

# Empreinte matières du véhicule électrique : comment respecter les limites planétaires ?



**MÉTROPOLE**

**GRAND LYON**

# Sommaire

Introduction .....	3
<b>Électrification du parc automobile : une transition énergétique vorace en matières premières .</b>	<b>4</b>
• Les scénarios de transition prévoient une forte augmentation de la production et de l'usage d'électricité bas-carbone.....	4
• ... dont le déploiement implique une consommation de métaux et minéraux en forte augmentation ..	5
• La transition énergétique, un levier de réduction de l'extraction de matières liée au système énergétique fossile .....	7
<b>Production des matières et transition énergétique : des préoccupations croissantes .....</b>	<b>10</b>
• Les contraintes d'approvisionnement pourraient freiner le rythme de déploiement des technologies bas-carbone .....	10
• La transition énergétique pourrait exacerber les impacts environnementaux (déjà) massifs de l'extraction minière .....	12
<b>Comment limiter la consommation de matières liée à l'électrification du parc automobile ? ..</b>	<b>16</b>
• Un impératif de souveraineté et de soutenabilité : minimiser la consommation de matières liée à la transition énergétique.....	16
• Poser un nouveau préalable : dimensionner le niveau minimum (plancher social) et maximum (plafond environnemental) de l'extraction de matières .....	17
• La sobriété automobile, premier levier de maîtrise de l'empreinte matières de l'électrification .....	19
Conclusion : l'urgence de repenser l'imaginaire automobile à l'heure de la sobriété .....	24
Bibliographie.....	26

**Septembre 2025**  
**Métropole de Lyon**

## Coordination

Direction de la Prospective et du Dialogue Public (DPDP)

## Rédaction

Boris Chabanel (Utopies)

## Réalisation

DPDP

*L'auteur remercie Hugo Le Boulzec (postdoctorant à l'Université Grenoble Alpes) et Joey Nijmens (consultant chez Deloitte) pour la mise à disposition des résultats statistiques issus de leurs travaux.*

*Photo de couverture ©AdobeStock*

# Introduction

« Pour moi, les véhicules électriques sont source de pollution cachée et ne vont pas résoudre la crise écologique ».

Cette assertion tirée de l'enquête *Perceptions et attendus du grand public à l'égard de l'électromobilité de l'Ademe* (20 23) illustre le scepticisme des Français à l'égard du bien-fondé environnemental de l'électrification automobile : seul un français sur cinq est convaincu que les véhicules électriques ont une empreinte environnementale plus faible que celle des véhicules thermiques, une méfiance figurant parmi les principales raisons pour lesquelles les personnes interrogées n'envisagent pas d'acheter un véhicule électrique.

Qu'en est-il vraiment ? Va-t-on manquer de matières pour électrifier le parc automobile ? Quels en seront les coûts environnementaux ? Comment réduire ces impacts ? Tout compte fait, la voiture électrique est-elle « l'arnaque écologique » que certains dénoncent ?

S'appuyant sur la littérature scientifique récente, cette note propose quelques éléments de réponse en s'attachant à mettre en lumière la dimension systémique du sujet. Elle replace tout d'abord l'électrification du parc automobile dans le cadre plus large de la transition énergétique et compare les besoins matières des technologies bas-carbone avec l'empreinte matières passée et future du système énergétique fondé sur les énergies fossiles.

La seconde partie se penche ensuite sur les préoccupations croissantes liées à la production des matières nécessaires à la transition énergétique, aussi bien sous l'angle des risques d'approvisionnement que des pressions environnementales induites par l'activité minière.

La dernière partie enfin, se confronte à la question des limites à donner à l'empreinte matières de l'électrification automobile, ce qui amène à s'interroger à la fois sur le plancher et le plafond d'extraction à respecter, et sur les leviers d'action permettant d'y parvenir concrètement.



# L'ÉLECTRIFICATION DU PARC AUTOMOBILE S'INSCRIT DANS UNE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE VORACE EN MATIÈRES PREMIÈRES

## Les scénarios de transition prévoient une forte augmentation de la production et de l'usage d'électricité bas-carbone...

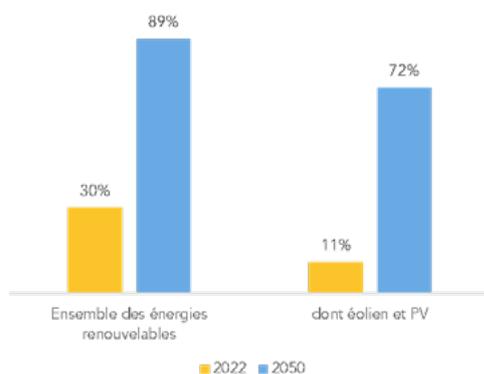
Parmi les scénarios de transition énergétique compatible avec l'objectif de limitation du réchauffement climatique à +1,5°C établi par l'Accord de Paris de 2015, le scénario *Net Zero Emissions by 2050* (NZE) de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) publié en 2021 et actualisé en 2023 fait souvent référence (IEA, 2023).

Son ambition est simple : faire passer les émissions de gaz à effet de serre liées à la production et la consommation d'énergie de 37 milliards de tonnes en 2022 à zéro en 2050. Or, plus de la moitié (55%) de cet objectif de réduction est atteinte à travers deux leviers étroitement liés.

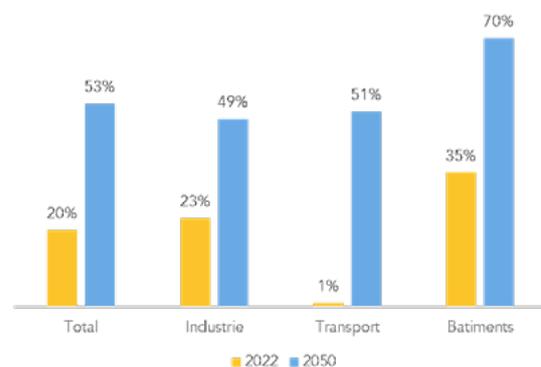
D'une part, la décarbonation de la production d'électricité via le développement des sources d'énergie renouvelable, et d'autre part l'électrification des usages dans l'industrie, les bâtiments et les transports.

C'est d'ailleurs dans ce dernier secteur que la part de l'électricité dans la consommation d'énergie augmenterait le plus fortement en lien avec l'essor des motorisations électriques dans le parc des véhicules particuliers, utilitaires et poids lourds. La contribution de l'électrification à l'objectif NZE est même plus importante avec les gains d'efficacité énergétique permis par la diffusion des équipements électriques, dont le rendement est beaucoup plus élevé que celui des équipements utilisant des combustibles fossiles.

Part des énergies renouvelables dans la production d'électricité selon le scénario NZE de l'Agence Internationale de l'Énergie (en %)



Part de l'électricité dans la consommation d'énergie finale selon le scénario NZE (en %)



Source : IEA, NZE scenario, 2023.

## ... dont le déploiement implique une consommation accélérée de métaux et minéraux

Bien que la consommation mondiale d'énergie finale recule de près de 1/4 dans le scénario NZE entre 2022 et 2050, les capacités de production électrique éoliennes et photovoltaïques installées (en GWh) augmentent massivement sur la période : x8 pour les premières et x16 pour les secondes. Il en est de même concernant les véhicules électriques.

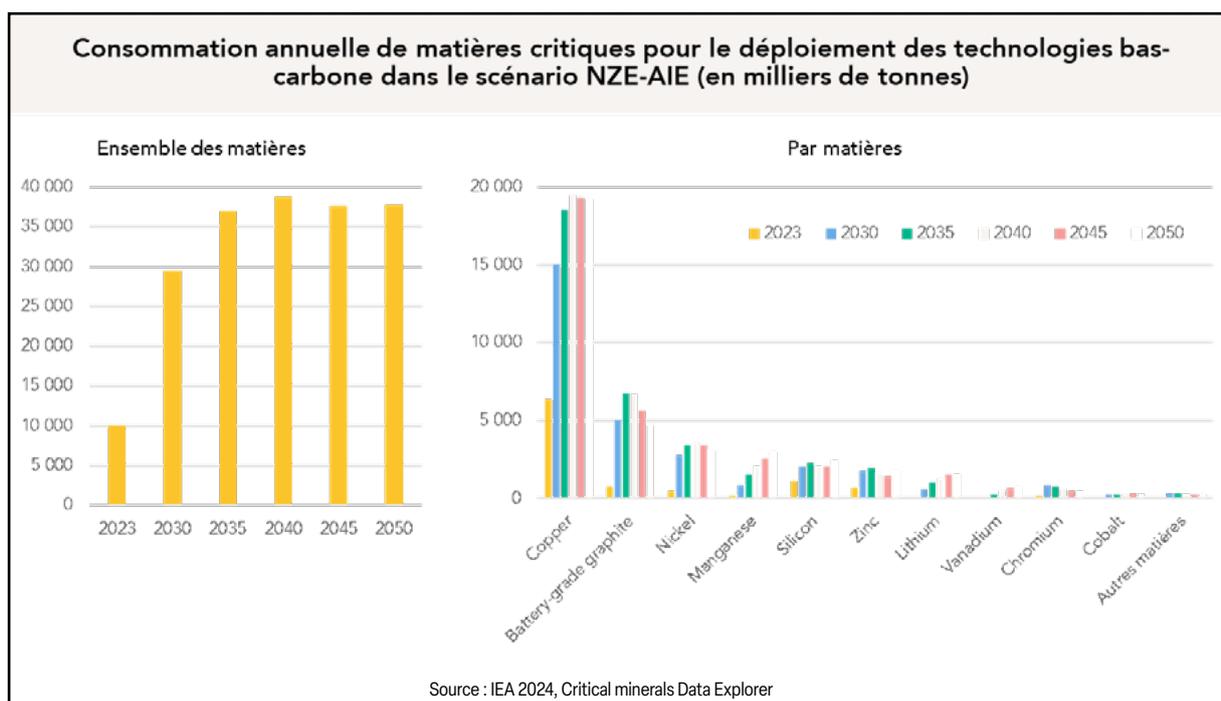
La part des motorisations électriques dans les ventes passerait de 10% à 95% sur la période, dans un contexte où le volume de déplacement en voitures particulières bondirait de 60%. Rien qu'entre 2023 et 2035, le scénario NZE prévoit une multiplication par près de 18 du parc de voitures électriques qui passerait de 28 à 505 millions d'unités.

