

Les défis de la croissance du marché des véhicules électriques

Contexte

Les notes prospectives (Foresight Briefs) publiées par le Programme des Nations Unies pour l'environnement sont destinées à mettre en lumière un point chaud des changements environnementaux, présenter un sujet scientifique émergent ou étudier une question environnementale actuelle. Elles donnent au public la possibilité de découvrir ce qui se passe dans son environnement en mutation, de comprendre les conséquences de ses choix quotidiens et de réfléchir aux orientations futures des politiques.

Résumé

Les véhicules électriques peuvent jouer un rôle important dans la décarbonation du secteur des transports. Le recours à cette technologie permet de réduire les émissions de CO₂, de NO_x, de SO₂ et de particules fines, ce qui contribue à l'atténuation des changements climatiques et à l'amélioration de la qualité de l'air dans les villes. Toutefois, pour que ces véhicules deviennent plus écologiques, il convient de redoubler d'efforts pour alléger le fardeau social et environnemental que représente l'extraction des terres rares nécessaires à leur production, notamment celles des batteries et des moteurs. Il est également nécessaire d'augmenter la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité et d'encourager l'adoption de directives claires sur la réutilisation et le recyclage des batteries.

Introduction

En raison de l'augmentation des émissions de CO₂ et de la dégradation de la qualité de l'air dans les villes, le recours aux véhicules électriques est considéré comme doublement bénéfique. Il est indispensable de trouver des alternatives aux véhicules thermiques, et les véhicules électriques semblent prometteurs, car ils ne consomment pas de carburant et n'émettent pas de CO₂, de NO_x ni d'autres particules ou gaz nocifs. La priorité dans le domaine de l'aménagement du territoire et de la planification

Mix mondial de production d'électricité

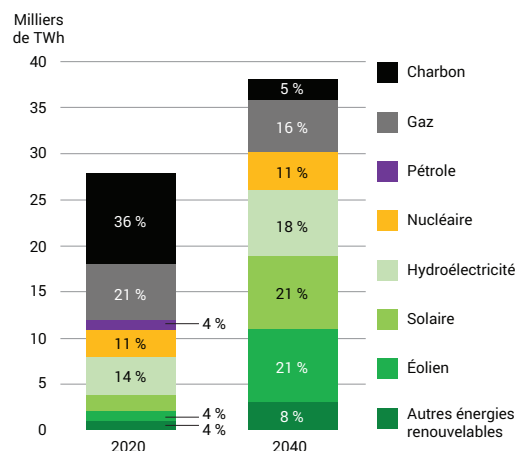


Figure 1 : Mix mondial de production d'électricité en 2020 et 2040. Les énergies renouvelables sont représentées en vert. En 2040, 18 000 terawattheures (TWh) supplémentaires seront produits à partir de sources renouvelables, ce qui fera passer leur part de 29 % à 68 %. La consommation d'électricité dans le domaine des transports augmentera de 3 800 TWh et représentera 10 % du total¹.

urbaine doit rester le développement et l'utilisation des transports publics et de la mobilité douce ; cependant, les besoins et la demande en matière de transport individuel subsisteront, et les véhicules électriques grand public peuvent jouer un rôle important à cet égard.

Pour que ces véhicules soient l'alternative écologique optimale dont nous avons besoin, l'électricité utilisée pour recharger leurs batteries doit provenir d'une source d'énergie renouvelable. En 2020, les combustibles fossiles représentent 61 % du mix électrique mondial (charbon : 36 %, gaz : 21 %, pétrole : 4 %, voir figure 1). L'augmentation rapide de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables, que l'on observe ces dernières années, devrait se poursuivre au cours des deux prochaines décennies. En 2040, 68 % de la production totale d'électricité proviendra de

sources renouvelables. Les transports représenteront 10 % de la consommation d'électricité¹.

Un examen plus approfondi des différentes phases du cycle de vie des véhicules électriques fait apparaître deux « défis » qui doivent être pris en compte si l'on veut que ces véhicules constituent une alternative encore plus écologique :

- 1) Les procédés de production des batteries et des moteurs font appel à des terres rares et sont très énergivores ;
- 2) Il est nécessaire de mettre en œuvre des stratégies pour la réutilisation, le recyclage et l'élimination des batteries en fin de vie.

Nous allons maintenant passer en revue les risques et les défis potentiels, ainsi que les solutions en matière de production et d'utilisation des véhicules électriques et de leurs batteries.



Voiture électrique à la station de recharge
© Smile Fight / Shutterstock.com

Quelles sont les principales conclusions ?

Empreinte carbone

L’empreinte carbone des véhicules électriques et celle des véhicules thermiques ont fait l’objet de nombreuses études : si la comparaison est nettement en faveur des véhicules électriques, ce résultat dépend principalement de la manière dont est générée l’énergie consommée pour les produire, en particulier les batteries, et de la source d’énergie utilisée pour recharger ces dernières. En Allemagne, où le charbon et les énergies renouvelables représentent respectivement 40 % et 30 % du mix électrique, une voiture électrique de taille moyenne doit parcourir entre 125 000 et 219 000 km pour que ses émissions de CO₂ soient équivalentes à celle d’une voiture diesel, et entre 60 000 et 127 000 km dans le cas d’une voiture

