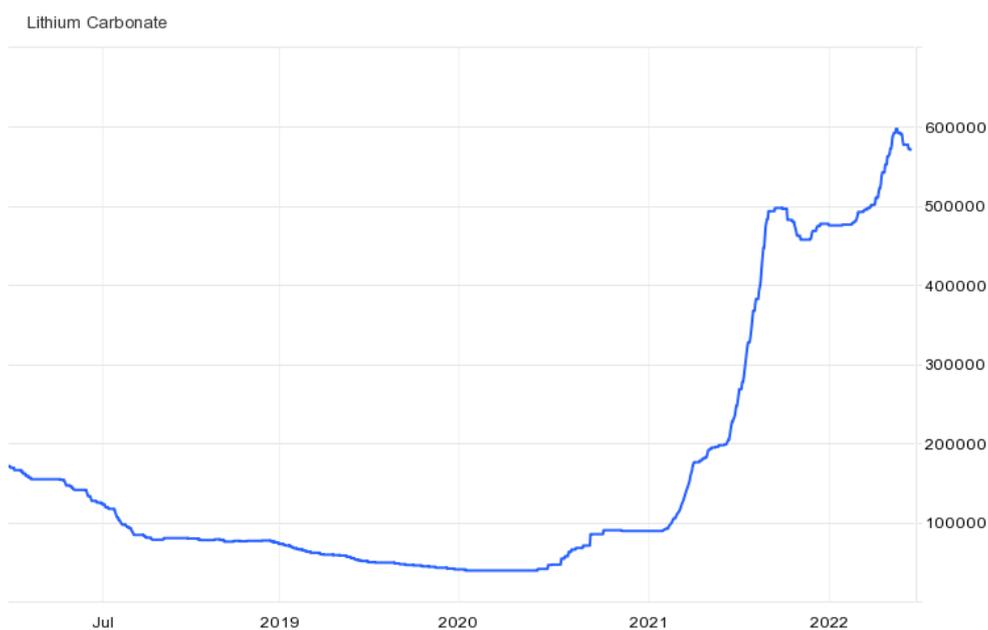


Figure 12: Valeur du carbonate de lithium, le précurseur du lithium utilisé dans la production de batterie, sur le marché des matières premières de 2017 à 2022, en CNY par tonne (Tradingeconomics, 2022b)

L'augmentation des prix des métaux utilisés dans les batteries est due à la combinaison d'une demande croissante de batteries, d'une pression accrue sur les chaînes d'approvisionnement, de préoccupations concernant une raréfaction des ressources et de la spéculation. Les pénuries d'approvisionnement en 2021 ont été fortement influencées par trois tendances : les problèmes de production causés par la pandémie de COVID 19, les inquiétudes concernant l'approvisionnement en nickel en provenance de Russie et le sous-investissement structurel dans de nouvelles capacités d'approvisionnement au cours des trois années précédant 2021, lorsque les prix des métaux étaient bas (AIE, 2022).



Figure 13: Valeur du nickel, un matériau de batterie, sur le marché des matières premières de 2017 à 2022, en USD par tonne (Tradingeconomics, 2022c).

Plusieurs facteurs expliquent que le prix des batteries soit resté en partie dissocié de la hausse des prix des matières premières. La hausse des prix a en effet incité les producteurs à changer de type de batterie. De nombreux constructeurs automobiles ont opté pour des chimies cathodiques moins chères et moins dépendantes du prix des matières premières, comme le LFP. De plus, ils se sont concentrés sur des types de batteries riches en nickel, comme le NMC811, ce qui a permis de considérablement réduire l'utilisation du cobalt (AIE, 2022). Ainsi, malgré des fluctuations temporaires, la tendance à la baisse des prix des batteries devrait se poursuivre à long terme. La figure 14 montre les projections pour les types de batteries utilisées dans les voitures individuelles jusqu'en 2030. La part des batteries LFP devrait nettement augmenter, pour atteindre 35% de part de marché dans le scénario "Base" et 60% dans le scénario "Constrained". En ce qui concerne les batteries de type NMC, ce sont surtout les variantes plus riches en nickel qui devraient s'imposer. D'autres types de batteries, tels que les batteries au sodium, LNMO, LNO et NMCA devraient prendre une place secondaire.

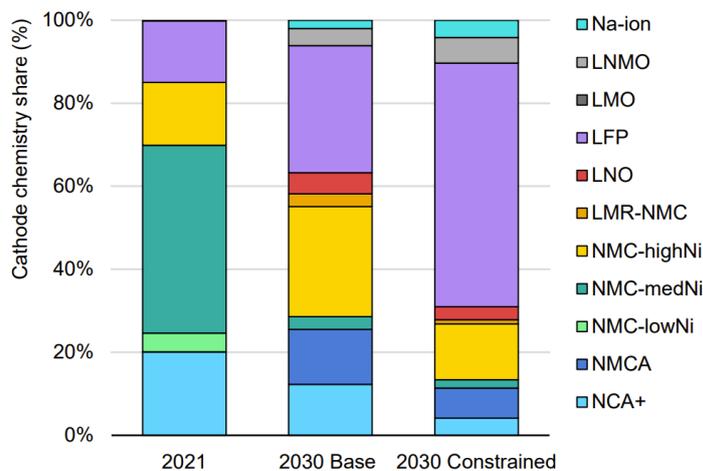


Figure 14: Projections des types de batteries utilisées dans les voitures particulières en 2021 et 2030. Les scénarios "Base" et "Constrained" correspondent à des proportions différentes des types de batteries en 2030. Le scénario "Base" correspond à la situation attendue si les prix actuels de chaque type restent constants. Le scénario "Constrained" reflète les conséquences d'une période prolongée de prix élevés des matières premières, associée à une réaction forte des constructeurs automobiles en réponse à ceux-ci. Remarques : NMC-highNi comprend NMC811 et NMC955, NMC-medNi comprend NMC532, NMC622 et NMC721, NMC-lowNi comprend NMC333.

2.3 Ecobilan de l'électromobilité et des batteries

Ecobilan global des voitures électriques : quel est l'impact des batteries ?

Le contenu de ce chapitre se base sur différentes études récentes issues de la littérature scientifique (Cox et al., 2018, 2020 ; Crenna et al., 2021 ; Dai et al., 2019), sur les résultats du "Carculator"⁶ développé par le PSI (Paul Scherrer Institut) ainsi que sur les nouveaux inventaires réalisés par le PSI sur mandat de l'OFEV pour les données du DETEC (OFEV, 2023). Afin de faciliter la lecture, chaque affirmation n'est pas associée individuellement à une référence, celles-ci étant fournies ici, en fin de paragraphe ou en notes de bas de page.

Production de la production de la batterie sur l'impact global du cycle de vie d'une voiture électrique

Une voiture électrique de classe moyenne avec une autonomie d'environ 400 km alimentée par de l'électricité suisse aura émis, au terme d'une utilisation totale sur 200'000 km au long de sa durée de vie totale, environ deux fois moins de gaz à effet de serre qu'une voiture diesel ou à essence comparable. Dans cet exemple, la fabrication de la batterie serait responsable de près de 20% des émissions totales de la voiture électrique (cf. figure 15).

Émissions de gaz à effet de serre après une longévité de 200'000 km

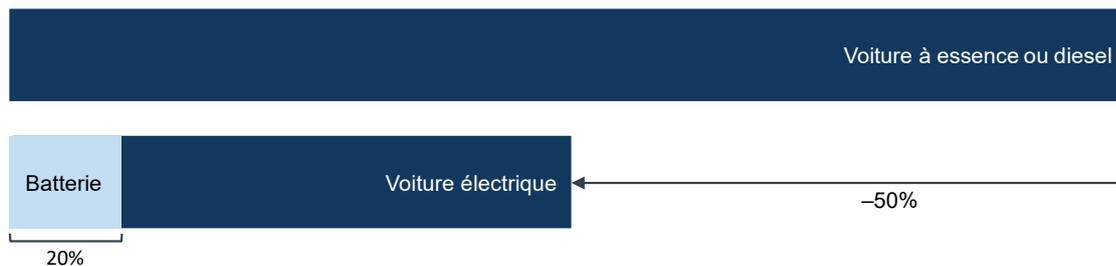


Figure 15: Représentation schématique des émissions de gaz à effet de serre d'une voiture de classe moyenne avec une autonomie d'environ 400 km. Graphique INFRAS.

Le résultat peut être différent lorsque d'autres catégories d'impacts environnementaux sont considérés : Par exemple en ce qui concerne la formation de smog, la voiture électrique se situe dans une fourchette similaire à celle d'une voiture diesel, les deux étant environ trois fois meilleures que les voitures à essence. En ce qui concerne les émissions de PM10⁷ sur l'ensemble du cycle de vie, les véhicules électriques se situent légèrement au-dessus des résultats obtenus par les voitures diesel ou à essence modernes. Les émissions de PM10 des véhicules électriques proviennent principalement de l'extraction de métaux tels que le cuivre et le nickel. Les PM10 sont principalement émises dans les mines situées dans des régions peu peuplées et les émissions vont nettement diminuer dans les prochaines années grâce à des mesures d'amélioration (cf. chapitre 4.2). Actuellement, la production de batteries contribue pour environ 40% à l'impact environnemental des PM10, le reste étant causé par la fabrication des véhicules ainsi que par l'exploitation. En phase d'exploitation, les émissions de PM10 des véhicules électriques sont toutefois inférieures à celles des voitures diesel ou à essence (pas d'émissions nocives à l'échappement, émissions d'abrasion comparables).

Contribution de la batterie à l'impact environnemental de la production de la voiture

La production de véhicules électriques a un impact environnemental 25% à 50%⁸ plus important que la production de véhicules à combustion interne (c'est-à-dire à essence ou diesel). Les véhicules électriques ne nécessitent pas de catalyseur contenant du rhodium, du palladium et d'autres métaux du groupe du platine, qui comptent parmi les matériaux les plus polluants par unité de masse extraite, mais contiennent

⁶ <https://calculator.psi.ch/>

⁷ Les particules dont le diamètre est inférieur à 10 ou 2,5 millièmes de millimètre sont appelées PM10 ou PM2.5. A partir de PM10, on parle également de "poussières fines".

⁸ Dépend de l'impact environnemental considéré.

plus de cuivre et d'électronique (de puissance). C'est principalement la fabrication de la batterie qui cause la plus grande part d'impact environnemental lors de la production de voitures électriques.

Par exemple, lors de la production d'une voiture de taille moyenne avec une batterie de 42 kWh, environ un quart des émissions de gaz à effet de serre est dû seulement à la batterie. Concernant les autres catégories d'impact environnemental, telles que la toxicité humaine ou la consommation de matières premières, la production de la batterie représente environ la moitié de l'impact environnemental total de la production d'un véhicule électrique.

Impact environnemental lié à l'utilisation et la fin de vie

Comparés aux véhicules à combustion interne, les véhicules électriques ne produisent pas d'émissions directes lors de leur utilisation, à l'exception de celles dues à l'usure des pneus et des freins. Ils sont de plus environ quatre fois plus efficaces énergétiquement que des véhicules à combustion interne comparables. En outre, la production et la conversion d'électricité sont moins nocives pour l'environnement, car elles gaspillent moins d'énergie que l'essence ou le diesel. Les véhicules électriques nécessitent également moins de fluides, comme l'huile moteur, ce qui réduit également l'impact environnemental.

De plus, les matériaux utilisés dans le véhicule et dans la batterie peuvent être récupérés en fin de vie grâce au recyclage. En revanche, le carburant consommé par les véhicules à combustion provient généralement d'une source de production polluante et est ensuite irrémédiablement perdu.

Impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie

Une voiture électrique génère plus d'impact environnemental durant sa production qu'une voiture à combustion interne, mais elle est plus propre à l'utilisation. Par conséquent, à partir d'une certaine distance parcourue, la voiture électrique engendre globalement moins d'impacts environnementaux.

La distance à laquelle la voiture électrique et la voiture à combustion ont généré un impact environnemental égal dépend de différents facteurs :

- 1. Catégorie d'impact environnemental considéré**
- 2. Taille, type et origine de la batterie**
- 3. Catégorie du véhicule**
- 4. Origine de l'électricité utilisée pour alimenter le véhicule**

1. Catégorie d'impact environnemental considéré

Les véhicules à combustion interne émettent principalement des gaz à effet de serre lors de leur utilisation. Ainsi, les émissions totales de gaz à effet de serre des véhicules électriques deviennent plus faibles que celles des véhicules à combustion interne après seulement environ 25'000 kilomètres parcourus (selon la catégorie de véhicule). Les véhicules à combustion interne modernes émettent toutefois relativement peu de polluants toxiques, comme les NOx, les PM ou le SO₂. Cela s'explique par la faible teneur en soufre du carburant ainsi que par le recours à des catalyseurs. En conséquence, il faut plus de temps qu'une voiture électrique devienne plus favorable qu'une voiture à combustion interne en termes de toxicité. Dans ce cas, il se pourrait même que la durée de vie moyenne d'un véhicule électrique soit trop faible pour qu'elle soit plus performante qu'un véhicule diesel ou à essence en termes d'effets toxiques potentiels pour l'homme.

2. Taille, type et origine de la batterie

Plus la batterie d'une voiture électrique est massive, plus l'impact environnemental par km parcouru est important. La capacité des batteries des voitures électriques disponibles en Suisse varie entre 27 et 108 kWh. Selon le modèle de voiture, l'impact environnemental de la production de la batterie peut varier d'un facteur 4 environ. Cela ne signifie pas pour autant qu'une voiture électrique dotée d'une grosse batterie doit parcourir une distance quatre fois plus grande pour être plus écologique qu'une voiture à combustion. En effet, une grosse voiture électrique doit être comparée à un gros véhicule à combustion, qui consomme lui aussi plus de carburant qu'un petit véhicule à combustion et émet donc plus de gaz à effet de serre par kilomètre (voir également le point 3).

Le type de batterie, en particulier la composition de sa cathode, est un autre facteur important. Les différentes proportions de nickel, de manganèse et de cobalt dans les batteries NMC peuvent faire varier l'impact environnemental de quelques points de pourcentage. L'impact environnemental des batteries NCA se situe dans le même ordre de grandeur que celui des batteries NMC. La différence entre les batteries NMC ou NCA et les batteries LFP est plus importante. Rapporté à une capacité maximale de stockage d'énergie égale, l'impact environnemental d'une batterie de type LFP est inférieur de 20% à 30%. L'origine de la batterie est aussi un élément central, la production d'électricité dans différents pays ou régions du monde entraînant des impacts environnementaux spécifiques variables. Ainsi, une production en Chine empire le bilan climatique de la batterie d'environ 20% par rapport à une production en Europe, en raison du nombre élevé de centrales à charbon pour la production d'électricité. Le chapitre 4.4 contient plus de détails sur les impacts environnementaux générés par la production de batteries.

3. Catégorie du véhicule

Les véhicules dotés d'une batterie plus grande sont aussi typiquement plus grands et plus lourds que les véhicules avec une petite batterie, même sans la batterie. Par exemple, une Mercedes EQS 53 4matic+ avec une batterie de 108,4 kWh pèse 2,65 tonnes. De l'autre côté du spectre, on trouve la Dacia Spring avec une batterie de 26,8 kWh et un poids à vide d'une tonne. La production de la Mercedes devrait avoir un impact environnemental environ 3 fois plus important que celle de la Dacia. Mais les véhicules thermiques présentent également des différences correspondantes et une comparaison entre une petite voiture électrique et un véhicule thermique haut de gamme ne serait pas juste. Ainsi, il faut comparer une Dacia à une petite voiture qui consomme environ 4-5 l/100 km d'essence pour calculer la distance après laquelle l'effort écologique supplémentaire pour produire une voiture électrique en vaut la peine. Pour la Mercedes EQS, en revanche, il faut considérer un véhicule de référence dont la consommation est supérieure à 10 l/100 km.

4. Origine de l'électricité utilisée pour alimenter le véhicule

L'origine de l'électricité utilisée pour la recharge de la batterie a une grande influence sur le bilan environnemental global. L'électricité d'origine hydroélectrique ou éolienne a un impact très faible sur l'environnement, alors que l'électricité produite par des centrales au pétrole, au charbon ou nucléaires a un impact 20 à 30 fois plus élevé par kWh. Par conséquent, l'impact environnemental généré par la production des véhicules électriques est amorti plus rapidement lorsque ceux-ci sont alimentés par de l'électricité plus propre. Cependant, même si un véhicule électrique moyen fonctionnait avec de l'électricité produite par une centrale à charbon, sa contribution totale au changement climatique en fin de vie serait tout de même inférieure à celle d'une voiture diesel ou à essence comparable.

Une voiture électrique moyenne de classe moyenne avec une autonomie d'environ 300 km, alimentée par de l'électricité suisse, doit donc parcourir environ 30'000 km pour amortir l'impact environnemental lié à sa production par rapport à une voiture à essence ou diesel. Au terme d'une distance totale de 200'000 km parcourue au long de sa durée de vie, cette voiture électrique aura émis environ deux fois moins de gaz à effet de serre qu'une voiture diesel ou à essence.

Une voiture électrique de classe supérieure dotée d'une plus grosse batterie, avec une autonomie de 500 km par exemple, devra parcourir environ 45'000 km pour amortir le coût environnemental de sa fabrication. Une petite voiture légère ayant une autonomie d'environ 150 km n'a besoin que d'environ 25'000 km pour atteindre le même résultat.

D'où provient l'impact environnemental de la production de batteries?

Les analyses du cycle de vie prennent en compte tous les processus, de l'extraction des matières premières à la dernière étape de production d'une batterie finie, en passant par la fabrication des métaux ou la fourniture d'énergie. Cependant, différentes études intègrent différemment les milliers de processus nécessaires au long de la chaîne de production. Cela peut conduire à ce que les impacts de certains processus soient pondérés différemment et que ceux-ci paraissent plus ou moins significatifs dans le résultat global selon les études. Dans Crenna et al. (2021), les impacts environnementaux sont additionnés pour

chaque produit et processus. Selon cette approche, la production des cellules de batterie représente, selon la catégorie d'impact considérée, entre 50% et 90% de l'impact environnemental total de la production de batteries (cf. figure 16).

Le reste est dû à la production des matériaux dans lesquels les cellules sont emballées, du module de gestion de la batterie, des matériaux de contact, du liquide de refroidissement et de l'électricité nécessaire à l'assemblage de la batterie. La production de la cathode et du collecteur en cuivre engendre la plus grande part, soit 60% à 80%, de l'impact environnemental de la production des cellules, notamment en raison de la toxicité potentielle de ces matériaux. La production de graphite et d'aluminium pour l'anode engendre aussi un impact environnemental conséquent. La fabrication du matériau actif de la cathode est responsable de 70% à 90% de l'impact environnemental de la production de la cathode. La production de ce matériau actif nécessite de l'hydroxyde. Sa production engendre à 50% à 60% de l'impact environnemental causé par la production du matériau actif de la cathode. La publication ne précise pas d'où provient l'impact environnemental de la production d'hydroxyde. Il apparaît toutefois que les processus de production d'électricité et de chaleur nécessaires à la production des batteries ne contribuent qu'à peine à 20% de leur impact climatique total, toutes étapes de production confondues (Crenna et al., 2021). Dai et al. (2019), en revanche, ont trouvé des proportions légèrement différentes, mais les principaux énoncés concordent bien.

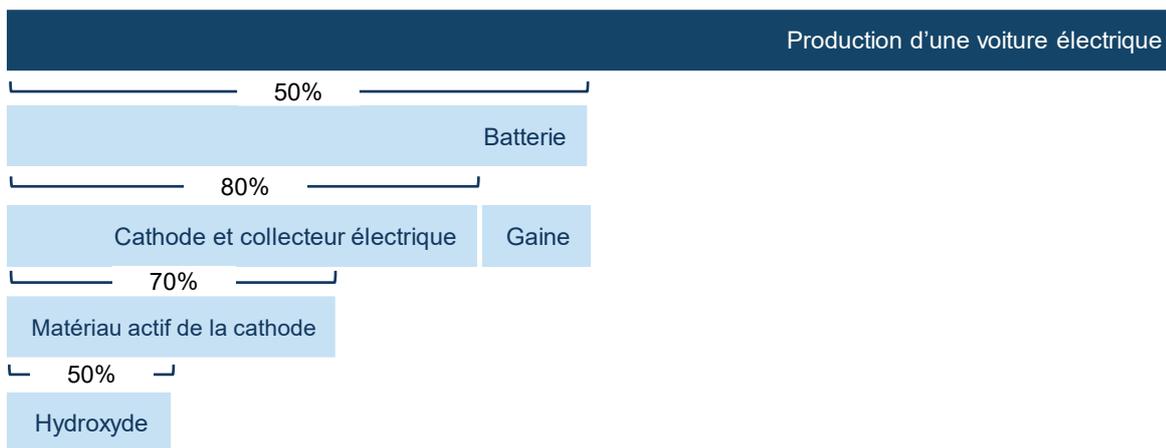


Figure 16: Représentation schématique de l'impact environnemental de la production de batteries. Graphique INFRAS.

Les études antérieures supposaient souvent des besoins énergétiques plus élevés pour la production. Elles aboutissaient donc à des impacts environnementaux beaucoup plus importants par kWh de batterie et à des contributions nettement plus importantes de la production d'énergie. Les hypothèses utilisées dans ces études reposent généralement sur des processus de laboratoire, qui n'ont toutefois pas grand-chose à voir avec la production industrielle à grande échelle, sur laquelle Dai et al. (2019) et Crenna et al. (2021) ont basé leurs données.

Résumé et perspectives

La production (et l'élimination) des batteries génère une part importante de l'impact environnemental total des véhicules électriques. Bien que les voitures électriques engendrent moins d'émissions de gaz à effet de serre et que les autres catégories d'impacts environnementaux soient plus faibles ou du moins pas significativement plus élevées que les véhicules à essence ou diesel, l'utilisation de batteries aussi petites que possible, produites de la manière la plus écologique possible est essentielle pour maximiser le bénéfice environnemental de la mobilité électrique. Si, à l'avenir, l'électricité et la chaleur utilisées pour la production des matériaux actifs des batteries provenaient exclusivement de sources renouvelables, il serait possible de réduire de 20% à 40% les émissions de gaz à effet de serre. Des économies supplémentaires peuvent être réalisées en choisissant d'autres matériaux actifs ou en améliorant les procédés utilisés (par l'innovation et les économies d'échelle). Globalement, une réduction de moitié de l'impact environnemental par kWh de batterie semble tout à fait réaliste au cours des dix ou vingt prochaines années.

2.4 Bases légales dans l'Union Européenne

Que contient le futur "règlement du parlement européen et du conseil relatif aux batteries et aux déchets de batteries"?

Le résumé ci-après est basé sur les documents "New EU regulatory framework for batteries: Setting sustainability requirements" de la collection "Briefing: EU Legislation in Progress" du Parlement européen de mars 2022 (Halleux, 2022) ainsi que sur la lettre du Secrétaire général du Conseil de l'UE à ce sujet de début 2023 (Council of European Union, 2023). En 2018, un plan d'action stratégique sur les batteries a été adopté dans le cadre du troisième train de mesure en faveur de la mobilité de l'initiative "L'Europe en mouvement" (European Commission, 2021). Sur cette base, une proposition de nouveau règlement relatif aux batteries et aux déchets de batteries a été adoptée le 10 décembre 2020. Celui-ci vise à moderniser la législation européenne dans le domaine de la fin de vie des batteries et vise à promouvoir la durabilité et la compétitivité de la filière européenne des batteries. La proposition s'inscrit dans le cadre du "Green Deal" européen et des initiatives connexes, y compris le plan d'action pour une économie circulaire et la nouvelle stratégie industrielle. Le plan d'action pour une économie circulaire a identifié les batteries comme secteur prioritaire, en raison de sa forte consommation de ressources et son grand potentiel pour l'économie circulaire.

La proposition de nouveau règlement sur les batteries et les déchets de batteries (Conseil de l'Union européenne, 2023) vise à remplacer la directive sur les batteries de 2006 (Parlement européen, 2006). Le règlement proposé poursuit trois objectifs interdépendants :

- I. Renforcer le marché intérieur (y compris pour les produits, les procédés, les déchets de batteries et leurs produits de recyclage) en garantissant des conditions de concurrence équitables et en établissant un cadre réglementaire commun,
- II. Promouvoir une économie circulaire, et
- III. Réduire les impacts environnementaux et sociétaux (négatifs) tout au long du cycle de vie des batteries.

Le règlement fixe donc des exigences dans les domaines suivants : la durabilité, la sécurité et l'étiquetage relatifs à la mise sur le marché et à la mise en service des batteries ainsi qu'à leur élimination à la fin de leur cycle de vie. Les principaux éléments du nouveau règlement concernant les batteries des véhicules électriques sont les suivants⁹:

- **Classification des batteries** : introduction de deux nouvelles classes: les batteries de véhicules électriques, et les batteries de moyens de transport légers (comme les vélos ou scooters électriques), en plus des classes existantes pour les batteries portables, de démarrage et industrielles ;
- **Empreinte carbone** : augmentation progressive des exigences en matière de réduction de l'empreinte carbone des batteries de véhicules électriques, des batteries de moyens de transport légers et des batteries industrielles rechargeables. Pour les batteries de véhicules électriques, il sera obligatoire de déclarer l'empreinte carbone dans les 18 mois suivant l'entrée en vigueur du règlement ; dans les 36 mois suivant son entrée en vigueur, les batteries devront être classées en différentes catégories de performance et étiquetées en conséquence ; et à partir du 54e mois, des valeurs maximales d'empreinte carbone seront appliquées sur l'ensemble du cycle de vie de ces batteries ;
- **Taux de matériaux recyclés** : obligation de déclarer le taux de matériaux recyclés présent dans toutes les batteries contenant du cobalt, du plomb, du lithium ou du nickel en tant que matériau actif, 5 ans après l'entrée en vigueur du présent règlement. Des valeurs minimales obligatoires pour la part de matériaux recyclés seront progressivement introduites : 16% pour le cobalt, 85% pour le plomb, 6% pour le lithium et 6% pour le nickel au bout de 8 ans - puis 26% pour le cobalt, 12% pour le lithium et 15% pour le nickel 13 ans après l'entrée en vigueur de cette ordonnance ;
- **Normes de sécurité** : Introduction de normes de sécurité pour les installations stationnaires de stockage d'énergie par batteries ;
- **Chaînes d'approvisionnement responsables** : des audits obligatoires de la conformité de la chaîne d'approvisionnement doivent être effectués par des organismes de contrôle indépendants et reconnus

⁹ Basé sur les informations disponibles les plus récentes au moment de la finalisation du présent document publiées le 18 janvier 2023 par le Secrétaire général du Conseil de l'UE (Council of European Union, 2023).

par l'Etat, selon les standards internationaux en matière d'audit, pour tous les acteurs économiques qui mettent des batteries sur le marché européen ;

- **Taux de collecte** : Augmentation progressive des taux de collecte des déchets de batteries des appareils électroniques, de 45% fin 2023 à 73% fin 2030, et à 61% en 2030 pour les batteries de moyens de transport légers. Pour les batteries de véhicules électriques, un système de collecte doit être mis en place, sans frais pour les consommatrices et consommateurs, de sorte que ces batteries puissent être intégralement collectées ;
- **Taux de recyclage** : introduction de nouveaux objectifs de recyclage pour les batteries lithium-ion (65% d'ici 2025, 70% d'ici 2030). Les taux de recyclage minimum seront fixés à 90% pour le cobalt, le cuivre, le plomb et le nickel et à 50% pour le lithium dès la fin 2027, puis à 95% pour le cobalt, le cuivre, le plomb et le nickel et à 80% pour le lithium dès la fin 2030 ;
- **"Second Life"** : définition d'exigences relatives à la réutilisation et au reconditionnement de batteries industrielles et de batteries de véhicules électriques pour une seconde vie ;
- **Étiquetage et obligation d'informer** : au plus tard 3 ans après l'entrée en vigueur du règlement, les batteries devront être étiquetées avec toutes les informations nécessaires à l'identification de leurs principales caractéristiques. Différentes étiquettes, sur la batterie ou son emballage, fourniront des informations sur sa longévité, sa capacité de charge, les exigences en matière de collecte, la présence éventuelle de substances dangereuses et les risques pour la sécurité. Pour certains types de batteries, un code QR permettra d'accéder plus simplement à ces informations. En outre, chaque batterie devra inclure un module de gestion de batterie permettant de sauvegarder les données nécessaires à l'évaluation de son état de santé et sa durée de vie restante ;
- **"Battery Passport"** : Au plus tard 42 mois après l'entrée en vigueur du règlement, un système électronique d'échange d'informations sur les batteries devra être mis en place, en particulier par la création d'un passeport électronique pour chaque batterie industrielle, batterie de véhicule électrique et batterie de moyens de transport légers mise sur le marché.

Le règlement proposé prévoit également la mise en place de critères et d'objectifs environnementaux minimaux à remplir lors de l'attribution de marchés publics. Le 9 décembre 2022, le Parlement européen et le Conseil sont parvenus à un accord provisoire sur la révision de la législation européenne sur les batteries au terme du "trialogue" en cours depuis le printemps 2022 entre la Commission, le Parlement et le Conseil des ministres des États membres¹⁰. La prochaine étape consistera en l'approbation formelle de cet accord par le Parlement et le Conseil de l'UE, ce qui signifie que le règlement ne devrait pas entrer en vigueur avant plusieurs mois. En tant que règlement, il sera directement applicable dans tous les États membres de l'UE et ne nécessitera pas de transposition dans les lois nationales.

Quelles sont les implications de la nouvelle directive sur la publication d'informations en matière de durabilité par les entreprises pour le secteur des batteries de véhicules électriques ?

La directive sur la publication d'informations en matière de durabilité par les entreprises (Corporate Sustainability Reporting Directive, CSRD) a été adoptée par la Commission européenne en février 2022 et entrera en vigueur le 5 janvier 2023¹¹. L'étape suivante consiste pour tous les États membres de l'Union européenne à intégrer cette directive dans leur législation nationale dans un délai de deux ans. La CSRD vise à promouvoir des pratiques commerciales durables et responsables dans toutes les chaînes de valeur mondiales. Les entreprises seront tenues d'identifier et, si nécessaire, de prévenir, d'éliminer ou de réduire les impacts négatifs de leurs activités. Cela concerne notamment les effets sur les droits de l'homme, comme le travail des enfants et l'exploitation des travailleuses et travailleurs, mais aussi sur l'environnement, comme la pollution et la perte de biodiversité.

Toutes les entreprises européennes de plus de 500 employés et dont le chiffre d'affaires est supérieur à 150 millions d'euros par an sont concernées. Pour les entreprises à forte consommation de ressources, cette directive s'applique à partir de 250 collaborateurs et d'un chiffre d'affaires de 40 millions d'euros. De

¹⁰ <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-5469-2023-INIT/en/pdf>

¹¹ https://finance.ec.europa.eu/capital-markets-union-and-financial-markets/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting_en

plus, les entreprises non européennes, comme les entreprises suisses, qui réalisent un chiffre d'affaires de plus de 150 millions d'euros au sein de l'UE, sont également soumises à cette directive. Les règles s'appliquent aussi aux filiales et aux chaînes d'approvisionnement des entreprises concernées.

Ces dispositions concernent notamment les aspects et thématiques suivants :

- rendre le devoir de diligence une partie intégrante de la politique des entreprises,
- identifier les impacts négatifs réels ou potentiels sur les droits de l'homme et l'environnement, en évitant ou en atténuant les impacts potentiels et en éliminant ou en réduisant autant que possible les impacts effectifs,
- contrôler l'efficacité des stratégies et des mesures de diligence mises en place et communiquer publiquement les résultats obtenus.

La CSRD vise à renforcer la transparence pour le public, les consommatrices et consommateurs et les investisseuses et investisseurs en fournissant des informations sur l'impact des entreprises en matière de droits de l'homme et d'environnement. L'objectif est de parvenir à une protection plus efficace des droits de l'homme, par exemple en garantissant des conditions de travail sûres et saines, et d'éviter les effets négatifs sur l'environnement qui contreviennent aux principales conventions internationales en la matière. Les entreprises doivent également avoir un plan qui montre que leur stratégie commerciale est en accord avec la limitation du réchauffement climatique à 1,5 °C, conformément à l'accord de Paris.

Les informations fournies par les entreprises seront ainsi plus facilement accessibles et plus compréhensibles, de sorte que les entreprises assument pleinement leur responsabilité vis-à-vis de la société. Les nouveaux éléments de la CSRD comprennent notamment

- L'obligation de reporting plus détaillé, obligeant les grandes entreprises à publier des informations sur les questions de durabilité telles que les droits environnementaux, les droits sociaux, les droits de l'homme et les aspects de gouvernance,
- L'obligation de certification concernant les rapports sur la durabilité,
- La clarification de la nature des informations que les entreprises doivent fournir conformément à des normes contraignantes en matière de reporting sur le développement durable applicables dans toute l'UE,
- L'obligation de publier toutes ces informations dans une section distincte du rapport de gestion des entreprises.
- Et l'obligation de publier toutes les informations dans une section distincte du rapport de gestion des entreprises.

Cette directive s'applique également à toutes les entreprises non européennes qui réalisent un chiffre d'affaires de plus de 150 millions d'euros dans l'UE et qui disposent d'au moins une filiale ou succursale dans l'UE. Au niveau politique, la Suisse se contente pour l'instant d'observer la situation. En réponse à une interpellation sur ce thème en décembre 2020, le Conseil fédéral a répondu en février 2021 que le Conseil fédéral suivait les discussions à l'étranger sur le thème de la gouvernance d'entreprise responsable et qu'il surveillait de près les développements à ce sujet, en particulier au sein de l'Union européenne et en Allemagne¹². Le Conseil fédéral a souligné que d'éventuelles nouvelles directives en la matière devraient être analysées avant que des mesures ne soient prises - la Suisse ayant clairement approuvé l'élaboration de normes internationales en la matière. Avec le contre-projet indirect à l'initiative sur la responsabilité des multinationales, qui avait été rejetée par la majorité des cantons en novembre 2020 malgré le soutien de 50,7% des votants, le Conseil fédéral avait confirmé son intention d'adopter une démarche concertée au niveau international, un thème qui est redevenu d'actualité avec l'entrée en vigueur de la DCDR dans l'UE.

¹² <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefft?AffairId=20204682>

3. Extraction des matières premières

3.1 Vue d'ensemble

Où sont extraites les matières premières utilisées pour la production de batteries ? Quelles en sont les réserves globales ? Faut-il s'attendre à une pénurie en raison de la croissance de la demande ?

Les principales matières premières utilisées pour les cellules des batteries type NMC sont le cobalt, le lithium, le nickel, le cuivre, le graphite et le manganèse. Les batteries de type LFP ne contiennent en revanche pas de nickel, de manganèse ou de cobalt. L'acier et/ou l'aluminium sont également utilisés pour la batterie dans son ensemble, en tant que support conducteur de la cathode ainsi que pour l'emballage (Fraunhofer ISI, 2020). Les terres rares ne sont pas utilisées dans les batteries, mais sont nécessaires à la production de certains moteurs électriques.