Comme le soulignent de nombreux travaux récents, la réussite de cette trajectoire ambitieuse nécessite de mobiliser une grande diversité de matières premières dans des quantités en forte augmentation pour la fabrication de ces infrastructures bas-carbone (PV, éolien, batteries, réseaux électriques, stockage stationnaire d'électricité, capacités de production d'hydrogène vert).

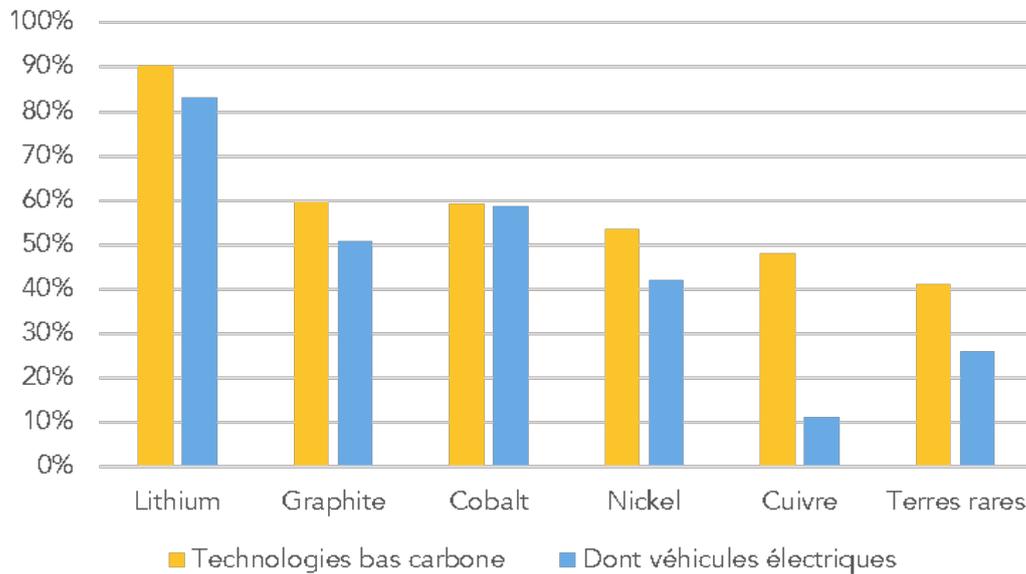
Selon les travaux de l'AIE, prenant en compte 37 métaux et minéraux indispensables à la transition énergétique, les besoins associés au scénario NZE impliqueraient une multiplication par 3,7 de la consommation annuelle de ces matières, qui passeraient de 10 à 38 millions de tonnes entre 2023 et 2050 (IEA, 2024).

Particulièrement marquée au cours des dix prochaines années avant une stabilisation sur le reste de la période, cette croissance (+5%/an en moyenne sur la période) s'avère nettement plus soutenue que les tendances historiques de l'extraction mondiale de métaux (+2,6%/an entre 1970 et 2020 selon les statistiques de l'International Resource Panel).

Notons également que 10 matières représentent 99% des besoins (voir graphique ci-dessous), parmi lesquelles le graphite, le nickel, le manganèse, le lithium et le vanadium font également partie du Top 10 des matières connaissant la plus forte augmentation sur la période.



## Part des technologies bas-carbone dans la demande mondiale de matières critiques selon le scénario NZE de l'Agence Internationale de l'Énergie (en %)



Source : IEA 2024, Criticak Minerals Data Explorer

Pour les six matières faisant l'objet d'une analyse approfondie de l'AIE (voir graphique ci-dessous), on observe que les technologies bas-carbone représenteraient plus de la moitié de la demande mondiale entre 2030 et 2050 pour le lithium, le graphite, le cobalt et le nickel (IEA, 2024). Mais il est important de préciser qu'une large partie des besoins de la transition énergétique concernent... les véhicules électriques.

Dit autrement, en raison de l'augmentation massive du parc automobile électrique à l'échelle mondiale d'ici 2050 et du fait qu'une voiture électrique consomme en moyenne 2,2 fois plus de métaux critiques qu'une voiture thermique (WWF, 2023), la transition vers le véhicule électrique serait le principal moteur de la croissance de la demande mondiale de lithium, de graphite, de cobalt et de nickel à l'avenir.

Il faut ajouter à cela les besoins d'acier et d'aluminium, qui représentent des volumes bien supérieurs à ceux associés aux métaux analysés par l'AIE.

Selon une étude portant également sur le scénario NZE (Nijnens et col., 2023), la consommation annuelle d'acier nécessaire aux technologies bas-carbone passerait de 10 millions de tonnes en 2021 à 76 en 2035, avant de redescendre à 24 en 2050. L'incidence sur la production mondiale d'acier serait cependant limitée, cette dernière s'élevant à 1,9 milliard de tonnes en 2023 (*United States Geological Survey, 2025*).

La consommation d'aluminium nécessaire aux technologies bas-carbone poursuivrait quant à elle une trajectoire ascendante sur la période (2 millions de tonnes en 2021, 17 en 2035 et 20 en 2050) et aurait en revanche un impact plus sensible sur la production mondiale, qui représente 70 millions de tonnes en 2023 (*United States Geological Survey, 2025*).

Portant au total sur 24 matières premières, cette étude, indique également que la consommation annuelle de matières induite par la transition énergétique connaîtrait un pic au milieu des années 2030 avant de baisser de 1/3 à l'horizon 2050, la réduction des besoins d'acier ayant une influence importante sur le total.

# La transition énergétique, un levier de réduction de l'extraction de matières liée au système énergétique fossile

Les constats qui précèdent peuvent amener à considérer la transition vers les technologies énergétiques bas-carbone comme un accélérateur majeur de l'extraction mondiale de matières. Cette conclusion appelle cependant quelques nuances, comme le montrent plusieurs études récentes.

Alors qu'on ne compte plus les études visant à quantifier les besoins matières de la transition bas-carbone, celles portant sur les infrastructures liées à l'extraction des combustibles fossiles s'avèrent beaucoup plus rares. Une lacune que vient combler une étude récente d'une équipe de chercheurs du laboratoire d'économie appliquée de Grenoble portant sur les infrastructures amont (exploration, extraction et production), intermédiaire (transport et stockage) et aval (raffinage et commercialisation) des filières charbon, pétrole et gaz (Le Boulzec et col., 2022).

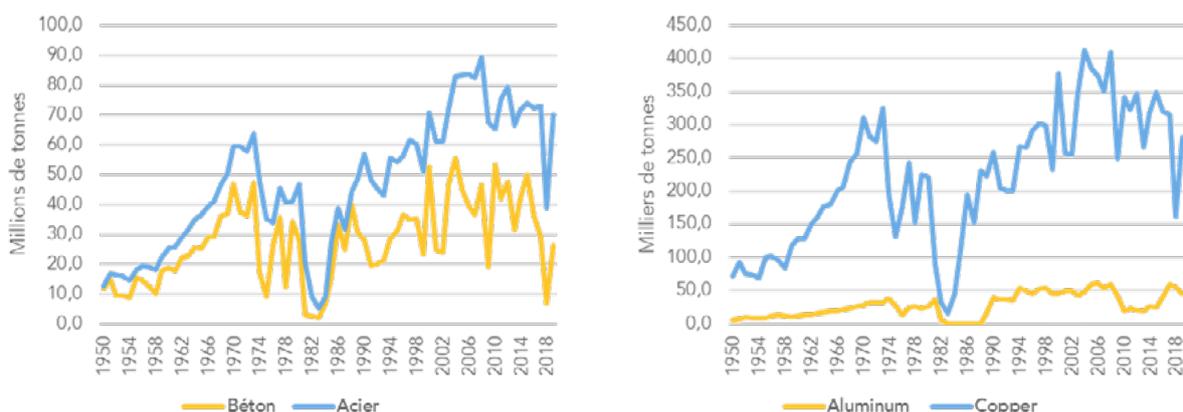
Premier constat, l'acier est la principale source de besoins en matériaux pour les combustibles fossiles. Il a représenté près de 70% de la demande en matériaux du secteur entre 1950 et 2020, les 30% restants étant principalement constitués de béton. En revanche, la consommation d'aluminium et de cuivre représente respectivement 0,04% et 0,06%.

Surtout, on constate que le développement accéléré des infrastructures après-guerre, dans un contexte d'essor des consommations de combustibles fossiles, n'a rien à envier à celui projeté pour la transition énergétique dans les décennies à venir.

La consommation d'acier passe ainsi de 4,4 Mt/an à 64 Mt/an entre 1940 et 1973, et celle de béton de 2,8 Mt/an à 42 Mt/an. De plus, ces consommations se maintiennent à un niveau élevé ces dernières années. La consommation de cuivre, en revanche, atteint des niveaux bien moindres que ceux observés pour les technologies bas-carbone.

