

Les batteries de véhicules électriques

Principaux faits et chiffres

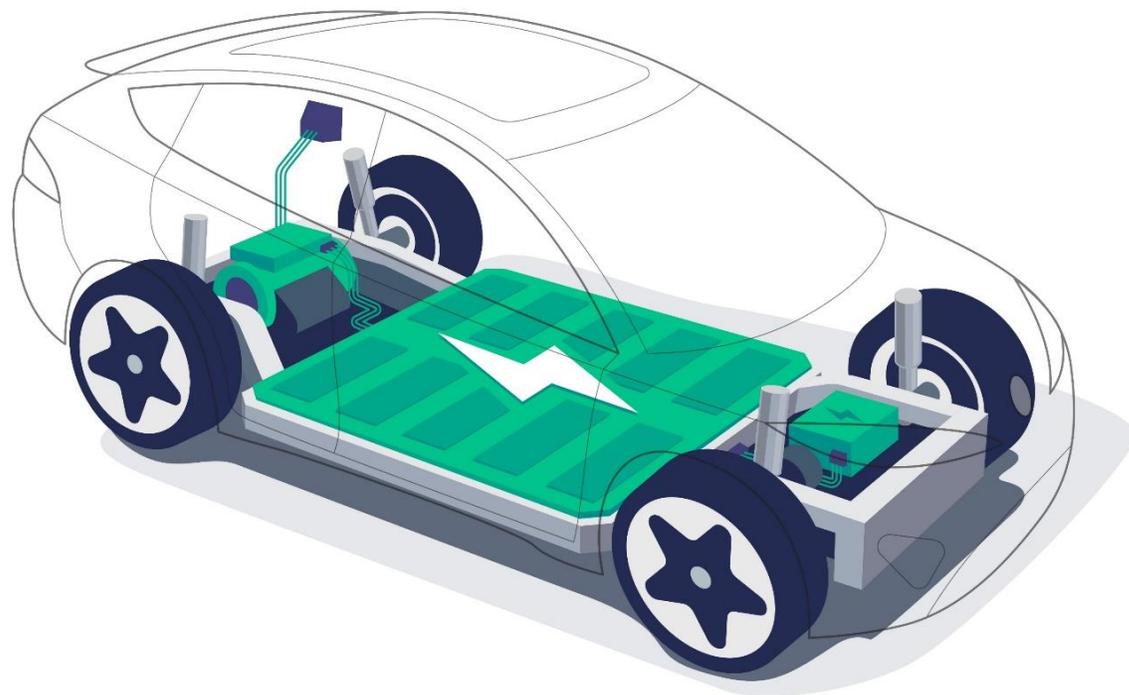


Table des matières et mentions légales

Contenu

1. Les batteries lithium-ion
2. Marché mondial
3. Ecobilan des batteries
4. Extraction des matières premières
5. Production des batteries
6. Utilisation des batteries
7. Fin de vie des batteries

Mandant

SuisseEnergie, Office Fédéral de l'Energie OFEN

Alois Freidhof, Spécialiste mobilité

Pulverstrasse 13, 3063 Ittigen. Adresse postale: 3003 Berne

www.suisseenergie.ch

Mandataire

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Empa, Lerchenfeldstrasse 5, 9014 St.Gallen

Auteur·e·s

Roberto Bianchetti, Hans-Jörg Althaus, Brian Cox, Lucas Truniger, Ursina Walther
([INFRAS](#))

Charles Marmy, Andrin Büchel, Martin Gasser, Roland Hischer, Patrick Wäger
([Empa](#))



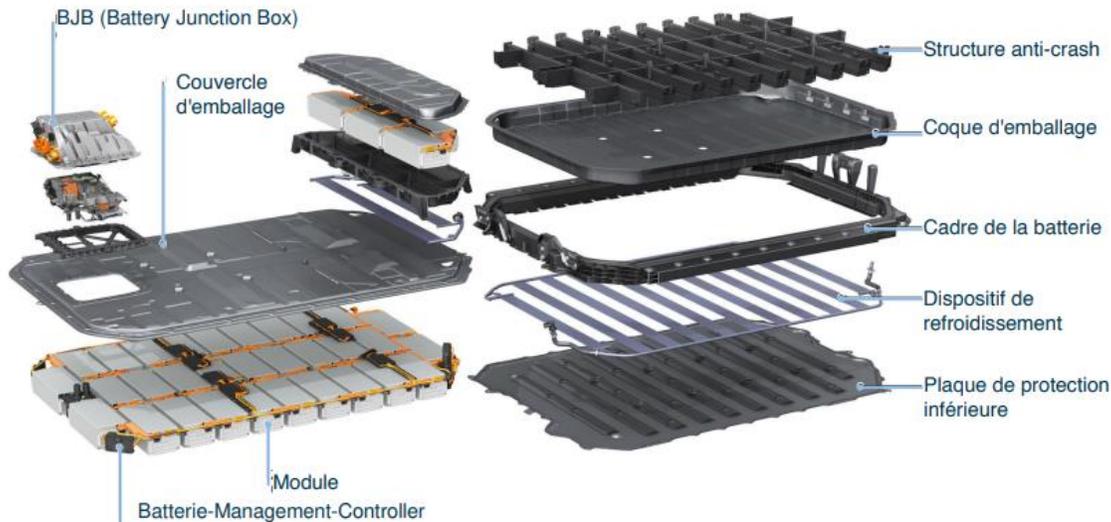
Cette étude a été réalisée sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie. Les auteures et auteurs sont seuls responsables de son contenu. Les affirmations contenues sont basées sur l'état des connaissances au moment de l'élaboration de la fiche d'information (février 2023). Pour faciliter la lecture, nous avons renoncé à attribuer une source à chaque affirmation. Des informations plus détaillées ainsi que toutes les sources utilisées se trouvent dans le rapport de base de l'OFEN «Les batteries de véhicules électriques».