Les réserves globales de cobalt, de lithium, de nickel, de cuivre, de graphite et de manganèse sont considérées comme suffisantes dans l'optique d'une future électrification de la flotte de véhicules. En ce qui concerne le cobalt, la situation va très probablement s'améliorer en raison du développement de batteries à faible teneur en cobalt et riches en nickel. Les réserves de lithium devraient être suffisantes, tandis que des incertitudes subsistent en ce qui concerne le nickel. Toutefois, il n'est pas exclu que certaines matières premières connaissent des pénuries temporaires, des problèmes d'approvisionnement ou des flambées de prix à court terme. Cela pourrait arriver si l'exploitation de nouvelles mines ne parvient pas à répondre à la demande ou si l'exportation depuis les pays producteurs est compromise, par exemple. Pour le lithium, le cuivre, le cobalt et le nickel, les procédés de recyclage sophistiqués à l'échelle industrielle seront de plus en plus pertinents à l'avenir (Fraunhofer ISI, 2020).

Augmentation des ressources ou des réserves

C'est un phénomène bien connu que lorsque la demande pour une matière première augmente, la ressource ou la réserve de celle-ci ne diminue pas, mais au contraire augmente (H. J. Althaus et al., 2015). Par le passé, les réserves - c'est-à-dire les gisements confirmés d'une matière première qui peuvent être économiquement exploités avec les techniques actuelles - ont été constamment augmentées en raison de la hausse des prix des métaux et de la découverte de nouveaux gisements. Cette évolution est le résultat du système économique en place. En règle générale, les entreprises minières réalisent uniquement les explorations pour prouver les réserves dont elles ont besoin à court terme, afin de justifier les investissements futurs, sur une période de 20 ans, par exemple. Elles ne cherchent pas nécessairement à découvrir la totalité des réserves d'une matière première (Commission européenne, 2010).

Cobalt

En 2021, la production mondiale de cobalt a atteint son plus haut niveau avec 170'000 tonnes, alors qu'elle n'était que de 144'000 tonnes en 2019 (USGS, 2022b). Le moteur de cette augmentation a été la croissance mondiale de la mobilité électrique. Plus de 70% du minerai de cobalt mondial provient de la République démocratique du Congo, principalement en tant que sous-produit des mines de cuivre et de nickel, avec une production de 120'000 tonnes en 2021, dont 12% à 30% sont extraits dans de petites mines artisanales utilisant des méthodes mécaniques très simples. Le reste est extrait de manière industrielle (Cobalt Institute, 2022). Les autres producteurs principaux sont la Russie avec 7'600 tonnes, le Canada avec 4'300 tonnes, Cuba avec 3'900 tonnes et l'Australie avec 5'600 tonnes (USGS, 2022). Le cobalt est presque toujours extrait en combinaison avec d'autres métaux tels que le cuivre, le nickel, les métaux du groupe platine et le zinc. La transformation du minerai en cobalt métallique a lieu pour l'essentiel en Chine. Le cobalt est utilisé dans des superalliages particulièrement durs utilisés pour la fabrication d'outils de coupe, les catalyseurs, des pigments et des alliages magnétiques utilisés dans les moteurs électriques, et des batteries li-ion. En 2021, environ 34% du cobalt mondial était utilisé pour la production de batteries de véhicules électriques (Cobalt Institute, 2022).

D'ici 2026, la demande mondiale de batteries li-ion pour véhicules électriques devrait au moins doubler les besoins en cobalt (Buchholz, 2021). Les projections de l'institut Fraunhofer ISI prévoient une demande globale de cobalt, en tenant compte des matériaux de cathode à teneur réduite en cobalt, de 150'000 à

250'000 tonnes pour l'année 2050. Les projections de Bloomberg concernant la demande globale se situent dans le bas de cette fourchette, avec environ 100'000 tonnes en 2030 (BloombergNEF, 2022a). Cela représenterait une demande totale de 6 à 9 millions de tonnes de cobalt - en tant que matériau primaire - entre aujourd'hui et 2050 (Fraunhofer ISI, 2020). Les réserves mondiales de cobalt ont été estimées à 7,6 millions de tonnes en 2021 (USGS, 2022b). Les ressources terrestres s'élèvent à 25 millions de tonnes et 120 millions de tonnes supplémentaires de réserves de cobalt pourraient se trouver dans des nodules de manganèse au fond de l'Atlantique, de l'océan Indien et de l'océan Pacifique (VDI/VDE, 2021). Toutefois, des innovations technologiques sont encore nécessaires pour exploiter ces ressources de manière rentable. En outre, des réserves ont été émises sur cette technologie, notamment pour des raisons écologiques.

Le cobalt peut être récupéré à plus de 90% dans les batteries collectées (Fraunhofer ISI, 2020 ; VDI/VDE, 2021). Actuellement, l'UE est dépendante des importations de cobalt. Cependant, la Finlande dispose à la fois de réserves de cobalt et de capacités de raffinage. La part de la Finlande dans l'extraction mondiale de cobalt n'est actuellement que d'environ 0,8% (VDI/VDE, 2021).

Lithium

La production annuelle mondiale en 2021 s'élevait à 104'800 tonnes de lithium. Sur ce total, 55'000 tonnes ont été extraites en Australie, 26'000 tonnes au Chili, 14'000 tonnes en Chine, 6'200 tonnes en Argentine et 3'600 tonnes dans trois autres pays (USGS, 2022b). D'ici 2026, la demande mondiale de lithium devrait tripler en raison du boom de la mobilité électrique (Buchholz, 2021). En 2021, environ 75% de la production globale de lithium était utilisée pour les batteries, dont près des deux tiers pour l'électromobilité (statista, 2022c), 14% a été utilisé pour la production de céramique et de verre, et le reste se répartissait entre différentes autres applications (statista, 2022a).

Les besoins mondiaux en lithium devraient atteindre 1 à 1,3 million de tonnes en 2050. En cumulant les besoins jusqu'en 2050, cela représenterait 14 à 20 millions de tonnes de lithium (Fraunhofer ISI, 2020). Les réserves mondiales connues de lithium sont actuellement estimées à environ 21 millions de tonnes, ce qui correspond à 256 fois la quantité extraite en 2020. En ce qui concerne les ressources mondiales actuelles, les données et les estimations divergent fortement. Selon les données de l'U.S. Geological Survey (USGS) datant de 2021, les ressources mondiales en lithium s'élèvent actuellement à environ 89 millions de tonnes.

L'UE est actuellement fortement dépendante des importations de lithium. Cependant, l'Europe dispose de ressources propres, comme par exemple en Serbie, au Portugal, en Espagne, en Finlande, en Autriche, en Allemagne ou en France (VDI/VDE, 2021). La production de lithium par le recyclage des batteries ne joue pas encore un rôle important. Cependant, les capacités industrielles de recyclage des batteries, notamment pour la récupération du lithium, se développent rapidement en Europe et en Suisse. Le lithium issu du recyclage des batteries pourrait couvrir une part significative des besoins annuels d'ici 2050. Pour cela, il faut assurer des taux de collecte et de recyclage élevés, afin de récupérer 25% à 50% du lithium des déchets de batteries (Fraunhofer ISI, 2020).

Nickel

Le principal pays producteur de nickel est l'Indonésie avec 771'000 tonnes en 2021, suivie des Philippines avec 334'000 tonnes, de la Russie avec 283'000 tonnes, de la Nouvelle-Calédonie avec 200'000 tonnes, du Canada et de l'Australie avec près de 170'000 tonnes chacun et de la Chine avec 120'000 tonnes (USGS, 2022b). La production mondiale s'élève à environ 2,7 millions de tonnes pour l'année 2021.

Le développement de batteries performantes à faible teneur en cobalt et riches en nickel va certainement faire évoluer les estimations concernant les besoins et réserves de nickel dans les années à venir. Il est pour le moment difficile d'évaluer l'ampleur de cette évolution, des pénuries temporaires ou des hausses de prix à court ou moyen terme ne sont donc pas à exclure. Les projections de l'institut Fraunhofer ISI pour l'année 2050 prévoient une demande mondiale de nickel de 4 à 6 millions de tonnes par an. Cette fourchette de valeurs pourrait toutefois être légèrement inférieure en raison du possible développement de

batteries à teneur réduite en nickel ou d'une augmentation de l'utilisation de batteries LFP. Les besoins cumulés en nickel se situeraient entre 70 et 110 millions de tonnes jusqu'en 2050 (Fraunhofer ISI, 2020). Les réserves globales actuelles sont estimées à 95 millions de tonnes (USGS, 2022b) et les ressources à 130 millions de tonnes (Fraunhofer ISI, 2020). La majorité du nickel nécessaire peut être recyclée à partir de batteries usagées. La sécurité de l'approvisionnement en nickel peut être assurée dans la mesure où les batteries en fin de vie sont collectées et recyclées de manière suffisamment efficaces.

Cuivre

Le Chili est le plus grand producteur de cuivre au monde, avec environ 5,6 millions de tonnes extraits en 2021, suivi du Pérou avec 2,2 millions de tonnes, du Congo et de la Chine avec 1,8 million de tonnes chacun, et des Etats-Unis avec 1,2 million de tonnes, pour ne citer que les principaux. La Chine est actuellement le premier pays dans le domaine du raffinage du cuivre avec environ 10 millions de tonnes de cuivre traitées par an, loin devant le Chili avec environ 2,2 millions de tonnes.

Les réserves mondiales de cuivre s'élèvent à environ 880 millions de tonnes, tandis que les ressources mondiales totales de cuivre étaient estimées à environ 2,1 milliards de tonnes en 2015. Les ressources non découvertes sont estimées à environ 3,5 milliards de tonnes (USGS, 2022a). En se basant sur les réserves actuelles, la disponibilité du cuivre devrait être assurée pendant environ 40 ans si la demande reste stable. En ajoutant à cela les ressources (c'est-dire les gisements connus) mondiaux de cuivre, il est possible d'exclure une future pénurie. Cependant, la demande en cuivre pourrait doubler d'ici 2040 en raison du développement de réseaux électriques supplémentaires (Le-pesant, 2021).

Selon certaines projections, le taux de récupération du cuivre par le recyclage des batteries lithium-ion sera d'environ 99% d'ici 2025 (WIFO, 2021). Actuellement, ce taux est d'environ 45% en Europe. Le secteur du recyclage des batteries est cependant en développement constant. Il est donc probable que le taux de récupération du cuivre soit beaucoup plus élevé et au moins égal aux autres flux de recyclage du cuivre mentionnés précédemment, soit ~99% (Le-pesant, 2021).

Graphite

En 2021, le plus grand producteur de graphite était, de loin, la Chine avec 820'000 tonnes, suivie du Brésil avec 68'000 tonnes puis du Mozambique et de la Russie avec près de 30'000 tonnes chacun. Environ 7% de la production globale a été utilisée pour la production de batteries lithium-ion, et ce chiffre devrait atteindre 30% d'ici 2025 (VDI/VDE, 2021). Le graphite est extrait dans des mines à ciel ouvert ou souterraines, puis broyé et enrichi par un processus industriel relativement simple. Outre l'utilisation du graphite pour les anodes des batteries, il est également utilisé comme anode dans les électrolyses. Il est également utilisé pour la production de matériaux réfractaires, de crayons et de lubrifiants. Le graphite peut être extrait sous forme de minerai (graphite naturel) ou être produit synthétiquement.

En 2021, la production mondiale de graphite naturel s'élevait à environ 1 million de tonnes. Les réserves actuelles de graphite sont estimées à environ 320 millions de tonnes (USGS, 2022b), soit 320 fois la production de 2021. Les ressources mondiales déclarées étaient d'environ 800 millions de tonnes en 2021 (USGS, 2022b). Seuls 2% environ de la production mondiale de graphite sont actuellement extraits en Europe, qui est donc fortement dépendante des importations. En 2018, environ 175'000 tonnes de graphite naturel ont été importées dans l'UE. En raison du risque d'approvisionnement, l'UE a classé le graphite naturel comme matériau critique. On estime que la demande mondiale de graphite se situera entre 400'000 et 1,6 million de tonnes par an d'ici 2030, et jusqu'à 5 millions de tonnes en 2050 (AT, 2021). Le recyclage du graphite des batteries lithium-ion n'a pas lieu actuellement pour des raisons économiques (VDI/VDE, 2021), mais fait déjà l'objet de recherches.

Manganèse

Le manganèse est principalement extrait sous forme de minerai dans des mines industrielles à ciel ouvert ou des mines souterraines. En 2021, la production mondiale était d'environ 20'000 tonnes. Sur ce total, 7'400 tonnes provenaient d'Afrique du Sud, 3'600 tonnes du Gabon, 3'300 tonnes d'Australie, 1'300

tonnes de Chine et 640 tonnes du Ghana (USGS, 2022b). Les réserves mondiales sont estimées à environ 1,5 million de tonnes, soit 75 fois la production de l'année 2021. Les ressources en manganèse sont actuellement considérées comme quasiment illimitées à l'échelle mondiale (BGR, 2019). D'ici 2025, le taux de récupération possible du manganèse par le recyclage des batteries lithium-ion devrait être d'environ 30%. D'ici 2030, ce taux de récupération devrait atteindre 70% (WIFO, 2021).

Comment va évoluer la demande mondiale de métaux pour les batteries de véhicules électriques ?

Perspectives et évolution de la demande globale

En 2021, la production de batteries de véhicules électrique était responsable de près de la moitié de la demande mondiale de lithium. La demande globale de lithium va quadrupler d'ici 2030 dont la part utilisée pour la production de batteries de véhicules électriques passera de 70% actuellement à près de 80%, selon le scénario considéré (AIE, 2022). Étant donné que le type de batterie le plus répandu pour les véhicules électriques contient beaucoup de nickel, la demande de nickel devrait continuer d'augmenter fortement d'ici 2030, malgré la croissance de la part de marché des batteries de type LFP. Pour le cobalt, la tendance est inverse, car les fabricants réduisent de plus en plus la teneur en cobalt des batteries qu'ils produisent. Cependant, l'augmentation de la demande mondiale de batteries devrait continuer d'accroître la demande globale de cobalt au cours de cette décennie.

L'approvisionnement en métaux pour batteries devrait être suffisant pour répondre à la demande dans le scénario STEPS¹³ de l'Agence internationale de l'énergie, si la capacité de production annoncée est mise en œuvre comme prévu. Néanmoins, les scénarios APS¹⁴ et NZE¹⁵, plus ambitieux, nécessitent des investissements plus importants dans nos capacités de production et de recyclage (voir figure 17). A long terme, le recyclage contribuera de manière significative à l'approvisionnement. Jusqu'en 2030, on ne s'attend toutefois qu'à de faibles contributions du recyclage (< 1% de la demande totale prévue pour le lithium et le nickel, respectivement environ 2% pour le cobalt) (AIE, 2022). Voir également le chapitre 6.

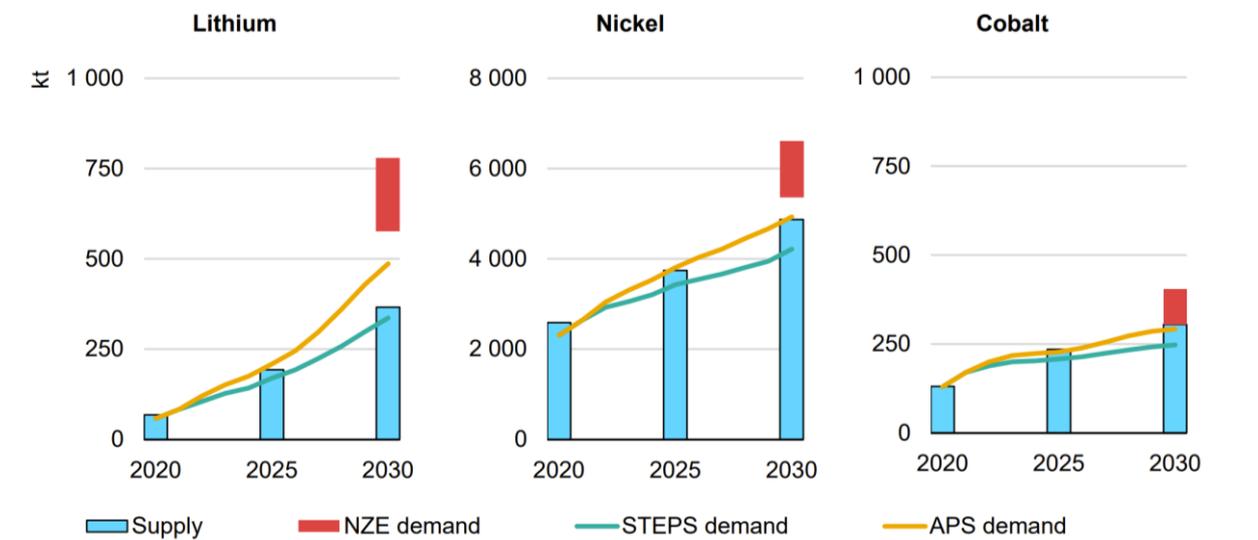


Figure 17: Projections de la demande et de l'offre globales de lithium, de nickel et de cobalt, de 2020 à 2030 (AIE, 2022).

¹³ Le Stated Policies Scenario ne dessine ses prévisions d'avenir que sur la base des mesures et initiatives effectivement prises actuellement.

¹⁴ Le scénario des engagements annoncés (Announced Pledges Scenario) s'intéresse aux mesures annoncées par les États et suppose que les engagements climatiques pris par les gouvernements du monde entier seront mis en œuvre intégralement et dans les délais.

¹⁵ Le scénario Net Zero Emissions d'ici 2050 de l'AIE.

3.2 Impacts sociaux et environnementaux de l'extraction des matières premières

Quels impacts environnementaux et sociaux sont engendrés par l'extraction de matières premières ?

L'extraction des matières premières - indépendamment du type de motorisation des véhicules - implique certains aléas environnementaux et sociaux. La Commission européenne définit la notion de batteries durables comme suit : Les batteries durables doivent être produites avec un impact environnemental aussi faible que possible et en utilisant des matériaux obtenus dans le respect intégral des standards sociaux et environnementaux. Les batteries doivent avoir une longue durée de vie, être sûres et pouvoir être réparées, réutilisées et réaffectées. (VDI/VDE, 2021).

L'extraction des matières premières pour la production de batteries s'effectue le plus souvent dans des pays où la pauvreté est répandue et où les normes environnementales et sociales sont limitées. Les normes locales de sécurité concernant la santé au travail sont souvent inadéquates et il n'existe pas de mécanismes de contrôle et de régulation appropriés. La croissance future de la production de batteries devrait considérablement accroître la demande mondiale de matières premières, ce qui devrait se traduire par une intensification de l'exploitation minière. Or, les impacts environnementaux et sociaux de l'extraction de matières premières sont largement documentés (Conde, 2017). Le Transition Minerals Tracker, affilié au Business and Human Rights Resource Centre (BHRRC, 2022), recense les violations des droits humains commises par l'industrie minière. Depuis 2010, 495 plaintes ont été enregistrées à l'encontre de 103 entreprises productrices de lithium, de cobalt, de cuivre, de manganèse et de nickel pour les technologies à faible émission de carbone, dont la mobilité électrique fait également partie.

L'Environmental Justice Atlas documente des centaines de conflits dans des projets d'extraction de matières premières, entraînant des impacts environnementaux et sociaux (EJAtlas, 2022). Dans ce secteur, les violations des droits humains et autres impacts négatifs sont notamment les suivants : limitation de l'accès à l'eau, pollution de l'eau, du sol et de l'air, atteintes à la sécurité et à la santé, violation des droits des peuples indigènes, normes de sécurité au travail insuffisantes, déplacement de villages entiers pour des concessions minières, destruction de terres agricoles et corruption (BHRRC, 2022).

Cobalt

Concernant l'extraction du cobalt, les aspects suivants sont considérés comme particulièrement problématiques pour l'environnement : l'absence de recultivation des zones d'extraction épuisées, la consommation importante d'eau douce et la pollution des eaux souterraines, des eaux de surface et des eaux côtières à proximité des installations d'extraction et de traitement, ainsi que les émissions de poussières et de dioxyde de soufre (BGR, 2021a).

Le cobalt est extrait de minerais sulfurés au même titre que le nickel, le cuivre, l'or ou l'argent, par exemple. En conséquence, son extraction génère également une grande quantité de résidus contenant des sulfures. Ces minéraux sulfurés sont partiellement transformés en acide sulfurique par une combinaison d'oxydation abiotique et microbienne ("acid rock drainage", ARD). Cette acidification entraîne la dissolution dans l'eau de certains métaux et métalloïdes des résidus miniers. Même après la fermeture d'une mine, les rejets toxiques de ces métaux se poursuivent pendant des milliers d'années. Ecoinvent prend en compte les émissions cumulées sur les 80'000 prochaines années et les impute à l'extraction des matières premières, avec bien sûr une très grande incertitude (H.-J. Althaus & Classen, 2004).

En outre, plusieurs études font état de la généralisation du travail des enfants dans l'extraction artisanale du cobalt (cf. chapitre 3.1). Ce type d'exploitation minière est informel et en partie illégal. Il n'y a donc pas de réglementation et/ou de contrôle en matière de sécurité au travail, de travail des enfants et d'autres aspects sociaux. Le cobalt extrait au Congo est principalement exporté vers la Chine. Les entreprises européennes achètent à leur tour une grande partie de leurs matériaux et composants en Chine. Il ne peut donc pas être exclu que les produits des fabricants européens contiennent du cobalt extrait par le biais du travail des enfants. Les chaînes d'approvisionnement sont souvent très opaques et il n'est donc pas possible de quantifier la part issue de l'extraction artisanale. Cela rend difficile pour les consommatrices et

consommateurs de s'informer sur les matériaux utilisés et l'origine des produits (earthlink, 2022). Dans ce contexte, l'ordonnance de l'UE sur les batteries, avec l'introduction d'un "passeport pour les batteries", ainsi que la future loi sur les chaînes d'approvisionnement de l'UE devraient considérablement améliorer la transparence au long de la chaîne d'approvisionnement des batteries (voir également le chapitre 2.4).

L'absence de mesures de protection au travail dans l'exploitation minière artisanale entraîne notamment un contact direct des travailleuses et travailleurs avec des métaux lourds radioactifs présents dans la roche, en particulier l'uranium, ainsi que des accidents graves (Bamana et al., 2021 ; BGR, 2017 ; earthlink, 2022). En revanche, l'exploitation minière artisanale permet aux personnes impliquées de gagner leur vie (Bamana et al., 2021 ; BGR, 2017 ; Fraunhofer ISI, 2020). De plus, le problème de la corruption est souvent présent lors de l'attribution des concessions minières (Bamana et al., 2021 ; VDI/VDE, 2021).

De plus, le cobalt lui-même est toxique, notamment lorsqu'il est inhalé en grande quantité. Bien qu'il soit relativement facile de protéger les mineurs de la poussière, plusieurs études ont démontré que ces derniers présentent des concentrations élevées de cobalt dans le sang ou l'urine (Bamana et al., 2021 ; Banza Lubaba Nkulu et al., 2018).

Lithium

L'extraction de lithium se fait principalement dans des régions peu peuplées situées dans le "triangle du lithium" entre la Bolivie, le Chili et l'Argentine, ainsi qu'en Australie (cette dernière produisant environ la moitié du lithium mondial) (Köllner, 2021). En Amérique du Sud, le lithium est principalement extrait des saumures des lacs salés, tandis qu'en Australie, il est issu de roches solides. Les deux modes de production sont très différents quant à leur impact environnemental (Köllner, 2021). En Australie, la réglementation en matière de protection de l'environnement est relativement stricte (Oeko-Institut, 2020). La production de lithium à partir de saumure nécessite de puiser de grandes quantités de cette eau salée dans le sous-sol, puis de l'évaporer dans de grands bassins. De telles installations d'extraction contribuent donc à abaisser le niveau des eaux souterraines et à assécher cours d'eau et zones humides. Cela peut entraîner une pénurie d'eau dans les régions environnantes. Si les eaux usées issues du processus d'extraction sont rejetées sans traitement, le sol et l'eau potable sont pollués. Cela peut nuire à la flore et à la faune, ainsi qu'à la population locale, en grande partie indigène (VDI/VDE, 2021).

Le Chili, dont les mines de lithium sont principalement localisées dans le nord du pays, souffre d'un manque d'eau généralisé. La raison principale en est le changement climatique. Les températures augmentent constamment, tandis que les pluies et les chutes de neige diminuent et que les glaciers fondent. Le Chili a déclaré six de ses 16 régions comme zones d'urgence agricole, et plus des trois quarts de la superficie du Chili est affectée par la sécheresse depuis plus de dix ans. La pénurie d'eau est aggravée par le fait que de grandes exploitations agricoles sont reprises par des entreprises minières afin de récupérer leurs droits d'eau. Le système d'attribution de l'eau au Chili est libéralisé et peu réglementé par l'État. Les besoins en eau potable constituent une source de conflits entre les propriétaires de mines et la population civile au Chili (E+Z, 2020 ; Landherr & Graf, 2022 ; Lepesant, 2021 ; VDI/VDE, 2021).

Une étude récente a examiné l'influence de l'extraction du lithium sur le régime hydrique local au Chili (Moran et al., 2022). Environ deux tiers de l'eau douce disponible est souterraine, tandis que le tiers restant se trouve à la surface. Les résultats montrent que le prélèvement d'eau douce a un impact nettement plus important sur le régime hydrique que le prélèvement de saumures de lithium. L'eau douce est principalement utilisée pour l'extraction du cuivre (environ 50%) et pour l'agriculture (environ 30%). Là où ces deux activités se combinent, la perte d'eau souterraine est la plus importante. L'exploitation du lithium est responsable d'environ 8% de la consommation d'eau douce, le tourisme d'environ 1%.

En Australie, les normes de sécurité du travail sont très strictes en ce qui concerne les mines de roche dure. Les violations des droits humains liées à cette activité sont donc peu probables. Toutefois, des destructions de sites aborigènes ont été signalés dans le cadre d'exploitations minières (Albeck-Ripka, 2020).

Nickel

L'extraction du nickel a des répercussions environnementales importantes, surtout dans les régions où elle a lieu. L'exploitation minière souterraine nécessite de vastes surfaces de terrain et consomme des quantités importantes d'eau souterraine. Les infiltrations d'eau salée qui s'ensuivent peuvent entraîner une pollution de l'eau potable. De plus, des métaux lourds peuvent être rejetés dans les eaux souterraines et de surface. Les émissions de poussières contenant des métaux lourds polluent l'atmosphère, comme par exemple à Norilsk Russie, l'un des plus grands sites de production de nickel au monde. Les émissions d'oxyde de soufre peuvent en outre altérer la croissance des plantes et perturber les écosystèmes, tandis que la biodiversité locale est affectée par l'exploitation du nickel en raison de la déforestation qu'elle entraîne. La production d'1 kg de nickel génère entre 13 et 45 kg d'émissions de CO₂eq (BGR, 2021b). L'ARD ("acid rock drainage") est également un problème lors de l'extraction de nickel à partir de minerais sulfurés (cf. cobalt).

Cuivre

Près d'un tiers de la production mondiale de cuivre provient du Chili. Les mines de cuivre chiliennes se trouvent principalement dans le nord du pays, dans la province aride d'Antofagasta, près du désert d'Atacama. Comme décrit ci-dessus pour l'extraction du lithium, le Chili souffre depuis des années d'un manque d'eau chronique. Cette pénurie est aggravée par le fait que de grandes exploitations agricoles sont rachetées par des entreprises minières afin de récupérer leurs droits sur l'eau, comme par exemple dans la région de la petite ville de Tierra Amarilla. Les exploitations agricoles sont alors laissées à l'abandon, l'agriculture à petite échelle et de subsistance n'étant pas viables sans droits d'accès à l'eau. Le cadre légal se serait certes amélioré ces dernières années, mais la gestion des bassins versants ou des droits d'eau est toujours considérée comme problématique pour l'industrie minière du cuivre (Landherr & Graf, 2022 ; Lepesant, 2021).

Graphite

L'extraction et la transformation du graphite entraînent une forte consommation d'énergie et génèrent des nuisances environnementales importantes. De plus, ces activités se déroulent principalement dans des pays où les normes environnementales sont peu contraignantes, notamment en Chine (Köllner, 2021 ; VDI/VDE, 2021). Le graphite n'est pas considéré comme toxique, mais les poussières générées par les procédés utilisés peuvent causer des problèmes d'écotoxicité et de santé, tant dans l'environnement de travail direct que dans les zones habitées environnantes. Les minéraux tels que les sulfures de fer, la pyrite et la pyrrhotine, parfois présents dans les gisements de graphite, peuvent se dissoudre et s'infiltrer dans les eaux souterraines causant ainsi l'acidification des nappes phréatiques (Oeko-Institut, 2020). Les terrils (des amas de matériaux d'excavation de la mine) peuvent contenir des substances toxiques telles que le sulfure d'éthylène, l'uranium, le nickel et le mercure (Oeko-Institut, 2020).

Des acides inorganiques, comme l'acide fluorhydrique, sont parfois utilisés pour purifier le graphite, ce qui entraîne une pollution des nappes phréatiques s'ils sont rejetés dans l'environnement sans traitement (Köllner, 2021 ; VDI/VDE, 2021). En outre, la production de graphite artificiel nécessite de chauffer le matériau à plus de 2 500 °C pendant plusieurs jours, ce qui n'est possible qu'avec des fours électriques spécialisés. Les émissions de gaz à effet de serre qui en résultent dépendent en grande partie du mix énergétique utilisé pour les alimenter (Köllner, 2021).

Manganèse

Le plus grand gisement de manganèse connu se trouve en Afrique du Sud. Son exploitation minière entraîne une pénurie d'eau et une pollution des eaux, de l'air et des sols. Les communautés locales souffrent de problèmes de santé tels que les maladies pulmonaires. Les risques pour l'environnement sont notamment liés à la concentration de substances radioactives et de métaux lourds dans les gisements (PowerShift, 2021).

L'exploitation de nodules de manganèse en mer profonde est une alternative envisagée (Koschinsky, 2021 ; PowerShift, 2021). Cependant, les écosystèmes marins risquent d'être dégradés par les processus d'extraction utilisés.

Comparaison au pétrole

L'extraction des matières premières pour la production de batteries n'est pas la seule à avoir un impact négatif sur l'environnement et les populations. D'autres matières premières utilisées dans l'industrie automobile et l'extraction et le raffinage du pétrole ont également des répercussions négatives. Ces impacts environnementaux sont évalués dans des analyses de cycle de vie et peuvent ainsi être comparés entre les différents types de véhicules (électriques ou à combustion internes). En revanche, les impacts sociaux sont rarement considérés dans une perspective d'analyse de cycle de vie et ne peuvent donc pas être comparés quantitativement pour différents types de véhicules.

Le pétrole et le gaz sont extraits dans des installations offshore à des profondeurs de plus de 200 mètres. Celles-ci se trouvent en Arctique, dans le Nord de l'Atlantique Nord, en Afrique de l'Est et de l'Ouest, dans le Golfe du Mexique, en Amérique du Sud, en Inde, en Asie du Sud-Est et en Australie (Cordes et al., 2016). Outre les impacts environnementaux de la construction de telles installations, c'est surtout la production d'eau usée qui pose des problèmes. Celle-ci est un sous-produit important de l'extraction offshore de pétrole et de gaz naturel et est renvoyée dans les gisements ou rejetée en mer après un éventuel traitement. L'eau produite contient entre autres du pétrole brut, des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), des alkylphénols (AP), des métaux (lourds) et de nombreux autres composants dangereux pour l'environnement. Malgré les mesures de régulation, l'eau usée reste la principale cause opérationnelle de pollution marine causée par l'industrie pétrolière offshore, et a un impact important sur la flore et la faune marines (Beyer et al., 2020 ; Cordes et al., 2016).

La méthode de "fracking" utilisée pour l'extraction pétrolière terrestre impacte l'air, les eaux souterraines, le sol, les roches, la végétation, la faune, les humains et autres éléments des écosystèmes. Les infrastructures génèrent des impacts environnementaux tels que le bruit, l'assèchement des sols locaux, des émissions de méthane et consomment beaucoup d'eau, ce qui modifie le cycle de l'eau local. Aux États-Unis, le fracking était jusqu'en 2015 faiblement réglementé au niveau fédéral, les déchets et eaux usées étant traités comme des déchets non dangereux dans le cadre du Resource Conservation and Recovery Act. Les États sont libres de réglementer ou non la fracturation en ce qui concerne l'eau potable et sa qualité (Meng, 2017, 2017 ; Tulane University, 2021).

Les raffineries de pétrole émettent beaucoup de polluants atmosphériques tels que les composés BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylène), les particules fines (PM), les oxydes d'azote (NOx), le monoxyde de carbone (CO), le sulfure d'hydrogène (H₂S) et le dioxyde de soufre (SO₂). Elles libèrent également du méthane et d'autres combustibles et huiles volatiles dans l'environnement (EPA, 2003). Les personnes travaillant dans le raffinage du pétrole peuvent être exposées à des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), qui sont classés comme polluants environnementaux et ont des propriétés toxiques, mutagènes et/ou cancérogènes (Abdel-Shafy & Mansour, 2016).

Les trois catastrophes pétrolières les plus marquantes sont celles du pétrolier Exxon Valdez, du pétrolier Hebei Spirit et de la plateforme pétrolière Deepwater Horizon et sont survenues lors de l'extraction du pétrole. La catastrophe de Deepwater Horizon a débuté le 20 avril 2010 et a libéré en 87 jours 507 millions de litres de pétrole brut par 1'600 mètres de fond dans le golfe du Mexique. Cela a durablement impacté les coraux d'eau profonde, la reproduction des huîtres a été interrompue pendant plusieurs années, les zones humides de la côte proche ont été affectées et les populations de dauphins, de tortues de mer et d'oiseaux marins ont diminué dans la zone touchée (Barron et al., 2020). L'impact de ces catastrophes n'est pas pris en compte dans les analyses du cycle de vie.

Comparer l'impact social des industries pétrolière, minière et gazière avec l'extraction de matières premières pour les batteries permet d'établir des parallèles. Le pétrole est essentiel pour l'économie de nombreux pays en développement. Cependant, ces activités industrielles ne respectent pas toujours les droits humains, et peuvent rendre des communautés vulnérables en les menant à la ruine économique et sociale, comme par exemple en 1995 en Guinée équatoriale, en 2003 en Irak ou en 2021 au Myanmar (Human Rights Watch, 2009, 2022 ; The Guardian, 2014).

En Afrique, où l'exploitation du pétrole est une source importante de revenus depuis sa découverte au milieu du 19^e siècle, les pratiques non-éthiques de certaines multinationales pétrolières ont entraîné des mouvements sociaux au sein de la population et des groupes de défense des droits de l'homme. Les abus de pouvoir et la corruption sont associés à un manque d'infrastructures, de terres agricoles et d'eau potable, sans compensation adéquate ni mesures correctives de la part des compagnies pétrolières et du gouvernement (Adeola et al., 2021). Actuellement, l'Environmental Justice Atlas documente environ 350 conflits sociaux dans le monde entier liés à la production pétrolière (EJAtlas, 2022). Sont notamment mentionnés les plaintes des populations autochtones contre des projets d'oléoducs aux États-Unis et en Russie, ainsi que les conflits ethniques et religieux en Afrique en raison de l'exploration pétrolière.