De même, l'industrie automobile n'a pas attendu de passer à l'électrique pour mobiliser de grandes quantités de matières. Passée de 11 à 56 millions d'unités entre 1961 et 2015 (*United States Department of Transportation*), la production mondiale de voitures particulières mobilise elle aussi des dizaines de millions de tonnes de matières depuis des décennies.

## Consommation annuelle de matières pour le développement des infrastructures fossiles mondiales



Source : Le Boulzec et col., 2022.

Les besoins de matières liés au système énergétique bas-carbone à venir ne sont donc pas une anomalie historique au regard du développement passé des infrastructures fossiles, et il convient en outre de corriger un autre biais de lecture. Les technologies bas-carbone sont souvent décrites comme plus intensives en matières premières (IEA, 2021) : construire un 1 GWh de capacité de production éolienne en mer nécessite en effet environ 13 fois plus de matières critiques qu'une centrale au gaz de puissance équivalente et 7 fois plus qu'une centrale à charbon, et respectivement environ 3 et 1,5 pour le photovoltaïque.

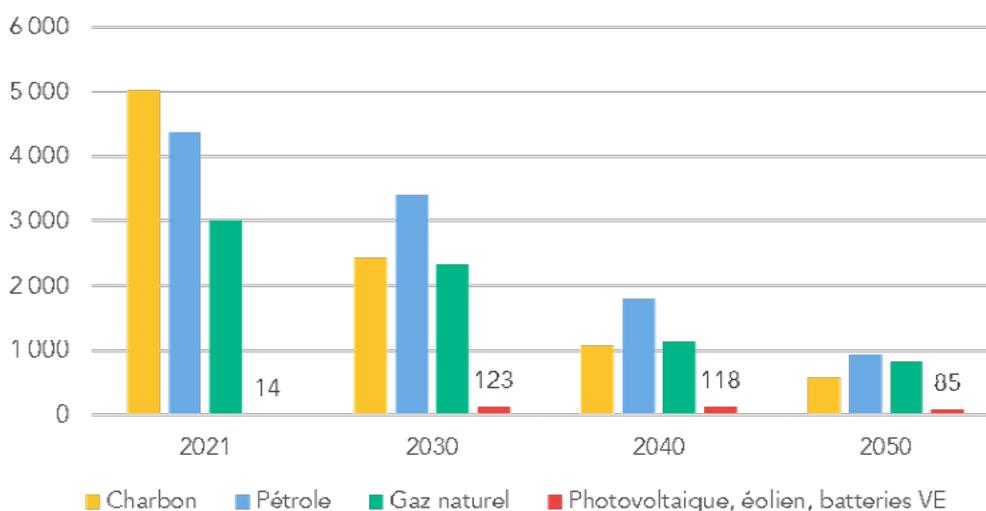
Mais quand est-il si l'on prend en compte les quantités de combustibles nécessaires au fonctionnement des centrales charbon et gaz ? Une étude récente montre que la photographie n'est plus la même (Wang et col. 2024) : pour produire 1 GWh d'électricité, une centrale au charbon performante nécessite d'extraire une quantité de combustible plus de vingt fois supérieure à la quantité de matières mobilisées pour produire la même quantité d'énergie via l'éolien ou le photovoltaïque.

De même, ce ratio est de deux à trois pour les centrales au gaz. De plus, cette étude est plutôt conservatrice puisqu'elle ne prend pas en compte les matières nécessaires à la construction des centrales fossiles, seulement leur combustible.

Enfin, plusieurs études suggèrent que la transition énergétique permettra probablement une réduction de l'empreinte matières totale du système énergétique mondial à l'avenir.

Une étude portant sur le scénario NZE de l'AIE (Nijens et col., 2023) montre que la réduction de la production de combustibles fossiles prévue d'ici 2050 contrebalance très largement l'augmentation de la consommation de matières premières nécessaire pour la construction des capacités électriques (éolien, photovoltaïque, batteries des véhicules électriques) : l'empreinte matières annuelle du système énergétique passerait d'environ 12,4 milliards de tonnes en 2021 à 2,4 en 2050, soit une baisse de 80% (cf. graphique ci-dessous).

### Consommation annuelle de charbon, de pétrole et de gaz et consommation annuelle de matières pour le déploiement des technologies bas-carbone (rouge) dans le scénario NZE de l'AIE (en millions de tonnes)



Source : Nijens et col., 2023.

Cette tendance à la baisse serait même plus importante encore si l'on prend en compte la réduction des besoins de matières liées à la construction des infrastructures fossiles (Le Boulzec et col., 2022) : dans le cadre du scénario NZE, la consommation annuelle de béton pour les infrastructures fossiles recule de 54% entre 2019 et 2050, et de 87% pour l'acier.

Un dernier point mérite d'être souligné ici, à la différence des systèmes énergétiques fossiles qui impliquent l'extraction continue de combustibles dont l'usage est dissipatif, le déploiement d'un système électrique fondé sur les énergies renouvelables permet de constituer un stock de matières dont le démantèlement en fin de vie offre des possibilités de réutilisation ou de recyclage qui permettront de réduire le besoin de matières primaires pour assurer le renouvellement des infrastructures.

Ces quelques éclairages soulignent les interactions fortes entre production d'énergie et extraction de matières premières (renvoyant au concept de «material-energy nexus» dans la littérature) : le déploiement des infrastructures de production d'énergie nécessite de grandes quantités de matières, dont l'extraction et la transformation nécessitent de grandes quantités d'énergie, ce qui implique que toute contrainte de ressource d'un côté peut entraîner des contraintes de l'autre (Hu et col., 2024).

Toutefois, ces éclairages montrent également que les craintes liées à une possible explosion de l'extraction mondiale de matières minérales induites par la transition énergétique s'avèrent infondées (Nijnens et col., 2023). Mais cela ne signifie pas pour autant que l'extraction de ces matières ne pose aucune difficulté ou menace à l'avenir.

# PRODUCTION DES MATIÈRES NÉCESSAIRES À LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE : DES PRÉOCCUPATIONS CROISSANTES

## Les contraintes d'approvisionnement pourraient freiner le rythme de déploiement des technologies bas-carbone

Cette perspective de croissance soutenue de la demande de matières peut susciter une inquiétude évidente : le déploiement des technologies bas-carbone sera-t-il entravé par la contrainte de ressources ? Sur les 37 matières analysées par l'AIE, 19 figurent parmi la liste des matières critiques dressée par la Commission européenne en 2023 (EU, 2023), c'est-à-dire des matières présentant à la fois une importance économique majeure — matières peu substituables et utilisées par des secteurs représentant une part importante du PIB... — et des risques d'approvisionnement élevés — forte dépendance aux importations, forte concentration des pays fournisseurs, risques géopolitiques...

Parmi les facteurs de risques d'approvisionnement, figure la disponibilité future des matières premières. Rappelons que l'on distingue habituellement les « ressources » et les « réserves » de matières, les premières désignant la partie des stocks géologiques présents sur Terre dont l'exploitation est considérée comme potentiellement faisable, tandis que les secondes correspondent à la partie des ressources pouvant être exploitables compte tenu des conditions techniques et économiques actuelles. Il s'agit donc de données évolutives, qui ne sont pas seulement définies en termes géologiques, mais varient aussi selon le contexte socio-économique (De Rochette François et De Temmerman Greg, 2022).

Jusqu'à présent, l'amélioration des techniques d'extraction a permis une augmentation continue des réserves en rendant exploitables des gisements de moins en moins concentrés (quantité de métaux par tonne de minerai extrait), ceux-ci étant plus nombreux que les gisements offrant une forte concentration. Dit autrement, en raison des économies d'échelle, un site plus grand avec des concentrations plus faibles peut être plus intéressant à exploiter qu'un site plus petit avec des teneurs plus élevées.

Si de nombreuses études se sont penchées sur la question de savoir si l'on dispose de suffisamment de matières à long terme pour conduire et soutenir la transition énergétique, il reste difficile d'en dégager des enseignements convergents. À titre d'exemple, une étude récente compilant 78 articles de recherche met en garde sur le déséquilibre entre la demande cumulée de métaux critiques d'ici 2100 liée au déploiement du véhicule électrique et les réserves disponibles (Zhang et col., 2023).

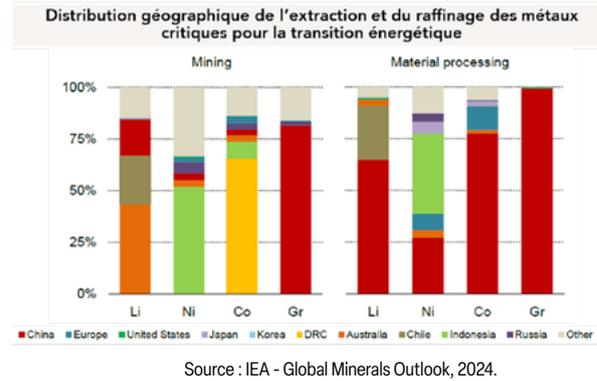
Comprise entre 33641 et 88614 Kt d'ici 2100, la demande cumulée de lithium dépasserait largement les réserves actuelles de lithium, estimées à 22000 Kt. Les réserves de nickel estimées à 95000 Kt en 2021 seraient également probablement insuffisantes pour répondre à la demande cumulée d'ici 2100. Le besoin cumulé en cobalt atteindrait entre 65426 et 97461 Kt, alors que les réserves mondiales de cobalt ne sont que de 7600 Kt.