1. Structure des batteries au lithium-ion

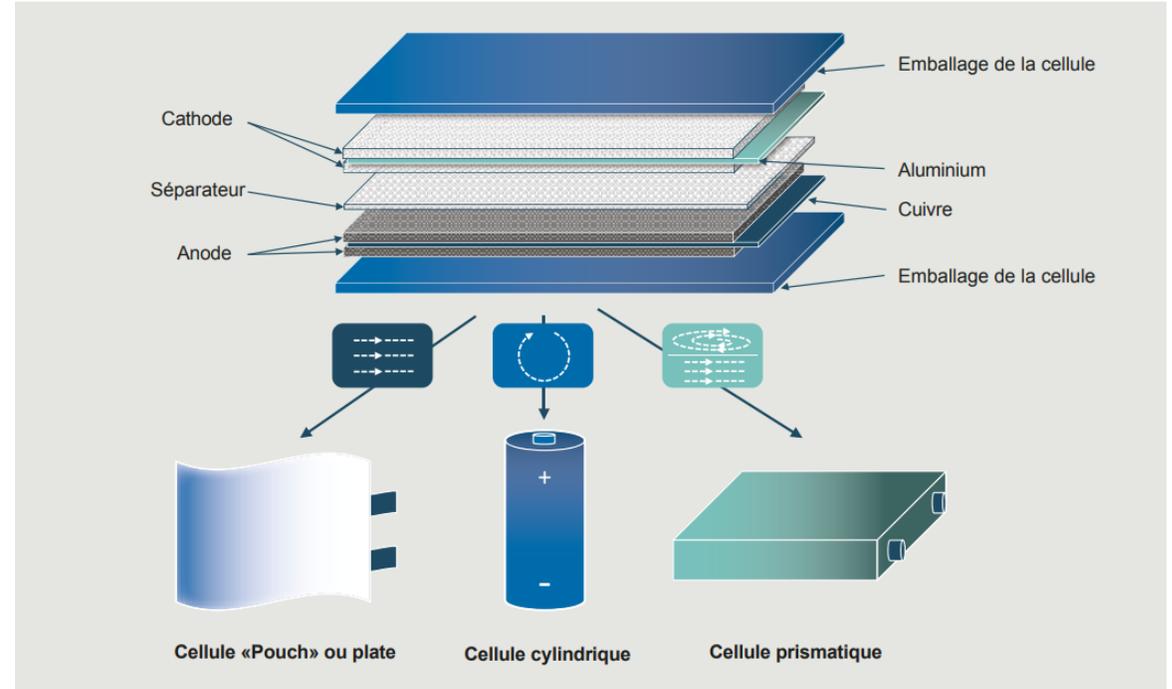
Définitions et constitution

Le terme «**batterie**» englobe l'ensemble du système, qui se compose des cellules électrochimiques proprement dites, d'un système de gestion de la batterie, d'un système de refroidissement ainsi que d'un boîtier et de connexions électriques.

Les batteries sont généralement modulaires et pèsent entre 250 et 650 kg. Les cellules individuelles sont reliées entre elles pour former des **modules** qui, à leur tour, sont combinés avec un système de refroidissement et un module de gestion de batterie intégré.



Structure d'une batterie de véhicule électrique (RWTH Aachen, 2022b)



Représentation schématique de la structure d'une cellule de batterie lithium-ion (Agora Verkehrswende, 2021)

Le cœur d'une batterie est composé de **cellules** électrochimiques. Elles se composent de deux électrodes et d'un électrolyte. L'électrode positive est appelée **cathode**, l'électrode négative **anode**. Les deux électrodes peuvent être composées de différents matériaux :

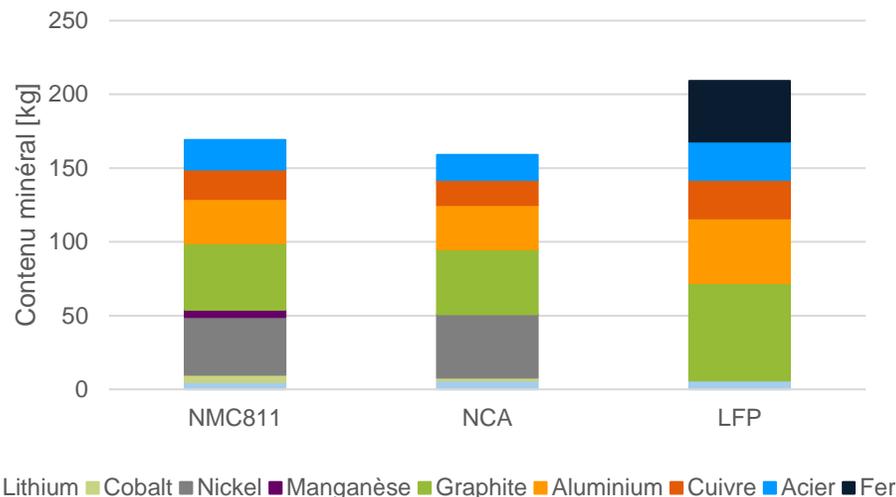
- L'anode des batteries lithium-ion est généralement composée de graphite, mais peut aussi être en titanate de lithium ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$; LTO).
- Les cathodes les plus utilisées sont composées d'oxydes de lithium, de nickel, de manganèse et de cobalt (**NMC**), d'oxydes de lithium, de nickel, de cobalt et d'aluminium (**NCA**) ou de phosphate de lithium et de fer (**LFP**).

¹ La Tesla modèle S contient par exemple 7'104 cellules.

1. Composition des batteries lithium-ion

Composition chimique

Le choix des matériaux de l'anode et de la cathode détermine en grande partie les propriétés de la cellule et donc de la batterie. La majorité des batteries utilisées actuellement dans des véhicules électriques sont de type **NMC**, **NCA** et **LFP** avec des anodes en graphite.



Composition chimique de différents types de batteries. Graphique INFRAS.