à essence^{6,7}. La situation est comparable aux États-Unis, mais différente en France, alimentée par des centrales nucléaires, et en Norvège, riche en énergies renouvelables, où le point d’équilibre peut être atteint dès 40 000 km pour un véhicule électrique de taille moyenne dont la durée de vie est estimée à 150 000 km. Les émissions de CO₂ des véhicules électriques sur l’ensemble de leur cycle de vie s’élèvent dans ces pays à environ 70-80 g de CO₂ par km, contre 190 g en Allemagne⁸. Un véhicule thermique européen de taille moyenne émet plus de 250 g de CO₂ par km, contre 130 g, soit environ la moitié, pour son homologue électrique (voir figure 4). Des recherches récentes portant sur la totalité du cycle de vie des voitures ont montré qu’au vu de l’intensité carbone actuelle de la production d’électricité, les émissions de CO₂ des véhicules électriques sont déjà inférieures à celles des véhicules thermiques dans la plupart des pays du monde⁹.

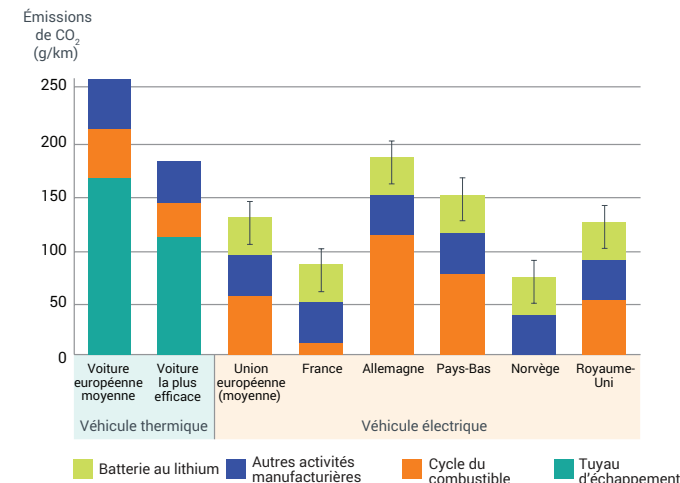


Figure 4 : Émissions sur la totalité du cycle de vie (150 000 km) des véhicules électriques et thermiques en Europe en 2015.⁷

La part des énergies renouvelables dans la production d’électricité va continuer à augmenter, ce qui renforcera progressivement l’avantage des véhicules électriques sur les véhicules thermiques. Il est possible de pousser plus loin cet avantage en faisant appel aux énergies renouvelables et à des matériaux recyclés pour produire les véhicules et les batteries. Certains constructeurs automobiles se sont déjà engagés dans cette voie.

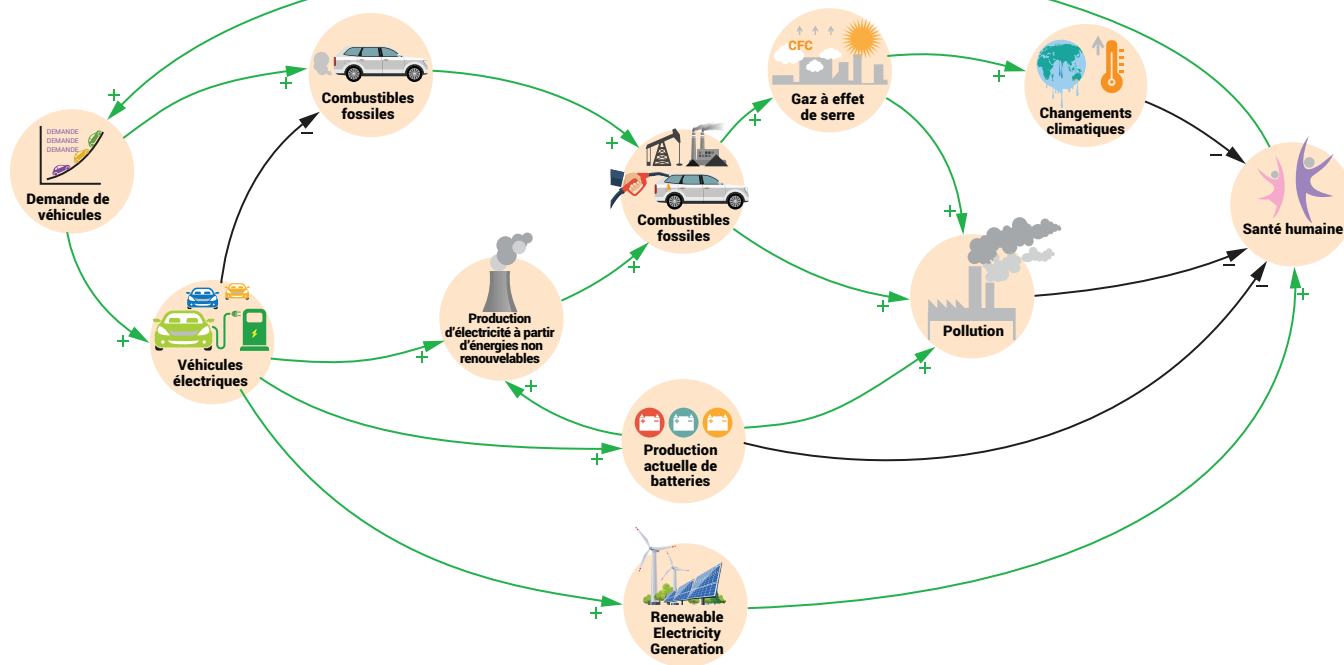
Empreinte écologique

Après l’empreinte climatique des véhicules, nous allons nous pencher sur les différents aspects de leur empreinte écologique, en gardant à l’esprit l’importance des impacts associés aux véhicules thermiques, notamment la pollution de l’environnement et la quantité d’énergie nécessaire à l’extraction du pétrole, à son transport et à son raffinage.