Quelles sont les mesures actuellement considérées pour réduire l'impact environnemental et social ? Quels matériaux alternatifs sont susceptibles de réduire les impacts de l'extraction des matières premières ?

Les impacts environnementaux et sociaux de l'extraction des matières premières doivent être atténués. Les aspects essentiels pour y parvenir sont le progrès des technologies extractives, la substitution des matières premières utilisés par des matériaux moins nocifs, la régulation par l'État et le devoir de diligence ainsi que la promotion du recyclage. De nombreux fabricants de véhicules et de batteries investissent dans la mise en place de chaînes d'approvisionnement transparentes. Cette démarche vise d'une part à garantir la sécurité de l'approvisionnement et d'autre part à rendre traçables les conditions de production des matériaux utilisés. Par ailleurs, l'utilisation de batteries plus petites permet de limiter les besoins en matières premières.

Focus sur l'Europe

La stratégie de développement durable "Green Deal" de l'UE, adoptée en 2020, considère l'accès aux ressources comme une "question de sécurité stratégique". En outre, un plan d'action a été adopté pour promouvoir la relance de l'industrie minière en Europe, la promotion du recyclage, la recherche de solutions alternatives et la diversification des pays importateurs. La Commission européenne a également approuvé le projet "European Battery Innovation" visant à promouvoir la recherche et l'innovation dans la chaîne de valeur des batteries. Douze États membres y consacreront jusqu'à 2,9 milliards d'euros au cours des prochaines années¹⁶.

La difficulté à trouver des alternatives aux matériaux utilisés actuellement plaide pour une relance des activités minières en Europe. D'une part, cela permettrait de renforcer l'attractivité de l'industrie européenne et, d'autre part, de mieux contrôler et réglementer les conditions sociales et environnementales de l'extraction des métaux (Lepesant, 2021).

Amélioration des taux de recyclage

Les matières premières utilisées pour la production de batteries devront être mieux recyclées à l'avenir, afin de réduire la demande en matières premières primaires et de diminuer ainsi l'impact environnemental et social négatif dans les régions d'extraction (Pain pour le prochain, Action de Carême, ATE, 2020). A ce sujet, voir le nouveau règlement de l'UE mentionné au chapitre 2.4. Cependant, dans un marché qui croît aussi rapidement que celui des batteries et où les produits sont utilisés durant 10 à 20 ans, seule une petite partie de la demande en matériaux peut être satisfaite dans un premier temps grâce au recyclage, même avec des taux de recyclage très élevés. C'est pourquoi la production primaire doit continuer à augmenter au cours des prochaines décennies afin de satisfaire la demande en véhicules électriques (VDI/VDE, 2021). De manière générale, les quantités de déchets métalliques devraient augmenter considérablement. La rentabilité du recyclage des métaux croît à tel point que les revenus du recyclage devraient dépasser ceux du secteur minier d'ici 2060. Le nombre d'installations industrielles de recyclage dans le secteur de l'industrie automobile augmente chaque année. Certains constructeurs automobiles ont déjà conclu des contrats avec des entreprises européennes spécialisées dans la récupération du cuivre, du cobalt et du nickel contenus dans les batteries lithium-ion (Lepesant, 2021). Voir également le chapitre 6.

¹⁶ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_21_226

Alternatives aux batteries lithium-ion et innovations technologiques

L'adoption de batteries lithium-ion sans cobalt ni nickel - en particulier de type lithium-phosphate de fer (LFP) - est une bonne alternative, déjà largement répandue, dont la densité d'énergie inférieure à celle des batteries de types NMC et NCA est compensée par des coûts de fabrication plus bas. La tendance générale consiste à accroître la part de nickel tout en réduisant celle du cobalt dans les batteries, bien que l'extraction du nickel engendre également des impacts environnementaux et sociaux (Köllner, 2021 ; Lepesant, 2021).

Les premières alternatives à la technologie lithium-ion sont en train d'apparaître, comme les batteries solides, les batteries lithium-soufre et les batteries au sodium. Leur production industrielle à grande échelle n'est pas encore à l'ordre du jour. Néanmoins, les batteries au sodium sont déjà commercialisées, par exemple par l'entreprise américaine Natron. L'entreprise chinoise CATL a également annoncé une production commerciale pour 2023. Quelques alternatives aux matières premières actuellement utilisées sont brièvement expliquées ci-dessous :

- **Cobalt** : Ces dernières années, pour des raisons de coûts et d'image, la tendance est à la réduction de la teneur en cobalt en faveur du nickel dans les batteries. En effet, certains types de batteries ont besoin de nettement moins de cobalt que les batteries NMC traditionnels¹⁷. La proportion de cobalt dans les batteries devrait continuer à diminuer (Fraunhofer ISI, 2020). Ces dernières années, les batteries au lithium-phosphate de fer (LFP) sont devenues plus courantes en Europe, par exemple chez Tesla, VW Group et Stellantis, avec pour objectif de remplacer complètement le cobalt. En 2018, 86% de toutes les batteries de véhicules électriques contenaient encore du cobalt, contre 60% seulement en 2022. Les défis restent cependant importants, car la demande de cobalt augmente dans le monde entier en raison de la forte croissance de la mobilité électrique dans son ensemble (BloombergNEF, 2022b). De nombreux constructeurs automobiles ont conclu des contrats d'approvisionnement avec des groupes miniers afin d'éviter que du cobalt provenant de sources non certifiées n'entre dans leurs chaînes d'approvisionnement et de s'assurer un accès à long terme à ces matières premières (VDI/VDE, 2021). Il s'agit d'un pas dans la bonne direction. Toutefois, un boycott - par exemple du cobalt problématique issu des mines artisanales congolaises - n'améliorerait pas la situation des personnes impliquées. Il faut plutôt améliorer les conditions, formaliser et réglementer l'exploitation minière artisanale et augmenter la transparence des chaînes d'approvisionnement (Fraunhofer ISI, 2020).
- **Lithium** : Au Chili, bien que le cadre législatif relatif à l'utilisation de l'eau ait été amélioré ces dernières années, la gestion des bassins versants reste problématique, aussi bien pour l'exploitation du lithium que pour celle du cuivre (Lepesant, 2021). L'impact environnemental et social de l'extraction du lithium pourrait être amélioré, notamment par des progrès techniques dans permettant de mieux économiser l'eau. A l'avenir, de nouvelles technologies devraient être davantage utilisées, telles que la récupération de l'eau par condensation, la réinjection de la saumure après l'extraction du lithium et les technologies de filtration membranaires pour la séparation directe du lithium de la saumure. Par exemple, BMW a annoncé qu'il s'approvisionnerait à l'avenir en lithium auprès d'une entreprise qui utilise un procédé permettant de repomper la saumure directement dans le sous-sol après la séparation du lithium (VDI/VDE, 2021). Récemment, une entreprise allemande a réussi à obtenir de l'hydroxyde de lithium sous forme très pure directement à partir de saumure résiduelle. Jusqu'à présent, ces résidus étaient considérés comme des déchets de la production de lithium. Ce processus ne nécessite pas l'extraction de saumure supplémentaire et n'abaisse donc pas davantage le niveau des eaux souterraines. Un projet d'industrialisation de cette technologie serait en préparation en Bolivie, qui dispose d'un tiers des réserves mondiales de lithium (Elektroauto-News, 2022 ; VDI/VDE, 2021).
L'Europe dispose d'importants gisements de lithium, notamment en Serbie, au Portugal, en Espagne, en Finlande, en Autriche et en France (Lepesant, 2021). Actuellement, une mine portugaise extrait plus de 1'000 tonnes de lithium par an pour l'industrie céramique. La Commission européenne souhaite encourager davantage l'extraction sur le sol européen et estime qu'il est possible de couvrir 80% des besoins totaux en lithium en Europe d'ici 2025. De nombreux projets ont été lancés dans ce sens : en Espagne près de San José, dans le sud de l'Autriche, au Portugal, en République tchèque, dans l'ouest

¹⁷ Voir chap. 2.1 pour les différentes compositions des cellules de batterie NMC en ce qui concerne la teneur en cobalt.

de la Finlande et en Allemagne (projet Zinnwald dans les monts Métallifères et Oberrheingraben dans le sud de l'Allemagne). Cependant, en 2021, aucun de ces projets n'avait encore atteint le stade de l'exploitation commerciale à grande échelle. Les obstacles à l'intensification de l'activité minière européenne sont l'acceptation sociale de la population locale, les risques environnementaux potentiels ou encore les questions de rentabilité (Lepesant, 2021).

- **Graphite** : Le graphite peut être produit synthétiquement, ce qui constitue une alternative à son extraction minière, actuellement la plus répandue. Le graphite synthétique est produit en chauffant du charbon et des résidus de goudron à des températures élevées, jusqu'à plus de 2500°C, durant plusieurs jours et en l'absence d'oxygène. La production synthétique a un impact environnemental plus faible que l'exploitation minière suivie d'une purification. De plus, la production n'est pas liée à des gisements et peut théoriquement être mise en place partout dans le monde. Bien entendu, la production de graphite synthétique génère également des impacts environnementaux (voir chapitre 4.2). L'utilisation de matières premières renouvelables comme source de carbone fait actuellement l'objet de recherches. L'empreinte carbone d'une telle production dépend en grande partie du mix énergétique qui l'alimente. En 2018, la part de marché du graphite synthétique dans les batteries lithium-ion atteignait environ 30 à 50% (Öko-Institut e.V., 2020 ; VDI/VDE, 2021).
Une autre possibilité serait de remplacer l'anode en graphite par d'autres matériaux. Le silicium peut être extrait du sable et contribuerait à une augmentation générale de la capacité énergétique des batteries lithium-ion (Köllner, 2021). Toutefois, la production de silicium nécessite également des températures très élevées, supérieures à 2'000 °C. De plus, les batteries avec anodes en silicium présentent une résistance au cyclage encore trop faible. Le lithium utilisé comme matériau d'anode pourrait un jour remplacer le graphite.

Nouvelles sources de matières premières

L'exploitation minière en eaux profondes est une possibilité pour l'extraction future de cuivre, de cobalt, de manganèse et de nickel des fonds marins. L'un des principaux défis, en plus des aspects techniques, est de maîtriser les impacts potentiels sur l'environnement. Une meilleure compréhension des écosystèmes et de leurs interactions est nécessaire avant de recourir à une telle stratégie d'extraction. Les impacts environnementaux seraient toutefois très différents de ceux de l'exploitation minière terrestre. L'exploitation minière en eaux profondes concernerait principalement trois types de gisements minéraux : les nodules de manganèse, les encroûtements de fer et de manganèse, qui sont particulièrement intéressants ils contiennent aussi du cuivre, du cobalt et du nickel, ainsi que les sulfures massifs volcanogènes (Koschinsky, 2021).

Labels et initiatives existants

L'extraction des matières premières pour la production de batteries a lieu principalement en dehors de l'Europe, à l'écart des contraintes réglementaires de l'Europe, et les chaînes d'approvisionnement en matières premières sont souvent opaques (VDI/VDE, 2021). En dépit de ces circonstances, les producteurs de batteries doivent, conformément aux directives internationales, veiller à ce que les impacts sociaux et environnementaux soient évités et corrigés le cas échéant dans leurs chaînes d'approvisionnement. Comme le montrent les résultats d'une enquête sur les conditions sociales de production, les grands acteurs du secteur n'assument jusqu'à présent que partiellement leurs responsabilités (Pain pour le prochain, Action de Carême, ATE, 2020).

Dans leurs stratégies, la plupart des producteurs de batteries font référence à des directives internationales telles que la Charte internationale des droits de l'homme et les conventions de l'Organisation internationale du travail. Les principes fondamentaux de l'ONU relatifs aux entreprises et aux droits de l'homme ainsi que ceux de l'OCDE à l'intention des entreprises multinationales misent sur des mesures volontaires des entreprises qui, dans la plupart des cas, ne sont pas suffisantes (Pain pour le prochain, Action de Carême, ATE, 2020).

En outre, il existe déjà de nombreuses autres initiatives volontaires qui traitent des aspects sociaux, comme par exemple :

- **Global Battery Alliance (GBA)** : Le GBA est une initiative du monde industriel qui compte 70 membres et qui a été créée lors du WEF 2017. Son objectif est de créer une chaîne de valeur des batteries durable et responsable d'ici 2030 (WEF, 2019).
- **Responsible Minerals Initiative (RMI)** : L'objectif de l'initiative est de promouvoir une production et un approvisionnement responsables en ressources minérales dans le monde entier. A l'exception des sociétés chinoises BYD et CATL, presque tous les producteurs de batteries sont membres de l'initiative. Outre les minéraux issus de zones de conflits les plus connus, la RMI couvre également le cobalt. Cependant, la responsabilité de la surveillance est souvent déléguée par les entreprises à la RMI, dont le contrôle ne va cependant pas jusqu'à l'extraction dans les mines (Pain pour le prochain, Action de Carême, ATE, 2020).
- **Responsible Mining Assurance (IRMA)** : IRMA est un projet regroupant plus de 30 entreprises, ONG, syndicats et sociétés minières du monde entier. L'objectif est un renforcement de la transparence dans le secteur minier industriel ainsi qu'une amélioration des conditions de travail sociales et environnementales. BMW, Volkswagen, Mercedes-Benz, GM, Ford et Tesla sont membres de l'initiative.
- **Responsible Cobalt Initiative (RCI)** : Cette initiative a été lancée par la Chambre de commerce chinoise pour les métaux, les minéraux et les produits chimiques. L'objectif est de promouvoir la coopération avec le gouvernement de la République démocratique du Congo, la société civile et les communautés locales concernées afin de prendre des mesures pour faire face aux risques et aux défis de la chaîne d'approvisionnement en cobalt.

Devoir de diligence et rôle de la politique

Les initiatives internationales en matière de devoir de diligence des entreprises, notamment leur inscription dans la loi, sont des pistes possibles pour réduire l'impact environnemental et social de l'extraction de ressources. Des institutions publiques fortes dans les pays miniers pourraient améliorer considérablement les normes environnementales et sociales. L'approche la plus prometteuse pour lutter contre ces manquements est l'établissement d'un devoir de diligence obligatoire pour les entreprises (Fraunhofer ISI, 2020).

Le devoir de diligence garantit que les entreprises identifient les risques environnementaux et sociaux dans leurs chaînes de valeur et prennent des mesures pour les minimiser. Les premières prescriptions légales à ce sujet existent pour les matériaux issus de zones de conflit, comme l'or, l'étain, le tungstène ou le tantale provenant de la République démocratique du Congo et des pays voisins. Ces prescriptions sont régies par le Dodd-Frank-Act américain, les Chinese Due Diligence Guidelines et la réglementation européenne 2017/821 (Fraunhofer ISI, 2020). En outre, la réglementation de l'UE se réfère au guide de l'OCDE sur le devoir de diligence pour la promotion de chaînes d'approvisionnement responsables en minerais provenant de zones de conflit ou à haut risque (OCDE, 2019). Le devoir de diligence se focalise surtout sur le cobalt et les matériaux issus de zones de conflit. Les autres matières premières utilisées pour la production de batteries et leurs conséquences sociales sont ignorées.

Les initiatives volontaires et les efforts visant à améliorer l'impact social ne permettent pas de garantir que tous les producteurs de batteries respectent les mêmes standards minimaux dans le monde entier. Dans ce contexte, la politique européenne est de préconiser des règles contraignantes pour garantir le respect du devoir de diligence dans l'extraction et le traitement des matières premières, car les efforts volontaires sont trop peu efficaces. L'Union européenne (UE) a adopté un règlement qui va dans ce sens avec le développement d'un "passeport batterie". Le nouveau rapport sur le développement durable pour les entreprises et la future loi sur la chaîne d'approvisionnement de l'UE devraient améliorer considérablement la transparence tout au long de la chaîne d'approvisionnement des batteries (voir également le chapitre 2.4).

Dans quelle mesure l'extraction de matières premières influence la réussite des "Sustainable Development Goals" ?

Les 17 objectifs de développement durable (ODD) des Nations unies ont été définis lors du sommet mondial de 2015 dans le cadre de l'Agenda 2030 pour le développement durable. De par ses activités, l'industrie minière est étroitement liée à des thèmes qui apparaissent dans les ODD. Les objectifs suivants sont notamment pertinents pour l'extraction de matières premières (VDI/VDE, 2021)

- - N° 3 Santé et bien-être
- - N°6 Eau propre et assainissement
- - N° 7 Énergie abordable et propre
- - N°8 Travail décent et croissance économique
- - N° 9 Industrie, innovation et infrastructures
- - N° 11 Villes et communautés durables
- - No 12 Consommation et production durables
- - N° 13 Mesures de protection du climat

L'industrie minière est confrontée à de nombreux défis liés aux ODD, tels que les violations des droits humains, les mauvaises conditions de travail, les inégalités sociales, la corruption ou encore la destruction de l'environnement. Une étude récente a examiné l'intégration des ODD dans les stratégies de 38 entreprises minières (RMF, 2020). Jusqu'à présent, la grande majorité des entreprises n'ont pas fait d'efforts importants pour intégrer les SDG dans leur stratégie commerciale. Cependant, certains acteurs précurseurs font mieux que leurs concurrents en matière d'intégration des ODD. Néanmoins, la plupart des rapports sur les ODD se contentent d'associer les ODD à des indicateurs de durabilité ou d'introduire le logo des ODD, sans plus d'explications. De plus, les rapports se limitent souvent à certains sites et initiatives, afin de montrer les mesures positives prises par les entreprises concernant certains ODD. Rares sont les cas où les impacts négatifs sont également mentionnés, et ceux-ci ne se réfèrent généralement qu'aux impacts éventuels au niveau du secteur et non aux impacts causés par l'entreprise elle-même. Enfin, seule une minorité d'entreprises rend compte des progrès réalisés par rapport aux indicateurs ou aux objectifs qu'elles se sont fixés pour suivre leur performance (RMF, 2020). Dans ce contexte, le manque de transparence - qui est un facteur de compétitivité dans le secteur industriel - constitue le principal problème concernant les ODD.

Il existe également un écart entre le nombre de mesures annoncées pour certains ODD et leur priorité pour les entreprises minières. Par exemple, l'ODD n° 3 Santé et bien-être et l'ODD n° 6 Eau propre et assainissement font partie des ODD les plus souvent mentionnés, mais les entreprises minières y consacrent les mesures les plus faibles (RMF, 2020).

4. Production des batteries

4.1 Production de batteries et de leurs cellules

Qui sont les fabricants de batteries à l'échelle globale ? Quel est le rôle de l'Europe ?

Chaîne d'approvisionnement mondiale

Actuellement, la Chine domine toutes les étapes de la chaîne d'approvisionnement des batteries, à l'exception du secteur minier (Mining) (cf. figure 18). Cela comprend le traitement des matériaux, la fabrication des composants des cellules, comme la cathode et l'anode, ainsi que la production des batteries et des véhicules électriques (AIE, 2022).

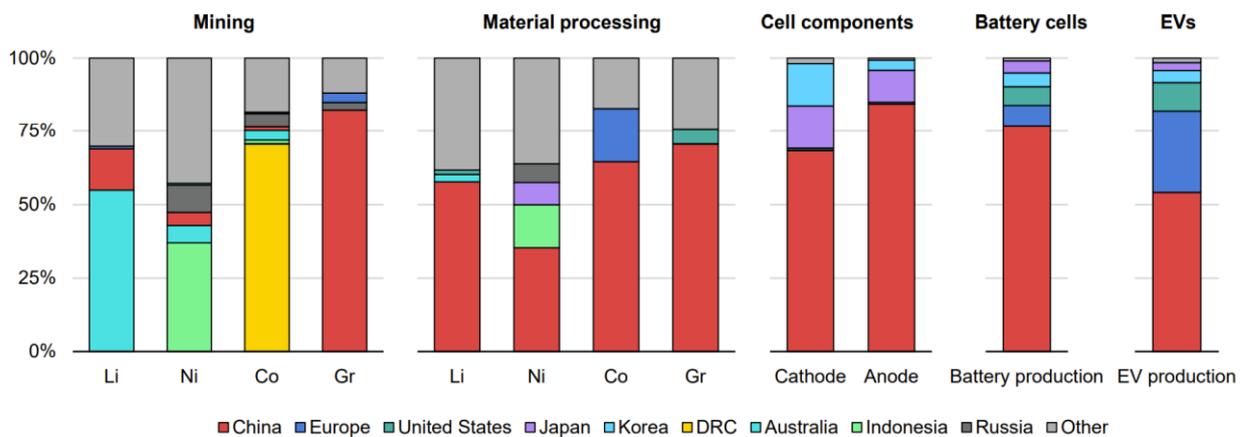


Figure 18: Répartition géographique de la chaîne d'approvisionnement mondiale des batteries (AIE, 2022). Remarques : Li = lithium ; Ni = nickel ; Co = cobalt ; Gr = graphite ; RDC = République démocratique du Congo. La répartition géographique se réfère au pays dans lequel la production a lieu. L'exploitation minière se base sur les données de production. La transformation des matériaux se base sur les données relatives à la capacité de production des raffineries. La production de composants de cellules se base sur les données relatives à la capacité de production de matériaux cathodiques et anodiques. La production de batterie se base sur les données relatives à la capacité de production. La production de véhicules électriques (EVs) se base sur les données de production.

Production globale de cellules et de batteries

En 2021, près de 80% de la fabrication de cellules était concentrée dans des entreprises asiatiques, suivies par des entreprises européennes avec 10% et nord-américaines avec 6%. Fin 2021, les entreprises CATL, BYD, Panasonic, LG et Samsung faisaient partie des cinq premiers fabricants mondiaux de cellules de batteries lithium-ion en termes de capacité (cf. figure 19). Tous les fabricants prévoient d'augmenter considérablement leur production future. Parmi eux, SVOLT et CALB affichent des objectifs ambitieux, annonçant respectivement une augmentation de leur production à 500 GWh et 600 GWh d'ici 2025 (Global X, 2022).

En 2021, la Chine était de loin le leader dans le domaine des batteries, avec près de 80% de la capacité de production mondiale des batteries lithium-ion, ce qui représente une capacité totale de 558 GWh. En outre, la Chine a acquis une position dominante dans l'extraction du graphite et le raffinage des minéraux de batteries tels que le lithium et le cobalt. Les États-Unis suivent la Chine avec environ 6%, soit 44 GWh de capacité totale, en 2021, dont la plus grande partie est attribuée à Giga Nevada de Tesla et Panasonic, avec une capacité annuelle de 37 GWh. L'ensemble des pays européens représentait environ 68 GWh en 2021, soit environ 10% de la capacité de production mondiale de batteries. La Hongrie et la Pologne font également partie des cinq premiers pays, où sont implantées des usines de grands fabricants de batteries comme SK Innovation et LG Chem. Dans un avenir proche, d'ici 2025, des pays comme l'Allemagne, la France, la Suède et l'Angleterre augmenteront considérablement leurs capacités de fabrication de batteries lithium-ion (voir la figure 20 et la section suivante) (Visualcapitalist, 2022).

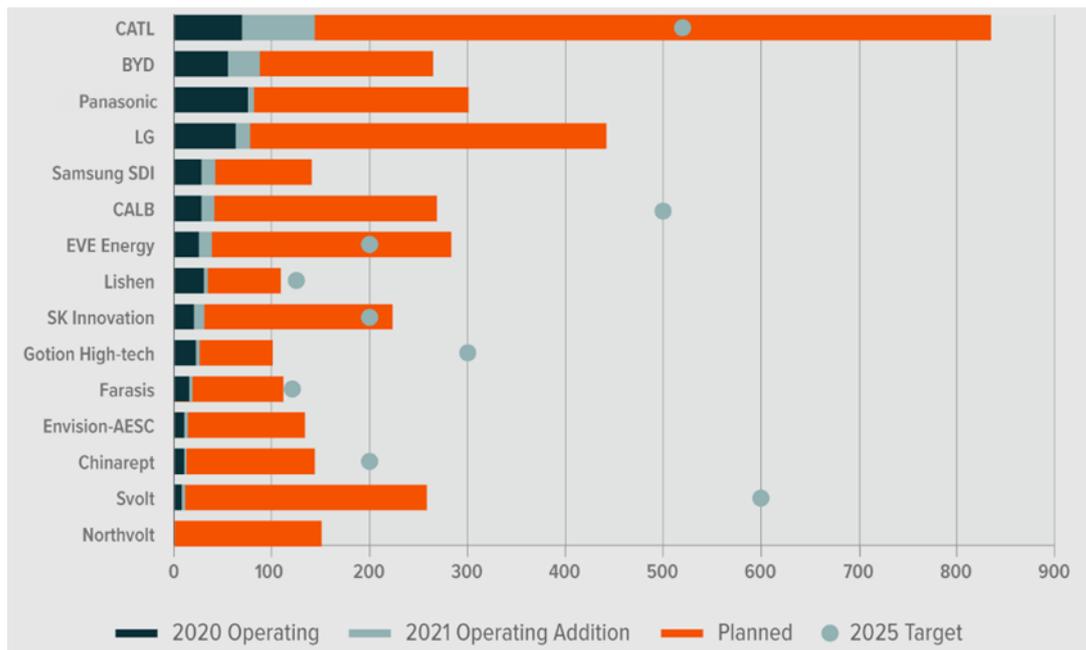


Figure 19: Capacité de production de cellules de batteries en GWh par fabricant et par an. CATL et BYD sont des entreprises chinoises, Panasonic est basé au Japon et LG est une entreprise sud-coréenne (Global X, 2022).

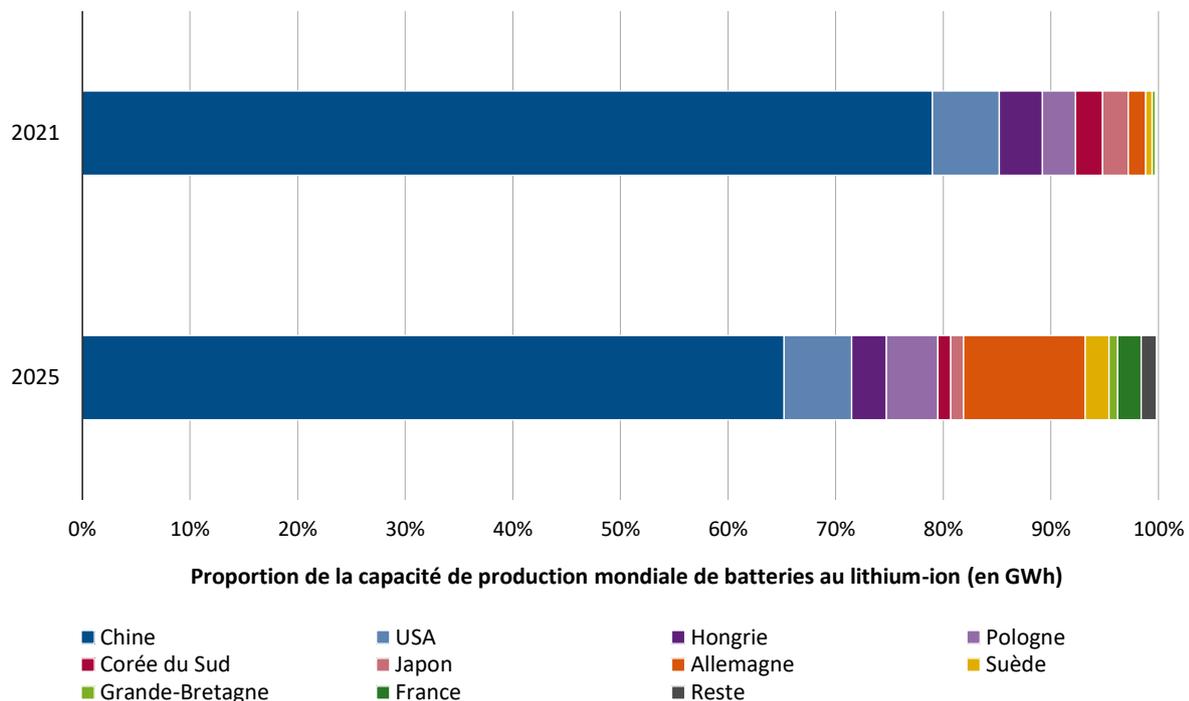


Figure 20: Proportion de la capacité de production mondiale de batteries au lithium-ion (en GWh) par pays (Visualcapitalist, 2022).

Capacité de production planifiée en Europe

Le marché des cellules de batteries est très dynamique à l'heure actuelle. Une quarantaine d'usines de production de cellules de batteries sont donc planifiées ou déjà en construction (RWTH Aachen, 2022a). La figure 21 montre la production de cellules de batteries planifiée pour 2030 en Europe : au total, plus de 1'400 GWh sont prévus, contre environ 68 GWh de capacité de production en 2020 (RWTH Aachen, 2022a). Avec près de 500 GWh, l'Allemagne deviendra le pôle de production des batteries en Europe, étant donné que la majorité des fabricants de cellules, des constructeurs de batteries ainsi que des centres d'essai s'y trouvent. L'Allemagne est suivie par le Royaume-Uni et la Norvège. D'autre part, les

pays nordiques ont une plus grande part de marché dans la production de matières premières ou et dans le recyclage. Parmi les fabricants de cellules, trois groupes se distinguent (RWTH Aachen, 2022a ; swissquote, 2022) :

- les grands producteurs établis ;
- les associations de constructeurs automobiles avec des partenaires technologiques, comme par exemple le partenariat entre VW et Northvolt ou les coentreprises de Total, Stellantis et Mercedes ;
- et les startups comme Britishvolt.

Presque tous les constructeurs automobiles, à l'exception notable de General Motors, développent et assemblent eux-mêmes le pack de batteries. Dans certains cas, l'assemblage du pack de batteries est réalisé par une coentreprise ou une entreprise dans laquelle le constructeur automobile détient une participation. Sur le marché européen, il n'existe pas encore d'entreprise générale couvrant l'ensemble de la production de batteries (RWTH Aachen, 2022a).

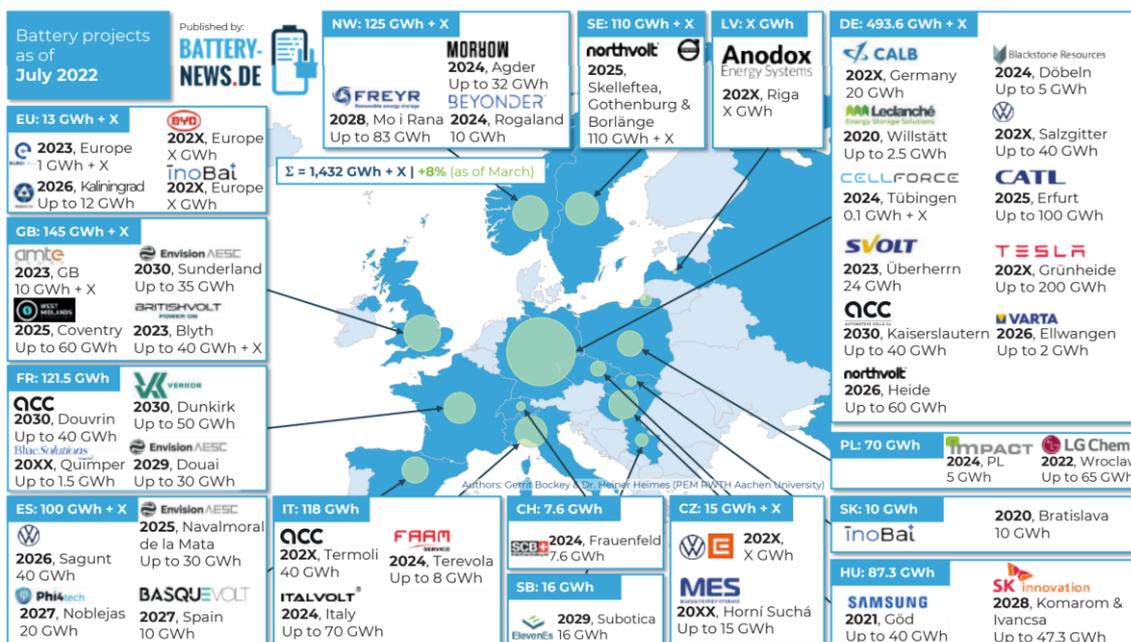


Figure 21: Aperçu de la production existante et planifiée de cellules de batteries en Europe (y compris CH, Norvège et UK), situation en juillet 2022 (RWTH Aachen, 2022a). Remarque : la taille des points représente la production future planifiée.

Le rôle de l'Union européenne

Jusqu'à récemment, l'Europe ne tenait pas une place importante en tant que site de production de cellules de batteries. Cependant, les innovations technologiques et les conditions politiques stables et propices rendent l'Europe de plus en plus attrayante en tant que nouveau marché pour la production de batteries. Les entreprises européennes représentent environ 840 GWh de la capacité de production prévue. En comparaison, les entreprises asiatiques prévoient d'y installer environ 390 GWh et les entreprises américaines 200 GWh de capacité de production annuelle (RWTH Aachen, 2022a).

Les fabricants asiatiques comme CATL sont également de plus en plus présents en Europe. La présence de fabricants extra-européens s'explique notamment par des conditions-cadres réglementaires. Il n'est pas encore clair si l'Europe pourra égaler l'Asie dans un avenir proche en termes de production et d'innovation : les fabricants asiatiques ont toujours une avance considérable et devraient rester en tête au cours des dix prochaines années. Derrière les coentreprises qui se forment en Europe se trouvent toutefois de grands constructeurs automobiles qui apportent le capital nécessaire et ont le potentiel d'égaliser les entreprises asiatiques (RWTH Aachen, 2022a). Avec 88 des 115 usines en projet, la Chine devrait rester en tête en termes de capacité de production au cours des dix prochaines années. C'est toutefois l'Europe qui affiche actuellement le taux de croissance le plus élevé (Benchmark Mineral Intelligence, 2019).

Quels sont les goulets d'étranglement en matière de capacité de production ?

Causes des problèmes d'approvisionnement

Des difficultés d'approvisionnement temporaires tout au long de la chaîne d'approvisionnement sont toujours possibles et peuvent être dues à différentes raisons. Il n'est pas possible de répondre de manière générale à la question des pénuries actuelles et futures, et celles-ci peuvent ne concerner que certaines entreprises, matières premières ou composants (Fraunhofer ISI, 2020).

De nombreux acteurs sont impliqués dans l'ensemble du processus de fabrication des batteries lithium-ion. Des retards de livraison au client final peuvent donc se produire, tout comme des goulets d'étranglement entre les constructeurs automobiles et leurs fournisseurs de cellules ou de batteries. Pour certaines matières premières, des pénuries temporaires, des problèmes d'approvisionnement ou des hausses de prix à court terme ne peuvent pas être exclus, notamment en raison d'une offre limitée sur le marché et d'instabilités géopolitiques. Cela peut par exemple se produire lors de la mise en exploitation de nouveaux sites d'extraction, au cas où les matières premières ne peuvent pas être extraites en temps voulu afin de répondre à la demande ou si l'exportation depuis les pays producteurs ne peut pas être garantie. Comme mentionné au chapitre 3.1, il existe encore des incertitudes quant à la disponibilité future des matières premières pour le nickel, c'est pourquoi des pénuries temporaires ou des problèmes de livraison ne sont pas à exclure (Fraunhofer ISI, 2020).