Type	Matériau actif de la cathode	Avantage	Inconvénients
NMC	Oxyde de lithium, de nickel, de manganèse et de cobalt	<ul style="list-style-type: none"> Haute densité d'énergie Recharge rapide 	<ul style="list-style-type: none"> Risque accru de surchauffe Dépendance au cobalt
NCA	Oxyde de lithium, de nickel, de cobalt et d'aluminium	<ul style="list-style-type: none"> Haute densité d'énergie Recharge rapide 	<ul style="list-style-type: none"> Risque accru de surchauffe Dépendance au cobalt
LFP	Phosphate de fer et de lithium	<ul style="list-style-type: none"> Grande densité de cellules dans la batterie Absence de cobalt 	<ul style="list-style-type: none"> Densité d'énergie moins élevée Réduction de la puissance à basse température

Alternatives

D'autres types et technologies alternatives aux batteries lithium-ion sont brièvement décrites ci-dessous. Elles ne sont toutefois pas encore produites et employées à l'échelle industrielle.

Les **batteries LMNO** (cathode en oxyde de manganèse et de nickel) ont une densité d'énergie élevée et ne contiennent pas de cobalt. Toutefois, leur résistance au cyclage doit être améliorée pour qu'elles puissent être utilisées dans des véhicules électriques à batterie.

Les **batteries LTO** (cathode NMC avec anode en oxyde de lithium et de titane) peuvent être chargées rapidement, mais présentent un mauvais rapport qualité-prix et ne sont pratiquement pas utilisées dans des véhicules électriques.

Les **batteries à anode de silicium** présentent une densité énergétique jusqu'à 50% supérieure à celle des batteries à anode de graphite, mais le silicium se dilate lorsqu'il absorbe des ions de lithium, ce qui affecte négativement la longévité de la batterie.

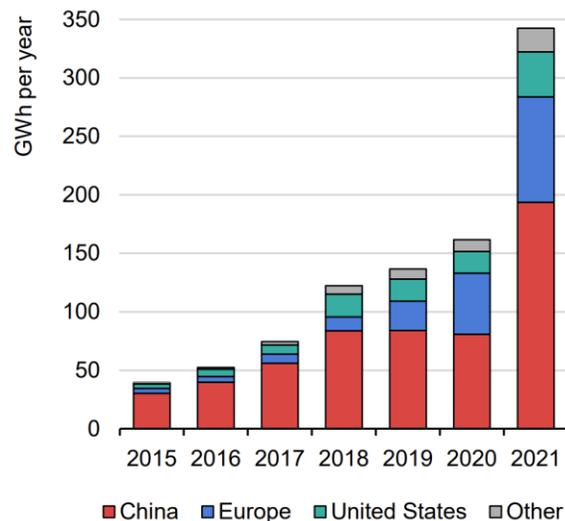
Les **batteries au sodium** ne sont pas inflammables et fonctionnent de manière fiable à des températures froides. Cependant, elles ont une longévité limitée et une densité d'énergie plus faible que les types de batteries les plus utilisés aujourd'hui.

Les **batteries solides** utilisant du lithium métallique comme anode présentent un risque réduit de court-circuit. Ces batteries sont considérées comme très prometteuses en termes de densité énergétique, qui pourrait dépasser les valeurs des batteries actuelles de 70%.

2. Marché mondial

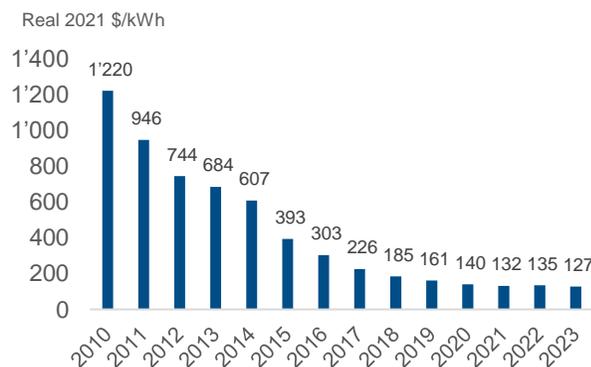
Situation actuelle

En 2021, la **demande de batteries** a doublé pour atteindre une capacité totale de **340 GWh**. La demande chinoise atteint **200 GWh**, suivie de l'Europe avec **80 GWh** et des États-Unis avec **40 GWh**.



Demande mondiale de batteries (AIE, 2022). Note: Chine, Europe, États-Unis, Autres

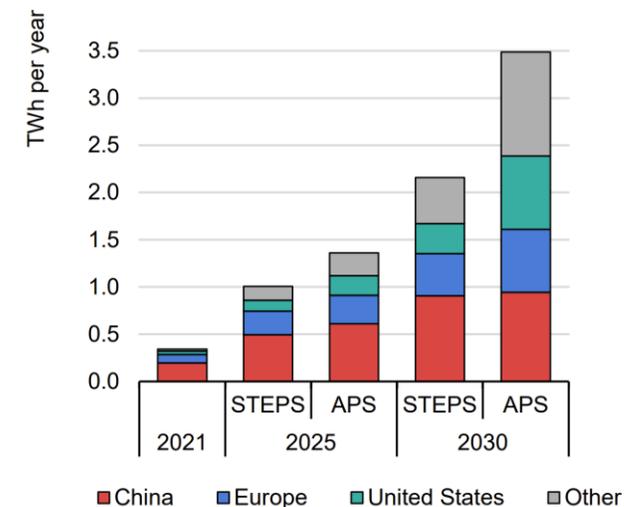
Les prix des cellules de batteries ont fortement chuté au cours de la dernière décennie, atteignant un minimum de **100\$/kWh** en 2021. Un renversement de tendance est observé pour 2022 avec une hausse des prix de **2%**, notamment en raison de l'augmentation massive des prix de l'énergie et des matières premières.



Prix moyens historiques et projetés par kWh pour les packs et les cellules (BloombergNEF, 2022b). Graphique INFRAS.

Projection jusqu'en 2030

D'ici 2030, la demande de batteries devrait connaître une forte croissance, allant jusqu'à un **facteur 10**. Selon les scénarios, il faudra multiplier par 6 à 10 fois la production actuelle pour répondre à cette demande accrue.