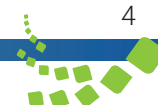
- Composants et minéraux

On parle beaucoup du lithium, mais d’autres éléments des batteries, tels que le cobalt, le nickel et le graphite, doivent également être pris en compte. Les batteries des voitures petites et moyennes pèsent environ 200 à 300 kg et ont une capacité de 30 à 45 kWh. Selon leur type, elles peuvent renfermer de 5 à 80 kg de lithium, de 8 à 20 kg de cobalt, et jusqu’à 50 kg de graphite et 100 kg de nickel^{3,10,11}.

Approche systémique



Ce diagramme illustre les boucles causales dominantes de la demande de véhicules individuels et indique des pistes de solutions. La demande conditionne la production et l’offre de véhicules. Les véhicules thermiques utilisent des combustibles fossiles qui polluent et émettent des gaz à effet de serre, lesquels aggravent les changements climatiques, qui ont des effets néfastes sur la santé humaine. Les véhicules électriques, s’ils sont construits et exploités en ayant recours à des énergies renouvelables et à des composants recyclables (batteries), permettront d’améliorer la santé humaine. Cette approche renforce de manière durable la demande de véhicules. (+) boucle de rétroaction positive (renforcement) ; (-) boucle de rétroaction négative (équilibre).



La plupart des véhicules électriques utilisent des aimants permanents en néodyme-fer-bore, qui peuvent contenir jusqu'à 1 kg de néodyme¹² et 100 g de dysprosium¹³, ainsi que du praséodyme. En 2015, la moitié de la demande mondiale de terres rares concernait ces métaux.

- Impacts sur l'environnement

En l'absence de politiques et de mesures claires, la production et l'utilisation des véhicules électriques sont susceptibles d'entraîner une augmentation considérable des risques d'effets toxiques sur les êtres humains et les organismes aquatiques d'eau douce, d'eutrophisation des milieux aquatiques d'eau douce et d'épuisement des ressources en métaux. Ces impacts sont en grande partie dus à la chaîne d'approvisionnement. Les analyses du cycle de vie montrent que tous les impacts étudiés sont principalement imputables à la production des batteries^{14 à 17}. Le type de recyclage mis en place joue également un rôle important. Il est nécessaire d'adopter de nouvelles politiques visant à accélérer la mise au point de batteries plus écologiques.

S'agissant des principaux minéraux utilisés pour produire les batteries des véhicules électriques, la consommation mondiale

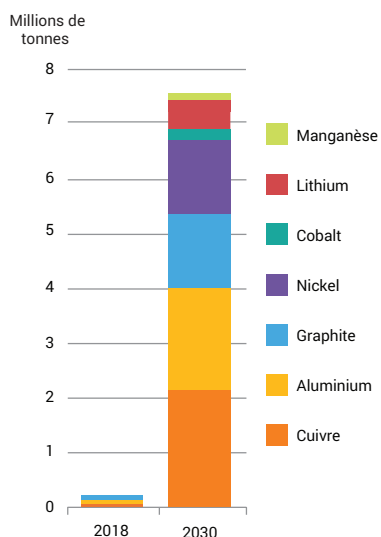


Figure 5 : Demande de métaux et de matériaux pour les batteries lithium-ion des véhicules de tourisme électriques¹⁸

passera d'environ 200 000 tonnes en 2018 à 7 100 000 tonnes en 2030¹⁸ (figure 5).

Les impacts environnementaux de l'extraction minière intensive sont indéniables : drainage minier acide, contamination de l'eau, ruptures de barrages et inondations, quantités importantes de déchets, pollution atmosphérique, érosion et contamination des sols, réduction des disponibilités en eau, destruction des écosystèmes, radioactivité et rejets de résidus miniers dans les cours d'eau ou dans la mer¹⁹. Ces aspects devraient être mieux réglementés. De nombreux rapports décrivent les effets néfastes sur la population locale et l'environnement de l'extraction des minéraux destinés aux véhicules électriques, comme le lithium^{20 à 22}, le nickel^{23,24}, le cobalt^{25,26} ou le graphite²⁷.

Il faut par exemple 250 à 750 tonnes de minerais riches en lithium pour produire une tonne de lithium²⁸. Un rapport indique que « 9 600 à 12 000 m³ de gaz résiduaires - contenant des poussières concentrées, de l'acide fluorhydrique, du dioxyde de soufre et de l'acide sulfurique - sont rejetés pour chaque tonne de métaux rares produite. Environ 75 m³ d'eaux usées acides et une tonne de déchets radioactifs sont également générés »²⁹. La présence de ces déchets résulte de la présence fréquente d'isotopes radioactifs du thorium et de l'uranium dans les minerais de terres rares.

Certains métaux proviennent de petits puits de mine dans lesquels les mesures de protection de l'environnement sont quasi inexistantes et dont les travailleurs, qui sont parfois des enfants, ne disposent pas d'équipements de protection individuelle adaptés²⁶. Il est nécessaire d'élaborer de nouvelles politiques et de les faire respecter afin de protéger la santé des mineurs et d'interdire le travail des enfants.