Conséquences de la guerre en Ukraine

La pénurie des semi-conducteurs et des matières premières ainsi que la pandémie mondiale de COVID ont eu un impact important sur la production ces dernières années et ont entraîné des retards dans les livraisons de véhicules. La guerre en Ukraine, qui a débuté au printemps 2022, a encore aggravé les difficultés de livraison sur le marché automobile. Par exemple, des pièces fournies par des usines ukrainiennes, comme des faisceaux de câbles, ont fait défaut (autoschweiz, 2022). Les chaînes d'approvisionnement en lithium, cobalt et graphite sont moins touchées par ces perturbations de l'approvisionnement. La situation est toutefois préoccupante pour le nickel : la Russie est le troisième plus grand producteur, avec environ 9% du nickel mondial extrait et environ 6% traité en 2021. La situation est encore plus critique si l'on considère que la Russie produit environ 20% du nickel mondial de classe 1, avec une teneur en nickel d'au moins 99,8%, nécessaire pour les batteries (AIE, 2022).

Stratégies de minimisation des risques

Afin de minimiser les risques et de réduire la vulnérabilité de l'industrie en matière d'approvisionnement, les entreprises adoptent différentes stratégies : Diversification des fournisseurs, coopérations industrielles stratégiques tout au long de la chaîne de valeur, comme par exemple BMW avec CATL, VW avec Northvolt, BMZ avec Samsung ou BASF avec Nor Nickel, ainsi que coopération en matière de recherche, joint-ventures et fabrication interne (Fraunhofer ISI, 2020). En outre, les constructeurs automobiles concluent des contrats directement avec les fournisseurs de matières premières pour batteries. En 2022, Mercedes a par exemple annoncé une coopération avec des producteurs de matières premières afin de garantir ses capacités de production (electrive, 2022). Dans le cadre d'un Important Project of Common European Interest (IPCEI), des consortiums d'entreprises sont encouragés à produire eux-mêmes des cellules de batteries. Un premier consortium de ce type est composé, entre autres, d'Opel, Saft, BMW, VARTA et BASF (Fraunhofer ISI, 2020).

Ces mesures sont accompagnées d'autres mesures réglementaires telles que la révision de la directive sur les batteries EU Directive 2006/66/EC (cf. également le chapitre 2.4).

L'éventuelle pénurie de nickel représente un risque, car elle pourrait entraîner des problèmes d'approvisionnement. Le recyclage est toutefois une mesure pertinente pour y faire face. Le nickel peut être récupéré à plus de 90% dans les batteries collectées. Si les batteries sont collectées ou recyclées efficacement, cela contribuera à l'avenir à la sécurité de l'approvisionnement en matières premières (Fraunhofer ISI, 2020). Toutefois, cette stratégie ne peut pas réduire de manière significative les risques à court et moyen terme. En effet, selon les prévisions, la demande en batteries va fortement augmenter au cours des prochaines décennies.

4.2 Production des matériaux et composants

Quels sont les impacts environnementaux engendrés par la production des métaux utilisés dans les batteries ?

Le chapitre 2.3 donne un aperçu de l'impact environnemental des batteries au long de leur cycle de vie et les compare avec les véhicules à combustion interne. Dans une perspective d'analyse du cycle de vie, les principaux matériaux utilisés dans la production de batteries sont les suivants :

- Les matériaux actifs de la cathode, principalement le nickel et le cobalt ;
- Le graphite dans l'anode ;
- Le cuivre, principalement utilisé dans les collecteurs d'électricité ;
- L'aluminium, utilisé dans différents composants de la batterie.

Ces matériaux sont abordés plus en détail dans le présent chapitre.

Production de graphite

Dans les batteries lithium-ion actuelles, le graphite est généralement utilisé comme matériau d'anode et représente une part importante de la masse totale de la batterie (voir chapitre 2.1). Par exemple, une Tesla modèle S contient jusqu'à 54 kg de graphite (Surovtseva et al., 2022). Le graphite actuellement utilisé dans les batteries est généralement composé d'un mélange de graphite naturel (environ deux tiers du total) et synthétique (environ un tiers) (ECGA, 2018). La part de graphite synthétique devrait augmenter dans les batteries plus modernes, car il est généralement de meilleure qualité (ECGA, 2018 ; Whiteside & Finn-Foley, 2019).

Le graphite synthétique est une source importante d'émissions d'oxydes d'azote NOx, d'oxydes de soufre SOx et de PM10¹⁸. Ces émissions sont générées lors du processus de carbonisation dans la production de graphite, lorsque le mélange de goudron de houille et de coke est contaminé par du soufre, de l'azote et des cendres (Dai et al., 2019). La production synthétique de graphite est également très gourmande en énergie, car elle nécessite des températures de traitement élevées (Porzio & Scown, 2021). De plus, selon Dai et al., 2019, cette consommation d'énergie est probablement massivement sous-estimée dans de nombreuses analyses de cycle de vie actuelles. Les auteurs indiquent même que la dernière étape de la production de graphite destiné à la production de batteries n'a pas été prise en compte dans leur étude.

Production de cuivre, de nickel et de cobalt

Le cuivre est l'un des principaux composants des batteries lithium-ion, de par son utilisation en tant que collecteur de courant, sous forme de fine feuilles métalliques. Le cuivre peut être produit par des procédés pyrométallurgiques ou hydrométallurgiques. Le procédé pyrométallurgique le plus utilisé consiste en la production d'un concentré de cuivre par broyage, suivie de procédés de fusion et de raffinage (Chordia et al., 2021). Le traitement et le raffinage des minerais de cuivre sulfurés peut entraîner des émissions de SOx importantes (Dai et al., 2019). De plus, l'extraction du cuivre implique l'élimination de déchets de minerais sulfurés, ce qui augmente considérablement les risques liés à des substances toxiques pour l'homme et l'environnement (Ellingsen et al., 2014).

Le nickel et le cobalt sont utilisés dans les matériaux actifs de la cathode, leur proportion dépendant du type de la batterie. En général, beaucoup de fabricants tentent de réduire la proportion de cobalt dans la cathode en augmentant celle de nickel. Le nickel et le cobalt sont généralement extraits de minerais sulfurés en même temps que le cuivre.¹⁹ Les impacts environnementaux de l'extraction, du traitement et du raffinage des minerais sont donc interconnectés. Les proportions des différents métaux dans le minerai sont déterminantes, mais elles varient selon le site de production.

L'extraction de sulfate de nickel de qualité suffisante pour produire des batteries utilise généralement sur du nickel pur à plus de 99,8%, obtenu par électrolyse à partir de nickel brut. Norilsk Nickel en Russie est

¹⁸ Les particules PM10 et PM2.5 sont celles dont le diamètre est inférieur à 10 et 2,5 millièmes de millimètre.

¹⁹ Le nickel est également extrait de minerais oxydés, mais la majorité est utilisée comme élément d'alliage dans la production d'acier.

l'un des principaux producteurs de nickel pur, et en même temps le plus grand émetteur individuel de SO₂ au monde, comme le montrent les données de la NASA (Greenpeace, 2020). Norilsk fait actuellement des investissements importants pour réduire ses émissions de SO₂ de plus de 90% au cours de la prochaine décennie (Nickel Institute, 2021 ; Norinickel, 2020). Il pourrait s'agir de la mesure individuelle réduisant le plus l'impact environnemental des batteries lithium-ion. En effet, les émissions de SO₂ occupent une place importante dans le calcul de nombreuses catégories d'impact. Ces émissions proviennent de l'extraction du nickel pour la production de matériaux actifs des cathodes. D'autres fonderies de nickel dans le monde ont déjà mis en place des mesures de contrôle des émissions de SO₂ (Dai et al., 2019). L'impact environnemental de l'extraction du nickel devrait donc être plus faible dans les futures études d'ACV sur les batteries lithium-ion.

L'extraction du cobalt a lieu principalement au Congo. Le cobalt y subit un premier traitement avant d'être exporté vers la Chine sous forme d'hydroxyde de cobalt brut (Dai, Kelly, & Elgowainy, 2018). Contrairement au processus de calcination de Norilsk pour l'extraction du nickel, les émissions de SO₂ provenant de la calcination des minerais de cuivre et de cobalt au Congo sont captées et réutilisées pour la production d'acide sulfurique. Le Congo n'ayant pas d'industrie chimique, les usines de traitement des minerais produisent de l'acide sulfurique sur place afin de couvrir au moins partiellement leurs besoins et réduire ainsi les coûts (Dai, Kelly, & Elgowainy, 2018 ; Dai et al., 2019). L'extraction du cobalt suscite d'autres préoccupations environnementales, telles que des émissions importantes de PM₁₀. Les émissions de particules fines des terrils de minerai de faible valeur ainsi que les grandes distances de transport parcourues par des camions diesel sur des routes non goudronnées y contribuent principalement (Dai et al., 2018, 2019, et Golder Associates, 2007). Voir chapitre 3.2 pour les impacts sociaux négatifs.

Production d'aluminium

L'aluminium est utilisé dans de nombreux composants des batteries lithium-ion (Porzio & Scown, 2021). Les impacts environnementaux liés à son extraction sont principalement dus à la consommation d'électricité pendant le processus d'électrolyse. En fonction du mix énergétique utilisé pour alimenter ce processus, ces impacts peuvent devenir considérables, comme c'est le cas par exemple en Chine, d'où proviennent la plupart des batteries. Bien que le taux de recyclage mondial de l'aluminium soit élevé, Dai et al. (2019) indiquent que l'aluminium utilisé dans les batteries pourrait être jusqu'à 100% de l'aluminium primaire (non-issu du recyclage), pour des raisons de qualité. L'aluminium recyclé contient la plupart du temps des impuretés, ce qui empêche son utilisation dans tous les domaines. En conséquence, il est utilisé le plus souvent utilisé comme matériau de moulage. Les différences de qualités et de spécifications des alliages pour les composants en aluminium compliquent le recyclage en circuit fermé des déchets de production d'aluminium. La production d'aluminium primaire et d'aluminium secondaire sont très différents du point de vue de la consommation énergétique et des impacts environnementaux. Les hypothèses faites sur la proportion d'aluminium secondaire (donc recyclé) pourraient donc influencer de manière significative les résultats de l'analyse du cycle de vie des batteries.

Sources d'énergie pour le transport, ainsi que pour la production de chaleur et d'électricité

Des combustibles fossiles sont utilisés pour le transport, le chauffage et la production d'électricité lors de la production des composants de batteries. Ces processus génèrent la majeure partie des émissions de gaz à effet de serre, au même titre que l'extraction et la transformation des matières premières. Plus ces processus de base seront alimentés par des sources d'énergie renouvelables, plus l'impact environnemental global de la production de matériaux et de composants sera faible.

4.3 Consommation de matières premières et d'énergie

Combien d'énergie et de matériaux sont utilisés pour la production de batteries?

Production et consommation d'énergie

Crenna et al. (2021) arrivent à la conclusion que les processus de production d'électricité et de chaleur dans toutes les étapes de production ne contribuent qu'à 20% de l'impact climatique total d'une batterie. En revanche, Dai et al. (2019) estiment qu'environ 40% de l'impact climatique est dû à ces processus. Selon Crenna et al. (2021), près de 85% des effets sur le climat provenant de la production d'électricité sont générés lors de la fabrication du matériau actif pour la cathode. Environ 6% proviennent de la fabrication de la cathode et environ 10% de la fabrication des cellules.

La consommation d'énergie pour la production du matériau actif de la cathode est considérable. La synthèse d'hydroxyde à partir de sulfates de nickel, de manganèse et de cobalt ainsi que la calcination avec du carbonate de lithium qui s'ensuit y contribuent notamment (Dai et al., 2019 ; Dai, Kelly, Dunn, et al., 2018). La première étape consiste en une épuration des eaux usées issues du processus, qui consomme beaucoup d'énergie. De plus, dans de nombreux cas, l'étape de calcination est répétée plusieurs fois afin d'utiliser la matière au maximum. Cela entraîne une consommation d'énergie plus élevée, mais réduit le coût en matériaux (Dai et al., 2019 ; Dai, Kelly, Dunn, et al., 2018).

En ce qui concerne la demande de chaleur industrielle, la production des cathodes et des cellules engendrent chacune environ la moitié de la consommation (Crenna et al., 2021). La gestion de l'humidité dans la salle de séchage des électrodes consomme de l'électricité. De plus, de la vapeur est utilisée pour la déshumidification et le séchage (Dai et al., 2019). Le solvant N-méthyl-2-pyrrolidone, également appelé NMP, est utilisé dans la production d'électrodes. L'évaporation de ce solvant nécessite une consommation d'énergie élevée, car une grande quantité d'air doit circuler pour maintenir la concentration de NMP dans l'air en dessous de la limite d'explosivité. La consommation d'énergie pour ces deux étapes de production est en grande partie indépendante de la charge de l'installation, c'est-à-dire que la consommation d'énergie par cellule est beaucoup plus élevée lorsque la production est faible que lorsqu'elle l'est à plein régime.

Consommation d'énergie pour la production de cellules et dimension de l'usine

L'énergie consommée par kWh de cellule de batterie produite a nettement diminué au cours de la dernière décennie. Trois facteurs sont à l'origine de cette évolution :

- L'augmentation de l'échelle de la production, en passant de projets pilotes à des gigafactories ; plus l'usine est grande, plus la consommation d'énergie spécifique est faible ;
- Les usines actuellement étudiées fonctionnent généralement quasiment à pleine capacité, ce qui n'était pas le cas des études plus anciennes basées sur des données provenant d'usines pilotes ;
- L'amélioration des pratiques grâce à l'innovation.

Alors que le potentiel d'amélioration des deux premiers effets est probablement déjà largement exploité, il est probable que des améliorations supplémentaires puissent être apportées grâce aux effets d'apprentissage et à l'innovation, à mesure que l'expérience de la production de batteries lithium-ion est engrangée.

Des installations de productions plus grandes ainsi que l'expérience engrangée offrent un potentiel d'amélioration dans le domaine de l'efficacité des matériaux. Chordia et al. (2021) arrivent à la conclusion que l'impact environnemental par kWh de cellule produite diminue nettement lorsqu'il est extrapolé aux capacités de production d'une gigafactory, car l'efficacité d'utilisation des matériaux augmente. Les catégories d'impact telles que l'acidification, l'eutrophisation et la toxicité ont été considérées pour cette étude. Celles-ci dépendent fortement de la production de sulfates de nickel et de cobalt, qui servent à la fabrication du matériau actif des cathodes.

4.4 Impacts environnementaux de la production

Quels sont les impacts climatiques et environnementaux de chaque type de batterie?

Comme mentionné au chapitre 2.3, les estimations de la consommation d'énergie pour la production des cellules de batterie varient considérablement d'une étude à l'autre. Cela s'explique par le fait que les installations considérées ont des tailles différentes et ne fonctionnent pas toutes à pleine capacité. Les gigafactories modernes fonctionnant à pleine charge occupent le bas de l'échelle en termes de consommation d'énergie dans la littérature. De plus, les différents procédés industriels utilisés et les types de batteries produites expliquent aussi la variation de la consommation d'énergie suivant les installations. Par exemple, la consommation d'énergie diminue si l'on utilise de l'eau au lieu du NMP comme solvant lors du séchage des électrodes (Dai et al., 2019). De plus, les installations situées dans des régions chaudes et humides consomment plus d'énergie pour la déshumidification que celles situées dans des régions plus tempérées (Dai et al., 2019).

Sources de l'énergie utilisée pour la production de batteries

Les sources d'énergie utilisées pour la production des batteries et les processus en amont ont une forte influence sur l'impact environnemental. Les émissions de gaz à effet de serre par kWh de batterie produit sont 3 à 9%²⁰ plus faibles si elles sont produites avec un mix électrique européen (composé à 43% d'électricité d'origine fossile) comparé au mix électrique chinois (composé à 73% d'électricité d'origine fossile) (Crenna et al., 2021, résultats révisés en janvier 2023). Selon une autre étude, la production de batteries en utilisant le mix électrique suédois, quasiment entièrement décarboné, émet 55% moins de gaz à effet de serre qu'une production utilisant le mix sud-coréen, la quasi-totalité de l'impact environnemental étant alors imputable aux processus en amont (Chordia et al., 2021). Les auteurs mentionnent en outre que des améliorations d'une ampleur similaire pourraient être obtenues dans les catégories d'impact suivantes : Formation d'ozone, émissions de particules fines, destruction de l'ozone stratosphérique et rayonnement ionisant. Dans ces cas aussi, les impacts sont principalement déterminés par la consommation d'électricité lors de la production. En revanche, selon Crenna et al. (2021), les émissions de particules fines proviennent en grande partie de la fabrication des matériaux, c'est-à-dire de l'extraction et des processus métallurgiques.

Influence du type de batterie

Le type des batteries produites a également une influence sur l'impact environnemental de la production de batteries lithium-ion, quoique dans une moindre mesure. Les émissions de gaz à effet de serre (en kg CO₂eq/kWh) lors de la production de modules de batteries de type NMC111, NMC811, et NCA diffèrent au maximum de 10% lorsqu'ils sont produits de manière similaire (Crenna et al., 2021). En effet, tous les types de batteries sont généralement produits à l'aide de procédés similaires. La principale différence réside dans le matériau actif utilisé pour la cathode. Le facteur déterminant est la proportion de nickel et de cobalt dans le matériau actif de la cathode. Il existe cependant une différence d'impact plus importante entre les cellules LFP et les cellules NMC ou NCA, car leur cathode est constituée de matériaux très différents.

La figure 22 montre les résultats d'analyses de cycle de vie (ACV) de la fabrication des batteries, classés selon les types de batteries les plus courants. Les résultats sont normalisés par rapport à l'impact environnemental de la production d'une batterie NMC622 en Chine. La principale différence entre les cathodes NMC et NCA réside dans l'utilisation de manganèse pour les cathodes NMC, ou d'aluminium pour les cathodes NCA. En général, la production d'aluminium engendre²¹ des impacts environnementaux plus élevés que le manganèse dans la plupart des catégories d'impact, c'est pourquoi les batteries NCA sont marginalement moins performantes que les batteries NMC. La principale différence entre les batteries NMC622 et NMC111 réside dans le fait que les batteries NMC622 ont une teneur en cobalt plus faible et une teneur en nickel plus élevée.

²⁰ Diminution de 9% : Si la production de matériaux actifs reste en Chine et que seule la production de cathodes, de cellules et de batteries est transférée en Europe. Diminution de 3% : si la production de matériaux actifs est également transférée en Europe. Données recalculées par E. Crenna avec ecoinvent v3.8 en janvier 2023.

²¹ En supposant un mix électrique mondial ou chinois pour l'électrolyse. En revanche, la production d'aluminium en Europe utilise en grande partie de l'électricité renouvelable et obtient donc de meilleurs résultats.

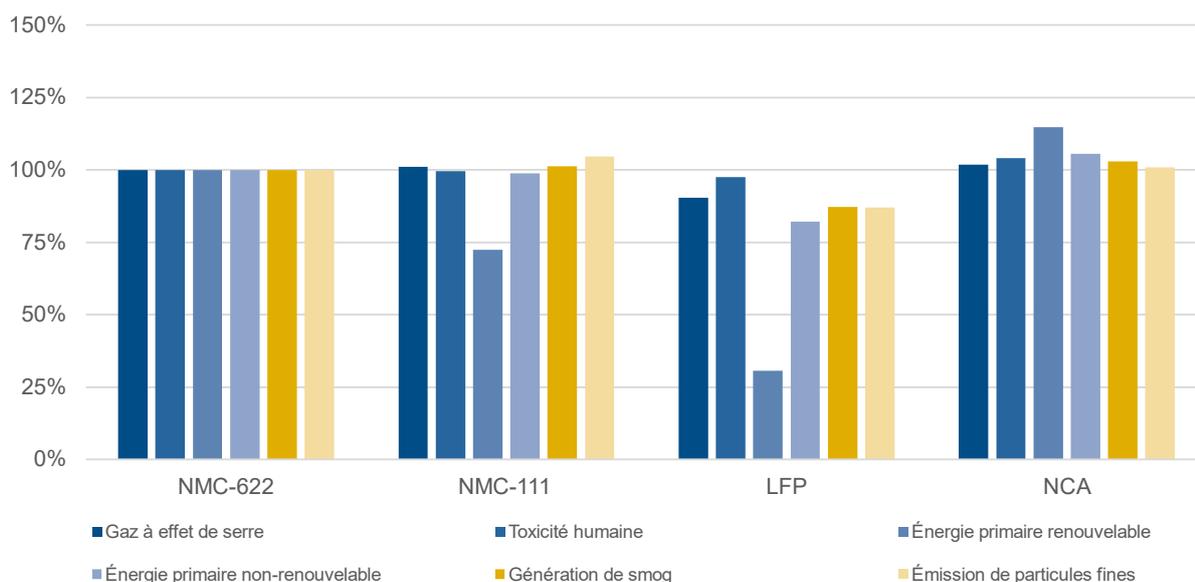


Figure 22: Comparaison de l'impact environnemental de la production de batteries selon leur type. Élaboration INFRAS avec les données du PSI-Carculator²².

L'état actuel des connaissances scientifiques en matière d'analyse de cycle de vie ne permet toutefois pas encore de comparer de manière détaillée les différents types de batteries, car les données disponibles ne sont pas encore suffisamment précises et complètes pour permettre une analyse comparative approfondie. De plus, les technologies impliquées s'améliorent rapidement, comme par exemple avec le rétrofit des gaz d'échappement dans les installations de fusion du nickel de Norilsk en Russie et les processus de recyclage améliorés des batteries lithium-ion (voir chapitre 6), qui réduiront encore l'impact environnemental futur.

²² <https://calculator.psi.ch/>

5. Phase d'utilisation des batteries

5.1 Dimensionnement des batteries

Comment une batterie est-elle utilisée efficacement ? Quel serait le dimensionnement optimal d'une batterie ?

Trajets moyens

En Suisse, la voiture de tourisme moyenne parcourt moins de 25 km par jour (OFS & ARE, 2017). De plus, selon une étude européenne, environ 80% des véhicules parcourent moins de 100 km par jour (Pafumi et al., 2018) et 90% à 95% des véhicules parcourent moins de 150 km par jour, en fonction de la région et de la source des données. Une étude a examiné les "Floating Car Data"²³ d'une zone métropolitaine italienne contenant plus de 30 millions de trajets. Elle a montré qu'un véhicule électrique avec une autonomie de 200 km aurait suffi pour 97% des trajets effectués, sans recharge intermédiaire. Une autonomie de 400 km suffirait pour 99% de tous les trajets (Brancaccio & Deflorio, 2021).

Des tailles de batteries différentes

Dans la première moitié de l'année 2022, les quatre véhicules électriques les plus vendus en Suisse (CleanTechnica, 2022) ont une autonomie d'environ 350 à 600 km selon les spécifications des modèles de véhicules²⁴, compilés selon la norme "Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure" (WLTP). Ces véhicules devraient donc pouvoir effectuer la grande majorité des trajets sans recharge intermédiaire. Le cinquième véhicule électrique le plus vendu est la Fiat 500e, qui a une autonomie de 190 à 282 km d'après la norme WLTP, selon la taille de la batterie choisie. Ce petit véhicule vise en particulier le marché des pendulaires. La figure 23 donne un aperçu de l'autonomie d'après la WLTP des véhicules électriques disponibles sur le marché suisse. La valeur moyenne est d'environ 380 km, le minimum de 105 km avec une Smart Fortwo Cabrio EQ. Le maximum est de 614 km avec une Tesla Model 3 Performance. Environ 70% de tous les modèles proposés ont une autonomie > 345 km.

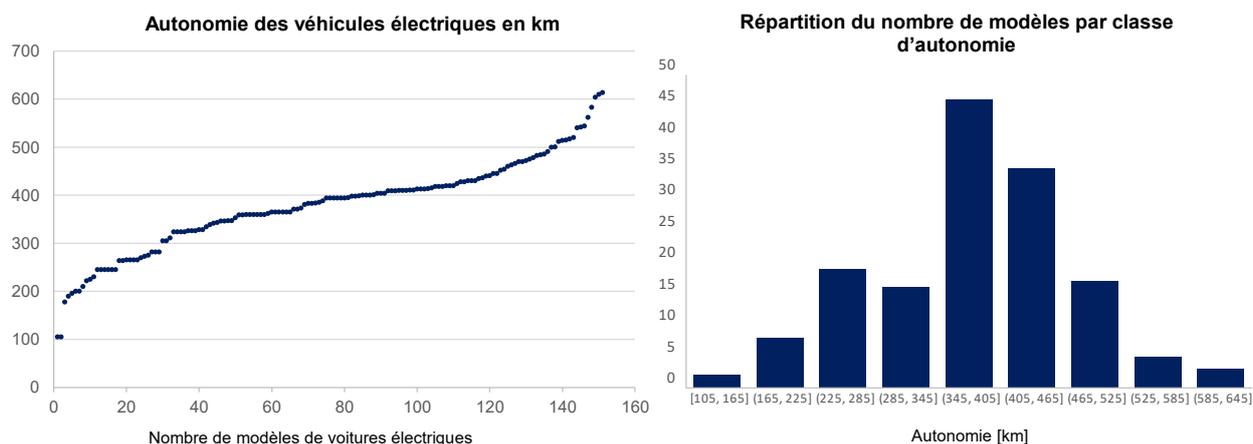


Figure 23: Aperçu de l'autonomie de tous les modèles de véhicules électriques disponibles sur le marché suisse. Graphique INFRAS sur la base des données d'Eco-Auto (2022).

La figure 24 présente un aperçu de la capacité des batteries en kWh des véhicules électriques vendus en Suisse. La valeur moyenne est d'environ 71 kWh, et le minimum est de 17.6 kWh km avec la Smart Fortwo Cabrio EQ. Le maximum est de 108,4 kWh avec la Mercedes EQS 53 4matic+. Environ 77% de tous les modèles proposés ont une capacité de batterie supérieure à 56 kWh.

²³ Floating Car Data (FCD) désigne une proposition de système avec des données générées à partir d'un véhicule qui participe actuellement à la circulation.

²⁴ <https://eco-auto.info/>

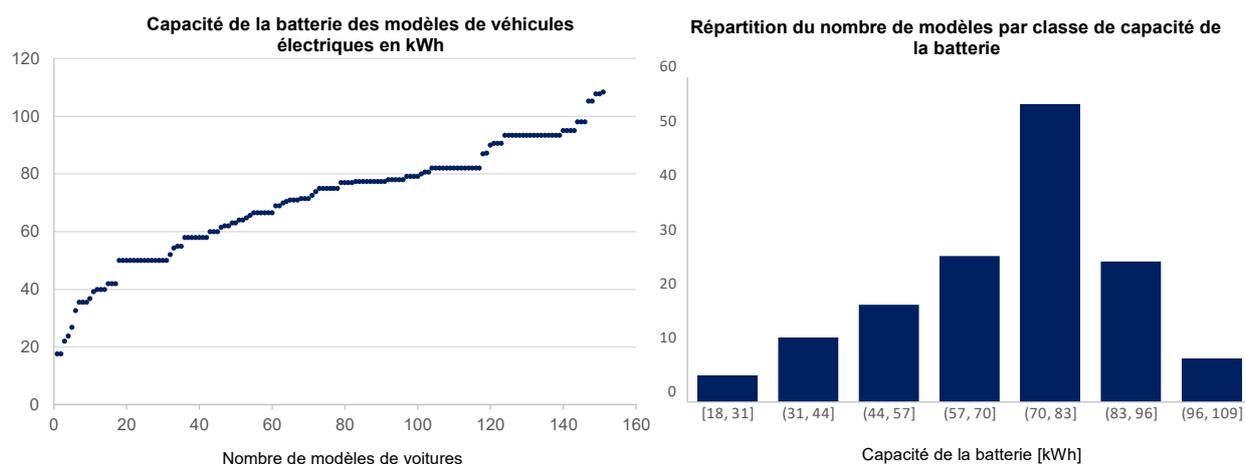


Figure 24: Aperçu de la capacité des batteries de tous les modèles de véhicules électriques disponibles sur le marché suisse. Graphique INFRAS sur la base des données d'Eco-Auto (2022).

Impact environnemental et taille de batterie

La figure 25 a été élaborée à l'aide du PSI-Carculator, en supposant des valeurs standard pour les conditions d'utilisation en Suisse. Seule la taille de la batterie a été modifiée. La simulation de différentes tailles de batteries pour un même modèle met en évidence l'influence que ce facteur exerce sur les émissions de gaz à effet de serre, l'impact environnemental moyen, le coût total de possession et l'autonomie réelle. La comparaison considère des tailles de batteries proposées par les modèles répandus sur le marché²⁵: une Tesla Model 3 60-75 kWh, une Fiat 500e 24-42 kWh et une Audi e-Tron 55-95 kWh. Une batterie plus massive de 50% augmenterait l'autonomie d'environ 40%, le coût total d'exploitation d'environ 14% et les émissions de gaz à effet de serre liées à la batterie d'environ 15%. Les simulations se basent sur l'hypothèse que les trois véhicules considérés parcourent la même distance au cours de leur durée de vie totale, ce qui n'est pas forcément le cas dans la réalité. Si la voiture avec la plus grosse batterie est utilisée pour effectuer des distances journalières plus élevées, elle aura probablement une meilleure performance kilométrique qu'un véhicule ayant une batterie plus petite qui ne parcourt que de courtes distances chaque jour. Dans ce cas, l'impact environnemental par km du véhicule équipé d'une batterie plus grande serait inférieur au résultat illustré ici. La production de batteries plus massive entraîne une augmentation de l'impact environnemental. L'influence des différentes chimies de batteries sur l'impact environnemental est décrite en détail au chapitre 4.4.

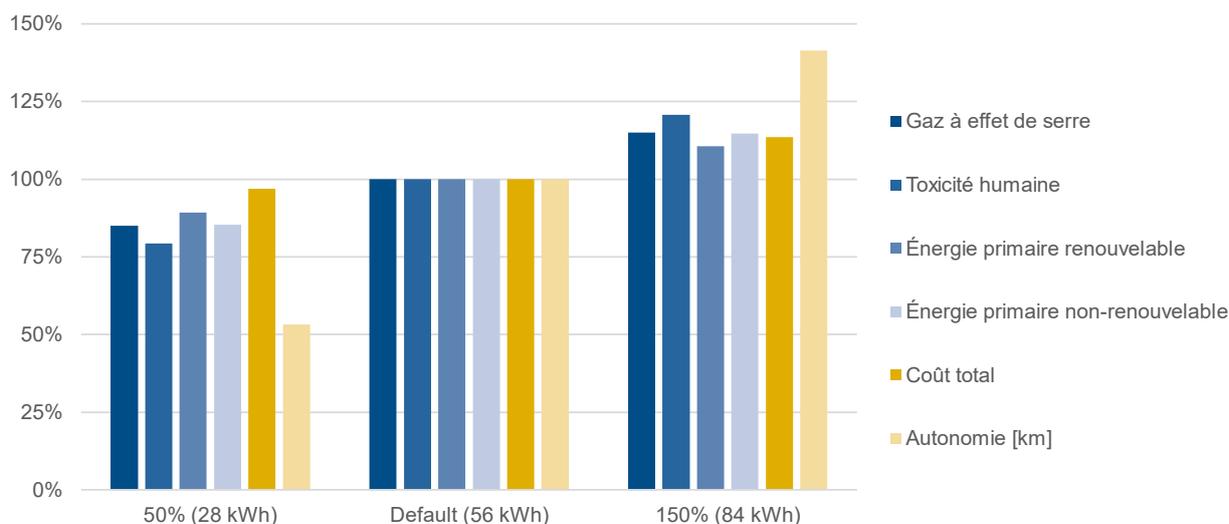


Figure 25: Relation entre la taille de la batterie et les catégories d'impact environnemental suivantes: émissions de gaz à effet de serre, toxicité humaine et consommation d'énergie primaire, ainsi que le coût total d'utilisation et l'autonomie réelle du véhicule. Graphique INFRAS avec des données du PSI-Carculator²⁶.

²⁵ <https://eco-auto.info/>

²⁶ <https://calculator.psi.ch/>

D'un point de vue environnemental, la batterie doit être la plus petite possible afin de minimiser l'impact de sa production. Une masse plus élevée signifie en outre une consommation d'énergie plus importante. D'autre part, une plus grosse batterie présente des avantages en hiver, comme par exemple une autonomie plus grande ou un vieillissement plus lent malgré les températures plus basses. La taille optimale de la batterie dépend donc des besoins individuels et constitue un compromis entre l'autonomie maximale, le coût et l'impact environnemental. La distance parcourue quotidiennement est le critère principal lors du choix du véhicule. En principe, un cycle de charge complet de 100% tous les deux jours garantit que la batterie puisse être utilisée pendant au moins 12 ans. Si l'on parcourt en moyenne 40 km par jour, l'utilisation de la batterie est optimale avec une autonomie réelle de 80 km. Mais comme les véhicules ne sont généralement pas utilisés tous les jours de la même manière, l'utilisation moyenne n'est pas le seul critère pertinent. Concrètement, on peut distinguer les cas d'application suivants :

– **Trajets typiques de pendulaires: moins de 40 km par jour**

Pas de longs trajets ou tout au plus très rarement : une capacité de batterie de 30 kWh maximum est nécessaire, ce qui correspond à une autonomie réelle de 120-150 km selon la saison en ville et en agglomération.

– **Trajets occasionnels sur de longues distances, jusqu'à 400 km par jour.**

Avec une capacité de batterie d'environ 50 kWh, il est possible de rouler 2 heures ou 200 km sur autoroute. La consommation d'électricité sur l'autoroute est plus élevée qu'en ville. Il est possible de recharger l'énergie pour les 200 km suivants en 10 à 45 minutes, selon la puissance de charge rapide maximale autorisée par le véhicule.

– **Longs trajets réguliers et/ou trajets de plus de 400 km par jour.**

Avec une capacité de batterie de 70 kWh, il est possible de rouler sur l'autoroute pendant environ 3 heures ou 300 km avec une seule charge. Le véhicule doit pouvoir être rechargé rapidement, à au moins 150 kW, afin de pouvoir fournir de l'énergie pour les 200 km suivants en 10 à 20 minutes.

5.2 Longévité des batteries

Quelle est la longévité des batteries et comment se dégradent-elles au fil de leur utilisation ? Quel est l'impact de la charge et de la décharge rapides ?