A *contrario*, le think-tank *Energy Transitions Commission* (2023) estime que les ressources actuellement estimées dépassent largement la demande cumulée d'ici 2050 et que les réserves estimées sont également supérieures aux besoins, à l'exception cependant du cuivre, du nickel et du cobalt. D'une manière générale, le ratio classique entre réserves et production à un instant  $t$  — utilisé pour évaluer le temps restant avant que la ressource considérée ne soit épuisée aux taux d'extraction actuels — ne donne d'indications pertinentes que sur le court terme, du fait du caractère dynamique des réserves et de la demande (De Rochette François et De Temmerman Greg, 2022).

Mais quand bien même nous disposerions de suffisamment de ressources à l'avenir, encore faut-il que les industries minière et métallurgique soient en capacité de suivre l'augmentation de la demande induite par le déploiement accéléré des technologies bas-carbone, dont le rythme à venir est, comme on l'a vu plus haut, supérieur aux tendances historiques.

Comme le rappelle l'AIE, l'industrie minière s'avère peu réactive aux évolutions de la demande en raison des délais nécessaires à la mise en exploitation de nouveaux gisements de minerais métalliques (5 à 20 ans en moyenne entre la phase d'exploration et la mise en service d'une mine). D'ici 2040, la production minière ne répondrait qu'à 70% des besoins en cuivre et 50 % des besoins en lithium, tandis que l'équilibre serait presque atteint pour le nickel et le cobalt (IEA, 2024).

Une difficulté supplémentaire est que nombre de métaux critiques sont des sous-produits de l'extraction minière, et dépendent donc de l'évolution des volumes extraits des métaux principalement exploités (Hu et col., 2024). Par ailleurs, l'extraction et le raffinage des métaux s'avèrent très concentrés géographiquement à l'échelle mondiale, la Chine occupant une place prédominante. Cette situation soulève des risques significatifs de perturbations des approvisionnements (pénuries, volatilité des prix, restrictions d'exportations, etc.), a fortiori pour l'Europe, dont les capacités de production sont de longue date très limitées.



Enfin, un autre motif de préoccupation concerne les consommations d'énergie que requière l'extraction des métaux et minéraux, en particulier pour l'utilisation des lourds équipements de forage, d'excavation, etc. À l'échelle mondiale, la consommation d'énergie finale du secteur des mines et carrières a été multiplié par plus de 3 entre 1970 et 2015 et représente près de 2 % de la consommation totale à cette date (Aramendia et col., 2023). Or, les coûts énergétiques de l'extraction dépendent principalement de la concentration des gisements (Desing et col., 2024) et on a vu qu'au fil du temps, l'extraction se porte progressivement sur des gisements de moindre qualité (moins concentrés, moins accessibles...), ce qui implique en théorie de mobiliser toujours plus d'énergie pour produire le même volume de métaux.

Si l'amélioration des techniques d'extraction a permis jusqu'ici de compenser cette difficulté, il existe une limite physique aux gains d'efficacité énergétique au-delà de laquelle la technologie ne peut plus contrebalancer la dégradation de la qualité des ressources. Ce point devrait être atteint pour nombre de métaux d'ici 2050 (Bonhomme et col., 2024). Dès lors, les coûts de production et les prix des métaux augmenteront inexorablement, à un rythme proportionnel à leur consommation. Selon les scénarios socio-économiques compatibles avec un réchauffement de +1,5 °C et l'évolution des intensités énergétiques et des taux de recyclage, la consommation d'énergie de l'extraction minière pourrait être multipliée par 2 à 8 d'ici 2060 (Aramendia et col., 2023).

Au total, ces éléments suggèrent que les risques d'approvisionnement pour certaines matières premières pourraient compromettre le déploiement de l'électrification automobile tel que prévu dans les scénarios de transition énergétique (WWF, 2023).

# La transition énergétique pourrait exacerber les impacts environnementaux (déjà) massifs de l'extraction minière

Au-delà des risques d'approvisionnement, les impacts environnementaux de l'extraction minière qui serait nécessaire pour répondre à la demande de métaux suscitent des inquiétudes croissantes. Et pour cause. Dans un ouvrage documenté sur le sujet ([La ruée minière au 21e siècle](#), 2024), la journaliste et philosophe Célia Izoard rappelle la réalité de la mine, largement oubliée ou occultée dans l'imaginaire collectif occidental : «L'extraction minière consiste à déplacer des montagnes, à détourner des rivières, à combler des vallées. C'est la plus géologique des activités humaines : celle dont les effets sont les plus vastes et les plus durables.»

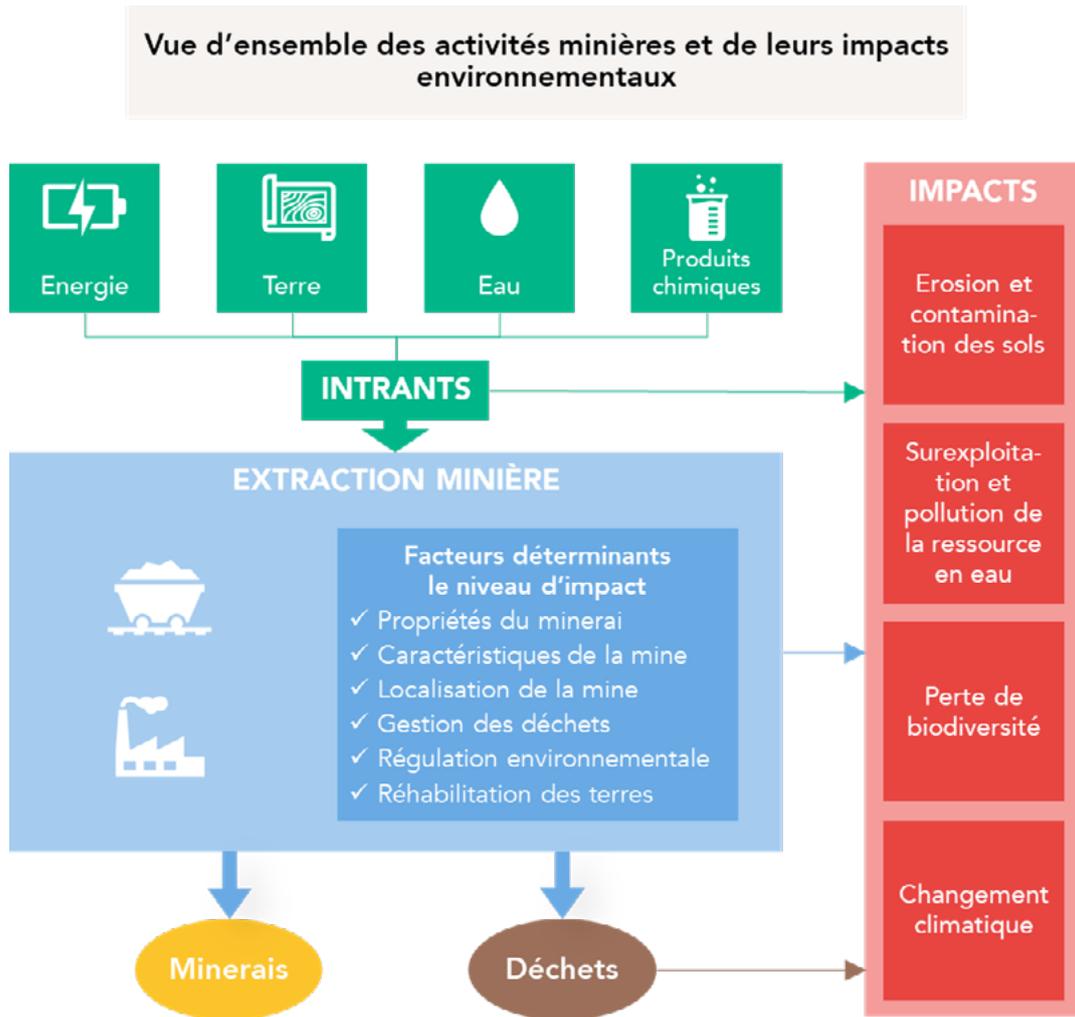
Pour le comprendre, il faut se représenter ce que recouvre l'exploitation minière (Izoard, 2024, Association Négawatt, 2024). Creuser des galeries souterraines ou, de plus en plus, des puits à ciel ouvert. Extraire et transporter des quantités considérables de roches par l'intermédiaire d'équipements gigantesques et énergivores (excavatrices, tombereaux, etc.).

L'étape suivante, broyer la roche en poudre, reste la plus consommatrice d'énergie. S'ensuit la phase de concentration du minerai via un ensemble de techniques de traitement physique et chimique ayant pour objet d'obtenir des produits ayant une valeur commerciale et transformables par la métallurgie (transformation du concentré en métal ou en alliage).

Enfin, à chacune de ces étapes, la part de la roche qui n'est pas intéressante pour l'exploitant est rejetée. Parmi ces déchets miniers qui représentent plus de 99% des volumes extraits, on distingue les stériles — sols ou roches extraits et stockés sous forme de collines artificielles pour permettre l'accès au gisement — et les résidus — issus des phases de concentration et dirigés vers d'immenses bassins de stockage.

Pour prendre la mesure du gigantisme des flux physiques en jeu, Célia Izoard prend l'exemple d'une grande mine de cuivre actuelle (chiffres issus d'une publication du Programme des Nations Unies pour l'Environnement). Chaque jour, il est nécessaire d'excaver 270 000 tonnes de roches, d'empiler 180 000 tonnes de stériles, de consommer 114 000 m<sup>3</sup> d'eau et d'envoyer 200 000 tonnes de boues toxiques dans des parcs à résidus pour produire 1750 tonnes de concentrés de cuivre.