Scénarios de développement jusqu'en 2030 : STEPS se base sur les mesures et initiatives actuellement mises en œuvre. Le scénario APS suppose que les engagements climatiques des gouvernements du monde entier seront mis en œuvre à temps (AIE, 2022). Note: Chine, Europe, États-Unis, Autres

Développements probables

- Passage à des chimies de cathodes moins coûteuses
- Réduction de la teneur en cobalt au profit du nickel
- Forte augmentation de la part des batteries LFP (jusqu'à 35-60%)

Perspectives concernant les prix : Malgré les fluctuations temporaires des prix des matières premières, la tendance à la baisse des prix des batteries devrait se poursuivre à long terme.

3. Ecobilan des batteries

Ecobilan de la mobilité électrique et rôle des batteries

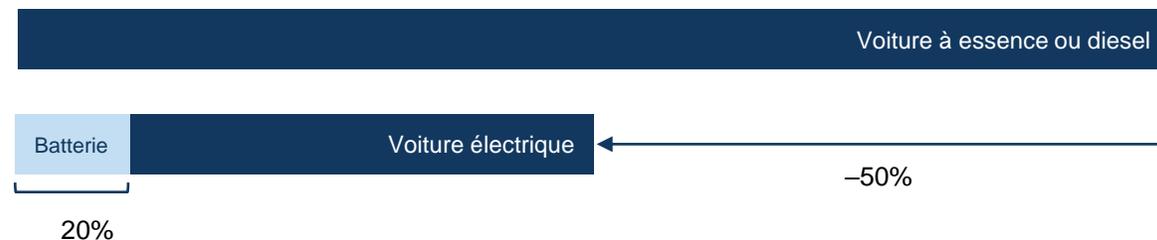
La **production** de véhicules électriques a un **impact environnemental² 25 à 50% plus élevé** que la production de véhicules conventionnels. Bien qu'ils n'aient pas besoin de catalyseurs au rhodium et au palladium, qui comptent parmi les matériaux les plus polluants, les véhicules électriques nécessitent **plus de cuivre et d'électronique (de puissance)** que les véhicules à combustion interne. C'est principalement la production de la batterie qui génère l'impact environnemental supplémentaire des véhicules électriques.

A **l'usage**, les véhicules électriques ne génèrent pas d'émissions directes, à l'exception de l'abrasion des pneus et des freins. Ils sont environ **quatre fois plus efficaces** sur le plan énergétique que des véhicules à combustion interne équivalents. En plus d'une consommation d'énergie plus faible, la production d'électricité génère moins d'impacts environnementaux que la production de carburants fossiles. C'est également le cas lorsque l'électricité utilisée n'est pas renouvelable. En fin de vie, le recyclage permet de récupérer non seulement les matériaux contenus dans le véhicule, mais aussi et surtout de la batterie.

Sur **l'ensemble de sa durée de vie**, une voiture électrique pollue plus lors de sa production qu'une voiture à combustion, mais elle génère moins de dommages environnementaux à chaque kilomètre parcouru, et compense l'impact initial à partir d'une certaine distance parcourue : environ **25'000 km** pour les petites voitures, **30'000 km** pour les voitures de taille moyenne et **45'000 km** pour les voitures de luxe.

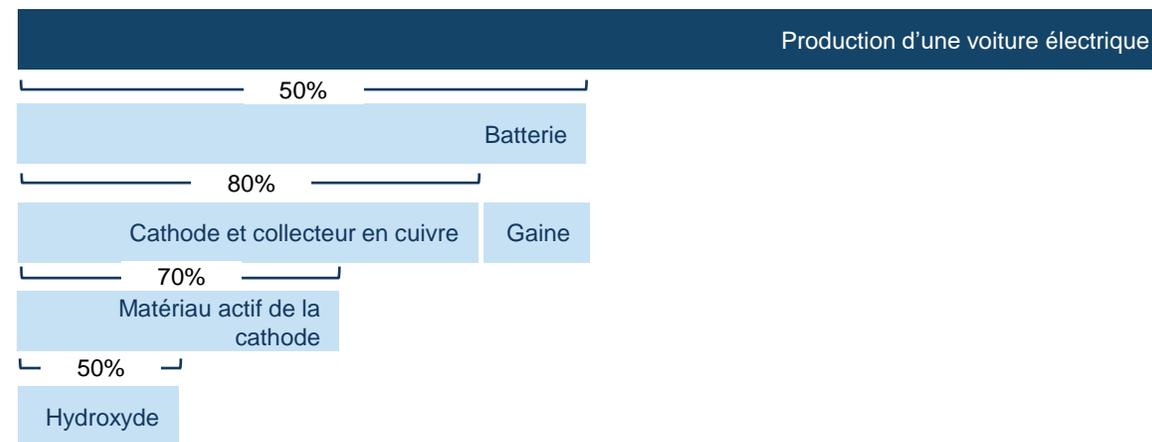
²Dépend des impacts environnementaux considérés. Il s'agit notamment des émissions de gaz à effet de serre, de la consommation d'énergie primaire, de la consommation d'eau, de l'utilisation du territoire, de la toxicité humaine, de la consommation de matières minérales, des particules fines et du smog estival.

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



Représentation schématique des émissions de gaz à effet de serre d'une voiture électrique de classe moyenne ayant une autonomie d'environ 400 km. Dans cet exemple, la fabrication de la batterie est responsable de près de 20% des émissions. Graphique INFRAS.

Où se situe l'impact environnemental dans la production de batteries ?

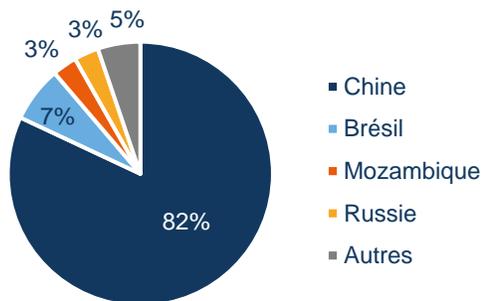


Représentation schématique de l'impact environnemental de la production de batteries. Graphique INFRAS.