Définition du processus de vieillissement de la batterie

Les batteries au lithium-ion subissent un processus de vieillissement au fil de leur utilisation et de leur âge. Leur longévité est donc limitée. Le processus de vieillissement peut être divisé en deux types : Le vieillissement calendaire, qui décrit la dégradation de la batterie au fil du temps, et le vieillissement cyclique, qui se produit en raison des sollicitations dues aux charges et décharges répétées (Université technique d'Ilmenau, 2022). Le niveau de vieillissement d'une batterie est décrit par le terme "State of Health" (SOH) (état de santé). Celui-ci décrit la capacité résiduelle d'une batterie par rapport à la capacité nominale²⁷ indiquée par le fabricant. La fin de vie d'une batterie est généralement atteinte lorsque la capacité de stockage maximale est inférieure à 80% de la capacité nominale d'origine, c'est-à-dire à un SOH < 80% (MOTEG, 2022 ; Technische Hochschule Ingolstadt, 2021). Cependant, la définition de la capacité résiduelle dépend fortement du type d'application considéré et des exigences subjectives des utilisateurs vis-à-vis de la batterie. Il peut donc exister différentes interprétations de la fin de vie d'une batterie. Sur le marché, des valeurs de SOH comprises entre 75% et 80% sont considérées comme raisonnables (lionknowledge, 2022).

Avec les batteries actuelles, il faut compter en moyenne 1'000 à 1'500 cycles de charge pour qu'une batterie lithium-ion atteigne la fin de son utilisation dans un véhicule électrique, c'est-à-dire qu'elle atteigne un SOH < 80%. En multipliant ce nombre par l'autonomie actuelle de 300 km²⁸ par cycle de charge, on obtient une distance parcourue totale de 300'000 à 450'000 km (AUTO BILD, 2022 ; TCS, 2022). Certains véhicules électriques peuvent même parcourir jusqu'à 1,5 million de km durant leur durée de vie, sans changer de batterie (Schulze, 2022). La capacité nominale d'une batterie diminue continuellement dès le premier cycle (voir figure 26).

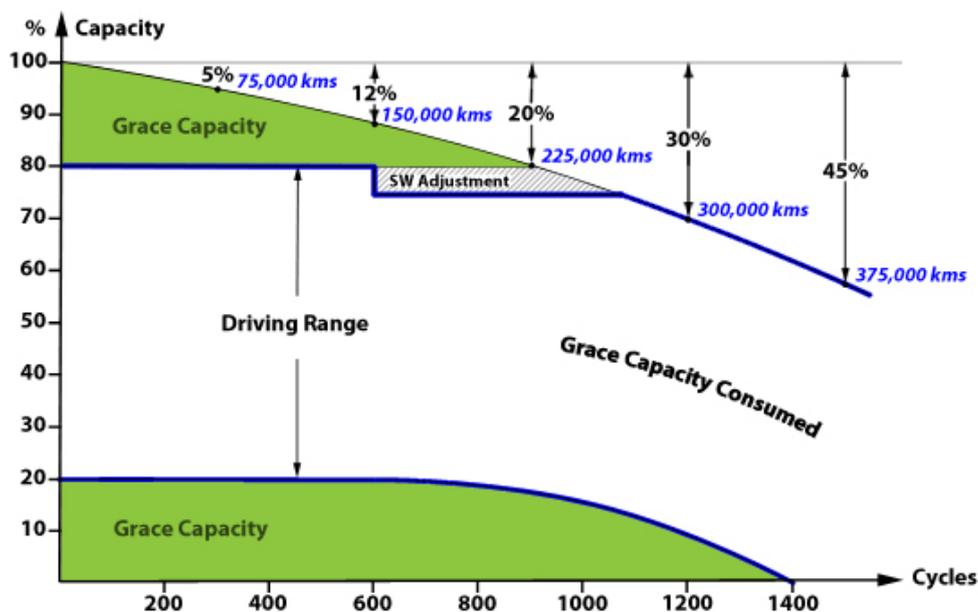


Figure 26: Représentation schématique de la capacité nominale et de la capacité de réserve ("Grace Capacity") d'une batterie lithium-ion en fonction du nombre de cycles de charge effectués (Battery University, 2019). Remarque : par "SW Adjustment", on entend l'adaptation de la capacité de réserve par le module de gestion de la batterie.

²⁷ La capacité nominale correspond au contenu énergétique en kWh d'une batterie lithium-ion à l'état neuf (également appelée capacité brute). Le contenu énergétique spécifique déclaré par le constructeur automobile, c'est-à-dire la capacité nette, est en général de 10% à 20% inférieur (e-mobileo, 2023 ; RP-Energie-Lexikon, 2022).

²⁸ Un cycle de charge est terminé lorsqu'une quantité d'énergie égale à 100% de la capacité nominale a été déchargée, mais pas nécessairement lors de la même charge. Par exemple, 80% de la capacité de la batterie peut être consommée en une journée et le véhicule électrique peut être rechargé complètement pendant la nuit. Si le jour suivant, 20% de la capacité de la batterie est utilisée, cela signifie que 100% de la capacité a été déchargée et que les deux jours constituent un cycle de charge complet.

Si une batterie est chargée à seulement 80% et déchargée sans descendre plus bas que 20% de sa capacité nominale, son autonomie correspond à 60% de sa capacité nominale. Ce processus est généralement contrôlé par le module de gestion de la batterie. Le module de gestion de la batterie contrôle également la capacité de réserve. En augmentant la capacité de charge, on prolonge la durée de vie de la batterie, mais on réduit aussi son autonomie. Lorsque la capacité de charge totale est épuisée, comme dans le graphique à 1'400 cycles, la batterie doit être entièrement rechargée et déchargée au minimum de sa capacité nominale afin de conserver l'autonomie initiale. À ce moment-là, la réduction de l'autonomie devient perceptible d'année en année (Battery University, 2019 ; lionknowledge, 2022).

La plupart des constructeurs offrent une garantie limitée sur la batterie lors de l'achat d'un véhicule électrique. Pour les voitures les plus répandues, la durée de la garantie est de 8 à 10 ans ou de 150'000 à 200'000 km, selon le constructeur. Cela correspond à environ 500 à 1'000 cycles complets, selon l'autonomie du véhicule (TCS, 2022). La durée de vie des batteries peut toutefois varier considérablement. Il n'y a actuellement pas de consensus à ce sujet dans la littérature, en raison du manque de données empiriques, la plupart des véhicules électriques mis sur le marché étant encore dans leur phase d'utilisation. Dans certains travaux, la durée de garantie des batteries de traction est utilisée comme référence pour estimer leur longévité, qui est de l'ordre de 8 à 10 ans selon les fabricants. Dans d'autres cas, c'est l'espérance de vie d'un véhicule à combustion actuel, d'environ 17 ans, qui sert de référence. Certains spécialistes estiment que les batteries dépasseront cette espérance de vie actuelle et dureront plus de 20 ans (voir également le chapitre 6.1). Dans le cadre de la seconde vie d'une batterie lithium-ion, il est possible de l'utiliser encore longtemps dans des applications stationnaires avec une capacité nominale nécessaire réduite, par exemple comme installation de stockage d'électricité solaire. Cela dépend toutefois fortement du type d'utilisation ou des exigences subjectives d'utilisation de la batterie par les utilisateurs.

Causes du processus de vieillissement

Le processus de vieillissement d'une batterie lithium-ion dépend de divers facteurs : le type de batterie, les matériaux utilisés et leur configuration, les mécanismes de dégradation associés aux différents composants de la cellule, la qualité de la production, le nombre de cycles de charge et de décharge, la méthode de charge de la batterie et la température ambiante (Fath, 2021 ; Technische Universität Ilmenau, 2022). Des niveaux de charge très élevés, supérieurs à 80%, et des niveaux de charge très bas, inférieurs à 20% de la capacité maximale, contribuent à accélérer le processus de vieillissement, car cela affecte certains processus chimiques au sein de la batterie (Schulze, 2022).

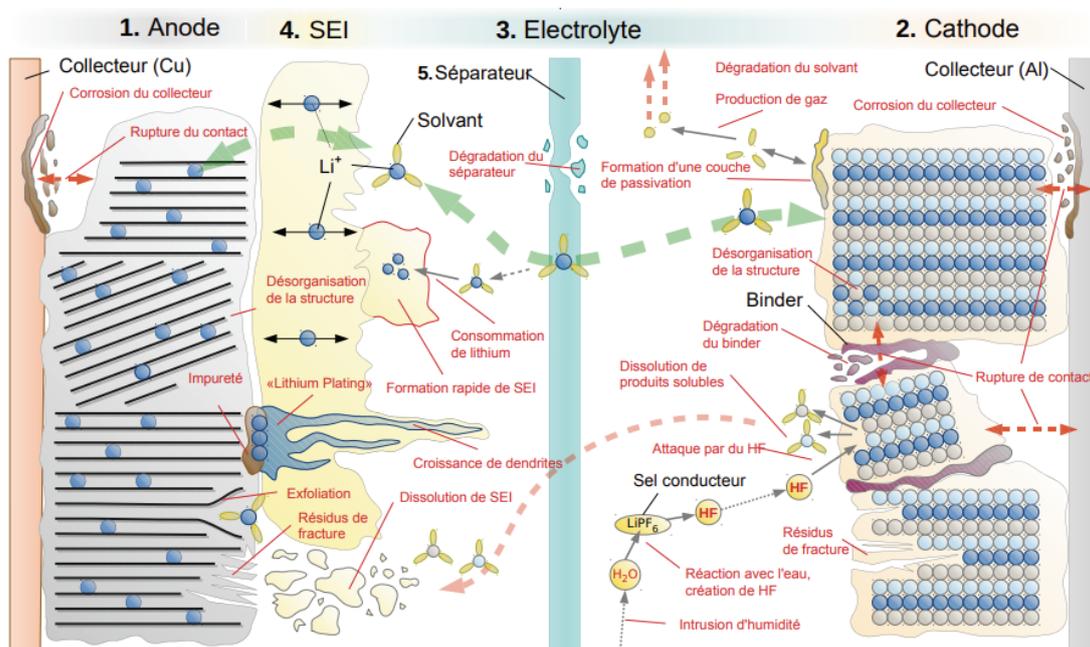


Figure 27: Aperçu des mécanismes d'altération de l'anode, de la cathode, du séparateur, de l'électrolyte et des composants de la cellule (Université technique d'Ilmenau, 2022). SEI : couche de passivation à l'interface entre le matériau actif de l'anode et l'électrolyte (en anglais "solid electrolyte interphase").

L'utilisation et le stockage des cellules de batteries lithium-ion entraîne une dégradation irréversible de ses différents composants. Les mécanismes de dégradation sont complexes et se produisent souvent simultanément. Lorsqu'un électrolyte liquide entre en contact avec la surface conductrice d'électrons de l'anode et que les cellules de la batterie sont chargées, une couche de passivation se forme à l'interface entre le matériau actif de l'anode et l'électrolyte. Cette couche est également appelée SEI, de l'anglais "solid electrolyte interphase". Des réactions électrochimiques entraînent une diminution de la capacité et de la puissance totale de la batterie²⁹. L'efficacité de la batterie diminue également. D'autres mécanismes de dégradation des composants de la cellule incluent la corrosion du collecteur, des ruptures de contact, des désordres de la structure de l'anode et de la cathode, la désagrégation du séparateur, et la création de résidus de fracture (cf. figure 27).

Effet de la charge rapide sur le vieillissement des batteries

La charge rapide des batteries en courant continu - en particulier la charge ultra-rapide de 150 kW à 350 kW - peut entraîner un vieillissement calendaire accru et une formation de gaz plus importante, ce qui réduit leur durée de vie (Geotab, 2020a). Les conditions de température, ainsi que la fréquence des recharges rapides, sont également déterminantes. De nombreux fabricants recommandent de n'utiliser les stations de recharge à courant continu qu'en cas de besoin, afin de préserver la batterie (Energyload, 2022 ; Wagner et al., 2022). Il n'est à l'heure actuelle pas possible de déterminer de manière fiable comment les différentes puissances de charge en courant alternatif, de 3,7 kW à 43 kW, influencent le vieillissement de la batterie. La tendance est toutefois de limiter la puissance d'absorption des véhicules à 11 kW, ce qui devrait minimiser la dégradation de la batterie³⁰. Les bornes de recharge dites ultra-rapides peuvent atteindre des puissances de recharge allant jusqu'à 350 kW. Toutefois, la puissance de charge effectivement utilisable dépend du type de véhicule ou de batterie. L'augmentation du niveau de remplissage de la batterie s'accompagne d'un échauffement croissant, ce qui réduit la vitesse de charge. Sur les bornes de recharge rapide, la charge est généralement limitée à 80% de la capacité nominale, contrôlée par le module de gestion de la batterie, afin de préserver la durée de vie de la batterie (DMT, 2020).

La rigidité structurelle de la batterie a également une influence sur son vieillissement. Au cours du processus de charge et en raison des mécanismes de dégradation de l'anode, les cellules de la batterie se dilatent. Or, comme les cellules sont solidement fixées dans des modules, la dilatation d'une batterie est limitée, ce qui peut entraîner une augmentation de la pression à l'intérieur des modules, favorisant ainsi le processus de vieillissement de la batterie (Université technique d'Ilmenau, 2022).

Influence des systèmes de connexion "Vehicle-to-Grid" sur la longévité des batteries

Les systèmes Vehicle-to-Grid, c'est-à-dire la connexion "du véhicule au réseau", est également appelé V2G. Cette méthode permet à l'énergie stockée dans les batteries des véhicules d'être réinjectée dans le réseau électrique public. Ainsi, l'énergie des batteries lithium-ion des véhicules électriques n'est pas seulement utilisée pour la conduite, mais sert également de stockage temporaire de l'énergie électrique afin que celle-ci puisse être utilisée à un autre moment. Des stations de recharge spéciales, dites "bidirectionnelles", sont toutefois nécessaires : du réseau électrique vers la batterie et de la batterie vers le réseau. Dans ce contexte, la question se pose de savoir dans quelle mesure cette approche affecte la longévité de la batterie. D'une part, les cycles de charge supplémentaires accéléreraient le vieillissement cyclique. D'autre part, le V2G n'a lieu la plupart du temps que quelques minutes par jour, principalement avec des puissances de charge plus faibles et dans une plage sûre de niveaux de charge variant entre 30% et 80%, ce qui devrait limiter la dégradation de la batterie.

Les effets du V2G dépendent en principe du type et de l'intensité de son utilisation. Il existe encore trop peu de données empiriques pour pouvoir évaluer de manière factuelle les effets à long terme. Ses effets concrets sur la longévité des batteries sont donc très incertains. Des études de modélisation et en laboratoire ont déjà été réalisées, mais leurs résultats sont contradictoires à ce sujet.

²⁹ P. Caliendo, Electro Mobility & Battery Degradation, e-mobile Lade Forum 2023, Zürich.

³⁰ De même, la puissance des stations de recharge domestiques est très souvent limitée à 11 kW.

Extension de la longévité des batteries

Les mesures suivantes peuvent permettre de prolonger la longévité d'une batterie (Borgeest, 2021 ; FHWien, 2022 ; Schulze, 2022 ; TCS, 2022) :

- Uniquement utiliser la batterie à un niveau de charge compris entre 20% et 80% de la capacité nominale indiquée. En règle générale, plus la fenêtre d'utilisation est petite, meilleure est la longévité ;
- Éviter autant que possible les charges rapides, en particulier lorsque la batterie est froide ;
- Protéger le véhicule contre les sollicitations mécaniques et thermiques excessives ;

La température a une influence significative sur la capacité de charge et donc sur la longévité d'une batterie. La température de fonctionnement optimale se situe généralement entre 25 °C et 35 °C, mais ces valeurs peuvent varier selon les indications du fabricant de la batterie (Borgeest, 2021). Cette fenêtre de température peut être garantie par un système de gestion de la chaleur, qui est contrôlé par le module de gestion de la batterie (FHWien, 2022). L'influence de la température sur l'autonomie est expliquée en détail au chapitre 5.3.

Remplacement des batteries et marché de l'occasion

Même si le marché des voitures électriques est encore relativement jeune, un marché de l'occasion est déjà en place et l'offre de voitures électriques de seconde main augmente. Lors de l'achat d'un véhicule d'occasion, c'est surtout le SOH de la batterie qui est important. La batterie est le composant le plus cher du véhicule. Il existe aujourd'hui de nombreux moyens permettant de contrôler le SOH, mais leur fiabilité varie. Lors de l'achat d'une voiture électrique d'occasion, il est donc important de faire contrôler correctement le SOH de la batterie par un garagiste et de fournir les informations nécessaires sur l'état de la batterie.

Peu de véhicules électriques circulent sur les routes suisses depuis plus de dix ans. Il s'agit principalement de la première génération de véhicules électriques, comme les modèles Leaf de Nissan, i-MiEV de Mitsubishi, Model S de Tesla ou Zoe de Renault. Aujourd'hui, les technologies utilisées pour produire ces véhicules sont jugées obsolètes. Lors de leur lancement sur le marché, les modèles de la première génération disposaient d'une autonomie d'environ 100 km. En raison de leur ancienneté, les batteries de ces véhicules ne seront probablement pas remplacées hors garantie. Le coût élevé de cette opération est à mettre en parallèle avec la faible valeur résiduelle du véhicule. Ces véhicules électriques continueront à être utilisés, mais avec un SOH réduit et donc une autonomie limitée, jusqu'à ce qu'ils soient mis à la casse ou exportés. La nouvelle génération de véhicules électriques contient des batteries nettement plus grosses, qui disposeront probablement d'une autonomie suffisante même après 10 ans d'utilisation. Il est donc peu probable que les batteries soient remplacées hors garantie à l'avenir. Toutefois, certains modules ou cellules pourraient être remplacés pendant la période de garantie.

Les remplacements de batteries ont surtout lieu dans le cadre d'actions de rappel de grande envergure, que le fabricant organise par mesure de sécurité, par exemple en cas de courts-circuits, d'incendies, de défauts du séparateur ou de problèmes de réglage de la batterie pour des états de sous-tension. Le fabricant de batteries LG Chem, par exemple, a dû procéder à d'importants rappels, notamment pour la Chevrolet Bolt et la Hyundai Kona (Aalund et al., 2021).

Aucun contrôle du SOH n'est a priori prévu lors de l'expertise obligatoire. Toutefois, une attention particulière sera accordée au plancher du véhicule électrique lors du contrôle, car une déformation de la coque de la batterie peut être le signe d'un dommage mécanique. Selon l'Union professionnelle suisse de l'automobile, le sujet de l'achat et de la vente de véhicules électriques d'occasion est complexe. Il est recommandé aux garagistes de toujours s'assurer directement auprès de l'importateur que la batterie est en parfait état avant de procéder à un achat. En outre, des prestataires de services indépendants comme Aviloo Battery Diagnostics peuvent servir de soutien aux clients finaux et aux garagistes en ce qui concerne ce point (UPSA, 2022). Dans ce contexte, l'ordonnance de l'UE sur les batteries améliorera considérablement l'accès aux informations avec l'introduction d'un "passeport batterie", comprenant un code QR (voir également le chapitre 2.4).

5.3 Autonomie des batteries

Quel est l'influence des changements saisonniers de température sur l'autonomie et la capacité des batteries?

Effet de la température ambiante sur les batteries

La température ambiante a une influence sur l'autonomie des véhicules électriques. En effet, lorsque les températures sont basses, deux facteurs défavorables se conjuguent et entraînent une consommation d'énergie nettement plus importante des véhicules électriques. D'une part, le besoin en énergie pour la conduite augmente par temps froid. D'autre part, la viscosité de l'électrolyte et donc la résistance interne de la batterie augmentent également, ce qui réduit la tension des cellules et, par conséquent, le contenu énergétique de la batterie. L'autonomie du véhicule s'en trouve réduite et les recharges intermédiaires sont nécessaires plus souvent.

Dans un véhicule électrique, le rendement énergétique de la batterie à la roue est supérieur à 71% (PSI, 2022). Cela permet certes de se déplacer efficacement, mais pose un problème pour le chauffage de l'habitacle. La puissance de chauffage doit alors être fournie par un chauffage électrique d'appoint, ce qui réduit directement l'autonomie, car l'énergie nécessaire à cet effet est prélevée sur la batterie (EMCEL, 2016). L'utilisation d'autres composants augmentent encore la consommation d'énergie en hiver, comme par exemple les sièges chauffants, le volant chauffant, le pare-brise et la lunette arrière chauffants ainsi que les rétroviseurs extérieurs chauffants. Lorsque ces composants fonctionnent, la puissance électrique atteint rapidement 500 watts (ADAC, 2021). A cela s'ajoute une consommation d'environ 4% plus élevée en raison de la plus faible efficacité des pneus d'hiver (Matzer et al., 2019).

Données empiriques sur la réduction de l'autonomie

En moyenne, la consommation pendant la saison froide est 10% à 30% plus élevée que pendant la saison chaude. En cas de températures négatives lors d'un court trajet (comme un trajet pendulaire par exemple), la consommation d'une voiture électrique peut augmenter de 50% par rapport à la situation normale, ce qui réduit d'autant son autonomie (ADAC, 2022). En effet, lors d'un trajet court, la consommation du chauffage est plus importante que lors d'un trajet plus long, car il fonctionne en général au maximum jusqu'à ce que l'habitacle soit réchauffé³¹. En outre, les vitesses de déplacement sur les courtes distances sont en général plus faibles que sur les longues distances, ce qui implique une consommation plus importante du chauffage par rapport à la résistance au roulement et à la résistance de l'air.

L'association norvégienne des automobilistes a mené un essai de conduite à grande échelle avec 20 véhicules électriques. Celui-ci a révélé une réduction moyenne de 18,5% (entre -9% et -30% selon les cas) de l'autonomie en conditions hivernales par rapport aux valeurs de mesure officielles selon WLTP (NAF, 2020). Les mesures faites par l'association automobile allemande "Allgemeinen Deutscher Automobil-Club" montrent que la consommation d'une voiture électrique augmente massivement sur un trajet moyen de 23 km en 30 minutes lorsqu'il fait -7 °C. En moyenne, la consommation a augmenté de 50%. Pour une température comprise entre 14 °C et -7 °C, l'autonomie diminue donc en moyenne de 30% avec une fourchette de 25% à 50% (ADAC, 2022). Dans le test de l'American Automobile Association, l'autonomie des cinq véhicules électriques testés a diminué jusqu'à 41% en hiver (AAA, 2019).

La consommation d'énergie des voitures électriques, et donc le coût d'utilisation, est significativement plus élevée par temps froid, en particulier pour les pendulaires qui parcourent de courtes distances. Les batteries actuelles sont souvent surdimensionnées pour les courtes distances, cette perte d'autonomie ne pose pas de problème pour les trajets courts. En revanche, pour les hybrides plug-in dotés d'une petite batterie, une réduction de l'autonomie réduirait la part des trajets quotidiens effectués à l'électricité (TCS, 2021).

Le froid entraîne donc toujours une réduction de l'autonomie, mais la chaleur peut également être problématique (voir figure 28). En cas de températures élevées, la climatisation augmente la consommation d'énergie, ce qui réduit l'autonomie d'environ 20% (Geotab, 2020b).

³¹ Bien entendu, il est possible de renoncer délibérément au chauffage sur un trajet court.

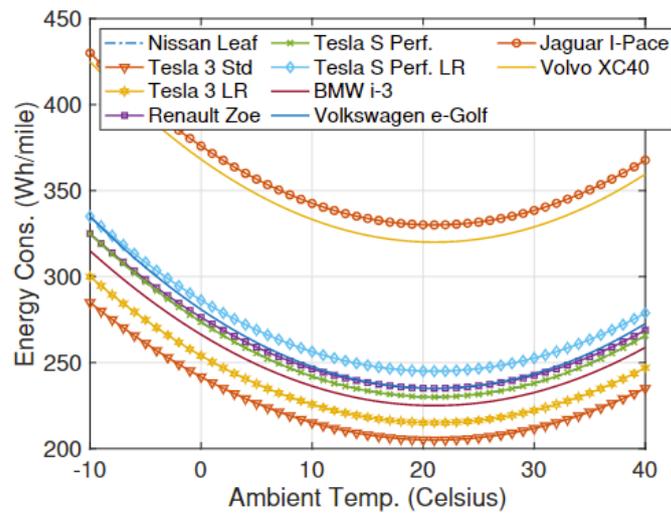


Figure 28: Consommation en énergie de différents véhicules électriques en fonction de la température (Bayram, 2021).

Charger une batterie par basse température

Le froid réduit également la capacité des batteries à absorber l'énergie lors de la charge. Les résultats d'une étude menée aux États-Unis montrent que la vitesse de charge peut se dégrader considérablement à des températures froides (Motoaki et al., 2018). Pour une charge de 30 minutes, le SOH est temporairement réduit en moyenne de 22% à 36% lorsque la charge est effectuée à une température de 0 °C, par rapport à une charge à 25 °C. Selon une étude réalisée en Finlande, la vitesse de charge à -10 °C est inférieure de 15% à la vitesse de charge à 20 °C. Toutefois, la courbe de charge et la gestion de la température varient fortement d'un modèle à l'autre, les affirmations générales sont donc peu pertinentes (TCS, 2021).

Lors de la charge rapide, le module de gestion de la batterie réduit la puissance de charge afin de ménager la batterie. Le processus de charge dure sensiblement plus longtemps lorsqu'il fait froid. Certains fabricants couplent le chauffage de la batterie avec le système de navigation. La batterie est ainsi préchauffée si une "station de recharge rapide" est entrée comme destination. La température optimale de démarrage se situe entre 20 °C et 30 °C (ADAC, 2022). L'effet du froid peut être atténué en préchauffant le véhicule pendant environ 15 minutes alors qu'il est encore branché à la prise de courant, et en le garant dans un garage, ce qui évite à la batterie de trop refroidir. Cela réduit considérablement la perte d'énergie qui résulte normalement du réchauffement d'une voiture très froide. Dès que la température du véhicule est stable, les besoins en chauffage diminuent considérablement (ADAC, 2022).

5.4 Risques d'incendie des batteries

Quels sont les aspects de sécurité à prendre en compte concernant les batteries ? Comment les véhicules électriques se comparent-ils aux véhicules à combustion interne en termes de risque d'incendie ?

Véhicules électriques et véhicules à combustion interne

Les batteries lithium-ion actuelles sont susceptibles de provoquer des incendies. La probabilité d'un tel incident dépend de divers facteurs, mais est généralement faible. Selon certaines études, les véhicules alimentés par des batteries lithium-ion sont moins susceptibles de prendre feu que les véhicules alimentés par d'autres types de batteries (Forbes, 2022) :

- Le service de consultation américain AutoinsuranceEZ résume la situation en disant que les véhicules électriques prennent moins souvent feu que les véhicules à combustion interne. Les véhicules hybrides prennent feu le plus souvent avec environ 3'500 incendies pour 100'000 véhicules vendus. Les véhicules à essence arriveraient en deuxième position avec environ 1'500 incendies pour 100'000 véhicules vendus et les véhicules électriques en troisième position avec seulement 25 incendies pour 100'000 véhicules vendus. Cependant, une étude de l'université du Tennessee indique en revanche que les incendies sont plus fréquents avec les véhicules électriques qu'avec les véhicules à essence (AutoinsuranceEZ, 2022).
- Le journal Tribune de Genève a analysé les différences de risque d'incendie entre les voitures à essence, hybrides et purement électriques. Ils citent l'assureur Allianz Suisse, qui conclut que "le type de propulsion ne joue aucun rôle". Toutefois, aucun chiffre concret n'est cité pour étayer cette affirmation (TdG, 2018).
- Selon une étude réalisée en 2017, 90 incendies de véhicules à combustion interne par milliard de kilomètres parcourus est considéré comme normal. Pour les voitures électriques, ce chiffre ne serait que de deux incendies par milliard de km parcourus. Selon Swiss eMobility, ces chiffres doivent toutefois être interprétés avec prudence en raison de la fragilité des données (Swiss eMobility, 2020b).
- Une étude danoise a évalué les données de la police saisies entre 2017 et 2021. Plus de 100'000 véhicules impliqués dans un accident y sont répertoriés. La part des véhicules électriques est de 2%. L'étude danoise conclut que les véhicules électriques impliqués dans des accidents prennent plus souvent feu que les véhicules à combustion interne. Toutefois, cette même étude conclut également que les véhicules électriques ne sont pas moins sûrs que les véhicules à combustion interne (Janstrup et al., 2022).

De manière générale, les études actuelles sur le risque d'incendie ne sont pas suffisamment fiables, car il n'y a pas suffisamment de données exploitables à l'heure actuelle. Il n'est donc pas possible de tirer des conclusions statistiquement significatives. Cependant, la lutte contre les incendies de batteries lithium-ion est plus complexe et nécessite plus de ressources. Il est donc nécessaire de procéder à une adaptation méthodologique et technique de la prévention des incendies. Cela concerne les pompiers et d'autres acteurs importants comme les architectes, et ingénieurs et ingénieures planifiant les systèmes d'extinction et de ventilation, etc. Concernant le dégagement de chaleur en cas d'incendie, une voiture électrique en feu n'est pas plus dangereuse qu'une voiture à combustion interne (Empa, 2020 ; Sun, 2019). De plus, les batteries sont toujours en phase de développement ou font l'objet de recherches en cours. Et avec l'augmentation du nombre de véhicules électriques sur les routes, la sécurité incendie restera très probablement un élément central.

Causes d'incendie

Le risque d'incendie d'une batterie lithium-ion est particulièrement élevé lorsqu'elle est défectueuse, endommagée, stockée dans des conditions inadéquates ou mal utilisée (Marmy, 2021). En règle générale, ce sont des problèmes de matériel qui en sont responsables, par exemple en raison de défauts de qualité lors de la fabrication ou de dommages mécaniques (Aalund et al., 2021).

Des causes spécifiques d'incendie sont énumérées et expliquées ci-dessous :

- Court-circuit provoqué par un dommage mécanique de la batterie, par ex. lors d'un accident. En cas de court-circuit, les batteries lithium-ion ont alors une très faible résistance interne, ce qui peut entraîner un flux de courant allant jusqu'à 20'000 ampères (Aigner, 2018) ;
- Dommages mécaniques : par exemple lors du transport de la batterie du lieu de fabrication à l'usine automobile ;
- Qualité déficiente lors de la fabrication ;
- Surchauffe : si la température de l'électrolyte est supérieure à 60 °C, le risque de "fuite thermique" augmente considérablement (Borgeest, 2021 ; Rutronik, 2022) ;
- Surcharge, provoquée par le dépassement de la tension maximale indiquée. Le risque d'incendie pendant la charge est en principe plus élevé (DETEC, 2020) ;
- Flux de courant trop élevé lors de la charge et de la décharge de la batterie, par exemple lors d'une charge rapide (Rutronik, 2022) ;
- La décharge complète de la batterie peut entraîner des dommages aux cellules et provoquer ainsi une combustion spontanée. C'est pourquoi il faut toujours maintenir un certain niveau de charge - en général entre 40 et 60% de la capacité nominale, contrôlé par le module de gestion de la batterie - lors du stockage de la batterie (Borgeest, 2021 ; Kampker, 2014) ;
- Les risques naturels, comme les inondations. La présence d'un véhicule électrique à une station de recharge dans un parking souterrain peut augmenter le risque d'électrocution mortelle et de rupture thermique (DETEC, 2020 ; Zurich Versicherungs-Gesellschaft AG, 2020).

Les incendies non accidentels ne doivent pas être sous-estimés. Divers incidents ont montré que le risque d'incendie est considérablement accru en cas de défauts importants au niveau de la fabrication de la batterie et des composants associés, comme par exemple le module de gestion de la batterie. Cela a déjà conduit à des rappels à grande échelle de la part des constructeurs, où des milliers de véhicules de différentes marques ont été touchés (Aalund et al., 2021).

Lutte contre les incendies

Les incendies de batteries lithium-ion sont considérés comme difficiles à éteindre, notamment en raison de l'apport interne d'oxygène, et ont souvent un comportement explosif (Borgeest, 2021 ; Huo, 2017). Une des raisons principales de la durée prolongée d'un incendie de batterie est la création en chaîne de courts-circuits de cellule en cellule, à mesure que la batterie est endommagée. Un autre problème réside dans le fait que la batterie lithium-ion se trouve généralement sous le véhicule, ce qui limite l'accès des agents d'extinction (Sun, 2019). En cas d'incendie, une batterie doit être refroidie en permanence pendant une longue période afin d'éviter de nouveaux départs de feu. Cette opération est généralement réalisée avec de l'eau, sachant qu'une voiture électrique nécessite entre 3'000 et 10'000 litres d'eau (Tages-Anzeiger, 2022).

Effets possibles d'un incendie

L'eau utilisée pour l'extinction doit être préalablement traitée avant d'être acheminée vers une station d'épuration (Empa, 2020). Lors de l'extinction, de l'acide fluorhydrique peut se former en raison de la présence d'eau. En cas d'inhalation, ce gaz peut provoquer des brûlures dans les poumons. Après un incendie de batterie au lithium-ion, un assainissement complet doit être effectué par des spécialistes, car de grandes quantités d'oxyde de cobalt, d'oxyde de nickel et d'oxyde de manganèse sont contenues dans la suie (Empa, 2020). Ceci est particulièrement important en cas d'incendie dans des installations souterraines ou fermées, comme les tunnels et les parkings souterrains. Les incendies de véhicules électriques peuvent atteindre des températures élevées, de l'ordre de 400 °C. Les gaz toxiques et les substances nocives, comme le liquide électrolytique, qui sont libérés présentent d'autres dangers (Huo, 2017 ; Rutronik, 2022). Selon le type de batteries, celles-ci peuvent contenir entre autres des gaz tels que le benzène, le toluène, le styrène, le biphenyle, l'acroléine ou des fluorures d'hydrogène (Huo, 2017).

Mesures de réduction des risques d'incendie

Le risque d'incendie dépend fortement de la taille et du nombre de cellules de batterie dans un véhicule électrique. Plus il y a de cellules, plus le risque d'incendie ou d'emballement thermique est élevé (Aalund et al., 2021). Pour minimiser le risque d'emballement thermique d'une batterie, la stabilité mécanique et thermique est essentielle. Il existe des mécanismes de surveillance permanents, tels que le module de gestion de la batterie, couplés à des composants mécaniques, tels que des interrupteurs pyrotechniques à tension continue. Toutefois, le module de gestion de la batterie ne peut pas toujours détecter et/ou traiter les courts-circuits internes (Aalund et al., 2021 ; Rutronik, 2022).

Un système de refroidissement permet d'éviter la surchauffe de la batterie. Le refroidissement est assuré par de l'air ou par un liquide de refroidissement composé d'eau, d'antigel et d'inhibiteurs de corrosion, comme ceux utilisés pour refroidir les moteurs à combustion (Borgeest, 2021). En cas d'accident, les forces de sécurité doivent reconnaître s'il s'agit d'un véhicule équipé d'une batterie au lithium-ion, afin de limiter le danger potentiel et l'ampleur des dommages (Swiss eMobility, 2020b).

Transport de voitures électriques accidentées

En cas de panne ou d'accident, les véhicules électriques posent de nouveaux défis aux forces d'intervention. Les collisions peuvent endommager la batterie. Dans ce cas, le risque d'incendie est élevé et le véhicule accidenté représente un risque pour l'homme et l'environnement. A l'avenir, les services de dépannage et de sauvetage en cas d'accident devront de plus en plus faire face à de tels dangers. L'OFROU a participé au groupe de travail BTVE (Bergen, Transportieren, Verwahren, Entsorgen) et a élaboré un guide en collaboration avec les organisations concernées³². Celui-ci doit aider les services de dépannage et de sauvetage en cas d'accident à identifier les tâches et les risques, et à mettre en œuvre des mesures efficaces dans les domaines de la sécurité, de la formation, des processus d'exploitation, du stockage et de la protection de l'environnement.