À la clé, des impacts environnementaux dont l'ampleur reste difficile à quantifier tant les données sur les activités minières font encore aujourd'hui largement défaut : les impacts de la moitié des zones minières dans le monde ne seraient pas documentés (Maus et Werner, 2024). Dans une synthèse de la littérature existante, l'agence de l'environnement des Pays-Bas distingue quatre grands types d'impacts environnementaux (De Haes et Lucas, 2024).



Source : De Haes et Lucas, 2024.

### • Érosion et contamination des sols

On estime qu'à l'échelle mondiale, les mines couvrent environ 100 000 km<sup>2</sup> de superficie, incluant les terrils de stériles, les fosses, les bassins d'eau, les digues à résidus, les aires de lixiviation en tas et les infrastructures de traitement (Maus et col., 2022), soit autant de surfaces de sols perdues. Cela représente environ 0,07 % de la superficie totale des terres.

À titre de comparaison, la superficie totale des zones urbaines représente environ 0,51 % de la superficie totale des terres à l'échelle mondiale. Bien que l'impact de l'exploitation minière sur l'utilisation des terres à l'échelle mondiale soit moindre que celui de l'exploitation forestière ou de l'agriculture, ses effets négatifs sont profonds et durables.

En raison du décapage du sol et du sous-sol au-dessus du substrat rocheux, du dynamitage et de l'excavation des roches et minéraux, du déversement des déchets et de la remise en état des terres après l'arrêt des activités minières, les procédés miniers réduisent considérablement la taille des particules du sol, aggravant ainsi l'érosion due aux précipitations, au ruissellement ou au vent. Il n'existe pas de quantifications globales de l'ampleur de l'érosion des sols autour des mines.

Cependant, de nombreuses études de cas indiquent qu'en aval, les écosystèmes et la santé humaine sont fortement impactés. Outre la perturbation des processus hydrologiques, les activités minières impliquent de fortes charges sédimentaires dans les eaux de surface, entraînant généralement de profonds changements dans les écosystèmes aquatiques.

L'exploitation minière est, de plus, l'une des sources les plus importantes de pollution des sols, principalement via la mauvaise gestion des résidus miniers (voir point suivant et Focus ci-après). Selon des estimations récentes, à l'échelle mondiale, les mines de métaux actives et inactives affectent environ 164 000 km<sup>2</sup> de plaines inondables en raison de la sédimentation des résidus miniers dans les cours d'eau (Macklin et col., 2023). Notons que l'aluminium, le cuivre, le nickel et le cobalt figurent parmi les métaux ayant un impact élevé sur la contamination des sols.

### • **Surexploitation et pollution de la ressource en eau**

L'exploitation minière nécessite de grandes quantités d'eau pour le traitement du minerai (broyage, flottation, séparation, etc.) et la suppression des poussières. Il existe une forte corrélation entre la quantité d'eau utilisée par kg de minerai et la teneur du minerai : plus la teneur du minerai est faible, plus il faut d'eau pour extraire le métal concerné. Parmi les métaux nécessaires à la transition énergétique, le lithium et les terres rares sont ceux nécessitant le plus d'eau par tonne de minerais, et le cuivre en valeur absolue.

Ainsi, bien que l'exploitation minière ne représenterait qu'environ 0,1% de la consommation d'eau à l'échelle mondiale (Meissner, 2021), elle peut avoir de graves répercussions sur les ressources en eau douce à l'échelle locale ou régionale lorsque la consommation d'eau dépasse la capacité de charge de la région au regard des besoins des écosystèmes naturels et des communautés locales.

Or, au moins 16% des mines et gisements de minéraux critiques terrestres se trouvent dans des zones soumises à un stress hydrique élevé, voire très élevé. Il s'agit de zones où l'agriculture, l'industrie et les habitations utilisent souvent une grande partie, voire la totalité, de l'eau disponible. Selon l'AIE, environ la moitié de la production mondiale de lithium et de cuivre est concentrée dans des zones déjà soumises à un stress hydrique élevé.

Par ailleurs, la pollution des masses d'eau causée par les opérations minières et les mines fermées ou abandonnées suscite également de vives inquiétudes. Pendant et après l'exploitation minière, la qualité de la ressource en eau peut se dégrader en raison des rejets d'eau toxiques provenant des bassins de rétention ou du ruissellement incontrôlé dans la zone minière. Ces eaux usées contiennent souvent des produits chimiques dangereux utilisés dans le traitement des minerais, tels que le cyanure, le mercure, l'arsenic, le plomb et le zinc.

De plus, cette contamination peut rester présente à long terme : une étude montre que plus de 70% des polluants déposés persistent dans les réseaux fluviaux pendant plus de 200 ans après la fermeture d'une mine. L'exploitation minière des métaux est responsable d'effets néfastes importants sur les écosystèmes aquatiques, en raison notamment de la contamination par les métaux lourds, l'acidification, l'accumulation de sédiments, ou encore la réduction des niveaux d'oxygène. À l'échelle mondiale (Macklin et col., 2023), 479 200 km de cours d'eau sont actuellement touchés par l'exploitation minière des métaux.

### • **Perte de biodiversité**

Les activités minières affectent la biodiversité par de nombreuses voies différentes et à toutes les échelles spatiales (site minier, paysage local, régional et mondial), directement et indirectement.

Pendant que l'exploration minière dans des zones naturelles protégées se poursuit (Sonter et col., 2023), le développement des mines se traduit par une perte directe de biodiversité en raison des phénomènes évoqués plus haut — décapage et contamination des sols, perturbation, pollution et surexploitation de la ressource en eau, etc. — et de la construction des installations de stockage, de traitement et de gestion des déchets. Avec pour conséquence une destruction des habitats naturels (sols fertiles, prairies, forêts...) et de la biodiversité qu'ils accueillent.

Plus indirectement, l'exploitation minière entraîne des activités connexes, telles que la construction de routes, le développement de l'agriculture, de l'exploitation forestière ou du braconnage,

autant d'activités qui introduisent de nouvelles menaces ou intensifient celles déjà existantes, comme les changements d'affectation des terres, la fragmentation des habitats, l'introduction d'espèces invasives... avec des impacts sur les services écosystémiques et la biodiversité.

Les zones à haute valeur écosystémique principalement touchées se localisent en Indonésie (nickel), en Australie (bauxite) et en Nouvelle-Calédonie (nickel). D'autres hotspots concernent l'exploitation du nickel aux Philippines et à Cuba, de la bauxite au Suriname, au Brésil et au Venezuela, et du fer au Brésil, en Chine et au Venezuela.

Au total, le WWF estime que le secteur minier est le quatrième facteur de déforestation dans le monde, affectant un tiers des écosystèmes forestiers mondiaux lorsque les impacts indirects sont pris en compte (WWF, 2023). À l'heure actuelle, l'exploitation minière menacerait autant d'espèces vivantes que le changement climatique (respectivement 11000 et 12000 espèces) (Sonter et col., 2023).

### • Changement climatique

L'impact de la production minière au regard du changement climatique est principalement lié à l'énorme quantité de combustibles fossiles requise pour l'utilisation d'équipements lourds et la production d'électricité. Les émissions de gaz à effet de serre associées à la production primaire de minéraux et de métaux représentaient environ 10% des émissions mondiales totales liées à l'énergie en 2018 (Azadi, 2020). Les activités minières contribuent également au changement climatique à travers la déforestation, la dégradation des écosystèmes et l'utilisation de produits chimiques à forte teneur en carbone.

La production de silicium est celle qui a le plus fort impact sur le changement climatique par tonne produite, principalement en raison de la grande quantité d'énergie nécessaire à la transformation du quartz de faible qualité en silicium de haute qualité. En valeur absolue, outre l'acier, la production de silicium, de cuivre et de nickel apparaît comme la plus émettrice de gaz à effet de serre.

## **Focus** Les risques liés aux bassins de rétentions des résidus miniers

«À l'échelle mondiale l'industrie minière est le plus important producteur industriel de déchets solides liquides et gazeux au monde», rappelle Célia Izoard. S'agissant des stériles, «s'ils sont trop pauvres pour être exploités, ils n'en contiennent pas moins des substances qui, une fois au contact de l'air et de l'eau, produisent des liquides acides et une diffusion de métaux toxiques dans les environs», souligne-t-elle.

Surtout, les parcs à résidus représentent un risque direct de dissémination de substances toxiques dans les sols et dans les eaux parce qu'il est difficile, sinon impossible, de les rendre parfaitement et durablement étanches, mais aussi parce que les accidents ne sont pas rares.

Figurant parmi les plus grands ouvrages de la planète, les bassins de résidus miniers sont censés assurer une solution de stockage à long terme pour contenir des polluants qui resteront actifs pendant des milliers d'années, à défaut d'autres solutions valables de traitement des déchets miniers.

À la différence des barrages hydroélectriques, conçus en béton pour retenir une quantité précise d'eau, les digues minières contiennent des matières bien plus dangereuses et sont pourtant construites à moindres coûts et progressivement agrandies et surélevées au cours de l'exploitation.

Alors qu'une étude indique que plus de 50 ruptures de barrages miniers ont eu lieu depuis le début du 21<sup>e</sup> siècle (Ineris, 2022), Célia Izoard revient sur plusieurs catastrophes récentes, dont celle qui a touché l'Andalousie en avril 1998.