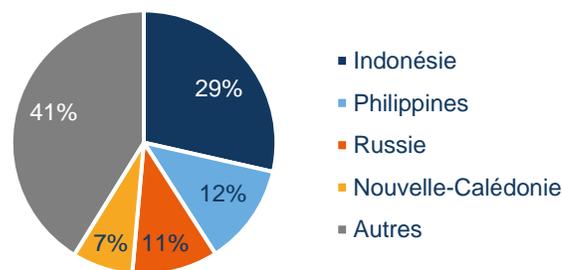
4. Extraction des matières premières

Exportateurs principaux de matières premières utilisés dans les batteries

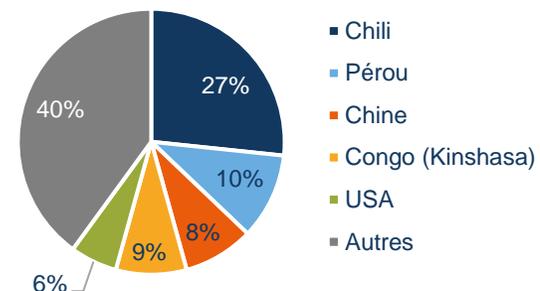
Graphite (naturel) [45 kg]



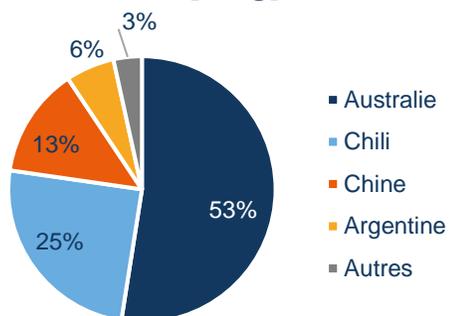
Nickel [39 kg]



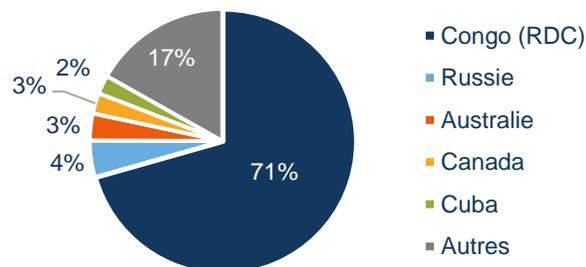
Cuivre [20 kg]



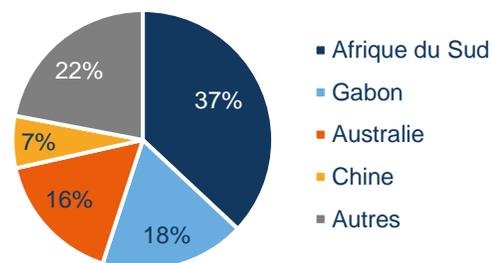
Lithium [5 kg]



Cobalt [5 kg]



Manganèse [5 kg]



Disponibilité future

- Les matières premières telles que le cobalt, le lithium, le nickel, le cuivre, le graphite et le manganèse sont considérées comme disponibles en quantité suffisante pour permettre une électrification future du parc de véhicules.
- La situation concernant le cobalt va très probablement s'améliorer en raison de la tendance à utiliser des batteries à faible teneur en cobalt et à haute teneur en nickel.
- La disponibilité du lithium ne devrait pas être critique, tandis que des incertitudes subsistent concernant le nickel.
- Pour le lithium, le cuivre, le cobalt et le nickel, les procédés de recyclage à l'échelle industrielle deviendront plus déterminants à l'avenir.

Les principaux pays exportateurs de matières premières utilisées dans la production de batteries et leur part respective dans la production mondiale. Les métaux sont listés par ordre décroissant de leur quantité dans une batterie de type NMC811. L'aluminium et l'acier ne sont pas représentés. Graphique INFRAS.

4. Extraction des matières premières

Impacts environnementaux et sociaux

Matériau ³	Impact environnementaux et sociaux
Cobalt	<ul style="list-style-type: none">– Manque de remise en état des sites d'extraction– Consommation d'eau douce et contamination des eaux– Émissions de poussières et de dioxyde de soufre– La majorité de l'extraction est industrielle. Une partie de l'extraction artisanale du cobalt est liée au risque d'exploitation des enfants.
Lithium	<ul style="list-style-type: none">– Abaissement des nappes phréatiques et pénuries locales d'eau lors d'extraction à partir de saumure– Contamination du sol et de l'eau potable– Les deux tiers du lithium sont toutefois extraits de roches solides en Australie, avec un faible impact environnemental et social.
Nickel	<ul style="list-style-type: none">– Forte occupation des sols– Grande consommation d'eau souterraine et contamination par l'intrusion d'eau salée– Contamination des eaux par des métaux lourds– Émissions de poussières contenant des métaux lourds et de dioxyde de soufre
Cuivre	<ul style="list-style-type: none">– Consommation d'eau élevée– Émissions de métaux lourds, de poussières et de SOx
Graphite	<ul style="list-style-type: none">– Consommation d'énergie élevée
Manganèse	<ul style="list-style-type: none">– Consommation d'eau élevée, contamination de l'eau, de l'air et du sol.– Problèmes de santé au sein des communautés locales, tels que les maladies pulmonaires.

Solutions envisagées

Différentes mesures sont prises pour réduire l'impact environnemental et social futur de l'extraction des matières premières dans le cadre de la production de batteries :

- Développement technologique de l'extraction des matières premières
- Substitution des matières premières critiques
- Réglementation publique et devoir de diligence
- Promotion du recyclage et transparence des chaînes d'approvisionnement

Labels et initiatives existants

- Global Battery Alliance (GBA) : chaîne de valeur durable des batteries d'ici 2030.
- Responsible Minerals Initiative (RMI) : production et approvisionnement responsables en minéraux. Tous les producteurs de batteries en sont membres, à l'exception de BYD et CATL.
- Responsible Mining Assurance (IRMA) : Initiative pour plus de transparence et de meilleures conditions de travail, et moins d'impacts sociaux et environnementaux dans le secteur minier.
- Responsible Cobalt Initiative (RCI) : Promotion de la coopération avec la République démocratique du Congo et la société civile.

Focus sur l'Europe et perspectives

La Commission européenne a approuvé en 2021 le projet «European Battery Innovation» visant à promouvoir la recherche et l'innovation dans la chaîne de valeur des batteries, avec un financement de 2,9 milliards d'euros.