Perspectives

Des recommandations concrètes concernant la sécurité incendie sont données dans des documents de l'Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS) et de la Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Il n'existe toutefois pas encore de directives uniformes pour la gestion des risques d'incendie causés par les batteries lithium-ion dans des infrastructures critiques (DETEC, 2020). En outre, il convient d'adapter ou de développer les méthodes actuelles de lutte contre les incendies. Les incendies dans les tunnels et les parkings souterrains, en particulier, pourraient être combattus plus efficacement grâce à un système moderne de ventilation des tunnels et à des installations de brouillard d'eau à haute pression (Empa, 2020).

³² <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/elektromobilitaet/leitfaden-bergen-transportieren-verwahren-entsorgen-elektrofahrzeuge.html>

6. Fin de vie des batteries

6.1 Vieillessement et seconde vie des batteries

Que fait-on des batteries de véhicules électriques usagées? Quelles solutions existent, et quels sont leurs avantages et inconvénients ?

Altération de la batterie lors de l'utilisation primaire

Les batteries se détériorent en raison de réactions chimiques et de processus physiques survenant naturellement. Ces processus de dégradation entraînent notamment une diminution des performances de la batterie, comme par exemple une baisse de la capacité de stockage d'énergie. L'indicateur "State of Health" (SOH) permet d'évaluer l'état de santé de la batterie. Selon l'industrie automobile, seules les batteries présentant un SOH > 80% sont suffisamment performantes pour être utilisées dans les voitures électriques (cf. chap. 5.2). En pratique, la longévité d'une batterie dépend toutefois de la décision individuelle de chaque utilisateur. Ce sont donc eux qui définissent subjectivement à partir de quel moment la batterie n'est plus assez performante, autrement dit sa "fin de vie". Par ailleurs, le vieillissement des batteries dépend de nombreux facteurs, tels que leur type de batterie, leur capacité, leur domaine et le mode d'application, etc. La durée de vie des batteries de véhicules électriques peut donc varier considérablement. Il n'y a actuellement pas de consensus sur cette question dans la littérature, en raison du manque de données empiriques. La plupart des véhicules électriques mis sur le marché sont encore dans leur phase d'utilisation. Dans certains travaux, la durée de la garantie des batteries est utilisée comme valeur indicative de leur longévité. Cette durée est d'environ 8 à 10 ans, selon le fabricant. Dans d'autres cas, la longévité d'un véhicule à combustion interne actuel, qui est d'environ 17 ans, est utilisée comme référence. Certains spécialistes estiment que les batteries surpasseront cette longévité et dureront plus de 20 ans. Dans ce chapitre, nous nous basons sur une espérance de vie d'environ 15 ans pour la première utilisation dans un véhicule électrique (Aguilar Lopez et al., 2022).

L'approche "multi-vies"

Une fois les batteries usagées retirées de leur véhicule, elles peuvent être valorisées de différentes manières. D'une part, la batterie peut être directement recyclée pour ses matériaux. D'autre part, la batterie peut d'abord être recyclée pour sa fonction (voir figure 29). Le plus simple est de les réutiliser en entier si leur état le permet. Sinon, les batteries de conception modulaire peuvent être ouvertes manuellement afin de contrôler l'état de santé des modules ou même des cellules individuelles et les trier selon leur SOH. Toutefois, si les batteries sont intégrées directement dans la structure des véhicules à l'avenir, ce processus peut être rendu plus difficile (cf. chap. 2.1).

Les modules et cellules présentant encore un SOH > 80% pourraient être réintégrés dans une batterie de véhicule électrique. En supposant que la longévité des véhicules électriques soit équivalente à celle des véhicules à combustion interne, leurs batteries devraient être en bon état au terme de leur "première vie", avec un SOH > 80% pour la plupart. Elles pourraient donc être réutilisées dans des applications mobiles ou stationnaires (Canals Casals et al., 2022).

Les modules avec un SOH < 80% pourraient être utilisés dans des applications stationnaires, pour stocker de l'énergie dans les bâtiments, par exemple. Les applications stationnaires ne nécessitent en effet pas de capacité ou de densité d'énergie particulièrement élevée pour leurs modules et cellules. De plus, de faibles vitesses de chargement et de déchargement sont suffisantes. Les modules et cellules récupérés pourraient ainsi servir à nouveau pendant environ 10 ans dans une "seconde vie" (Pagliaro & Meneguzzo, 2019).

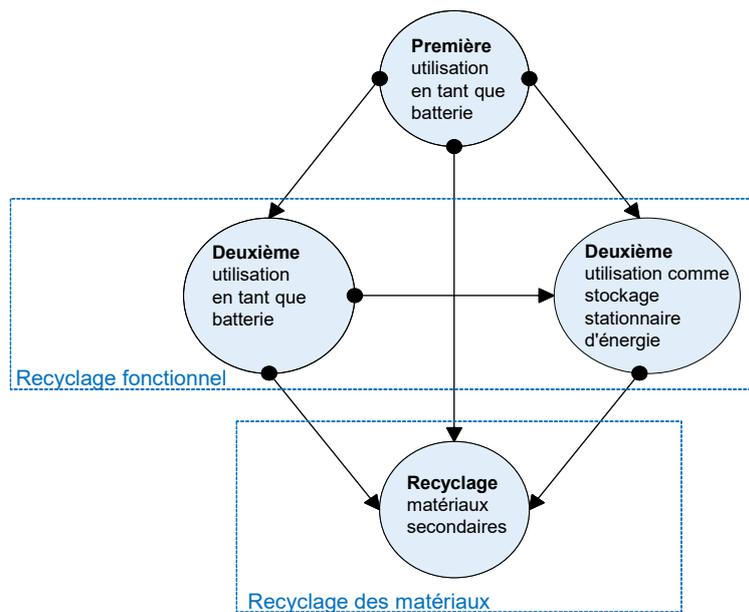


Figure 29: Approche "multi-vie" pour les batteries de véhicules électriques. Source : Empa

On parle d'une approche dite "multi-vies" lorsque les batteries, après leur première utilisation dans un véhicule électrique, leur "première vie", peuvent être réutilisées et avoir une "deuxième vie". Cette approche atténue la demande en matériaux critiques et permet de trouver des débouchés pour les déchets de batteries ayant un potentiel économique. Les batteries de seconde main remplacent ainsi des batteries neuves potentielles, ce qui en réduit la demande. Cependant, les batteries vieillissent au cours de leur première et deuxième vie, et la diminution de leur performance par rapport aux batteries neuves est de plus en plus importante. Toutes les batteries doivent donc être recyclées pour leur matière à un moment ou à un autre. En outre, en raison des progrès technologiques rapides dans le domaine, les batteries les plus récentes sont plus performantes que les modèles plus anciens, à consommation égale de matériaux critiques. D'un point de vue environnemental, il peut donc être plus intéressant de récupérer ces matières premières par un recyclage efficace afin de fabriquer de nouvelles batteries plutôt que de prolonger la longévité de batteries peu performantes. Tout l'art consiste donc à déterminer le moment et les procédés optimaux pour le recyclage (cf. chapitre 6.3).

Deuxième vie des batteries

Les batteries usagées en bon état après leur "première vie" sont très recherchées sur le marché de l'occasion. En effet, on peut les utiliser, entières, leurs modules ou leurs cellules de manière polyvalente: dans de grandes installation de stabilisation du réseau, dans des unités industrielles de stockage d'énergie, comme batterie stationnaire domestique, ou dans les applications plus petites comme batterie de camping-cars, de caddies de golf ou de chariots élévateurs. De plus, il est difficile de se procurer des batteries de véhicules électriques neuves en tant que produits individuels. De nombreuses entreprises se sont spécialisées dans ce type d'activités. Quelques exemples pertinents sont cités ci-dessous.

Les entreprises norvégiennes Eco Stor et Hagal, par exemple, produisent de grands conteneurs de stockage d'énergie à partir de batteries de seconde main. La conception modulaire permet d'atteindre une capacité de stockage de 240 à 1'000 kWh par conteneur. La figure 30 montre un conteneur de batteries pour la stabilisation du réseau de l'entreprise Eco Stor, qui contient des modules de batteries de seconde vie (EcoStor, 2023).



Figure 30: Le conteneur de batteries de la société Eco Stor contient des modules de "deuxième vie" issus de batteries de véhicules électriques (EcoStor, 2023).

Les deux entreprises mentionnées proposent en outre des solutions pour le stockage d'énergie domestique, tout comme l'entreprise suisse TWICE. Les cellules des batteries de traction sont ici regroupées de manière modulaire avec des capacités allant de 5 kWh à 30 kWh (TWICE, 2023).



Figure 31: Le système de stockage d'énergie domestique "Hexagon" de la société TWICE contient exclusivement des batteries de "seconde vie" issues de véhicules électriques (TWICE, 2023).

Pour des applications à plus petite échelle, les cellules des batteries sont également très prisées par les bricoleurs. Elles sont souvent couplées à une installation photovoltaïque pour en stocker l'énergie, par exemple lors de la transformation de camionnettes en camping-cars.

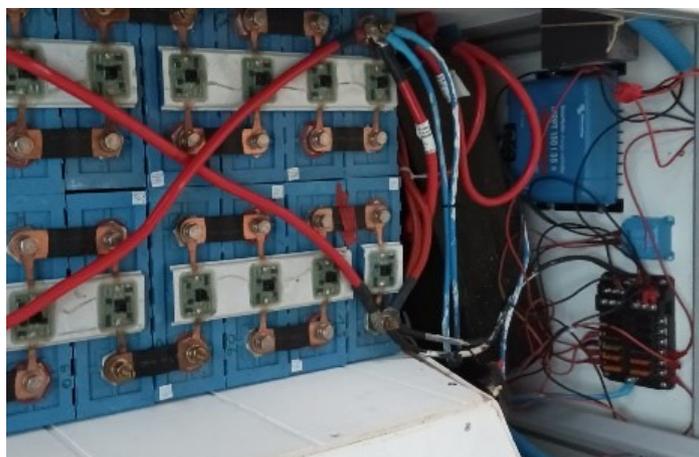


Figure 32: Les cellules sont chargées par l'installation photovoltaïque sur le toit et fournissent de l'électricité au camping-car (source : photos personnelles).

Recyclage de matière

Après environ 20 ans d'utilisation totale, y compris une éventuelle seconde vie, les batteries doivent être recyclées matériellement. Grâce à l'approche "multi-vies" décrite ci-dessus, les batteries encore en état de fonctionnement peuvent être réutilisées tandis que les batteries dont les performances ou l'état ne sont plus satisfaisants sont recyclées matériellement.

La quantité de batteries lithium-ion en fin de vie qui sera récupérée va connaître une croissance exponentielle au cours des prochaines décennies, sous l'impulsion du boom actuel de la mobilité électrique (figure 33). En comparant cette croissance avec les projections de la demande future en lithium (voir figure 17 du chapitre 3.1), il apparaît que le recyclage des batteries prendra de plus en plus d'importance pour couvrir les besoins en matières premières (EIs, 2018 ; Reuters, 2022 ; Schmidt, 2017 ; Shahan, 2022). En effet, le recyclage permet de récupérer des matériaux précieux et stratégiquement importants, comme le lithium, le cobalt, le graphite ou le nickel. Les batteries usagées servent ainsi également de source de matières premières secondaires (Barazi & Rohstoffagentur, 2022 ; BGR, 2021a ; Cobalt Institute, 2022 ; Szurlies, 2021).

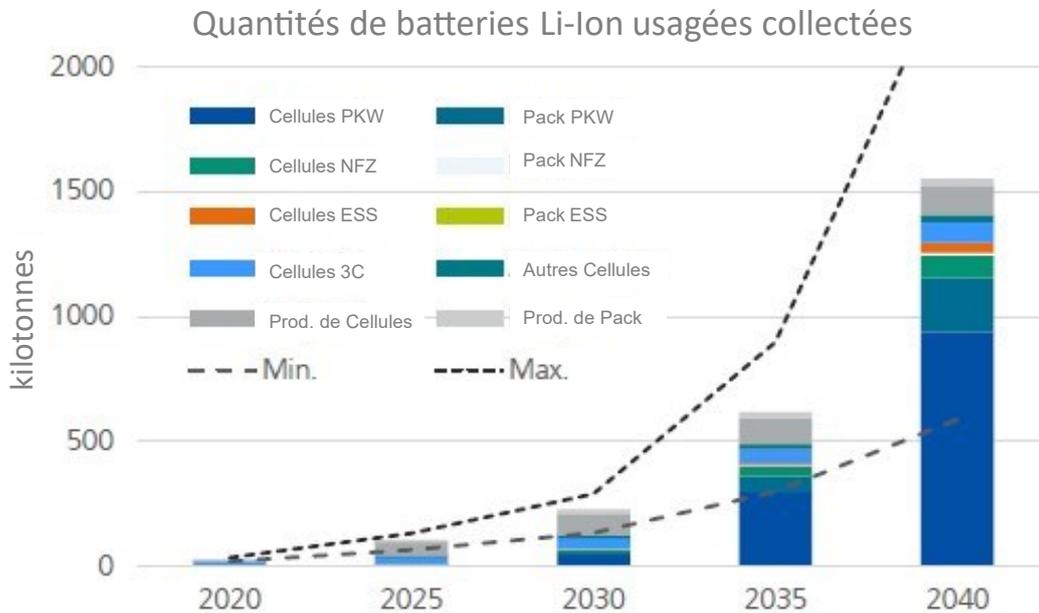


Figure 33: Estimation de la quantité future de batteries lithium-ion usagées récupérées issues de différentes applications (PKW = voitures particulières, NFZ = véhicules utilitaires légers, ESS = stockage stationnaire, 3C= "Computing, Consumer, Communication") et de déchets de production des batteries produites en Europe. Seul le scénario de base est représenté (Neef et al., 2021).

6.2 Recyclage des batteries

Quelles sont les projections concernant le recyclage des batteries ? Quels sont les matériaux récupérés aujourd'hui et dans le futur ?

Récupération des matériaux de l'anode et de la cathode

Le recyclage de matière permet de récupérer les matériaux composant les batteries, ce qui présente un intérêt économique et environnemental. Des taux de recyclage d'environ 90% sont possibles pour la plupart des matériaux, certaines entreprises innovantes annonçant même des taux de recyclage de 95%. Le recyclage des batteries peut ainsi servir de source de matières premières secondaires pour des matériaux importants tels que le cuivre, le cobalt, le nickel, le manganèse ou le lithium (cf. chapitre 2.1).

Les collecteurs de courant d'une cellule de batterie se présentent sous forme de métaux purs. L'électrode positive, ou cathode, est une feuille d'aluminium, tandis que l'électrode négative, ou anode, est une feuille de cuivre. Les deux servent également de support pour les matériaux actifs. Le graphite se présente également à l'origine sous forme pure. Lorsque le graphite est utilisé dans les anodes comme matériau actif, les ions de lithium se fixent dans le graphite dès le premier cycle de charge et des dépôts se forment à sa surface. Parfois, le graphite est également ajouté comme additif conducteur dans le revêtement du matériau actif. Les matériaux actifs de la cathode les plus répandus sont les suivants : Oxyde de lithium, de nickel, de manganèse et de cobalt (NMC) et Phosphate de fer et de lithium (LFP). Le vecteur de charge dans les batteries est le lithium.

Estimation des futurs taux de recyclage

Les taux actuels de collecte des batteries pour la production de matières premières secondaires sont encore faibles. D'une part, la plupart des batteries sont en circulation et d'autre part, la capacité des installations industrielles de recyclage reste limitée. Sur la base des projections des quantités de batteries collectées dans le futur, il est possible d'estimer la quantité future recyclée de chaque matériau. Ces projections reposent sur de nombreuses hypothèses et peuvent donc varier considérablement, comme le montrent les figures suivantes. Cependant, en tenant compte de la tendance actuelle d'électrification de la flotte de véhicules, la tendance générale à une croissance rapide représentée dans les projections est assez certaine.

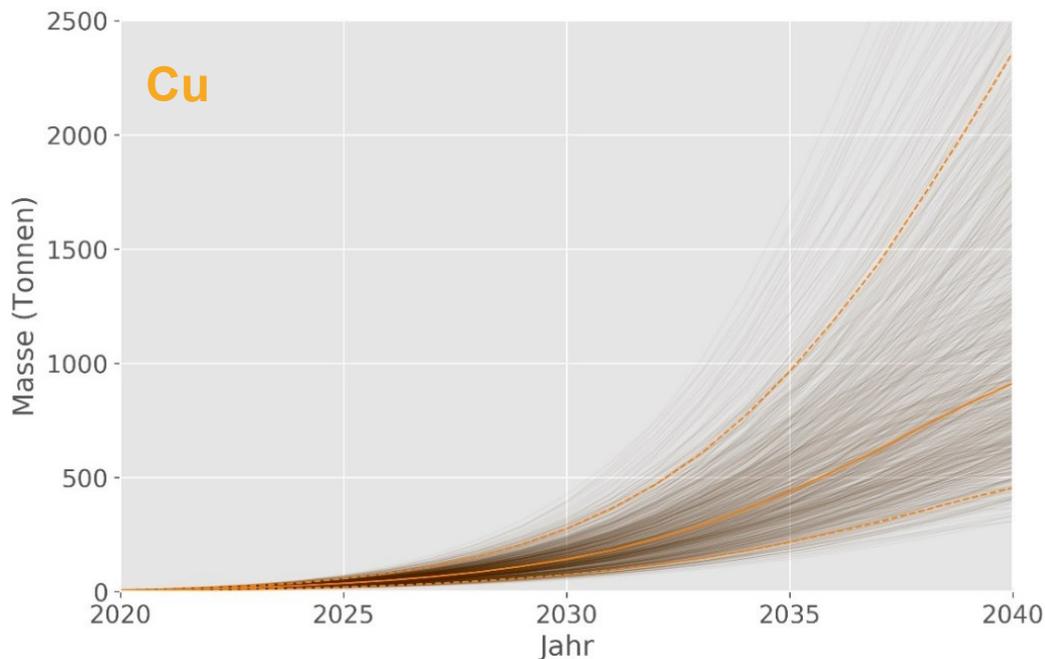


Figure 34: Estimation de la récupération future de cuivre issu du recyclage des batteries en Suisse. Afin de tenir compte des incertitudes, le recyclage du matériau a été calculé pour un grand nombre de scénarios réalistes légèrement différents à l'aide d'un modèle développé à cet effet selon la méthode de Monte Carlo. Chaque calcul donne une estimation de la quantité du matériau récupéré par recyclage (lignes fines). En considérant tous les résultats obtenus selon une approche statistique, la valeur réelle de la quantité de matériau récupéré se situera vraisemblablement entre les deux lignes en pointillés (+ σ - σ), le résultat le plus probable étant représenté par la ligne pleine (Widmer et al., 2021)

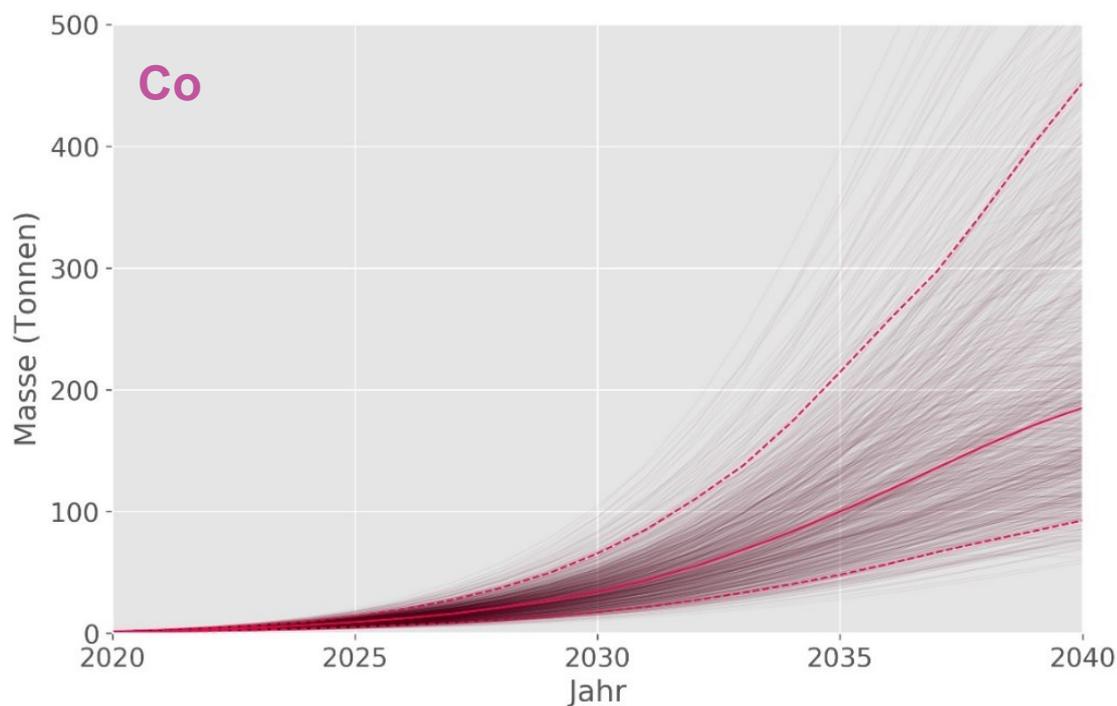


Figure 35: Estimation de la récupération future de cobalt issu du recyclage des batteries en Suisse. Afin de tenir compte des incertitudes, le recyclage du matériau a été calculé pour un grand nombre de scénarios réalistes légèrement différents à l'aide d'un modèle développé à cet effet selon la méthode de Monte Carlo. Chaque calcul donne une estimation de la quantité du matériau récupéré par recyclage (lignes fines). En considérant tous les résultats obtenus selon une approche statistique, la valeur réelle de la quantité de matériau récupéré se situera vraisemblablement entre les deux lignes en pointillés ($+\sigma - \sigma$), le résultat le plus probable étant représenté par la ligne pleine (Widmer et al., 2021)

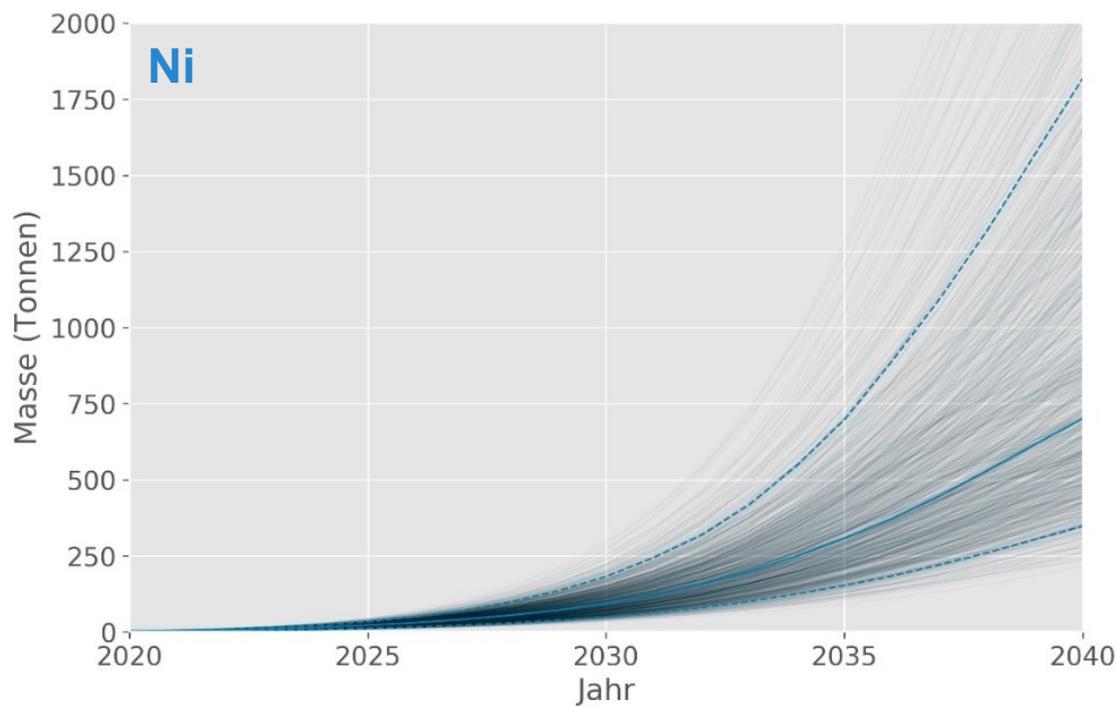


Figure 36: Estimation de la récupération future de nickel issu du recyclage des batteries en Suisse. Afin de tenir compte des incertitudes, le recyclage du matériau a été calculé pour un grand nombre de scénarios réalistes légèrement différents à l'aide d'un modèle développé à cet effet selon la méthode de Monte Carlo. Chaque calcul donne une estimation de la quantité du matériau récupéré par recyclage (lignes fines). En considérant tous les résultats obtenus selon une approche statistique, la valeur réelle de la quantité de matériau récupéré se situera vraisemblablement entre les deux lignes en pointillés ($+\sigma - \sigma$), le résultat le plus probable étant représenté par la ligne pleine (Widmer et al., 2021)

Comment la collecte batteries usagées est-elle gérée en Suisse ? Quel est le taux de récupération des batteries en Suisse ? Que dit la législation de l'UE ?

Un cadre légal strict et efficace

En Suisse, l'Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim, 2022) constitue la base légale en matière d'élimination des batteries usagées. D'une part, il existe une "obligation de reprise" pour les distributeurs de batteries, qui doivent les reprendre gratuitement aux consommatrices et consommateurs à chaque point de vente. D'autre part, il existe une "obligation de restitution" pour les consommatrices et consommateurs, qui sont tenus d'apporter leurs batteries usagées à un commerçant soumis à l'obligation de reprise, de les déposer dans des centres de collecte de batteries, ou auprès d'entreprises d'élimination disposant de l'autorisation nécessaire. Les batteries des véhicules purement électriques pèsent généralement plusieurs centaines de kilos. Il est donc en pratique quasiment impossible de les démonter et les éliminer en dehors du cadre réglementaire. Les batteries étant considérées comme des déchets spéciaux en raison de la toxicité de leurs composants (voir chap. 5.4), il est nécessaire de les éliminer de manière appropriée. Tant que les véhicules sont éliminés en Suisse, la probabilité que leurs batteries finissent dans des filières d'élimination de déchets inappropriées est faible.

Une vague à venir de batteries usagées

L'essor de la mobilité électrique est encore relativement récent, même si la demande en véhicules électrique a fortement augmenté au cours des cinq dernières années. Sachant que la longévité d'un véhicule électrique et de sa batterie de traction est estimée à environ 15 ans (Restrepo et al., 2018 ; UK Department for Transport, 2021), il en résulte que la quasi-totalité des batteries de traction vendues en Suisse sont toujours utilisées à l'heure actuelle et que, par conséquent, seule une petite partie d'entre elles a été éliminée. Les premières générations de véhicules hybrides sont les seules à être arrivées au terme de leur longévité normale, comme par exemple la Toyota Prius, qui a été mise en production en 2001 (Morah, 2022 ; Toyota, 2022). Cependant, ce modèle n'était pas équipé de batteries au lithium-ion, mais de batteries nickel-hydrure métallique. De plus, ces batteries étaient beaucoup plus petites en termes de masse et de capacité que les batteries produites actuellement pour des véhicules équivalents. Si des batteries modernes atteignent déjà en fin de vie, cela est plutôt dû à des accidents ou à des défauts survenus pendant la production ou l'utilisation. La base légale, comprenant les obligations de reprise et de restitution des batteries de véhicules électriques doit donc encore faire ses preuves à plus grande échelle. Mais comme le montre l'exemple d'autres types batteries en Suisse (Inobat, 2021), le système existant permet des taux de collecte élevés et devrait donc être efficace.

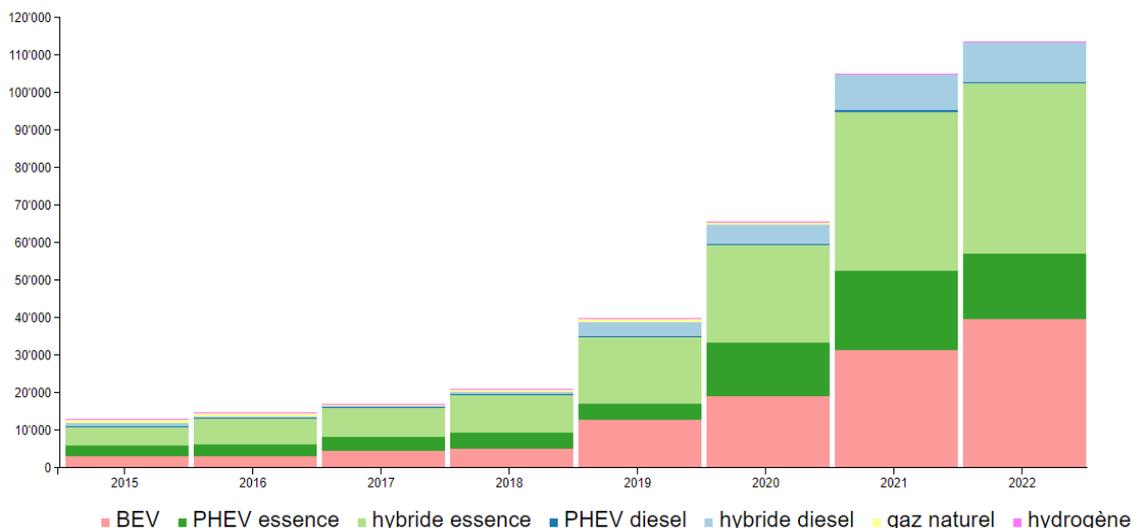


Figure 37: Nouvelles immatriculations de voitures électriques en Suisse. BEV : Battery Electric Vehicles, voitures purement électriques. PHEV : Plug-In Hybrid Electric Vehicle, voitures hybrides rechargeables. (OFEN, 2023).

La rapide électrification de la flotte de véhicules devrait se poursuivre à l'avenir (Schreyer & Morlier, 2022 ; Swiss eMobility, 2020a). De nombreux constructeurs automobiles, notamment en Europe, ont déjà annoncé qu'ils ne produiraient plus que des véhicules purement électriques dans un avenir proche (Wietlisbach, 2022). Cela implique non seulement qu'il y aura plus de batteries en circulation, mais aussi qu'elles seront plus grosses, car les véhicules purement électriques utilisent les batteries les plus massives. Par conséquent, la quantité et la masse de batteries en fin de vie augmentera en suivant approximativement la courbe de mise sur le marché des véhicules électriques, mais avec un décalage d'environ 15 ans. Une fois que l'ensemble du parc automobile sera électrifié, la quantité annuelle de batteries recyclées en Suisse se stabilisera. Cela ne sera pas le cas avant 2060, le cas échéant. Cependant, il existe encore de grandes incertitudes dans la prévision de cette évolution (Widmer et al., 2021).

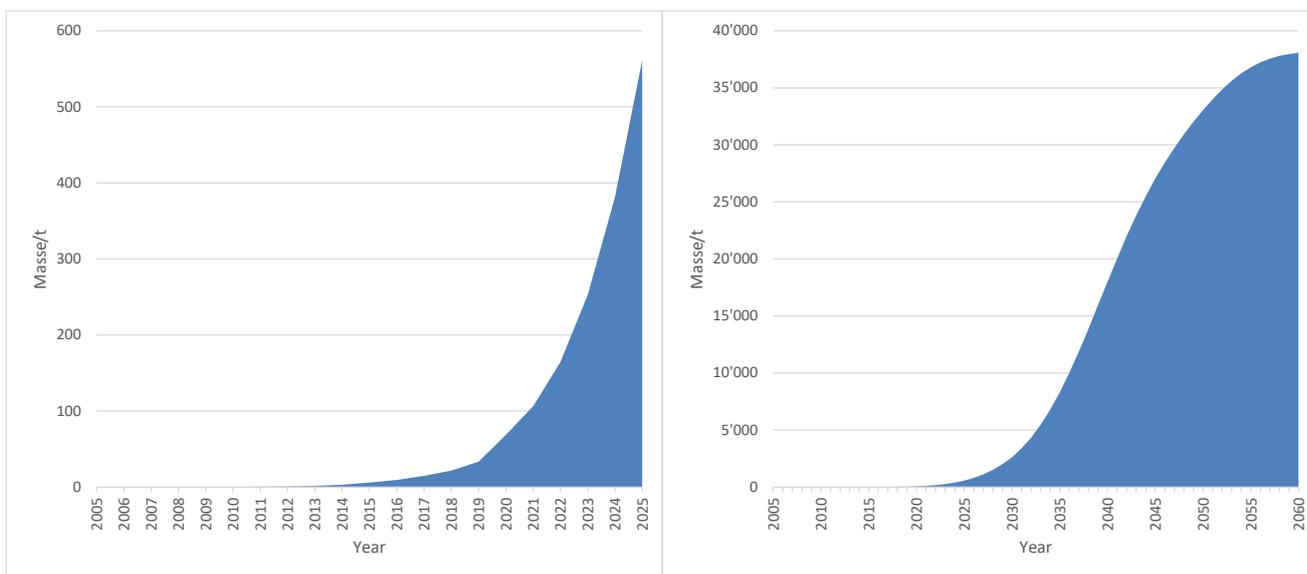


Figure 38: Projections des flux de recyclage des batteries lithium-ion de véhicules électriques en Suisse d'ici 2025 (à gauche) et 2060 (à droite) (Widmer et al., 2021).

Exporter des véhicules électriques implique d'exporter des batteries

La plupart des batteries de voitures électriques utilisées en Suisse n'y seront probablement pas éliminées. Environ 80% des véhicules arrivant au terme de leur utilisation en Suisse sont exportés en tant que véhicules d'occasion (OFAC, 2022) et sont donc également éliminés dans d'autres pays, environ 20% des véhicules sont recyclés en Suisse, tandis que la destination des véhicules restant n'est pas connue. Soit ces véhicules ont été exportés illégalement, soit ils sont stockés par des personnes, des garages ou des ferrailleurs (SARS, 2022).

Par conséquent, environ 80% des véhicules utilisés en Suisse sont ensuite recyclés ou réutilisés à l'étranger. Parmi ceux-ci, la part des véhicules électriques est actuellement encore très faible, estimée à environ 0,5%. Elle devrait toutefois augmenter considérablement dans un avenir proche, pour atteindre environ 6% en 2030 et 60% en 2040 (Marmy, 2022b, 2022a). Une batterie accompagne chaque véhicule électrique exporté de Suisse. Par conséquent, l'élimination de ces batteries n'est plus contrôlée ou surveillée par des institutions suisses, mais se fait selon les lois et pratiques en vigueur dans le pays de destination. Il n'est donc pas possible de garantir que ces batteries de traction seront recyclées à la fin de leur durée de vie.