L'extraction minière ne représente qu'une petite partie de la chaîne d'approvisionnement des terres rares. Le raffinage des minerais et leur transformation en produits commercialisables en sont les principaux maillons, et sont responsables de la majorité des impacts environnementaux et sociaux associés.

- Eau

Outre les conséquences habituelles de l'exploitation minière – résidus, poussières, flux de déchets toxiques et autres – une préoccupation majeure dans les pays producteurs de lithium est la grande quantité d'eau nécessaire à son traitement¹⁰. Selon

des données provenant de Bolivie et du Chili, il faut 5 à 50 m³ d'eau douce pour obtenir une tonne de carbonate de lithium de « qualité batterie »³⁰.

D'autres sources font état de quantités bien plus élevées, pouvant atteindre 2 000 mètres cubes²². Cette extraction a un impact important sur les agriculteurs locaux²¹. Dans les zones arides (par exemple, dans le désert d'Atacama), la concurrence pour l'accès à l'eau entraîne de fortes tensions entre les mines et les exploitants agricoles. Il est nécessaire de mieux prendre en compte la question de l'utilisation de l'eau et de mettre en place de nouvelles techniques d'extraction.

• Électricité

La bonne nouvelle, c'est que les effets d'une augmentation du parc de véhicules électriques sur la consommation d'électricité sont plutôt faibles pendant la phase d'utilisation de ces véhicules. En Allemagne, par exemple, la mise en circulation de 10 millions de véhicules électriques se traduirait par une augmentation de la consommation d'électricité de 5 %, soit 30 Twh³¹. Si la totalité de la distance parcourue par l'ensemble des voitures particulières de ce pays – environ 630 milliards de km en 2015 – était effectuée avec des véhicules électriques, la consommation d'électricité correspondante représenterait « seulement » 20 % à peu près de la consommation actuelle.

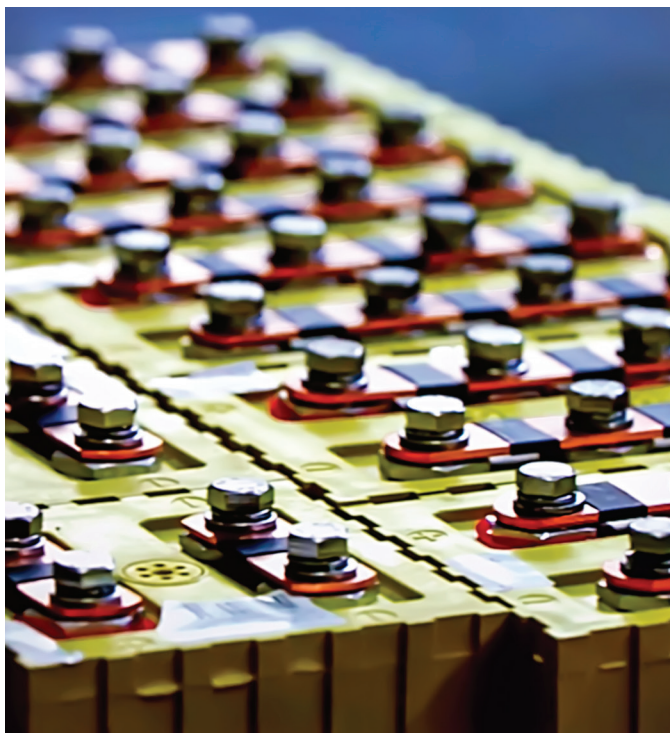


© Petair / Shutterstock.com

Quelles solutions ont été mises en place ?

Procédés de production des véhicules électriques

En raison d'une prise de conscience accrue des effets incontrôlés sur l'environnement induits par les petites exploitations minières illégales, certains pays en ont fermé un grand nombre ces derniers temps^{23,32}. Les pressions croissantes exercées par les entreprises et les accords internationaux conduisent à une amélioration de la gestion des mines sur le plan environnemental et social. Le ratio intrants/extrants (énergie et matériaux) diminue de manière inversement proportionnelle à l'augmentation (rapide) de l'efficacité des batteries, ce qui entraîne une diminution constante de l'empreinte écologique. Un grand nombre de technologies de batteries nécessitant peu ou pas de cobalt et faisant appel à des substances moins nocives sont en cours de développement dans le monde entier, ce qui permettra de réduire progressivement l'empreinte environnementale des véhicules électriques.



Production de batteries au lithium pour des voitures électriques écologiques
© Fishman64 / Shutterstock

Recyclage des batteries

Jusqu'en 2011, seule une infime partie des batteries à base de terres rares (moins de 1 %) et des batteries lithium-ion (moins de 5 %) utilisées en Europe étaient recyclées^{33 à 36}. La plupart finissaient dans des décharges³⁷, ce qui entraînait une perte considérable de ressources. Même si les batteries des véhicules électriques n'arriveront en fin de vie que dans plusieurs années, leur recyclage doit être organisé et réglementé suffisamment tôt.