La **nouvelle ordonnance de l'UE sur les batteries**, avec l'introduction du passeport batterie muni d'un code QR, ainsi que le nouveau **rapport de durabilité** pour les entreprises et la **loi prévue sur la chaîne d'approvisionnement** devraient améliorer considérablement la transparence future tout au long de la chaîne d'approvisionnement des batteries.

5. Production des cellules de batteries

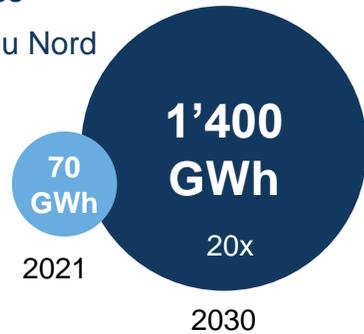
Situation actuelle

Les cinq premiers fabricants mondiaux de cellules de batteries lithium-ion sont **CATL**, **BYD**, **Panasonic**, **LG** et **Samsung**.

Répartition globale de la production de cellules de batteries:

- 80% entreprises asiatiques
- 10% entreprises européennes
- 6% entreprises d'Amérique du Nord

Capacité de production en Europe



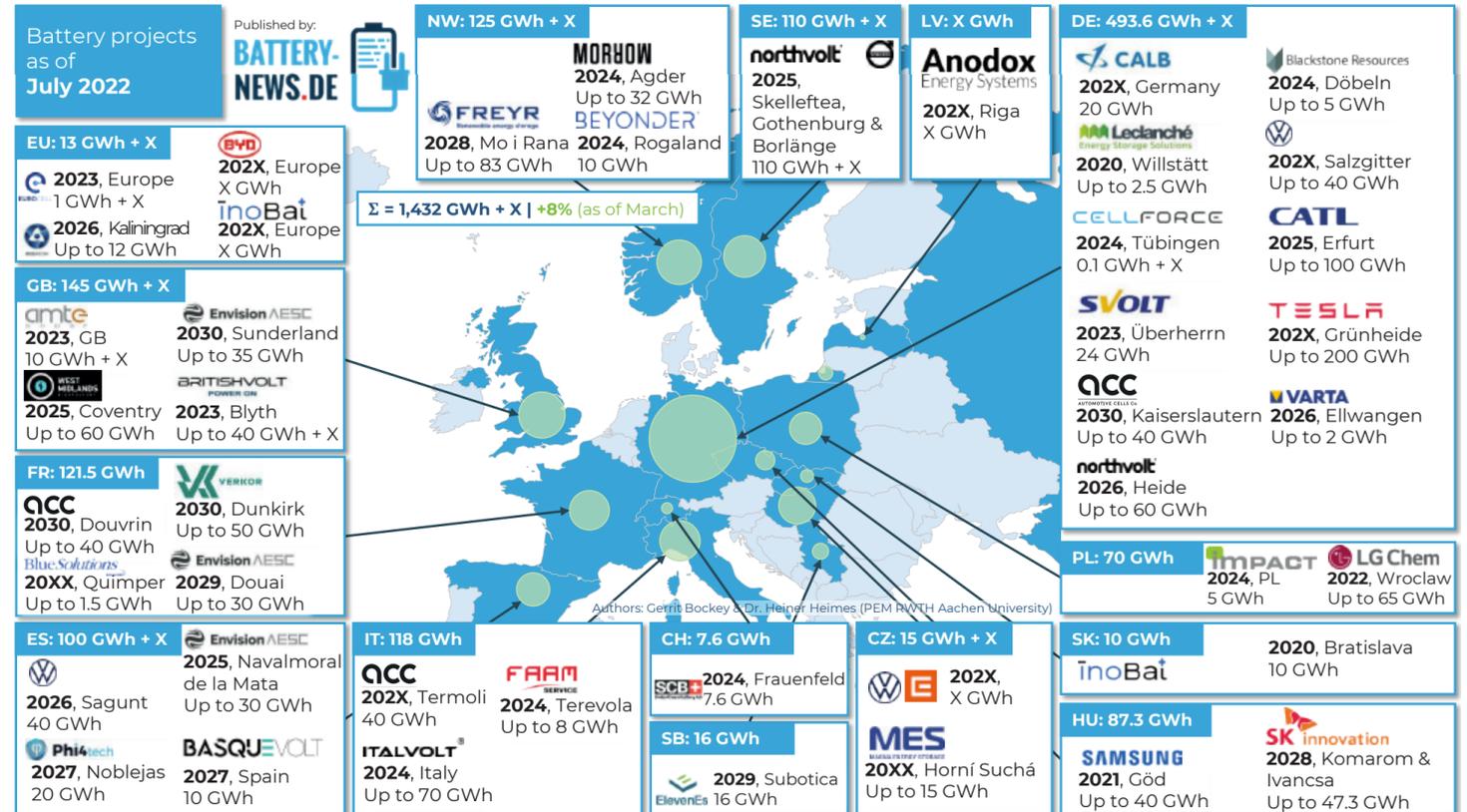
Goulets d'étranglement dans la capacité de production

Pour réduire la vulnérabilité de l'industrie à l'approvisionnement, les entreprises adoptent différentes stratégies :

- Diversification des fournisseurs
- Coopérations industrielles au long de la chaîne de valeur
- Privilégier les coopérations de recherche, joint-ventures et la fabrication en interne
- Contrats directs avec les fournisseurs de matériaux

Développement futur probable

Tous les fabricants prévoient d'augmenter considérablement leur production. L'Allemagne deviendra le haut-lieu des batteries avec **500 GWh** de capacité de production annuelle, suivi par le Royaume-Uni et la Norvège.



Aperçu de la production existante et planifiée de cellules de batteries en Europe (juillet 2022) (RWTH Aachen, 2022a)

6. Utilisation de la batterie

Dimensionnement

En Suisse, une voiture de tourisme parcourt en moyenne moins de **25 km** par jour. En Europe, 80% des véhicules roulent moins de 100 km par jour.

Mais les voitures électriques les plus vendues en Suisse ont une autonomie de **350 à 600 km**.