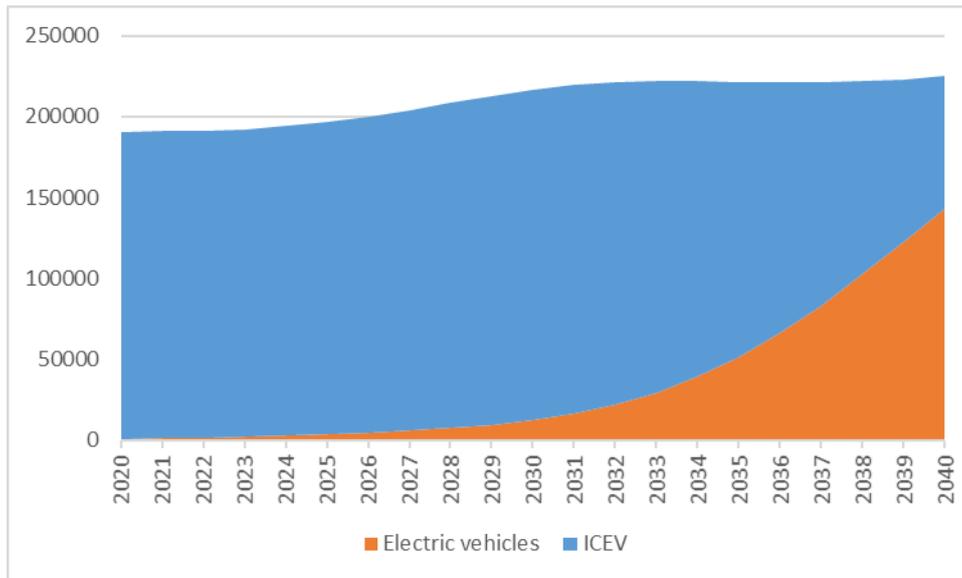


Figure 39: Projection du nombre de véhicules exportés de Suisse, selon le scénario de l'Empa, développé sur mandat de l'OFEV. ICEV : Internal Combustion Engine Vehicle, Véhicule à combustion interne (Løvik et al., 2020 ; Marmy, 2022b).

Une situation similaire dans l'Union Européenne

La plupart des véhicules en provenance de Suisse sont exportés vers l'Union européenne. La collecte et le recyclage des batteries usagées y est soumise à des règles similaires à celles en vigueur en Suisse, avec quelques différences selon les Etats membres. La directive 2006/66/CE du Parlement européen et du Conseil relative aux batteries et leurs déchets, également appelée "directive Batterie", s'applique à tous les États membres. La directive a été transposée dans les bases légales nationales le 1er décembre 2009 par la loi sur la mise sur le marché, la reprise et l'élimination non polluante des batteries et accumulateurs (European Parliament, 2006). La Commission européenne élabore actuellement une nouvelle directive européenne sur les batteries, dont l'entrée en vigueur est prévue pour 2024 (European Parliament, 2022 ; Widmer et al., 2021). Plus précisément, les États membres doivent veiller à ce que les producteurs de batteries mettent en place des systèmes de reprise auprès des utilisateurs finaux. Si les batteries proviennent de véhicules privés non commerciaux, ces systèmes doivent être gratuits et ne doivent pas inclure l'obligation d'acheter une nouvelle batterie. En revanche, il n'y a pas d'obligation de restitution comme dans l'ordonnance suisse correspondante. Pour plus de détails sur la législation européenne, voir le chapitre 2.4.

6.3 Procédés industriels utilisés dans le recyclage

Quels sont les procédés utilisés dans le recyclage des batteries, et quel est leur efficacité ?

Lorsque les batteries de voitures électriques arrivent en fin de vie, l'opportunité d'une seconde utilisation, par exemple en tant que système de stockage d'énergie photovoltaïque, devrait être examinée. Dans le cas où une deuxième vie n'est pas avantageuse, les batteries sont recyclées afin de récupérer les matériaux qu'elles contiennent et de réduire ainsi les besoins en matières premières primaires. Le recyclage des batteries usagées est une obligation légale en Suisse et dans de nombreux autres pays (INOBAT, 2022b). Au cours des dernières années, plusieurs procédés industriels ont été mis au point pour broyer et trier les composants des batteries en fractions de matériaux, afin de produire des matières premières secondaires. Une partie de ces matériaux secondaires est ensuite réutilisée dans la production de batteries. Le reste est utilisé pour la fabrication d'autres produits. Toutefois, l'efficacité du recyclage dépend du type des batteries recyclées, de leur modèle, de leur année de fabrication, du matériau actif de leur cathode, de leur taille, de leur emballage, etc. Les procédés de recyclage utilisés ainsi que la situation du marché sont également importants pour déterminer dans quelle application les matières premières secondaires sont utilisées (Neef et al., 2021).

Procédés de recyclage des batteries lithium-ion

Des procédés industriels de recyclage sont utilisés pour séparer les matériaux en fractions individuelles, puis pour concentrer et récupérer les matériaux cibles. Pour ce faire, on se sert de différentes propriétés des matériaux cibles, comme la densité, le point de fusion, l'aptitude à la décantation, etc. Les batteries peuvent en principe être traitées thermiquement, mécaniquement ou chimiquement (Zheng et al., 2018).

Traitement thermique

Le traitement thermique consiste à faire fondre les batteries lithium-ion en utilisant beaucoup d'énergie et à les séparer en différentes fractions métalliques. En Suisse, ce processus pyrométallurgique constitue la base du recyclage des batteries portables traditionnelles (BATREC, 2022). Les batteries de véhicules électriques peuvent être introduites entières dans ce processus, ce qui permet un rendement élevé et une application polyvalente. Le cuivre, le cobalt, le manganèse et le nickel sont récupérés, tandis que le graphite, les plastiques et l'électrolyte sont détruits. L'aluminium et le lithium se retrouvent dans les mâchefers de la fonderie et ne peuvent pas être récupérés.

Traitement mécanique

Le traitement mécanique consiste à démonter les batteries lithium-ion en leurs différents composants. Des processus spécifiquement adaptés aux différents types de batteries permettent de séparer les matériaux sans grande dépense d'énergie. Les cellules de la batterie sont déroulées ou démontées manuellement ou semi-automatiquement. De tels processus spécialisés ne permettent toutefois pour l'instant que de traiter de faibles quantités de batteries. Le traitement mécanique à plus grande échelle consiste à broyer les batteries lithium-ion pour ensuite séparer les matériaux actifs des électrodes. La résultante de cette première étape est ensuite triée en différentes fractions de matériaux à l'aide de tamis, d'aimants et d'autres procédés. L'une des fractions obtenues est la masse noire, un mélange de matériaux actifs qui doit ensuite être traité chimiquement pour récupérer les matériaux qu'elle contient. Le cuivre et l'aluminium, en revanche, peuvent être directement récupérés grâce à ce processus.

Traitement chimique

Le traitement chimique des batteries lithium-ion consiste à récupérer des substances cibles dans la masse noire par des réactions d'acidification et de précipitation. Ce processus hydrométallurgique nécessite plusieurs produits chimiques auxiliaires. Les composants des matériaux actifs tels que le cobalt, le nickel, le manganèse, le graphite et le lithium sont récupérés sous forme de sulfates, de carbonates ou d'hydroxydes. Le traitement chimique nécessite un processus de préparation mécanique et/ou thermique.

Installations de recyclage prévues et planifiées en Suisse et en Europe

Les procédés utilisés aujourd'hui combinent les processus présentés ci-dessus de diverses manières afin de récupérer le mieux possible les matériaux des batteries lithium-ion. La plupart des procédés commencent par le contrôle et la décharge (électrique) des batteries de véhicules électriques. Pour ce faire, les batteries sont plongées dans de l'eau salée, ce qui crée une connexion entre les électrodes. Il est également possible d'extraire l'électricité via une station de décharge. L'électricité ainsi récupérée peut être directement utilisée dans le processus de recyclage (W. Wang & Wu, 2017 ; Zheng et al., 2018). Ensuite, l'emballage de la batterie est le plus souvent ouvert manuellement. Les modules de batterie qu'il contient sont alors envoyés dans les différents processus de recyclage des batteries lithium-ion. L'emballage, le câblage et les composants du module de gestion de la batterie sont envoyés dans les filières de ferraille et des déchets électro- niques.

Suisse

A ce jour, le secteur du recyclage des batteries ne dispose pas d'un procédé clairement défini qui pourrait être qualifié d'état de l'art. La tendance actuelle semble aller vers des procédés qui traitent d'abord mécaniquement les batteries puis chimiquement la masse noire ainsi obtenue (figure 40). En Suisse, la société Batrek SA utilise cette approche, bien que les fractions destinées au traitement chimique soient encore exportées vers la France (INOBAT, 2022a). La société suisse Librec SA, qui souhaite se développer dans le domaine du recyclage des batteries de véhicules électriques, envisage également un procédé similaire dans une future installation (LIBREC, 2022). Des procédés de traitement mécano-chimiques de ce type permettent d'atteindre des taux de recyclage de l'ordre de 90% pour la plupart des matériaux (Duesenfeld, 2022). Kyburz Switzerland SA recycle ses propres batteries de manière purement mécanique. L'ensemble composé de la cathode, de l'anode et du séparateur est d'abord déroulé. Ensuite, un bain d'eau sépare le matériau actif de l'électrode correspondante. Le taux de recyclage obtenu est de 91% (KYBURZ, 2022).

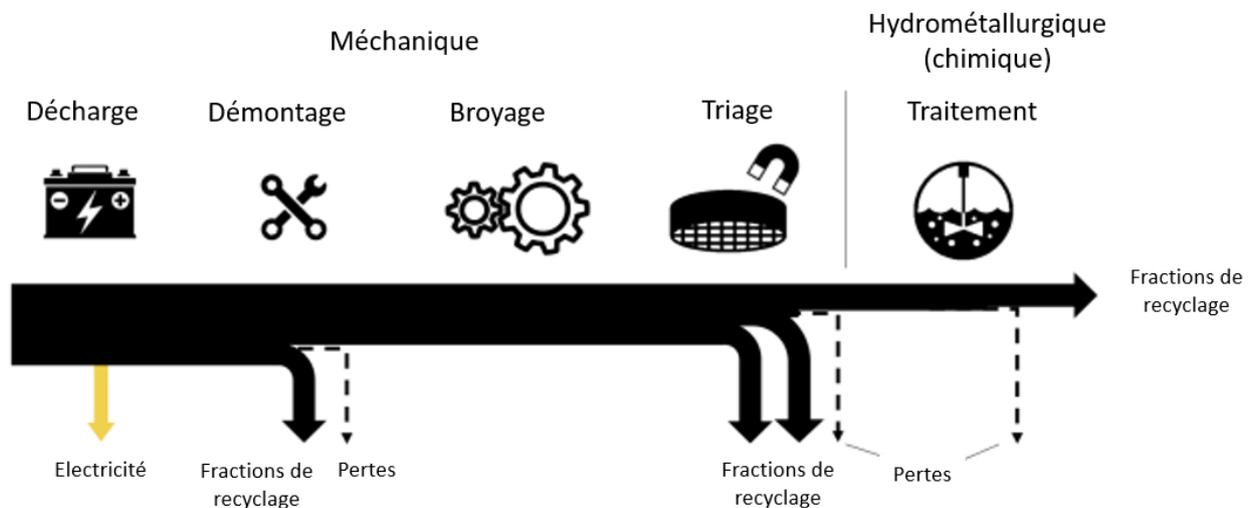


Figure 40: Représentation schématique des étapes typiques d'un processus de recyclage mécanique et hydrométallurgique de batteries lithium-ion (source : Empa).

Europe

L'entreprise Umicore en Belgique utilise une combinaison de procédés pyrométallurgiques et hydrométallurgiques pour recycler les batteries (Umicore, 2022). Les batteries lithium-ion des voitures électriques sont préalablement démontées en modules individuels, sans utiliser de broyeurs. Le cobalt, le cuivre et le nickel sont récupérés à plus de 95%. L'entreprise allemande ACCUREC Recycling GmbH utilise pour sa part une combinaison de traitement mécanique et thermique pour le recyclage des batteries lithium-ion (Accurec, 2022).

Des entreprises de toute l'Europe planifient actuellement la construction d'installations de recyclage pour les batteries lithium-ion (cf. figure 41). Les prochaines années révéleront quels procédés de recyclage s'imposeront à plus grande échelle. Cependant, il existe aujourd'hui déjà une grande diversité de solutions de recyclage présentant des taux de récupération élevés.

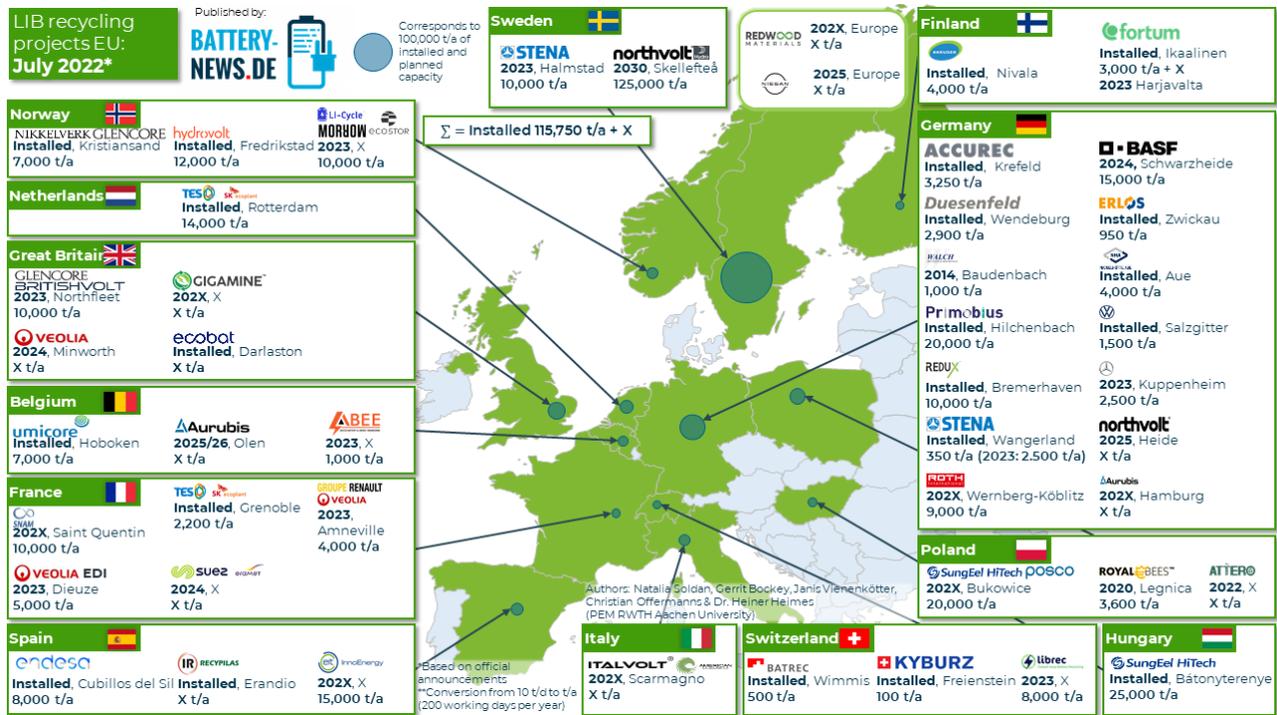


Figure 41: Installations de recyclage de batteries existantes et planifiées en Europe (Bockey, 2022).

6.4 Aspects économiques du recyclage

Quels sont les coûts et la rentabilité du recyclage ? Comment le recyclage est-il financé ? Quel est le rôle d'une taxe anticipée de recyclage ?

En Suisse, le recyclage des batteries de voitures électriques n'est actuellement pas rentable, mais cette situation pourrait évoluer rapidement en fonction du prix des matières premières et d'autres facteurs tels que le marché des véhicules ou l'innovation dans les technologies de recyclage (Widmer et al., 2021). Cela s'explique par le fait que les exigences légales en matière de recyclage entraînent des coûts d'opération élevés. Cela inclut par exemple une surveillance stricte, des exigences de sécurité élevées ainsi que des normes sanitaires et environnementales strictes. Les coûts dépassent donc actuellement les recettes du recyclage des batteries. En outre, les coûts d'extraction des matières premières primaires sont généralement moins élevés. C'est pourquoi un système de financement est nécessaire pour couvrir la différence.

Système de financement du recyclage

En Suisse, l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim, 2022) définit le cadre du financement du recyclage des batteries, y compris des batteries de véhicules électriques. Selon cette ordonnance, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) mandate une organisation privée, à savoir Inobat, pour qu'elle se charge de la collecte, de la gestion et de la distribution d'une taxe d'élimination anticipée (TEA) obligatoire (Inobat, 2021). Dans certaines conditions, un secteur économique peut organiser lui-même le financement du recyclage de ses batteries. En outre, Inobat a dans tous les cas la tâche de surveiller les batteries mises sur le marché en Suisse. Pour ce faire, chaque distributeur doit mettre à la disposition d'Inobat des données relatives aux batteries mises en circulation, telles que les quantités, le type des batteries et leur teneur en substances nocives. Inobat a également pour mission d'informer le public sur le recyclage des batteries.

Le financement est assuré sur le principe d'une taxe d'élimination anticipée (TEA) obligatoire pour toutes les batteries, qu'elles soient intégrées ou non dans des appareils. L'argent est versé dans un fonds qui finance la collecte, le transport et le recyclage des batteries. L'argent du fonds sert également à financer les informations ainsi que les activités propres de l'organisation privée qui s'inscrivent dans le cadre du mandat de l'OFEV (ORRChim, 2022).

Dans la mesure où un secteur peut organiser, gérer et financer collectivement la collecte et l'élimination de ses batteries usagées, il peut collectivement solliciter auprès d'Inobat une exemption de l'obligation de payer la taxe. Pour obtenir une telle exemption, le secteur doit prouver que le système qu'il propose englobe l'ensemble des acteurs de la branche, couvre tous les coûts d'élimination et de recyclage et est respectueux de l'environnement (ORRChim, 2022). Une telle approche peut être avantageuse lorsqu'un secteur est en mesure de mettre en place un système moins cher et mieux adapté à ses besoins. Le secteur peut alors organiser le financement en demandant par exemple une contribution anticipée facultative au recyclage (CAR) pour chaque batterie mise sur le marché chez ses membres (SARS, 2022 ; Widmer et al., 2021).

Coûts de recyclage

Les coûts du recyclage sont générés par les quatre activités suivantes : la collecte et la préparation, le traitement, la logistique et l'exploitation du système de recyclage.

Collecte et préparation

Les batteries atteignent la fin de leur durée de vie et sont recyclées parce qu'elles sont endommagées ou qu'elles ne sont plus assez performantes pour remplir leur fonction. Comme évoqué au chapitre 5.4, les batteries anciennes ou endommagées peuvent présenter un risque d'incendie ou dégager des produits chimiques très dangereux comme le fluorure d'hydrogène. Elles doivent donc être traitées avec précaution et de manière spécifique. Par exemple, une batterie doit être déchargée selon des procédures spécifiques et sécurisées avant tout autre traitement (Groux, 2018 ; W. Wang & Wu, 2017). Celle-ci doit ensuite être stockée selon des directives spécifiques. Ces activités impliquent un travail manuel considérable et nécessitent des mesures de protection spécifiques. Par conséquent, ces activités représentent une part importante et difficilement variable des coûts totaux.

Traitement

Comme décrit au chapitre 6.2, les batteries en fin de vie doivent être soumises à des procédés industriels spéciaux afin de récupérer les matériaux qu'elles contiennent. Il existe différentes technologies de recyclage qui combinent un grand nombre de processus, tels que le broyage mécanique des batteries ou le démontage de leurs principaux composants (pour la composition des batteries, voir chapitre 2.1), le tri mécanique des déchets issus du broyage et les processus de traitement chimique, hydrométallurgique et pyrométallurgique. Ces processus aboutissent chacun à des résultats différents. Par exemple, le démontage des batteries en leurs composants génère des fractions de meilleure qualité que le broyage et engendre très peu de pertes. Les processus pyrométallurgiques ne permettent pas de récupérer le lithium, alors que les processus hydrométallurgiques le peuvent (Christmann et al., 2015 ; Ekberg & Petranikova, 2015, p. 7 ; Groux, 2018).

Parallèlement, ces procédés nécessitent ne nécessitent pas les mêmes moyens. Le démontage des batteries en leur composant est souvent effectué manuellement et nécessite plus de temps par unité que le broyage. Les processus pyrométallurgiques consomment beaucoup d'énergie, tandis que les processus hydrométallurgiques nécessitent des quantités importantes de produits chimiques qui doivent être correctement gérés. En outre, certaines technologies génèrent des déchets qui ne peuvent pas être valorisés et qui, s'ils sont dangereux, doivent être éliminés dans des installations spécialisées, comme par exemple l'électrolyte des batteries. Tous ces aspects ont un impact significatif sur les coûts d'exploitation et les revenus générés par les matières premières secondaires produites. De plus, ces processus ont lieu dans des installations industrielles qui nécessitent des terrains, du personnel et des bâtiments. Le développement de ces technologies nécessite des innovations industrielles supplémentaires, qui nécessitent à leur tour des investissements importants (Groux, 2018).

Les coûts totaux du traitement peuvent varier en fonction du prix du marché de l'énergie et des produits chimiques, mais ils sont généralement relativement stables et prévisibles. Ils dépendent également fortement de la quantité de batteries traitées, étant donné que les processus industriels mécaniques et chimiques peuvent fortement bénéficier d'économies d'échelle (X. Wang et al., 2014).

Logistique

Le recyclage des batteries usagées nécessite leur transport depuis le lieu où elles atteignent la fin de leur vie, par exemple depuis un garage ou le lieu d'un accident, jusqu'aux installations de traitement. Les batteries usagées étant considérées comme des déchets spéciaux dans la législation suisse, leur transport nécessite des mesures spéciales, qui sont encore plus strictes pour les batteries endommagées ou défectueuses. Il s'agit notamment d'emballages spéciaux, d'équipements de sécurité spécifiques dans les véhicules qui transportent les batteries, d'autorisations particulières pour les entreprises qui effectuent ce tra-

vail ou d'une formation adéquate des conducteurs et conductrices. Les mesures spéciales impliquent également des coûts supplémentaires qui, d'une part, sont pour la plupart fixes et prévisibles et, d'autre part, ne représentent qu'une petite partie des coûts totaux (SDR, 2021 ; ADR, 2022).

Systeme

Comme décrit précédemment, le recyclage des batteries implique également des tâches de gestion et d'administration, que ce soit par Inobat ou via une solution sectorielle. L'exploitation d'un système de recyclage implique, entre autres, l'établissement de contrats de recyclage avec des partenaires et l'administration de la taxe d'élimination anticipée (TEA) ou de la contribution anticipée de recyclage (CAR) dans un fonds correspondant. A cela s'ajoute l'obligation d'assurer le suivi des batteries recyclées (Inobat, 2021 ; SENS Swico, 2022).

Revenus du recyclage

Les revenus du recyclage des batteries sont générés par la vente de matières premières secondaires. Pour maximiser ces revenus, les pertes engendrées par les procédés utilisés doivent être réduites au minimum et la qualité des produits doit être maximisée tout au long du recyclage. Comme indiqué au chapitre 6.1, différents métaux et matériaux peuvent être récupérés et sont considérés comme précieux. Le prix de vente dépend toutefois de la valeur sur le marché, qui peut varier fortement au fil du temps. Par exemple, le prix du cobalt, un métal essentiel pour la plupart des types de batteries actuels, a fluctué entre moins de 30'000 et plus de 90'000 USD par tonne au cours des cinq dernières années. Il en va de même pour le carbonate de lithium, un matériau précurseur pour la production de lithium pour les batteries, qui était vendu 50'000 CNY par tonne, soit environ 7'000 USD, au milieu de l'année 2020 et qui a atteint un prix de 550'000 CNY par tonne, soit environ 75'000 USD, en octobre 2022 (Tradingeconomics, 2022a, 2022b).

En conséquence, les revenus du recyclage sont très dynamiques et difficilement prévisibles. Si le prix des matériaux de batterie continue d'augmenter à l'avenir, notamment en raison d'une hausse de la demande de batteries pour l'électromobilité, le recyclage pourrait devenir rentable.

Perspectives

Avec l'augmentation de la quantité de batteries à recycler et une adaptation de l'ensemble du secteur de la mobilité électrique à cet enjeu, on peut s'attendre à ce que les coûts de recyclage diminuent avec le temps. Il est difficile de prévoir comment les revenus futurs évolueront, car ils dépendent de la valeur commerciale des matières premières secondaires produites. Si l'électrification du parc automobile se poursuit, la demande de ces matériaux devrait augmenter et, avec elle, les prix des matières premières, ce qui entraînera une hausse des revenus issus du recyclage.

7. Références

- AAA. (2019). *AAA Electric Vehicle Range Testing*. American Automobile Association.
- Aalund, R., Diao, W., Kong, L., & Pecht, M. (2021). *Understanding the Non-Collision Related Battery Safety Risks in Electric Vehicles a Case Study in Electric Vehicle Recalls and the LG Chem Battery* (S. 6). IEEE.
- Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2016). *A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation*. Water Research & Pollution Control Department, National Research Center, Tahreer Street (El-Behous St.), Dokki, Cairo, Egypt.
- Accurec. (2022). *Lithium – Accurec Recycling GmbH*. <https://accurec.de/lithium>
- ADAC. (2021). *Stromverbrauch von Sitzheizung und Co.: Wie hoch ist er tatsächlich?* <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/ausstattung/sitzheizung-verbrauch/>
- ADAC. (2022). *Elektroauto im Winter: Wenn die Reichweite schwindet...* <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-reichweite-winter/>
- Adeola, A. O., Akingboye, A. S., Ore, O. T., Oluawjana, O. A., & Adewole, A. H. (2021). *Crude oil exploration in Africa: Socio-economic implications, environmental impacts, and mitigation strategies*. Department of Chemical Sciences, Adekunle Ajasin University, 001 Akungba-Akoko.
- Agora Verkehrswende. (2021). *Batteriestandort auf Klimakurs. Perspektiven einer klimaneutralen Batterieproduktion für Elektromobilität in Deutschland*.
- Aguilar Lopez, F., Billy, R. G., & Müller, D. B. (2022). A product–component framework for modeling stock dynamics and its application for electric vehicles and lithium-ion batteries. *Journal of Industrial Ecology*, 26(5), 1605–1615. <https://doi.org/10.1111/jiec.13316>
- AGVS. (2022). *Darauf müssen Garagisten achten*. Auto Gewerbe Verband Schweiz. <https://www.agvs-upsa.ch/de/news/news-archiv/darauf-muessen-garagisten-achten>
- Albeck-Ripka, L. (2020, Juni 11). Mining Firm Plans to Destroy Indigenous Australian Sites, Despite Outcry. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2020/06/11/world/australia/indigenous-caves-BHP-mining.html>
- Althaus, H. J., Duschmalé, J., & Fries, N. (2015). *Cleantech Ressourcenstrategie*. Foundation for global sustainability. www.swisscleantech.ch/Ressourcenstrategie DOI: 10.13140/RG.2.1.2651.752
- Althaus, H.-J., & Classen, M. (2004). *Life Cycle Inventories of Metals and Methodological Aspects of Inventorying Material Resources in ecoinvent (7 pp)*. Empa - Materials Science and Technology.
- AT. (2021). *Lösungen zur Graphitrundung für Lithium-Ionen-Batterien*. AT Mineral Processing. https://www.at-minerals.com/de/artikel/at_Loesungen_zur_Graphitrundung_fuer_Lithium-Ionen-Batterien_3695669.html
- AUTO BILD. (2022). *So weit ist die Entwicklung der E-Auto-Akkutechnik mittlerweile*. <https://www.auto-bild.de/artikel/elektroauto-batterie-akku-tauschen-co2-abdruck-kosten-recycling-16202315.html#159553903>
- AutoinsuranceEZ. (2022). *Gas vs. Electric Car Fires [2022 Findings]*. AutoinsuranceEZ. <https://www.auto-insuranceez.com/gas-vs-electric-car-fires/?nowprocket=1>
- autoschweiz. (2022). *Auto-Markt im April: Logistik- und Lieferprobleme schlagen durch*.
- BAFU. (2023). *Umweltauswirkungen von Personenwagen mit verschiedenen Antriebssystemen. Gegenwart (2021) und Zukunftsszenarien (bis 2050). Fachbericht des Bundesamtes für Umwelt BAFU*. Bundesamt für Umwelt.
- Bamana, G., Miller, J. D., Young, S. L., & Dunn, J. B. (2021). *Addressing the social life cycle inventory analysis data gap: Insights from a case study of cobalt mining in the Democratic Republic of the Congo*. Department of Anthropology, Normandale Community College, Bloomington.
- Banza Lubaba Nkulu, C., Casas, L., Haufroid, V., De Putter, T., Saenen, N. D., Kayembe-Kitenge, T., Musa Obadia, P., Kyanika Wa Mukoma, D., Lunda Ilunga, J.-M., Nawrot, T. S., Luboya Numbi, O.,

- Smolders, E., & Nemery, B. (2018). Sustainability of artisanal mining of cobalt in DR Congo. *Nature Sustainability*, 1(9), 495–504. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0139-4>
- Barazi, S. A., & Rohstoffagentur, D. (2022, November 3). *Battery Raw Materials – Outlook for Demand and Supply in Europe*. Future Battery Forum, Berlin.
- Barron, M. G., Vivian, D. N., Heintz, R. A., & Yim, U. H. (2020). *Long-Term Ecological Impacts from Oil Spills: Comparison of Exxon Valdez, Hebei Spirit, and Deepwater Horizon*. U.S. Environmental Protection Agency, Gulf Breeze, Florida.
- BATREC. (2022). Batterie-Recycling. *Batrec Industrie*. <https://batrec.ch/de/batterie-recycling/>
- Battery University. (2019). *BU-1003a: Battery Aging in an Electric Vehicle (EV)*. <https://batteryuniversity.com/article/bu-1003a-battery-aging-in-an-electric-vehicle-ev>
- Bayram, S. (2021). *Impacts of Electric Vehicle Charging under Cold Weather on Power Networks*. Department of Electronic and Electrical Engineering University of Strathclyde.
- BAZG, B. für Z. und G. (2022). *Aussenhandelsstatistik*. <https://www.bazg.admin.ch/bazg/de/home/themen/schweizerische-aussenhandelsstatistik.html>
- Benchmark Mineral Intelligence. (2019). *EV Battery Arms Race Enters New Gear with 115 Megafactories, Europe Sees Most Rapid Growth*. Benchmark Mineral Intelligence. <https://www.benchmarkminerals.com/ev-battery-arms-race-enters-new-gear-with-115-megafactories-europe-sees-most-rapid-growth/>
- Beyer, J., Goksoyr, A., Hjermann, D. O., & Klungsoyr, J. (2020). *Environmental effects of offshore produced water discharges: A review focused on the Norwegian continental shelf*. Norwegian Institute for Water Research (NIVA), Oslo.
- BFS, & ARE. (2017). *Verkehrsverhalten der Bevölkerung—Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015*. Bundesamt für Statistik (BFS), Bundesamt für Raumentwicklung (ARE).
- BGR. (2017). *Kobalt aus der DR Kongo—Potenziale, Risiken und Bedeutung für den Kobaltmarkt*. https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/53_kobalt-aus-der-dr-kongo.html
- BGR. (2019). *Mangan—Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe* [Steckbrief]. BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- BGR. (2021a). *Kobalt—Informationen zur Nachhaltigkeit*. BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- BGR. (2021b). *Nickel—Informationen zur Nachhaltigkeit*. BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- BHRRC. (2022). *Transition Minerals Tracker*. Business & Human Rights Resource Centre. <https://www.business-humanrights.org/en/from-us/transition-minerals-tracker/>
- Bhutada, G. (2022a). *Breaking Down the Cost of an EV Battery Cell*. Elements by Visual Capitalist. <https://elements.visualcapitalist.com/breaking-down-the-cost-of-an-ev-battery-cell/>
- Bhutada, G. (2022b, Mai 2). *The Key Minerals in an EV Battery*. Elements by Visual Capitalist. <https://elements.visualcapitalist.com/the-key-minerals-in-an-ev-battery/>
- Bloomberg Hyperdrive. (2022). *The Cobalt Crisis That Wasn't*. Bloomberg L.P.
- BloombergNEF. (2022a). *Electric Car Battery Bottlenecks Have a Way of Being Worked Out*.
- BloombergNEF. (2022b). *Race to net zero: Pressures of the battery boom in five charts*. BloombergNEF.
- Bockey, G. (2022, Juli 8). Batterie-Recycling in Europa (Stand: Juli 2022). *Battery-News.de*. <https://battery-news.de/index.php/2022/07/08/batterie-recycling-in-europa-stand-juli-2022/>
- Borgeest, K. (2021). *Elektronik in der Fahrzeugtechnik* (4.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-23664-9>
- Brancaccio, G., & Deflorio, F. P. (2021). *Extracting travel patterns from floating car data to identify electric mobility needs: A case study in a metropolitan area*. DIATI - Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering, Politecnico di Torino.