Il y a plusieurs raisons à ce faible taux de recyclage : la production des batteries fait appel à de nombreux procédés chimiques, ce qui rend difficile la mise au point d'un procédé de recyclage normalisé ; le coût du recyclage est important ; la valeur des métaux contenus dans les batteries est négligeable ; le taux de collecte des batteries au lithium usagées est faible ; peu de mesures incitatives ont été mises en place^{38,39}. Le coût du recyclage est tel que le lithium recyclé est actuellement cinq fois plus cher que le lithium neuf³⁹. Il est nécessaire d'adopter des mesures correctives afin que le recyclage devienne la norme. Certaines entreprises recyclent les batteries lithium-ion, mais cela ne concerne que le cobalt et le nickel, en raison de leur valeur élevée¹⁰.

Actuellement, la méthode la plus répandue consiste à chauffer les batteries à haute température (>600 °C) ; cette opération est très énergivore (intensité carbone très élevée) et ne permet de récupérer qu'une quantité limitée de métaux dont la qualité est parfois médiocre^{40 à 42}. Certaines entreprises ont recours à la destruction mécanique, ce qui permet d'améliorer considérablement le taux de récupération et pourrait faciliter le passage à une économie plus circulaire. Avant d'être recyclées, les batteries peuvent également être réutilisées comme batteries tampons ou comme dispositifs de stockage d'énergie ou d'alimentation de secours des antennes relais.

Les réglementations européennes imposant aux fabricants de batteries de prendre en charge les coûts de collecte, de traitement et de recyclage de leurs produits sont en place, mais ne prévoient que des normes minimales. Onze millions de tonnes de batteries lithium-ion usagées devront être recyclées d'ici à 2030³⁵. Les constructeurs automobiles et les recycleurs devront collaborer pour rendre ce processus aussi rentable et efficace que possible.

Qu'est-ce que cela signifie en matière de politiques ?

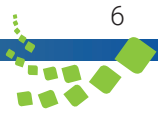


© zhang sheng / Shutterstock.com

Modifier nos modes de mobilité

La réduction des impacts des moyens de transports individuels commence par la diminution de la demande. Il est essentiel d'examiner de manière plus globale la question du transport de personnes, de l'aménagement du territoire et de la planification urbaine afin de concevoir un système de transports qui mette en œuvre un réseau efficace de transports publics et de mobilité douce. Nous avons besoin de nouveaux concepts de mobilité, qui peuvent être organiques (vélo, marche) ou électrifiés (métro, trains, bus, vélos, trottinettes et motos électriques) au lieu de reposer sur la voiture individuelle.

Les pouvoirs publics devraient s'employer à réduire le recours à la voiture et mettre en place des mesures incitatives pour promouvoir l'utilisation des transports publics et la mobilité douce. Parmi les exemples de réussite, on peut citer certaines villes des Pays-Bas ou Tallin en Estonie, où les transports publics sont gratuits. À Copenhague, 62 % des citoyens se rendent au travail, à l'école ou à l'université en vélo⁴³, et en Suisse, l'utilisation du train est beaucoup plus répandue que dans les autres pays.



Passer rapidement aux énergies et matériaux renouvelables dans les phases de production et d'utilisation des voitures

Le remplacement des véhicules thermiques par des véhicules électriques doit s'accompagner d'une transition rapide vers la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables. L'industrie automobile devrait également faire appel à ces énergies.

Promouvoir une exploitation minière responsable

Les entreprises devraient exercer une diligence raisonnable concernant la production de tous les métaux utilisés pendant la phase de fabrication. De tels processus ont déjà été mis en place aux États-Unis pour certains produits miniers provenant de zones de conflit tels que l'étain, le tungstène et l'or. Dans l'UE, des réglementations comparables existent, mais elles n'incluent pas certains minéraux comme le cobalt.

Étant donné qu'une part importante des importations de produits miniers de l'UE provient probablement de sites mal gérés susceptibles d'avoir des effets néfastes sur l'environnement, il est nécessaire que les politiques internationales, européennes et nationales s'attaquent à ce problème. Il faut notamment renforcer les capacités de gouvernance des pays, aider les entreprises minières à mettre en œuvre des pratiques de gestion environnementale et améliorer le niveau technique des vieux sites miniers. De telles mesures de protection seraient bénéfiques pour l'environnement et pour les populations les plus gravement touchées par les activités minières.

Les entreprises minières devraient adhérer à des normes internationales telles que celles de l'Initiative on Responsible Mining Assurance, une organisation indépendante dont l'objectif est d'améliorer le bien-être social et économique, de renforcer la protection de l'environnement et de mettre en place une gouvernance équitable.

Réutiliser les batteries

Des essais de réutilisation des batteries de voiture sous la forme de dispositifs de stockage d'électricité dans les bâtiments sont en cours. La baisse d'efficacité des batteries, dont l'incidence sur l'autonomie des véhicules électriques est considérable, a peu d'importance quand on regroupe de nombreuses batteries pour stocker le surplus d'électricité produit par les systèmes photovoltaïques installés sur les toits. Cependant, certains soutiennent que les batteries contenant de grandes quantités de

cobalt devraient être recyclées immédiatement pour renforcer les réserves de cobalt et éviter ainsi une intensification de l'exploitation minière⁴⁴. À terme, l'offre de batteries usagées de véhicules électriques dépassera de loin la capacité d'absorption du marché du réemploi⁴⁵.

Recycler les batteries

Le système actuel doit être rapidement transposé à grande échelle afin de gérer la grande quantité de déchets de matériaux que devrait générer l'introduction massive des véhicules électriques dans les années à venir^{46,47}. Cette transition doit s'accompagner de programmes de production, de réutilisation, de collecte et de recyclage bien conçus.