Le barrage de la mine d'Aznalcollar s'est rompu et a déversé 7 millions de tonnes d'effluents miniers acides à forte teneur en métaux lourds dans les cours d'eau Rio Agrío et du Guadiamar. Parcourant 62 km le long, les boues ont contaminé 7 000 hectares de pâturage et de marécage et 3 500 de culture, et tué des populations entières de poissons d'oiseaux, de chevaux et de chèvres.

Pour Célia Izoard, il y a urgence à questionner le devenir de ces ouvrages face aux aléas induits par le changement climatique : « Comment assurer la sécurité de ces immenses barrages de déchets face à des pluies diluviennes ou des cyclones ? Comment des régions entières pourront-elles faire face à la sécheresse si les eaux souterraines et de surfaces ont été contaminées par les résidus toxiques ? ».

# COMMENT LIMITER LA CONSOMMATION DE MATIÈRES LIÉE À L'ÉLECTRIFICATION DU PARC AUTOMOBILE ?

## Un impératif de souveraineté et de soutenabilité : minimiser la consommation de matières liée à la transition énergétique

Si la transition énergétique peut contribuer à réduire la dépendance de la France et de l'Europe aux importations de combustibles fossiles, cela pourrait être cependant au prix d'une dépendance accrue aux importations de matières minérales et de risques d'approvisionnement exacerbés (Hache et col., 2021 ; Bonnet et col., 2022).

Les enjeux de sécurisation de l'accès aux matières premières critiques figurent ainsi en bonne place de l'agenda politique en France et à l'échelle européenne. Toutefois, comme le soulignent certains, cela ne saurait suffire et la réduction de la consommation de ressources doit être considérée désormais comme un levier géopolitique à part entière pour faire face aux vulnérabilités liées aux dépendances économiques (Hache, 2024).

La question de la maîtrise des consommations de matières pour la transition énergétique prend en outre une dimension éthique pour l'Europe. Elle est en effet la région du monde comptant le moins de mines actives (Macklin et col., 2023), tout en affichant des stocks de métaux en usage par habitant parmi les plus élevés au monde (Watari et Yokoi, 2021).

En d'autres termes, l'Europe tend à s'accaparer les ressources métalliques mondiales tout en laissant à d'autres pays, bien souvent en retard de développement, le poids du fardeau écologique induit par l'extraction et la transformation de ces métaux. Ce qui soulève une question de taille : « Quand ces pays pauvres auront le niveau économique suffisant pour envisager la construction de leur infrastructure énergétique décarbonée, auront-ils accès à la ressource de qualité nécessaire, ou sera-t-elle entièrement immobilisée dans l'infrastructure bâtie plus tôt dans les pays riches ? » (Bonhomme et col., 2024).

# Poser un nouveau préalable : dimensionner le niveau minimum (plancher social) et maximum (plafond environnemental) de l'extraction de matières

Dans le contexte de la crise environnementale mondiale, un principe clé devrait s'imposer désormais : l'apport de matière première est principalement limité non pas par la disponibilité physique ou géopolitique des ressources, mais par la nécessité de limiter l'extraction et l'utilisation des matières en raison des impacts environnementaux qui en résultent (Desing et col., 2020).

L'urgence désormais est de donner des limites physiques au système économique de manière à l'inscrire sur une trajectoire soutenable au regard des limites planétaires – ces 9 grands mécanismes de régulation qui conditionnent la stabilité du système Terre (CGDD, 2023 ; Boutaud et Gondran, 2020).

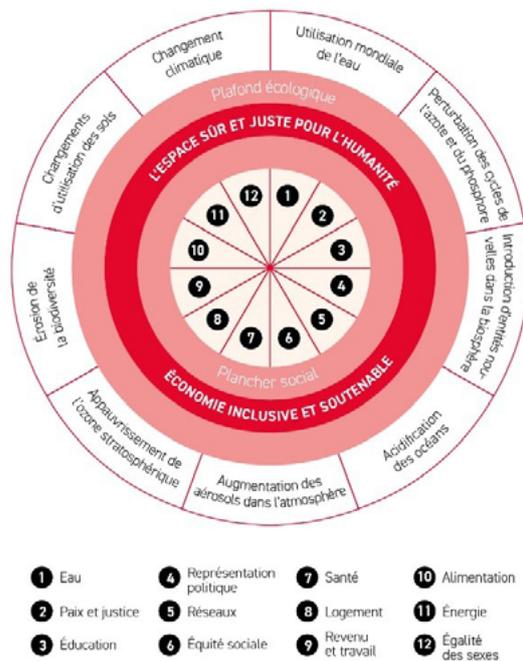
Parce que l'ampleur et la nature des flux de prélèvements de ressources (combustibles fossiles, métaux, minéraux non métalliques, biomasse, eau...) dans l'environnement détermine le rythme d'épuisement des ressources, l'étendue de l'artificialisation des espaces naturels et l'ampleur des rejets dans les milieux (gaz à effet de serre, déchets, polluants, etc.), la définition de plafonds d'extraction de matières premières est devenue un préalable nécessaire pour assurer la soutenabilité des modes de production et de consommation (Chabanel, 2023).

Mais définir un plafond d'extraction ne suffit pas. Tout l'enjeu est de concilier respect des limites planétaires et satisfaction des besoins essentiels de chacun à l'échelle mondiale (Gupta et col., 2024). L'économiste britannique Kate Raworth a proposé une manière simple de représenter ce double impératif de prospérité et de soutenabilité à travers le concept d'économie du donut (Raworth, 2018). Celui-ci permet d'articuler deux limites à ne pas franchir pour délimiter « a safe and just space for humanity » :

- La frontière « intérieure » du donut constitue le « fondement social », c'est-à-dire les besoins humains fondamentaux à satisfaire pour chacun ;
- La frontière « extérieure » du donut représente le « plafond écologique », c'est-à-dire les limites planétaires à ne pas dépasser pour préserver l'habitabilité de la planète.

## LE CONCEPT DU DONUT DÉFINISSANT UNE ESPACE SÛR ET JUSTE POUR L'HUMANITÉ

Source : UTOPIES à partir de Raworth, 2018.



Comment appliquer concrètement ce cadre d'analyse à l'extraction de matières minérales ? L'association Negawatt propose une initiative pionnière pour nourrir le débat public en France et en Europe à travers le projet « Minimal ». Il vise à définir un « corridor de consommation juste et soutenable » pour huit métaux clés pour la transition énergétique et dont l'extraction est particulièrement préjudiciable pour l'environnement : lithium, cuivre, cobalt, néodyme, fer, aluminium, nickel, or.

Une première étude portant sur le lithium établit ainsi «un plancher, représentant le minimum social en termes d'accès au lithium pour garantir des conditions de vie décentes, et un plafond correspondant au budget écologique d'extraction du lithium au-delà duquel le risque d'atteinte aux limites planétaires est élevé».

Portant essentiellement sur les batteries de véhicules électriques et hybrides, l'évaluation du besoin minimum de lithium se base sur la littérature scientifique sur les *Decent Living Standards* (niveaux de vie décents) pour définir un besoin minimum de déplacement individuel (en kilomètres par personne et par an) et de fret de marchandises par personne (en tonne-kilomètre par personne et par an).

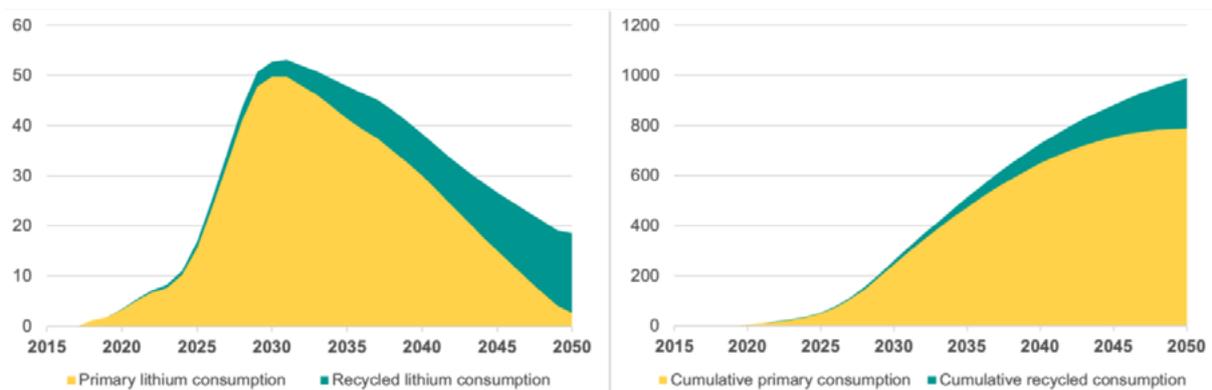
Les hypothèses retenues sont les suivantes : un niveau de mobilité de 8000 kilomètres par habitant en Europe en 2050 (tous modes de transport confondus), soit une réduction de 38% par rapport à 2018 ; un taux d'occupation des véhicules qui progresserait de 184% sur la période ; 100% des véhicules légers vendus à l'horizon 2035 sont électriques (suivant la réglementation européenne) et présentent des batteries dont la capacité moyenne est légèrement inférieure à la moyenne actuelle ; la moitié des véhicules lourds (poids lourds, camions, bus et cars) seront électrifiés et munis de batteries d'ici 2050 ; 100% des batteries usagées sont recyclées et le taux de récupération du lithium passe de 50% en 2026 à 90% en 2035.