La valeur moyenne de la capacité des batteries de tous les véhicules électriques proposés en Suisse est de **71 kWh** et 77% de tous les modèles ont une capacité > 56 kWh.

Utilisation	Taille de batterie recommandée
Distance pendulaire (< 40km par jour)	30 kWh (120-150 km en ville et agglomération)
Longs trajets occasionnels (jusqu'à 400 km par jour)	50 kWh (200 km sur autoroute)
Longs trajets réguliers (> 400 km par jour)	70 kWh (300 km sur autoroute)

Autonomie

Conduite par temps froid

L'autonomie d'une batterie diminue quand la température baisse. Le chauffage doit être alimenté par la batterie. Les pneus d'hiver contribuent également à une augmentation de la consommation d'environ 4%.

La surconsommation pendant la saison froide se situe entre 10% et 30% supplémentaires par rapport à la consommation pendant les saisons chaudes. La **réduction moyenne de l'autonomie** est d'environ **30%**, avec une fourchette allant de 9% à 50%. En cas de températures élevées, la climatisation augmente la consommation d'énergie, ce qui réduit l'autonomie d'environ 20%.

Recharge par temps froid

Le froid réduit également la capacité d'absorption d'énergie de la batterie, et **réduit considérablement la vitesse de charge**. Pour une charge de 30 minutes, la capacité résiduelle de la batterie est réduite en moyenne de 22% à 36% lorsque la température est de 0 °C, par rapport à des températures chaudes de 25 °C. Toutefois, la courbe de charge et la gestion de la température varient considérablement d'un modèle à l'autre.

Mesures recommandées pour atténuer l'effet du froid

- Préchauffer l'intérieur du véhicule pendant environ 15 minutes alors qu'il est encore branché à la prise électrique.
- Éviter tout refroidissement extrême: si possible se garer dans un garage, ce qui préserve la batterie.

6. Utilisation de la batterie

Longévité

Processus de vieillissement

- Vieillissement calendaire : dégradation interne de la batterie au fil du temps, même sans utilisation de la batterie.
- Vieillissement cyclique : vieillissement dû à des charges et décharges répétées.

L'état de santé d'une batterie est indiqué par son «**State of Health**» (SOH). Celui-ci indique la capacité restante d'une batterie par rapport à sa capacité nominale⁴ indiquée par le fabricant.

Une capacité de stockage maximale inférieure à 80%, c'est-à-dire un **SOH < 80%**, est généralement considérée comme la limite de la longévité d'une batterie et est atteinte après environ 1'000 à 1'500 cycles de charge. Cela donne une autonomie approximative sur toute la durée d'utilisation de 300'000 à 450'000 km. La longévité peut toutefois varier considérablement. Il n'y a pas de consensus à ce sujet dans la littérature, car les données empiriques font défaut. Les valeurs publiées varient entre **12 et 20 ans**.

Recommandation pour prolonger la longévité de la batterie

- Utilisation à un niveau de charge compris entre environ 20% et environ 80% de la capacité nominale⁴ 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.
- Éviter les sollicitations mécaniques et thermiques excessives.

Risques d'incendie

Le risque d'incendie d'une batterie au lithium-ion est en principe accru si elle est endommagée, stockée dans des conditions inadéquates ou mal utilisée.

Causes d'incendie

- Court-circuit dû à un dégât mécanique, par ex. lors d'un accident
- problèmes de qualité lors de la fabrication
- Surchauffe, dite «emballement thermique»
- Courant trop élevé lors de la charge / décharge
- Décharge complète suivie d'une détérioration des cellules
- Dangers naturels (p. ex. inondations)

Lutte contre les incendies

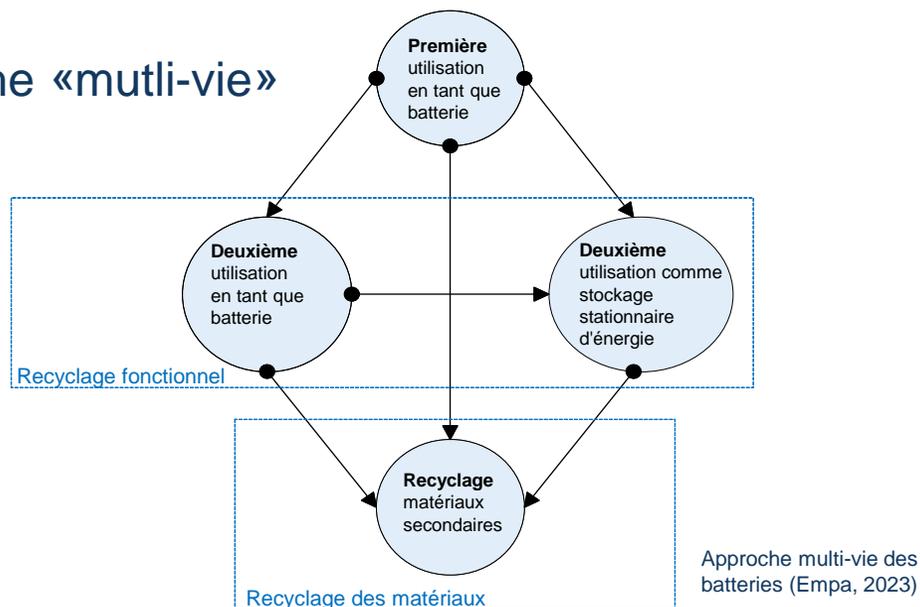
Les incendies de batteries peuvent créer des explosions et durent plus longtemps. La plupart du temps, la batterie est installée dans le plancher du véhicule et est difficilement accessible par les agents d'extinction. Une batterie en feu doit être refroidie à l'eau pendant une longue période. Cela nécessite 3'000 à 10'000 litres d'eau.

Risques d'incendie des véhicules électriques

Les données actuelles ne permettent pas d'évaluer avec précision le risque d'incendie des véhicules électriques par rapport aux véhicules à combustion interne. Les premières évaluations indiquent toutefois que les véhicules électriques **ne présentent pas un risque d'incendie significativement plus élevé**.