L'UE a répondu aux défis environnementaux posés par les déchets miniers au sein de l'Union en adoptant la *Directive concernant la gestion des déchets de l'industrie extractive* de 2006 et en rendant obligatoire la réalisation d'études d'impact sur l'environnement pour les projets miniers. Les problèmes environnementaux liés à l'importation des matières premières sont abordés par l'*Initiative « matières premières »*, qui promeut le « développement durable » sans formuler d'objectifs précis et sans définir de moyens d'action¹⁹. Il est urgent de poursuivre l'élaboration de la directive européenne sur les batteries, en imposant des quotas de recyclage élevés aux fabricants de batteries et aux producteurs de véhicules électriques.

Il serait logique que les fabricants recyclent eux-mêmes leurs produits dans leurs installations, car ils connaissent parfaitement la structure et la composition de leurs batteries. L'idéal serait que les sites de recyclage soient situés à proximité des usines de batteries afin que le cycle soit aussi court que possible. Tesla a déjà mis en œuvre ce concept dans sa Gigafactory 1 au Nevada³¹. Il serait en outre judicieux que les batteries soient normalisées et conçues pour être démontées afin de pouvoir facilement réutiliser les pièces et recycler les matériaux.

Promouvoir la recherche et le développement de matériaux de remplacement

La mise au point de matériaux de remplacement pour fabriquer les groupes motopropulseurs et les batteries peut constituer une bonne stratégie à long terme pour une utilisation durable des métaux critiques⁴⁸. Les efforts continus de recherche et de développement ont permis d'améliorer considérablement

l'efficacité des batteries et de réduire leurs coûts. De nouvelles technologies de batteries permettront peut-être de réduire l'empreinte de l'utilisation des terres rares.

Taxer les voitures lourdes

La réduction de l'empreinte écologique des voitures (thermiques et électriques) passe également par une diminution de leur taille et de leur poids. Le caractère écologique d'un véhicule dépend beaucoup de son poids et de la taille de sa batterie. Les voitures lourdes sont peu efficaces et posent des problèmes de sécurité routière. Leur présence dans le parc automobile influe sur la conception des protections des autres voitures en cas d'accident et favorise le développement de voitures qui sont en moyenne plus lourdes.

Les véhicules électriques ne devraient pas servir à réduire artificiellement les émissions moyennes d'un parc automobile. En effet, la législation européenne fixe un objectif progressif pour les émissions moyennes de l'ensemble des voitures particulières neuves immatriculées dans l'Union ; cet objectif est de 95 g de CO₂/km en 2020. Les véhicules électriques étant intégrés dans le calcul, les constructeurs automobiles peuvent afficher une valeur moyenne moindre pour leur parc. Cela signifie qu'à moins de choisir une marque qui ne produit pas de véhicules thermiques, un consommateur qui achète un véhicule électrique permet indirectement à un autre consommateur d'acheter un puissant tout-terrain de loisir (SUV). Il est nécessaire d'améliorer la législation, afin d'inclure non seulement un objectif d'émissions moyennes, mais aussi un objectif d'émissions maximales, qui doit également être progressif. Les autorités chargées de la réglementation devraient tenir compte du poids en taxant les voitures lourdes et en créant des incitations pour les petits modèles, tant pour les véhicules électriques que pour les véhicules traditionnels.

Conclusion

Les véhicules électriques peuvent jouer un rôle important dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre liées au transport individuel. Ils présentent également l'avantage d'être silencieux et de contribuer à protéger la qualité de l'air. La résolution des problèmes présentés dans la présente note prospective permettrait d'améliorer considérablement l'empreinte des véhicules électriques.

Les clients qui achètent des véhicules électriques sont sensibles aux questions environnementales. Acheter une nouvelle voiture, c'est choisir la technologie de propulsion - carburant ou électricité

- qui sera utilisée pendant toute la durée de vie de la voiture, c'est-à-dire pendant les 20 années à venir. Lorsque les véhicules électriques deviendront la norme, les constructeurs automobiles les plus respectueux de l'environnement bénéficieront d'un atout commercial et très probablement aussi d'une fiscalité avantageuse. Actuellement, les véhicules thermiques sont soumis à des taxes, afin de réduire les émissions ; la prochaine étape devrait être l'adoption d'une législation favorisant les véhicules électriques les plus propres.

Il est donc également dans l'intérêt du secteur des véhicules électriques de commercialiser des voitures à faible empreinte écologique.

Remerciements

Auteur Stefan Schwarzer, PNUE/GRID-Genève

Réviseurs Rob de Jong, Alexander Körner, Pascal Peduzzi, Sandor Frigyyik, Angeline Djampou, Virginia Gitari, Samuel Opiyo

Équipe Foresight Briefs du PNUE Alexandre Caldas, Sandor Frigyyik, Audrey Ringler, Erick Litswa, Pascil Muchesia

Contact

unep-foresight@un.org

Mentions légales

Les appellations employées dans la présente publication et les éléments qui y figurent n'impliquent de la part du PNUE ou des organismes de coopération aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones mentionnés, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

© Cartes, photos et illustrations telles que mentionnées.