- Brot für alle, Fastenopfer, VCS. (2020). *Die Batterie: Knackpunkt der Elektromobilität. Soziale und ökologische Herstellungsbedingungen unter der Lupe* (S. 25).
- Buchholz, P. (2021). *Ressourcensicherung – nationale Strategie und globale Verantwortung*. Heidelberg University Publishing. <https://heiup.uni-heidelberg.de/journals/index.php/generale/article/view/24413/18275>
- Canals Casals, L., Etxandi-Santolaya, M., Bibiloni-Mulet, P. A., Corchero, C., & Trilla, L. (2022). Electric Vehicle Battery Health Expected at End of Life in the Upcoming Years Based on UK Data. *Batteries*, 8(10), Art. 10. <https://doi.org/10.3390/batteries8100164>
- Chordia, M., Nordelöf, A., & Ellingsen, L. A.-W. (2021). *Environmental life cycle implications of upscaling lithium-ion battery production*. Division of Environmental Systems Analysis, Chalmers University of Technology, Institute of Transport Economics.
- Christmann, P., Gloaguen, E., Labbé, J.-F., Melleton, J., & Piantone, P. (2015). Chapter 1—Global Lithium Resources and Sustainability Issues. In A. Chagnes & J. Swiatowska (Hrsg.), *Lithium Process Chemistry* (S. 1–40). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801417-2.00001-3>
- CleanTechnica. (2022). *Top 10 Automobiles in Switzerland*. <https://cleantechnica.com/2022/10/05/tesla-model-y-is-best-selling-automobile-in-switzerland-in-2022-tesla-model-3-is-3rd-best/>
- Cobalt Institute. (2022). *Cobalt Market Report 2021*.
- Conde, M. (2017). Resistance to Mining. A Review. *Ecological Economics*, 132, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.08.025>
- Cordes, E. E., Jones, D. O. B., Schlacher, T. A., Amon, D. J., Bernardino, A. F., & Brooke, S. (2016). *Environmental Impacts of the Deep-Water Oil and Gas Industry: A Review to Guide Management Strategies*. Department of Biology, Temple University, Philadelphia, PA.
- Council of European Union. (2023). *Outcome of Proceeding concerning 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—Document No. 5469/23*. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-5469-2023-INIT/en/pdf>
- Cox, B., Bauer, C., Beltran, A. M., van Vuuren, D. P., & Mutel, C. L. (2020). *Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios*. PSI Switzerland, INFRAS, ICTA Spain, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, Copernicus Institute of Sustainable Development Netherlands.
- Cox, B., Mutel, C. L., Bauer, C., Beltran, A. M., & van Vuuren, D. P. (2018). *Uncertain Environmental Footprint of Current and Future Battery Electric Vehicles*. Paul Scherrer Institut Laboratory for Energy Systems Analysis PSI, Leiden University Institute of Environmental Sciences (CML), PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Crenna, E., Gauch, M., Widmer, R., Wäger, P., & Hirschier, R. (2021). *Towards more flexibility and transparency in life cycle inventories for Lithium-ion batteries*. Technology & Society Laboratory, Empa.
- Dai, Q., Kelly, J. C., Dunn, J., & Benavides, P. T. (2018). *Update of Bill-of-materials and Cathode Materials Production for Lithium-ion Batteries in the GREET Model*. Argonne National Laboratory.
- Dai, Q., Kelly, J. C., & Elgowainy, A. (2018). *Cobalt Life Cycle Analysis Update for the GREET Model*. Argonne National Laboratory.
- Dai, Q., Kelly, J. C., Gaines, L., & Wang, M. (2019). *Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications*. Systems Assessment Group, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, DuPage County, Argonne.
- DMT. (2020). *E-Auto-Glossar: Von Akkumulator bis Wechselstrom*. Puls Online Magazin. <https://www.dmt-puls.de/news/e-auto-glossar-von-akkumulator-bis-wechselstrom/>
- Duesenfeld. (2022). *Geringer Energieaufwand und höchste Rückgewinnungsraten*. <https://www.duesenfeld.com/recycling.html>
- E+Z. (2020). *Privatisiert und ausgetrocknet*. Entwicklung und Zusammenarbeit. <https://www.dandc.eu/de/article/chile-leidet-wegen-der-klimakrise-unter-dramatischem-wassermangel>

- earthlink. (2022). *40 000 Kinder quälen sich in kongolesischen Kobaltminen*. aktiv gegen Kinderarbeit. <https://www.aktiv-gegen-kinderarbeit.de/2022/09/40-000-kinder-quaelen-sich-in-kongolesischen-kobaltminen/>
- ECGA. (2018). *Towards CO2 neutrality due to carbon and graphite*. European Carbon and Graphite Association.
- EcoStor, 2023. (2023). *ECO STOR | Second life*. <https://www.eco-stor.com/solutions/second-life>
- EJAtlas. (2022). *EJAtlas*. <http://www.envjustice.org/ejatlus/>
- Ekberg, C., & Petranikova, M. (2015). Chapter 7—Lithium Batteries Recycling. In A. Chagnes & J. Świątowska (Hrsg.), *Lithium Process Chemistry* (S. 233–267). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801417-2.00007-4>
- electrive. (2022). *Wie Europa als Produktionsstandort für Batterien aufholt*. <https://www.electrive.net/2022/09/16/wie-europa-als-produktionsstandort-fuer-batterien-aufholt/>
- Elektroauto-News. (2022). *Deutsches Lithium-Projekt in Bolivien vor dem Neustart?* Elektroauto-News.net. <https://www.elektroauto-news.net/2021/deutsches-lithium-projekt-in-bolivien-vor-dem-neustart>
- Ellingsen, L. A.-W., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A. K., Valøen, L. O., & Hammer Strømman, A. (2014). *Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack*. Department of Energy and Process Engineering Norwegian University of Science and Technology.
- Els, F. (2018, Dezember 1). The lithium price bulls were right. *MINING.COM*. <https://www.mining.com/lithium-price-bulls-right/>
- EMCEL. (2016). *Heizung im Elektrofahrzeug: Warum nimmt die Reichweite im Winter ab?* <https://emcel.com/de/heizung-im-elektrofahrzeug/>
- e-mobileo. (2023). *E-Auto Batterie: Unterschied zwischen Brutto- und Nettokapazität*. <https://www.e-mobileo.de/e-auto-akku-brutto-vs-nettokapazitaet/#:~:text=Die%20Bruttokapazit%C3%A4t%20bezieht%20sich%20immer,ist%20also%20die%20Netto%2DKapazit%C3%A4t.>
- Empa. (2020). *Wie gefährlich sind brennende Elektroautos? Brandversuch im Tunnel*. Empa - Materials Science and Technology. <https://www.empa.ch/web/s604/brandversuch-elektroauto>
- Energyload. (2022). *Verkürzt Schnellladen die Lebensdauer der Elektroauto-Batterie?* <https://energyload.eu/elektromobilitaet/elektroauto/schnellladen-lebensdauer-elektroauto-batterie/>
- EPA. (2003). *Environmental Impact of the Petroleum Industry* (Environmental Update #12). Environmental Protection Agency (USA). https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjSwrnLiqH7AhX-wAIHSHHBuwQFnoECAs-QAQ&url=https%3A%2F%2Fcfpub.epa.gov%2Fncerc_abstracts%2Findex.cfm%2Ffuseaction%2Fdisplay.files%2FfileID%2F14522&usg=AOvVaw3vgIrlSfRAXYdifq7WnNfG
- Europäische Kommission. (2010). *Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials*.
- European Commission. (2021). *BERICHT DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN über die Umsetzung der EU-Jugendstrategie (2019–2021)* (Website COM/2021/636 final). Publications Office of the European Union. <http://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/cd7e8978-2cd9-11ec-bd8e-01aa75ed71a1/language-de>
- European Parliament, EP, CONSIL, 266 OJ L (2006). <http://data.europa.eu/eli/dir/2006/66/oj/eng>
- European Parliament. (2022). *A new EU regulatory framework for batteries*. [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi-2ubwhpX7AhUCif0HHbz0B-QQFnoECBAQAw&url=https%3A%2F%2Fwww.europarl.europa.eu%2FRegData%2Fetudes%2FATA-TAG%2F2022%2F729285%2FEPRS_ATA\(2022\)729285_EN.pdf&usg=AOvVaw2mpqm1Jx8Si47EnMqbUsGC](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi-2ubwhpX7AhUCif0HHbz0B-QQFnoECBAQAw&url=https%3A%2F%2Fwww.europarl.europa.eu%2FRegData%2Fetudes%2FATA-TAG%2F2022%2F729285%2FEPRS_ATA(2022)729285_EN.pdf&usg=AOvVaw2mpqm1Jx8Si47EnMqbUsGC)
- Fath, J. P. (2021). *Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien zur Lebensdauerprädiktion unter besonderer Berücksichtigung des Anodenüberhangeffekts* (S. 346). Karlsruher Institut für Technologie. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/53522>

- FHWien. (2022). *Zukunft verantwortungsvoll gestalten*. Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-36861-6_3
- Forbes. (2022). Electric Car Fire Risks Look Exaggerated, But More Data Required For Definitive Verdict. *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/neilwinton/2022/03/02/electric-car-fire-risks-look-exaggerated-but-more-data-required-for-definitive-verdict/?sh=3bf1fc482327>
- Fraunhofer ISI. (2020). *Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf*.
- Fraunhofer ISI. (2022). *Solid-State Battery Roadmap 2035+*.
- Geotab. (2020a). *Was können uns 6.000 Elektrofahrzeuge über die Lebensdauer der EV Batterien sagen?* Geotab. <https://www.geotab.com/de/blog/efahrzeuge-batterie-lebensdauer-studie/>
- Geotab. (2020b). *Wie wirkt sich die Temperatur auf die Reichweite des Elektrofahrzeugs aus?* <https://www.geotab.com/de/blog/elektrofahrzeuge-batterie-temperatur/#:~:text=Bei%20optimalen%20Temperaturen%20k%C3%B6nnen%20Elektrofahrzeuge,Reichweite%20des%20Fahrzeugs%20hinaus%20fahren.>
- Global X. (2022). *How China Is Transforming the Global Lithium Industry*. Global X. <https://www.globalxetfs.com/how-china-is-transforming-the-global-lithium-industry/>
- Golder Associates. (2007). *Environmental Impact Assessment Tenke Fungurume Project—Volume A: ESIA Introduction and Project Description*. Tenke Fungurume Mining.
- Greenpeace. (2020). *Ranking the World's Sulfur Dioxide (SO₂) Hotspots: 2019-2020* [Report]. Delhi: Center for Research on Energy and Clean Air & Greenpeace India.
- Groux, O. (2018). *In-house Recycling von Li-Ionenbatterien: Alternativen zu etablierten Recyclingoptionen unter Beachtung rechtlicher und sicherheitstechnischer Auflagen—Bachelorarbeit* [Bachelorarbeit]. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften Life Sciences und Facility Management Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen.
- Halleux, V. (2022). *New EU regulatory framework for batteries: Setting sustainability requirements | Think Tank | European Parliament*. European Parliament. [https://www.europarl.europa.eu/think-tank/en/document/EPRS_BRI\(2021\)689337](https://www.europarl.europa.eu/think-tank/en/document/EPRS_BRI(2021)689337)
- Human Rights Watch. (2009). *Well Oiled—Oil and Human Rights in Equatorial Guinea*. Human Rights Watch.
- Human Rights Watch. (2022). Myanmar: Thai State-Owned Company Funds Junta. *Human Rights Watch*. <https://www.hrw.org/news/2021/05/25/myanmar-thai-state-owned-company-funds-junta>
- Huo, H. (2017). *Safety Requirements for Transportation of Lithium Batteries* (S. 38). College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China.
- IEA. (2022). *Global Electric Vehicle Outlook 2022*. International Energy Agency.
- lionknowledge. (2022). *2.7 Lebensdauerende*. Lithium-Ionen-Batterietechnik. <https://lionknowledge.com/2-funktionsweise-von-lithium-ionen-batterien/2-7-lebensdauerende/>
- Inobat. (2021). *Jahresbericht 2020 betreffend Erhebung, Verwaltung und Verwendung der vorgezogenen Entsorgungsgebühr (VEG) für Batterien und Akkumulatoren*. INOBAT. <https://www.inobat.ch/ueber-uns/publikationen/taetigkeitsberichte/>
- INOBAT. (2022a). *Battery News*. Inobat. <https://www.inobat.ch/ueber-uns/publikationen/battery-news/>
- INOBAT. (2022b). *Inobat*. Inobat. <https://www.inobat.ch/>
- Inobat. (2023). *Zahlen und Fakten*. Inobat. <https://www.inobat.ch/batterierecycling/zahlen-fakten/>
- Janstrup, K. H., Møller, M., & Hipólito, F. (2022). *A comparison of crash, person and environment characteristics between electric and conventional vehicle*. Technical University of Denmark (DTU).
- Kampker, A. (2014). *Elektromobilproduktion*. Springer Vieweg.
- Köllner, C. (2021). Öko-Probleme bei den Batterie-Rohstoffen Lithium und Graphit. *Springer Nature, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*. <https://www.springerprofessional.de/batterie/ressourceneinsatz/oeeko-probleme-bei-den-batterierohstoffen-lithium-und-graphit/18790148>
- Koschinsky, A. (2021). *Tiefseebergbau—Chancen und Risiken einer zukünftigen Gewinnung kritischer metallischer Rohstoffe vom Meeresboden*. Jacobs University Bremen.

- KYBURZ. (2022). *Elektromobile & Transportlösungen* | KYBURZ Switzerland AG. Batterierecycling | KYBURZ Switzerland; KYBURZ Switzerland AG. <https://kyburz-switzerland.ch/>
- Landherr, A., & Graf, J. (2022). *Territoriale Macht und periphere imperiale Lebensweise – Internalisierungsmechanismen in der chilenischen Bergbaustadt Tierra Amarilla* (Austrian Journal of Development Studies) [Journal]. Mattersburger Kreis für Entwicklungspolitik an den österreichischen Universitäten.
- Lepesant, G. (2021). *Die Rolle der kritischen Metalle bei der Energiewende: Herausforderungen und Strategien*. HAL.
- LIBREC. (2022). *Closed-loop Battery Recycling*. Librec AG. <https://librec.ch/>
- Løvik, A. N., Marmy, C., Restrepo, E., & Widmer, R. (2020). *Projekt EVA II Elektronik – Verwertung – Altautos: Recycling von eingebetteten Elektronikgeräten in Fahrzeugen—Das Dynamisches Stoffflussmodell* [Projektbericht - nicht öffentlich publiziert]. Empa.
- Marmy, C. (2021). *La révolution Li-Ion* [Microsoft PowerPoint]. Swiss Recycling Forum, Lausanne.
- Marmy, C. (2022a). *Projekt EVA II Elektronik – Verwertung – Altautos: Recycling von eingebetteten Elektronikgeräten in Fahrzeugen—Synthesebericht* [Projektbericht - nicht öffentlich publiziert]. Empa.
- Marmy, C. (2022b). *Projekt EVA II Elektronik – Verwertung – Altautos: Recycling von eingebetteten Elektronikgeräten in Fahrzeugen—Szenarienanalyse und Entscheidungshilfe* [Projektbericht - nicht öffentlich publiziert]. Empa.
- Matzer, C., Weller, K., Dippolt, M., Lipp, S., Röck, M., Rexeis, M., & Hausberger, S. (2019). *Update of Emission Factors for HBEFA Version 4.1*. TU Graz. https://www.hbefa.net/d/documents/HBEFA41_Report_TUG_09092019.pdf
- Meng, Q. (2017). *The impacts of fracking on the environment: A total environmental study paradigm*. Department of Geosciences, Mississippi State University, MS.
- Morah, R. (2022, Mai 21). *Prius Battery Lifespan: How Long Does Toyota Prius Battery Last*. EVs Guy. <https://evsguy.com/prius-battery-lifespan/>
- Moran, B., Boutt, D., McKnight, S., Jenckes, J., Munk, L. A., Corkran, D., & Kirshen, A. (2022). *Relic Groundwater and Prolonged Drought Confound Interpretations of Water Sustainability and Lithium Extraction in Arid Lands* (Earth's Future, 10). <https://doi/10.1029/2021EF002555>
- MOTEG. (2022). *STATE OF HEALTH (SOH)*. STATE OF HEALTH (SOH). <https://www.moteg.de/e-mobility-glossar/state-of-health/>
- Motoaki, Y., Yi, W., & Salisbury, S. (2018). Empirical analysis of electric vehicle fast charging under cold temperatures. *Energy Policy*, 122, 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.036>
- NAF. (2020). *20 popular EVs tested in Norwegian winter conditions*. Norwegian Automobile Federation. <https://www.naf.no/elbil/aktuelt/elbiltest/ev-winter-range-test-2020/>
- Neef, C., Schmaltz, T., & Thielmann, A. (2021). *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau*. <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/301299>
- Nickel Institute. (2021). Sulphur project reducing environmental impact. *Nickel Institute*.
- Nornickel. (2020). *Our Far North* [Sustainability Report]. Nornickel Group.
- OECD. (2019). *OECD-Leitfaden für die Erfüllung der Sorgfaltspflicht zur Förderung verantwortungsvoller Lieferketten für Minerale aus Konflikt- und Hochrisikogebieten* (Dritte Ausgabe: OECD Publishing).
- Oeko-Institut. (2020). *Ökologische und sozio-ökonomische Herausforderungen in Batterie-Lieferketten: Graphit und Lithium*. Oeko-Institut.
- Öko-Institut e.V. (2020). *Lithium & Graphit für die Batterieproduktion: Zukunft der Lieferkette*. Öko-Institut e.V. <https://www.oeko.de/presse/archiv-pressemitteilungen/presse-detailseite/2020/lithium-graphit-fuer-die-batterieproduktion-zukunft-der-lieferkette>
- Paffumi, E., De Gennaro, M., & Martini, G. (2018). *European-wide study on big data for supporting road transport policy*.

- Pagliaro, M., & Meneguzzo, F. (2019). Lithium battery reusing and recycling: A circular economy insight. *Heliyon*, 5(6), e01866. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01866>
- Porzio, J., & Scown, C. D. (2021). *Life-Cycle Assessment Considerations for Batteries and Battery Materials*. Energy & Biosciences Institute.
- PowerShift. (2021). *Das unbekannte Mangan—Zerstörung an Land und Bedrohung für die Tiefsee?! Umweltbundesamt Deutschland*. <https://power-shift.de/wp-content/uploads/2021/10/Die-vergessenen-Batterierohstoffe-Mangan-web.pdf>
- PSI. (2022). *Carculator*. <https://calculator.psi.ch/>
- Restrepo, E., Loevik, A., & Widmer, R. (2018). *Projekt „EVA“: Szenarien & Dynamik—Schlussbericht zu der Arbeitspaket C3* [Unpublished]. Empa.
- Reuters. (2022, Januar 21). Factbox: World faces shortage of lithium for electric vehicle batteries. *Reuters*. <https://www.reuters.com/technology/world-faces-shortage-lithium-electric-vehicle-batteries-2022-01-21/>
- RMF. (2020). *Mining and the SDGs, a 2020 status update*. Responsible Mining Foundation; Columbia Center on Sustainable Investment.
- RP-Energie-Lexikon. (2022). *Kapazität einer Batterie*. Kapazität einer Batterie. https://www.energie-lexikon.info/kapazitaet_einer_batterie.html
- Rutronik. (2022). *Lithium Ionen Batterien: Wie lässt sich ein Thermal Runaway verhindern?* Rutronik Elektronische Bauelemente GmbH. <https://www.rutronik.com/de/artikel/detail/News/lithium-ionen-batterien-wie-laesst-sich-ein-thermal-runaway-verhindern/>
- RWTH Aachen. (2022a). *Battery Atlas 2022*. www.battery-atlas.eu
- RWTH Aachen. (2022b). *Komponenten elektrischer Antriebsstränge—Aufbau eines Batteriesystems* (RWTH-Wissenschaftsnacht-Steckbriefe). PEM RWTH Aachen University.
- SARS. (2022). *2021 JAHRESBERICHT*. Stiftung Auto Recycling Schweiz. <https://files.designer.host-star.ch/98/0b/980ba2fa-4322-4142-a8d3-dec8f05da845.pdf>
- Schmidt, M. (2017). *DERA Rohstoffinformationen—Rohstoffrisikobewertung Lithium* (Nr. 33). Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Aktuelles/rohstoff_lithium.html?nn=5091226
- Schreyer, C., & Morlier, D. (2022). Roadmap Elektromobilität: Zukunft unter Strom. *Die Volkswirtschaft*. <https://dievolkswirtschaft.ch/de/2022/10/roadmap-elektromobilitaet-zukunft-unter-strom/>
- Schulze, O. (2022). *Elektromobilität*. Springer.
- SDR, Nr. SR 741.621 (2021). <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2002/685/de>
- ADR, Nr. AS 1972 1073, BBl 1969 II 1 (2022). https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1972/1073_1085_1249/de
- ChemRRV, Nr. SR 814.81 (2022). <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/478/de>
- SENS eRecycling. (2023). *Branchenlösung «VFAS» – Nachhaltige Entsorgungslösung für den Autohandel*. SENS eRecycling. <https://www.erecycling.ch/wissenswertes/wissensblog/fach88.html>
- SENS Swico. (2022). *FACHBERICHT 2022* [Fachbericht]. SENS Swico.
- Sestorec. (2023). *Branchenorganisation*. sestorec.ch. <https://www.sestorec.ch/branchenorganisation>
- Shahan, Z. (2022, Oktober 20). *World Needs To Mine 25x More Lithium By 2050*. CleanTechnica. <https://cleantechnica.com/2022/10/20/world-needs-to-mine-25x-more-lithium-by-2050/>
- SOMO. (2020). *The battery paradox: How the electric vehicle boom is draining communities and the planet* (S. 65). Centre for Research on Multinational Corporations.
- statista. (2022a). *Distribution of lithium end-usage worldwide in 2021, by area of application*. <https://www.statista.com/statistics/268787/lithium-usage-in-the-world-market/#:~:text=In%202021%2C%20batteries%20were%20by,made%20up%20and%20other%2014%20percent.>
- statista. (2022b). *Major countries in worldwide graphite mine production in 2021*. <https://www.statista.com/statistics/267366/world-graphite-production/>

- statista. (2022c). *Projected global battery demand from 2020 to 2030, by application*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/1103218/global-battery-demand-forecast/>
- Sun, P. (2019). *A Review of Battery Fires in Electric Vehicles* (S. 50). Research Centre for Fire Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong.
- Surovtseva, D., Crossin, E., Pell, R., & Stamford, L. (2022). *TOWARD A LIFE CYCLE INVENTORY FOR GRAPHITE PRODUCTION*.
- Swiss eMobility. (2020a). *Elektromobilität in der Schweiz: Zahlen – Fakten – Prognosen*. Swiss eMobility. https://www.swiss-emobility.ch/de-wAssets/docs/eFaktenblatt/Swiss_eMobility_Faktenblatt_105x180mm_DE.pdf
- Swiss eMobility. (2020b). *Mythbuster Elektroauto* (S. 20).
- swissquote. (2022). *Dossier Batterien elektrisieren die Welt*. www.swissquote.com
- Szurliès, M. (2021). *DERA Rohstoffinformationen—Rohstoffrisikobewertung Nickel* (Nr. 48). Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-48.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Tages-Anzeiger. (2022, September 6). Für brennende E-Lastwagen sind Schweizer Tunnels schlecht gerüstet. *Tages-Anzeiger*. <https://www.tagesanzeiger.ch/fuer-brennende-e-lastwagen-sind-schweizer-tunnels-schlecht-geruestet-572176179394>
- TCS. (2021). *Elektroauto bei Kälte: Der Einfluss auf die Reichweite*. https://www.tcs.ch/de/testberichte-ratgeber/ratgeber/elektromobilitaet/elektroauto-kaelte.php#anchor_3d35f12a_Accordion-Die-Vorteile-von-Elektroautos-in-der-Kaelte
- TCS. (2022). *Wie lange halten Batterien von Elektroautos, und was geschieht mit ihnen danach?* Touring Club Schweiz. <https://www.tcs.ch/de/testberichte-ratgeber/ratgeber/elektromobilitaet/lebensdauer-elektroauto-batterie.php>
- TdG. (2018). *Vorsicht vor Autobränden!* Tribune de Genève. <https://www.tdg.ch/gare-aux-incendies-de-voitures-717308349086>
- Technische Universität Ilmenau. (2022). *Optimierung der äußeren Druckbedingungen auf Li-Ionen Zellen zur Erhöhung der Lebensdauer* (S. 144) [DISSERTATION]. Technische Universität Ilmenau.
- Technischen Hochschule Ingolstadt. (2021). *Methoden zur sichern Deaktivierung von Lithium-Ionen-Zellen* (S. 54) [Bachelorarbeit]. <https://opus4.kobv.de/opus4-haw/files/2833/I001038016Abschlussarbeit.pdf>
- The Guardian. (2014). *Iraq invasion was about oil*. *Guardian News & Media Limited*. <https://www.theguardian.com/environment/earth-insight/2014/mar/20/iraq-war-oil-resources-energy-peak-scarcity-economy>
- Toyota, K. (2022). *How Long Does a Toyota Last? | Camry, Corolla, Highlander, RAV4, Prius*. <https://www.kingstoyota.com/blog/2021/may/14/how-long-does-a-toyota-last.htm>
- Tradingeconomics. (2022a). *Cobalt—2022 Data—2010-2021 Historical—2023 Forecast—Price—Quote—Chart*. <https://tradingeconomics.com/commodity/cobalt>
- Tradingeconomics. (2022b). *Lithium—2022 Data—2017-2021 Historical—2023 Forecast—Price—Quote—Chart*. <https://tradingeconomics.com/commodity/lithium>
- Tradingeconomics. (2022c). *Nickel—2022 Data—2010-2021 Historical—2023 Forecast—Price—Quote—Chart*. <https://tradingeconomics.com/commodity/nickel>
- Tulane University. (2021). *EPA's Report on Fracking and Water Quality*. Tulane University Law School. <https://online.law.tulane.edu/blog/epa-fracking-report-water-quality#:~:text=Environmental%20Concerns%20Related%20to%20Fracking&text=However%2C%20hydraulic%20fracturing%20is%20exempt,it%20pertains%20to%20drinking%20water.>
- TWICE, 2023. (2023). *TWICE Energiespeicher*. TWICE Energy. <https://twice-energy.ch/index.php/produkt/>
- UK Department for Transport. (2021). *Outcome and response to ending the sale of new petrol, diesel and hybrid cars and vans*. <https://www.gov.uk/government/consultations/consulting-on-ending-the-sale-of-new-petrol-diesel-and-hybrid-cars-and-vans/outcome/ending-the-sale-of-new-petrol-diesel-and-hybrid-cars-and-vans-government-response>

- Umicore. (2022). *Our recycling process*. <https://brs.umicore.com/en/recycling/>
- USGS. (2022a). *Copper—Mineral Commodity Summaries 2022* [U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries].
- USGS. (2022b). *Mineral commodity summaries 2022*: U.S. Geological Survey.
- UVEK. (2020). *Risikominimierung von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen* (S. 102) [Forschungsprojekt].
- VDI/VDE. (2021). *Nachhaltigkeit der Batteriezellfertigung in Europa*. Publikation der wissenschaftlichen Begleitung zur Fördermaßnahme Batteriezellfertigung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.
- Visualcapitalist. (2022). *Mapped: EV Battery Manufacturing Capacity, by Region*. Visualcapitalist. <https://www.visualcapitalist.com/sp/mapped-ev-battery-manufacturing-capacity-by-region/>
- Wagner, A., Schmalz, M., Weisbeck, J., & Krause, S. (2022). *Einfluss der Gasbildung auf die Entwicklung von Lithium-Ionen-Batterien* (S. 42–47) [MTZ-Motortechnische Zeitschrift 83.9]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s35146-022-0849-z>
- Wang, W., & Wu, Y. (2017). An overview of recycling and treatment of spent LiFePO₄ batteries in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 233–243. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.019>
- Wang, X., Gaustad, G., Babbitt, C. W., & Richa, K. (2014). Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.009>
- WEF. (2019). *A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030 Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation*. World Economic Forum.
- Whiteside, J., & Finn-Foley, D. (2019). Supply Chain Looms as Serious Threat to Batteries' Green Reputation. *Wood Mackenzie, Greentech Media*.
- Widmer, R., Grösser, S., Loevik, A., Toledo, L., & Marmy, C. (2021). *Projekt „SARS-LIB“: „CH-Branchenlösung zur Entsorgung von Li-Ionen Batterien aus e-Fahrzeugen“—Schlussbericht 2021* [Unpublished]. Empa, Complexity Engineering.
- Wietlisbach, O. (2022, August 6). Wann welcher Autohersteller Benzin- und Dieselaautos aus dem Angebot wirft. *watson*. <https://www.watson.ch/amp/1501694830>
- WIFO. (2021). *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien* (S. 11). https://www.wifo.ac.at/jart/prj3/wifo/resources/person_dokument/person_dokument.jart?publikationsid=69243&mime_type=application/pdf
- Zheng, X., Zhu, Z., Lin, X., Zhang, Y., He, Y., Cao, H., & Sun, Z. (2018). A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries. *Engineering*, 4(3), 361–370. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.018>
- Zürich Versicherungs-Gesellschaft AG. (2020). *«Elektroautos brennen nicht häufiger als konventionelle Fahrzeuge»* [Zürich Versicherungs-Gesellschaft AG]. <https://www.zurich.ch/de/services/wissen/fahrzeuge-und-reisen/brennende-elektroautos>

8. Glossaire et abréviations

Anode	Électrode à partir de laquelle des ions chargés positivement (cations de lithium dans le cas des batteries au lithium) se détachent lors de la décharge de la batterie et s'écoulent vers la cathode à travers l'électrolyte. Des électrons circulent alors en parallèle à le circuit pour équilibrer la charge, fournissant ainsi de l'énergie électrique.
ARD	"acid rock drainage", l'écoulement d'eaux acides issues de mines de métaux ou de charbon.
Cellule de batterie	Cellule électrochimique formant l'unité de base d'une batterie, composée de deux électrodes (une cathode et une anode), d'un électrolyte, d'un séparateur, et d'un emballage. Les batteries pour véhicules électriques contiennent de nombreuses cellules ainsi qu'un système de gestion de la batterie et parfois un système de refroidissement.
Electrode	Cathode et/ou anode. Une électrode est un conducteur d'électrons qui, en interaction avec une contre-électrode, interagit avec l'électrolyte qui se trouve entre les deux électrodes.
Electrolyte	L'électrolyte est le composant liquide ou solide de la cellule situé entre les deux électrodes dans lequel peuvent se déplacer les ions
Energie	L'énergie est la capacité d'effectuer un travail (au sens physique), de produire de la chaleur ou d'émettre de la lumière. L'énergie peut par exemple être mécanique, électrique, magnétique, cinétique, chimique, thermique ou potentielle. Unité SI : J (joule)
Densité d'énergie	Quantité d'énergie qui peut être stockée par unité de masse (kg) ou de volume (l) de batterie.
Batterie solide	Les batteries solides sont des batteries dont l'électrolyte à l'état solide, contrairement aux batteries "habituelles" contenant un électrolyte liquide. Les électrolytes des batteries solides sont des plaques de verre ou de gel à base d'oxydes céramiques, de sulfures céramiques ou encore de polymères. Actuellement, les batteries solides sont utilisées dans les pacemakers ou les appareils auditifs, ainsi que dans certains bus. À l'avenir, une adoption plus large de ces batteries pourrait permettre l'utilisation de lithium métallique comme matériau d'anode, avec des densités d'énergie très élevées à la clé.
Gigafactory	Gigafactory est un terme général qui décrit les grosses usines de production de batteries pour véhicules électriques. Le terme a été utilisé à l'origine par le constructeur de voitures électriques Tesla. Le succès de ce concept a conduit à une utilisation générique du terme.
IEA	International Energy Agency
Capacité	La capacité d'une batterie est la quantité de "charge électrique" pouvant être délivrée lorsqu'elle est pleinement chargée (en ampère-heure). Si l'on multiplie la capacité par la tension (en Volt) de la batterie, on obtient la quantité d'énergie électrique maximale stockée dans la batterie (mesurée en watt-heure ou kilowatt-heure (kWh)). Le terme "capacité" est souvent utilisé pour désigner la capacité maximale de stockage d'énergie d'une batterie, ce qui est inexact d'un point de vue physique.
Cathode	Électrode recevant les cations de lithium lorsque la batterie se décharge. Les cations sont libérés par l'anode et se déplacent à travers l'électrolyte. Pour équilibrer la charge, des électrons chargés négativement circulent alors de l'anode à la cathode en passant par le circuit électrique.
LCO	Dioxyde de cobalt et de lithium (LiCoO ₂): Matériau de cathode qui, en combinaison avec des anodes de graphite, permet d'atteindre une densité d'énergie élevée. En revanche, la durée de vie des cathodes est réduite. De plus les batteries utilisant ces cathodes sont chères en raison de leur forte teneur en cobalt. Ce matériau n'est en principe pas utilisé dans les batteries de véhicules électriques.
Puissance	Travail ou énergie produite (en joules) par unité de temps. Unité SI : W (watt) ou J/s (joule/seconde)
Densité de puissance	Puissance qu'une batterie peut fournir par unité de masse (kg) ou de volume (l).

LFP	Phosphate de fer lithié (LiFePO ₄). Matériau utilisé dans les cathodes des batteries lithium-fer-phosphate, en combinaison avec des anodes de LTO ou de graphite. Les batteries LFP sont bon marché, sûres et ont une bonne espérance de vie. Bien qu'ayant une densité énergétique plus faible que les batteries de type NMC, les batteries LFP conviennent bien pour une utilisation dans les véhicules électriques, et sont de plus en plus adoptées à cette fin.
LiCoO ₂	Voir LCO
LMO	Dioxyde de manganèse-lithium (LiMn ₂ O ₄), parfois nommé LMS: Matériau de cathode sans cobalt, permettant toutefois une densité énergétique nettement inférieure à celle des batteries de type NMC. Ce matériau de cathode n'est pas utilisé dans les batteries des véhicules électriques de série.
LMS	Spinelite d'oxyde de manganèse et de lithium: voir LMO
LTO	Oxyde de lithium-titane/titanate de lithium : matériau d'anode, habituellement utilisé en conjonction avec des cathodes de NMC, NCA ou LFP. Les batteries LTO ont une densité de puissance très élevée et peuvent donc être chargées et déchargées très rapidement. En outre, elles peuvent être chargées et déchargées de nombreuses fois avant que leur capacité ne soit affectée. En revanche, leur capacité énergétique spécifique est inférieure à celle des anodes en graphite. Les batteries LTO sont très chères et ne sont pas utilisées dans les batteries des véhicules électriques de série (à l'exception de certains bus).
NCA	Oxydes de lithium, de nickel, de cobalt et d'aluminium. Ce sont des oxydes mixtes contenant les cations du lithium, du nickel, du cobalt et de l'aluminium et forment un groupe de substances composé d'oxydes. Ils sont utilisés comme matériau actif de la cathode dans les batteries lithium-ion. Les batteries NCA présentent des propriétés similaires à celles des batteries NMC. Tesla a longtemps misé sur ce matériau de cathode, mais depuis quelques années, elle utilise également des NMC et des LFP.
NMC	Oxyde de lithium, nickel manganèse et cobalt. Matériau de cathode qui, en combinaison avec des anodes de graphite, fait partie des principaux matériaux actifs des batteries au lithium pour les véhicules électriques. La proportion des trois métaux de transition (nickel, manganèse et cobalt) dans ce type de matériaux est très variable, modifiant ainsi les propriétés des cathodes. Les batteries utilisant ces cathodes présentent une bonne combinaison de densité d'énergie et de puissance, d'espérance de vie, de résistance aux températures élevées, et de prix.
NMC111	Type spécifique de NMC, LiNi _{0.33} Mn _{0.33} Co _{0.3} O ₂
NMC532	Type spécifique de NMC, LiNi _{0.5} Mn _{0.3} Co _{0.2} O ₂
NMC622	Type spécifique de NMC, LiNi _{0.6} Mn _{0.2} Co _{0.2} O ₂
NMC811	Type spécifique de NMC, LiNi _{0.8} Mn _{0.1} Co _{0.1} O ₂
SEI	Revêtement de passivation à l'interface entre le matériau de l'anode et l'électrolyte (de l'anglais. "solid electrolyte interphase")
SOH	State of Health: État de la batterie, mesuré en pourcentage de la capacité initiale de stockage d'énergie. Un SOH inférieur à 80% signifie que la batterie est arrivée en fin de vie. Il s'agit toutefois d'une définition arbitraire qui ne signifie pas qu'une batterie dont le SOH est < 80% ne pourrait plus être utilisée.
Gaz à effet de serre	On dénombre les gaz à effet de serre suivants : CO ₂ , méthane, protoxyde d'azote, hydrocarbures fluorés et perfluorés contenant de l'hydrogène (HFC et PFC), hexafluorure de soufre et trifluorure d'azote.