L'ensemble de ces hypothèses sont traduites en besoin annuel de lithium d'ici 2050 grâce au modèle BAMASI (*BAttery MAterials Simulation*) développé par l'Association négaWatt. Selon ces calculs, la consommation en lithium primaire nécessaire pour répondre aux besoins minimaux de l'Europe représente 790 000 tonnes de lithium cumulées sur la période 2018-2050, soit l'équivalent de 5 années et demie de production mondiale au niveau actuel.

Pour la seule année 2050, le plancher de consommation s'élève à 3000 tonnes de lithium pour l'Europe. En raison de l'électrification rapide des véhicules neufs vendus, la demande en lithium primaire atteint un pic de consommation en 2030 avant d'atteindre des niveaux bien plus faibles en 2050. Cette diminution est aussi appuyée par un taux annuel de matière recyclée réincorporée qui augmente progressivement pour atteindre 85% en 2050.

Le plafond environnemental à la production de métaux vise quant à lui à définir, à l'image du budget carbone, un budget matière pour 2050, c'est-à-dire «un maximum de tonnes extraites par an dont la production est compatible avec les limites planétaires». Il s'agit tout d'abord d'attribuer au secteur des métaux une part des limites planétaires correspondant à sa contribution actuelle aux impacts environnementaux pesant sur chacune de ces limites.

Consommation annuelle (à gauche) et cumulée (à droite) de lithium de l'UE selon le plancher social (en milliers de tonnes)



Source : Pigneur et col., 2024.

Les travaux académiques précurseurs sur le sujet montrent que la limite planétaire la plus contraignante pour la production des métaux est le changement climatique, et en particulier l'indicateur des émissions de CO<sub>2</sub> (Desing et col., 2020).

C'est pourquoi l'étude Négawatt a fait le choix de calculer le budget matière du lithium uniquement en fonction de la limite climatique, étant entendu que le respect de cette limite permettrait de respecter les autres limites. La part des limites planétaires attribuées au secteur des métaux est ensuite ventilée par métaux en fonction de leur part dans la production totale (en tonnes) du secteur.

Une fois établi l'impact carbone unitaire (par kg) de chaque métal en analyse de cycle de vie, le niveau d'extraction maximum de chaque métal est calculé en augmentant progressivement le volume de production multiplié par l'impact unitaire jusqu'à ce que la limite planétaire sur les émissions de CO<sub>2</sub> soit dépassée. Enfin, une partie du budget matières déterminé pour chaque métal à l'échelle mondiale est attribuée à l'Union européenne en fonction de son poids dans la population mondiale.

Qu'est-ce que cela donne pour le lithium ? Un budget écologique mondial estimé à 459 000 tonnes en 2050, dont 20 000 tonnes attribuées à l'UE. Ce plafond environnemental de 20 000 tonnes est donc supérieur au plancher social de 3 000 tonnes évoqué plus haut, ce qui valide le principe de corridor de consommation de lithium. Il est en revanche plus de quatre fois inférieur à la consommation de lithium de l'Europe en 2050 (88 000 tonnes) correspondant au scénario de référence établi par l'étude négaWatt.

Il est important de noter également que le plafond environnemental est inférieur au besoin de lithium (40 500 tonnes en 2050) induit par le scénario de transition énergétique proposé par l'association Négawatt à l'échelle européenne (scénario CLEVER). Autre enseignement frappant, le budget écologique pour toutes les productions métalliques est estimé à 39,5 millions de tonnes en 2050, soit 43 fois moins que la production mondiale de métaux en 2022.

Ces limites drastiques à l'extraction de métaux posent directement la question des leviers d'action : comment inscrire l'électrification du parc automobile entre le plancher social et le plafond environnemental ?

## La sobriété automobile, premier levier de maîtrise de l'empreinte matières de l'électrification

Trois principaux leviers sont mobilisés dans les études ou les politiques publiques visant à limiter l'empreinte matières de la transition vers le véhicule électrique : l'amélioration du recyclage des batteries, la substitution des matières critiques des batteries, la sobriété des véhicules et des usages. Les lignes qui suivent se focalisent sur ces leviers, même si d'autres pistes potentielles sont évoquées par certains travaux (Desing et col., 2024 ; Le Boulzec et col., 2022) : par exemple, détourner la production primaire actuelle vers l'industrie automobile en réduisant la demande du reste de l'économie pendant la transition ; réduire les stocks existants afin d'utiliser leurs matériaux pour constituer les stocks de véhicules électriques, en particulier à partir d'infrastructures fossiles obsolètes.

Les études cherchant à évaluer la contribution des différents leviers à la réduction de l'empreinte matières de l'électrification de l'automobile amènent à un premier constat important. Si nombre d'observateurs comptent sur le recyclage pour pourvoir aux besoins de matières de l'industrie automobile électrique, son potentiel ne sera significatif toutefois qu'à partir de la décennie 2040, lorsqu'un flux important de véhicules électriques arrivera en fin de vie, et à la condition bien entendu d'optimiser la recyclabilité des batteries et de mettre en place une filière de recyclage performante (WWF, 2023). Dit autrement, le recyclage ne peut pas contribuer à la constitution initiale du stock de véhicules électriques et ne peut donc constituer un levier de réduction de l'extraction de matières à court terme (Desing et col., 2024).

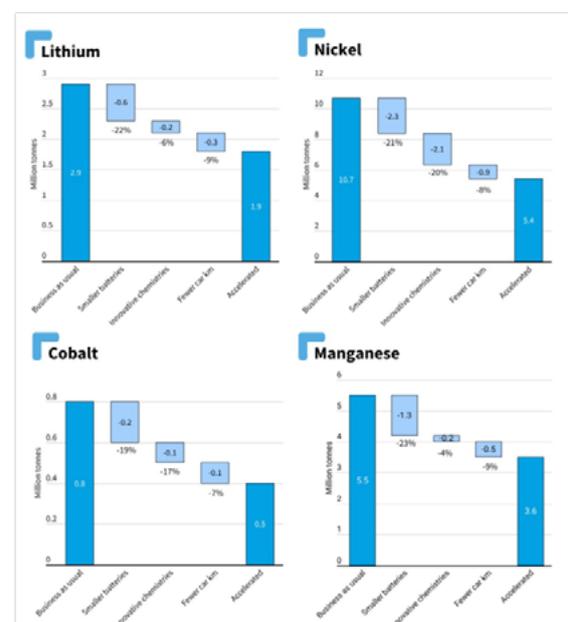
Concernant les autres leviers d'action, les enseignements de deux études sont intéressants à présenter ici. À l'échelle européenne tout d'abord, l'étude conduite par l'ONG *Transport & Environment* permet de comparer les besoins en métaux critiques (lithium, nickel, cobalt, manganèse) de trois scénarios d'électrification du transport de passager entre 2022 et 2050 (*Transport & Environment*, 2023) :

- **Scénario de référence (Business as usual) :** ce scénario est aligné avec le scénario énergétique de référence de l'UE, lequel table notamment sur le maintien de la part modale de l'automobile à un niveau élevé, l'augmentation de la capacité moyenne des batteries pour atteindre 73 kWh à partir de 2030 et une composition chimique des batteries similaire à celle observée aujourd'hui.
- **Scénario de transition accélérée :** comparativement au scénario de référence, ce scénario prévoit une réduction de la distance parcourue en voiture de 5% dans les années 2030 et de 10% dans les années 2040, un report modal vers le transport public ou les mobilités actives de 6% durant les années 2030 et de 12% durant les années 2040, une limitation de la capacité moyenne des batteries à 50 kWh d'ici 2050, ainsi qu'une plus grande part de batteries au sodium (20%), peu gourmandes en matières critiques.
- **Scénario de transition agressive :** plus ambitieux que le scénario d'accélération, il prévoit avec une réduction de 15% dans les années 2030 et de 25% dans les années 2040 de la distance parcourue en voiture, un report modal vers le transport public ou les mobilités actives de 15 % durant les années 2030 et de 30% durant les années 2040, une limitation de la capacité moyenne des batteries à 40 kWh d'ici 2050 et une part importante de batteries au sodium (40%).

Résultat des courses, le scénario de transition accélérée nécessite de fabriquer 1/3 de moins de capacité de batterie d'ici 2050 que le scénario de référence, ce qui permettrait de réduire significativement les besoins cumulés de lithium (-33%), de nickel (-44%), de cobalt (-50%) et manganèse (-33%). Le scénario agressif quant à lui diviserait par deux la fabrication de batterie, ce qui entraînerait une diminution encore plus importante de la demande en métaux critiques : lithium (-57%), nickel (-59%), cobalt (-56%), manganèse (-45%).

Mais quels paramètres des scénarios contribuent le plus à ces réductions ? Le *downsizing* des batteries apparaît comme le facteur ayant l'impact le plus important, avec une réduction de 19% de la demande en matières premières dans le scénario de transition accélérée et de 27% dans le scénario de transition agressive. Dans le scénario de transition accélérée, le moindre recours aux batteries gourmandes en matières critiques permet une réduction supplémentaire de 4 à 20%, tandis que la réduction des kilomètres parcourus en voiture particulière entraîne quant à elle une réduction de 7 à 9%.

Contribution des différents facteurs à la réduction de la demande de matières premières dans le scénario de transition accélérée



Source : Transports & Environment, 2023.