Bibliographie

- Agence internationale de l'énergie. *World Energy Outlook 2019*. Paris, 2019.
- Gorner, M., Scheffer, S., Cazzola, P., 2019. Electric vehicles. Tracking Clean Energy Progress [Document multimédia]. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.iea.org/tcep/transport/electricvehicles/> (consulté le 10 août 2019).
- Swiss Resource Capital AG. *Battery Metals Report 2019: Everything You Need to Know about the Battery Metals Lithium, Cobalt and Vanadium!* 2019. Disponible à l'adresse suivante : https://download.resource-capital.ch/fileadmin/reports/2019/en_DS_BMR2019.pdf
- Agence internationale de l'énergie. *Global EV Outlook 2019: Scaling-up the transition to electric mobility*. Paris. OCDE, 2019. Disponible à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1787/35fb60bd-en>
- Alpiq. *Electric vehicle market penetration in Switzerland by 2020*. Lausanne, 2009. Disponible à l'adresse suivante : https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/003/43003896.pdf
- Held, M., Graf, R., Wehner, D., Eckert, S., Faltenbacher, M., Weidner, S. et al. *Abschlussbericht: Bewertung der Praxistauglichkeit und Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen*. Berlin: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH), 2016. Disponible à l'adresse suivante : <https://edocs.tib.eu/files/e01fn16/871331055.pdf>
- Jungmeier, G., Canella, L., Pucker-Singer, J. et Beermann, M. *Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen*. 2019.
- Hall, D. et Lutsey, N. *Effects of Battery Manufacturing on Electric Vehicle Life-cycle Greenhouse Gas Emissions*. International Council on Clean Transportation, 2018.
- Knobloch, F., Hanssen, S.V., Lam, A., Pollitt, H., Salas, P., Chewprecha, U. et al. Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time. *Nature Sustainability* 3, 2020, 437-447. Disponible à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0488-7>.
- Persson, A. et Oman, D. *Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles: Sustainable to what extent?* KTH Royal Institute of Technology, 2018. Disponible à l'adresse suivante : <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1216809/FULLTEXT01.pdf>.
- Del Maestro, A. et van Oorschot, J. *The Outlook for electric vehicles. strategy&PwC*, juin 2018.
- VHM Limited. *Rare Earths. VHM Limited*, 2018. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.vhm ltd.com.au/products/rare-earths/>.
- East, A. Investors toast rare earths as electric cars drive 'magnet metals' demand. *Stockhead*, 30 janvier 2018. Disponible à l'adresse suivante : <https://stockhead.com.au/resources/investors-toast-rare-earths-as-electric-car-demand-drives-magnet-metals/>
- Cusenza, M. A., Bobba, S., Ardente, F., Cellura, M. et Di Persio, F. Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of Cleaner Production* 215, 2019, 634-649. Disponible à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.056>
- Bicer, Y. et Dincer, I. Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles. *Resources, Conservation and Recycling* 132, 2018, 141-157. Disponible à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.036>
- Matheys, J. et Van Autenboer, W. *SUBAT: Sustainable Batteries - Work package 5: Overall Assessment. Final Public Report*. 2005. Disponible à l'adresse suivante : <http://etec.vub.ac.be/publications/2005Matheys215.pdf>
- Zackrisson, M., Avellan, L. et Orlenius, J. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles - Critical issues. *Journal of Cleaner Production* 18(15), 2010, 1519-1529. Disponible à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.004>
- Bloomberg New Energy Finance. *Electric Vehicles Outlook 2018*. 2018. Disponible à l'adresse suivante : <https://bnf.turtl.co/story/evo2018>.
- Dolega, P., Degreif, S., Buchert, M. et Schüller, D. *Outlining Environmental Challenges in the Non-Fuel Mining Sector*. STRADE Policy Brief No. 04/2016. 2016. Disponible à l'adresse suivante : http://stradeproject.eu/fileadmin/user_upload/pdf/PolicyBrief_04-2016_Sep2016_FINAL.pdf
- Frankel, T.C. et Whoriskey, P. Tossed aside in the 'white gold' rush: Indigenous people are left poor as tech world takes lithium from under their feet. *The Washington Post*, 19 décembre 2016. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/tossed-aside-in-the-lithium-rush/>
- Katwala, A. The spiralling environmental cost of our lithium battery addiction. *Wired UK*, 5 août 2018. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.wired.co.uk/article/lithium-batteries-environment-impact>
- Merchant, E.F. Lithium-ion battery production is surging, but at what cost? *Greentech Media*, 20 septembre 2017. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.greentechmedia.com/articles/read/lithium-ion-battery-production-is-surging-but-at-what-cost>
- Cruz, E.D. et Serapio, M. Jr. Philippines to shut half of mines, mostly nickel, in environmental clampdown. *Reuters*, 2 février 2017. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.reuters.com/article/us-philippines-mining/philippines-to-shut-half-of-mines-mostly-nickel-in-environmental-clampdown-idUSKBN15H0BQ>
- Opray, M. Nickel mining: the hidden environmental cost of electric cars. *The Guardian*, 24 août 2017. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/aug/24/nickel-mining-hidden-environmental-cost-electric-cars-batteries>
- Frankel, T.C. The cobalt pipeline. Tracing the path from deadly hand-dug mines in Congo to consumers' phones and laptops. *The Washington Post*, 30 septembre 2016. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/congo-cobalt-mining-for-lithium-ion-battery/>
- Kelly, A. Children as young as seven mining cobalt used in smartphones, says Amnesty. *The Guardian*, 19