7. Fin de vie des batteries

Approche «mutli-vie»



Une fois les batteries usagées retirées des véhicules, elles peuvent être recyclées pour leurs matériaux ou pour leur fonction. On parle d'une **approche dite «multi-vie»** lorsque les batteries peuvent bénéficier d'une **deuxième utilisation** après la première dans la voiture électrique. Cela réduit la demande en matériaux critiques et permet de trouver des débouchés pour les batteries usagées. Cependant, les batteries vieillissent au cours des deux cycles de vie et la **perte de capacité** par rapport aux batteries neuves est de plus en plus drastique.

Les progrès rapides permettent en outre de produire des batteries plus performantes pour une même consommation de matériaux. Il peut donc être plus intéressant, d'un point de vue environnemental, de récupérer les matières premières par un **recyclage efficace** pour fabriquer de nouvelles batteries, plutôt que de prolonger leur longévité le plus longtemps possible.

Recyclage en Suisse et à l'étranger

L'ordonnance suisse sur la réduction des risques liés aux produits chimiques prévoit une obligation de reprise et de restitution des batteries. Ainsi, en Suisse, l'élimination des batteries est assurée dans les règles de l'art.

Exportation des voitures électriques

- Au total, en Suisse, environ **80%** des véhicules en fin de vie sont exportés à l'étranger pour y être réutilisés ou recyclés.
- Le recyclage de la batterie de ces véhicules ne peut plus être contrôlé par des institutions suisses, mais se fait selon les lois et les règles en vigueur localement.
- Le recyclage de la batterie selon les normes suisses ne peut donc être garanti pour les véhicules exportés. La plupart des véhicules sont toutefois exportés vers des États membres de l'UE où les exigences en matière de recyclage des batteries sont similaires.

Base légale dans l'UE

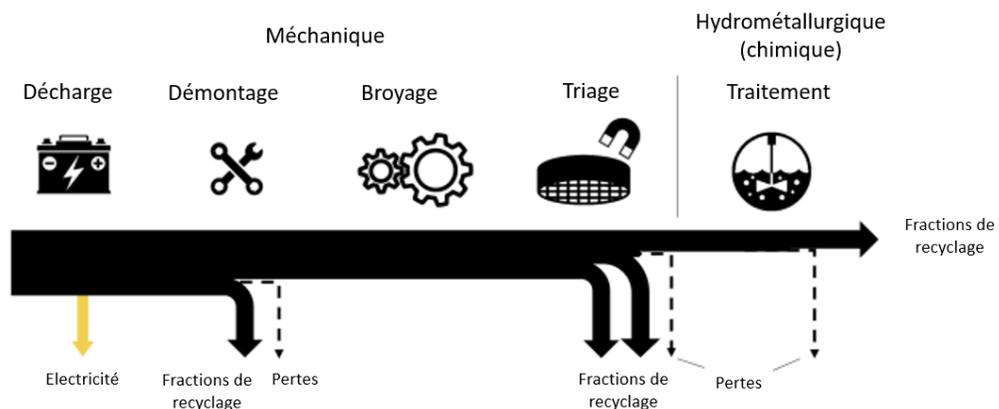
Dans l'Union européenne, des règles similaires à la Suisse s'appliquent à l'élimination et au recyclage des batteries. La directive 2006/66/CE s'applique dans tous les États membres. Une obligation de reprise s'applique et les États membres doivent veiller à ce que les fabricants mettent en place un système de retour gratuit des batteries pour l'utilisateur final. En revanche, il n'existe pas d'obligation de restitution.

7. Fin de vie des batteries

Projections concernant le recyclage

Après environ 20 ans de durée de vie totale, y compris une seconde utilisation possible mais non nécessaire, les batteries ont tellement vieilli qu'elles doivent être recyclées matériellement. La quantité de batteries lithium-ion usagées va augmenter **exponentiellement** dans les décennies à venir, en raison du boom actuel de la mobilité électrique. Le recyclage des batteries deviendra de plus en plus important, car il permet de récupérer des matériaux indispensables tels que le lithium, le graphite, le cobalt ou le nickel.

Le processus de recyclage implique souvent une combinaison de **traitement mécanique, thermique et chimique**. En Suisse, aucun procédé de recyclage univoque ne s'est encore imposé dans la pratique. Toutefois, il est fréquent que la batterie soit traitée mécaniquement et que la masse noire qui en résulte soit traitée par hydrométallurgie.



Représentation schématique d'un procédé de recyclage mécanique et hydrométallurgique. Graphique Empa.

Aspects économiques du recyclage

En Suisse, le recyclage n'est **pas rentable** à l'heure actuelle. Les exigences élevées en matière de sécurité, de surveillance et les réglementations environnementales et sanitaires strictes entraînent des coûts élevés. Ceux-ci dépassent les revenus, dictés par les coûts des matières premières primaires.

Les fabricants et importateurs de véhicules électriques exonérés de la taxe anticipée de recyclage doivent mettre en œuvre, sous leur propre responsabilité, un système d'élimination respectueux de l'environnement (collecte, transport et valorisation des matériaux) et en assurer le financement.

Perspectives

Le coût du recyclage devrait diminuer avec l'augmentation des quantités traitées grâce aux économies d'échelle. Le développement des technologies de recyclage devrait permettre de récupérer une part croissante de matériaux de batterie de meilleure qualité et d'augmenter ainsi les revenus du recyclage.

Taux de recyclage prévu par le nouveau règlement de l'UE

- Objectifs pour les batteries lithium-ion : **65%** d'ici 2025, **70%** d'ici 2030
- Taux de récupération de **90%** pour le cobalt, le cuivre et le nickel et de **50%** pour le lithium d'ici fin 2027
- Taux de recyclage de **95%** pour le cobalt, le cuivre et le nickel et de **80%** pour le lithium d'ici fin 2030

Le recyclage du graphite des batteries lithium-ion n'est pas réalisé à l'heure actuelle pour des raisons économiques, mais fait déjà l'objet de recherches. On s'attend à un taux de recyclage du manganèse d'environ 30% d'ici 2025 (70% d'ici 2030).