- janvier 2016. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.theguardian.com/global-development/2016/jan/19/children-as-young-as-seven-mining-cobalt-for-use-in-smartphones-says-amnesty>
- Whoriskey, P. In your phone, in their air: A trace of graphite is in consumer tech. In these Chinese villages, it's everywhere. *Advanced Biofuels*, 3 octobre 2016. Disponible à l'adresse suivante : <https://advancedbiofuels.usa.info/in-your-phone-in-their-air-a-trace-of-graphite-is-in-consumer-tech-in-these-chinese-villages-its-everywhere/>
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R. et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature* 575, 75-86, 2019. Disponible à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>.
- Smith, T. Rare Earthware: a journey to the toxic source of luxury goods. *The Guardian*, 15 avril 2015. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.theguardian.com/environment/gallery/2015/apr/15/rare-earthware-a-journey-to-the-toxic-source-of-luxury-goods>
- Flexer, V., Baspineiro, C.F. et Galli, C.I. Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of The Total Environment* 639, 15 octobre 2018, 1188-1204. Disponible à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>
- Hohnhorst Brothers. Die Elektrifizierung der Mobilität: Warum die Zukunft elektrisch fahren wird – und das schneller, als man denkt. Medium, 20 novembre 2018. Disponible à l'adresse suivante : <https://medium.com/@lukasvh/die-elektrifizierung-der-mobilit%C3%A4t-warum-die-zukunft-elektrisch-fahren-wird-und-das-schneller-e21e098a5f6>
- Bloomberg. Rare Earth Metals Electrified by China's Illegal Mining Clean-Up. *Bloomberg News*, 7 septembre 2017. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-09-07/rare-earth-metals-electrified-by-china-s-illegal-mining-clean-up>
- Anderson, R. L.A. Multi-tactic approach to manage weed population dynamics in crop rotations. *Agronomy Journal* 97(6), 2005, 1579-1583. Disponible à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0194>
- Friends of the Earth. *Lithium*. 2013. Disponible à l'adresse suivante : https://www.foeurope.org/sites/default/files/publications/13_factsheet-lithium-gb.pdf
- Gardiner, J. The rise of electric cars could leave us with a big battery waste problem. *The Guardian*, 10 août 2017. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/aug/10/electric-cars-big-battery-waste-problem-lithium-recycling>
- Programme des Nations Unies pour l'environnement et Groupe international d'experts sur les ressources. *Recycling Rates of Metals: A Status report*. 2011. Disponible à l'adresse suivante : <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8702>
- Mayyas, A., Steward, D. et Mann, M. The case for recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive Li-ion batteries. *Sustainable Materials and Technologies* 19, April 2019, e00087. Disponible à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00087>
- Binnemans, K., Jones, P.T., Blanpain, B., Van Gerven, P., Yang, Y., Walton, A. et al. Recycling of rare earths: A critical review. *Journal of Cleaner Production* 51, 2013, 1-22. Disponible à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>
- Christmann, P., Gloaguen, E., Labbé, J.-F., Melleton, J. et Piantone, P. Global lithium resources and sustainability issues. *Lithium Process Chemistry: Resources, Extraction, Batteries and Recycling*, 1-40. Elsevier, 2015. Disponible à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801417-2.00001-3>
- Boyd, A., Soo, V.K. et Doolan, M. The environmental impacts of recycling portable lithium-ion batteries. *Procedia CIRP* 48, 188-193, 2016. Disponible à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.100>
- Ciez, R.E. et Whitacre, J.F. Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. *Nature Sustainability* 2, 2019, 148-156. Disponible à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0222-5>
- Romare, M. et Dahllöf, L. *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries*. Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute, 2017. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.energimyndigheten.se/globalassets/forskning-innovation/transporter/c243-the-life-cycle-energy-consumption-and-co2-emissions-from-lithium-ion-batteries-pdf>
- Ville de Copenhague. Et bedre København. *Københavns Kommune*, 2019. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.kk.dk/etbedrekbh>
- Reaugh, L. American Manganese: VRIC Conversation with President and CEO Larry Reaugh – MoonShot Exec, 25 janvier 2018. Disponible à l'adresse suivante : <https://moonshotexec.com/american-manganese-vice-conversation-with-president-and-ceo-larry-reaugh/>
- Sun, S. I., Chipperfield, A. J., Kiaee, M. et Wills, R. G. A. Effects of market dynamics on the time-evolving price of second-life electric vehicle batteries. *Journal of Energy Storage* 19, 2018, 41-51. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X17306084>
- Eckart, J. Batteries can be part of the fight against climate change - if we do these five things. *Forum économique mondiale*, 28 novembre 2017. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.weforum.org/agenda/2017/11/battery-batteries-electric-cars-carbon-sustainable-power-energy/>
- Calma, J. The electric vehicle industry needs to figure out its battery problem. *The Verge*, 6 novembre 2019. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.theverge.com/2019/11/6/20951807/electric-vehicles-battery-recycling>
- Pavel, C.C., Thiel, C., Degreif, S., Blagoeva, D., Buchert, M., Schüller, D., et Tzimas, E. Role of substitution in mitigating the supply pressure of rare earths in electric road transport applications. *Sustainable Materials and Technologies* 12, 2017, 62-72. Disponible à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.01.003>
- Transport & Environment. *Electric vehicle life cycle analysis and raw material availability*. 2017. Disponible à l'adresse suivante : https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2017_10_EV_LCA_briefing_final.pdf