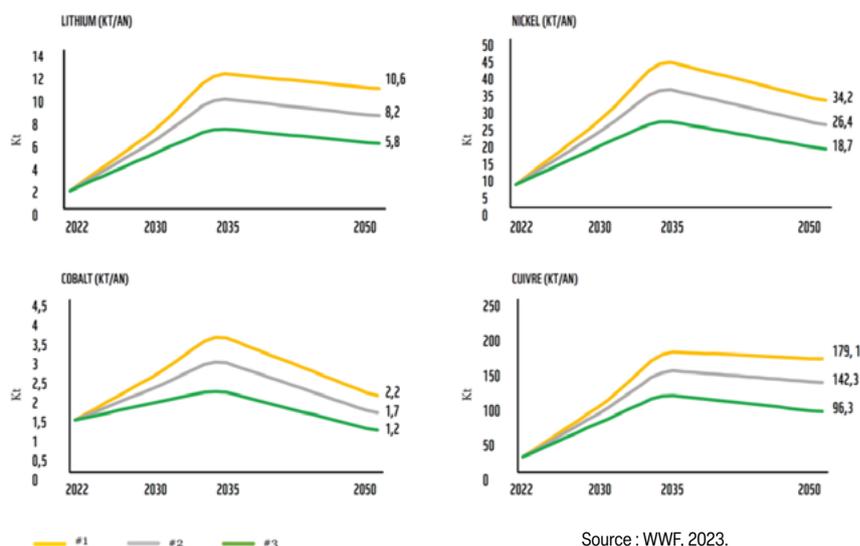
En France, une étude du WWF contribue également à démontrer l'effet levier de la sobriété (WWF, 2023). Après avoir rappelé qu'un gros SUV doté d'une batterie de 100 kWh (par exemple, Tesla Model X, Audi Q8 e-tron, Peugeot e-3008) consomme 3 fois plus de cuivre et d'aluminium et 5 fois plus de lithium, de nickel, de cobalt, de manganèse et de graphite qu'une petite citadine d'une batterie de 20 kWh (par exemple, Renault Twingo ZE), cette étude propose trois scénarios d'électrification du parc automobile sur la période 2022-2050 et en mesure les implications en termes de consommation de lithium, nickel, cobalt et cuivre :

- **Scénario #1 Laisser-Aller** : ce scénario correspond à un renoncement à toute politique publique visant à sortir de la dépendance à la voiture individuelle et à infléchir les ventes de gros véhicules. S'appuyant notamment sur le scénario tendanciel de l'exercice de prospective Transition 2050 de l'Ademe, ce scénario poursuit la tendance haussière pré-crise sanitaire de la demande de mobilité, maintient la part des déplacements automobile et voit les SUV continuer leur progression dans les ventes.
- **Scénario #2 Intermédiaire** : Poursuivant les politiques publiques actuelles, ce scénario se traduit par une stabilisation de la demande de mobilité, un léger recul de la part modale de la voiture individuelle et une part identique de SUV.

- **Scénario #3 Sobriété** : Ce scénario fait le pari de la mise en œuvre de politiques publiques volontaristes visant à sortir de la dépendance à la voiture individuelle et à orienter les ventes vers des véhicules plus petits et efficaces. La demande de mobilité diminue de 6% par rapport à celle de 2022, tandis que la part modale de la voiture particulière baisse de 10 points et le taux d'occupation des véhicules progresse sensiblement (1,8 personne à partir de 2035 contre 1,6 en 2022). Autant d'inflexions qui se traduisent par une baisse du nombre de véhicules mis sur le marché par rapport 2022 et donc un recul de la taille du parc automobile (-12% d'ici 2035 contre +11% dans le scénario 1). Enfin, la segmentation moyenne des véhicules, autrement dit leur taille, diminue, allant jusqu'à incorporer 6% de véhicules intermédiaires entre le vélo et la voiture en 2035. La part des SUV baisse et représente 20% de parts de marché à partir de 2035.

La comparaison des scénarios montre que le scénario 1 induit une multiplication par 8 du besoin annuel en batteries entre 2022 et 2035 en raison de la tendance à l'accroissement du parc automobile et de la taille des véhicules, qui induit un besoin en batteries de tailles croissantes pour satisfaire la demande en autonomie associée à l'achat de véhicules lourds.

Evolution de la demande annuelle en métaux critiques liés aux voitures électriques en France



Source : WWF, 2023.

Dans le scénario 3, la décroissance du parc automobile et de la part des gros véhicules se traduit quant à elle par une multiplication par 5 du besoin annuel en batteries. Notons également que, sur la période allant de 2035 à 2050, la demande en batteries se stabilise dans le scénario 1, caractérisé par une hausse continue des ventes de véhicules neufs, tandis qu'elle recule de 8% dans le scénario 3.

Directement corrélée à l'évolution de la quantité nécessaire de véhicules et de batteries, la demande en métaux critiques primaires et secondaires suit des tendances similaires. Comparativement au scénario 1, la demande cumulée en métaux critiques dans le scénario 3 baisse de 25 à 29% en 2030, et de 34 à 38% en 2050. Ce qui souligne là encore l'impact des leviers de sobriété sur les besoins de matières par rapport à des scénarios tendanciels. L'étude montre d'ailleurs que le levier contribuant le plus à la baisse du besoin en batterie en 2035 comparativement au scénario 1 est la réduction de la taille des véhicules (-17%), suivi par le report modal (-14%) et la réduction du besoin total de mobilité (-9%).

Cette prééminence de la sobriété dimensionnelle converge donc avec les enseignements de l'étude de T&E évoquée plus haut. Comme le résume l'étude WWF, « avec la même quantité de métaux critiques que celle utilisée pour produire une batterie de gros SUV, il est possible de fabriquer la batterie de cinq petites citadines électriques, 16 mini-voitures ou 250 vélos à assistance électrique ».

Une question se pose à la lecture de ces deux études : les scénarios de sobriété qu'elles proposent s'inscrivent-ils en deçà du plafond environnemental défini par l'association Négawatt pour le lithium ? Du côté de l'étude *Transport & Environment*, même dans le scénario agressif, le besoin annuel de lithium (environ 59000 tonnes) s'avère largement supérieur au plafond environnemental en 2050 (20000 tonnes), un écart qu'il semble difficile de combler par le seul recyclage.

Du côté de l'étude WWF, la demande annuelle en 2050 s'élève à 5800 tonnes dans le scénario 3, ce qui veut dire que la France consommerait à elle seule plus du quart du plafond environnemental européen. Ces constats semblent indiquer qu'une ambition accrue en faveur de la sobriété automobile sera nécessaire pour maintenir l'empreinte matières du véhicule électrique dans les limites planétaires.



# Conclusion

## L'urgence de repenser l'imaginaire automobile à l'heure de la sobriété

Tout indique que l'électrification de l'automobile sera sobre ou ne sera pas. Réduire l'usage, le nombre et la taille des voitures apparaît indispensable aussi bien pour maximiser le bénéfice climatique du véhicule électrique que pour rendre son prix d'achat accessible à tous les automobilistes qui demeurent dépendants de leur voiture au quotidien (Chabanel, 2025) et réduire au minimum les pressions environnementales liées aux matières premières nécessaires à la fabrication des batteries. Ajoutons à cela que les petits véhicules électriques apparaissent moins menacés par leurs équivalents importés de Chine.

Les leviers d'action pour promouvoir une sobriété automobile sont connus (Pigneur et col., 2024, WWF, 2023) :

- ▶ Sobriété d'usage : report modal par le développement des transports en commun (train, tram, bus, etc.) et des mobilités actives, arrêt des projets d'infrastructures routières, développement du télétravail, promotion du tourisme de proximité...
- ▶ Sobriété collaborative : appui développement du covoiturage et de l'autopartage, etc.
- ▶ Sobriété dimensionnelle : ajustement des réglementations, subventions et incitations financières (bonus et malus écologique notamment) pour orienter la production automobile vers la fabrication de citadines et compactes électriques non-SUV, renforcement des obligations à l'égard des flottes professionnelles pour soutenir le marché de l'occasion, amplification du dispositif de leasing social de petits véhicules électriques, etc.

Accélérer la transition vers une électromobilité sobre implique cependant de mener la bataille culturelle face à un imaginaire automobile qui demeure aux antipodes, comme le démontre un récent ouvrage publié par Léo Larivière, responsable du plaidoyer transition automobile au sein du bureau français de l'ONG et think-tank *Transport & Environment* ».

Rappelant que la publicité massive diffusée par les constructeurs automobiles depuis des dizaines d'années a propagé «l'image idéalisée d'une voiture symbole de liberté, de progrès social, de modernité» et contribué ainsi à «légitimer et rendre désirable l'un des choix collectifs les plus structurants du siècle dernier : faire de la voiture individuelle le pilier de la mobilité et de l'aménagement du territoire», il souligne qu'aujourd'hui encore, la publicité automobile continue de façonner la perception individuelle et collective de ce que doit être une voiture désirable.

À partir d'une immersion dans l'univers des marques automobiles à travers l'analyse de près de 200 films publicitaires diffusés en France entre janvier 2022 et juin 2024, Léo Larivière montre que les marques automobiles, loin de promouvoir une nouvelle vision de l'automobile qui ferait converger désirabilité et soutenabilité, continuent de *glorifier un idéal en bout de course*.

Si près de la moitié des publicités analysées encouragent le passage à la voiture électrique, les 2/3 promeuvent par ailleurs les modèles de type SUV. De même, les constructeurs continuent de promouvoir des imaginaires pour le moins contradictoires avec la nécessité d'une automobilité sobre : la liberté et l'évasion sans limites; la nouveauté technologique comme ringardisation des modèles précédents ; le désir de distinction sociale par le prestige du véhicule...

À rebours de la nécessité de créer un imaginaire positif autour de véhicules sobres accessibles à tous, «la focalisation sur les modèles surdimensionnés ou luxueux contribue à renforcer l'idée que l'électrique est réservée aux plus aisés». L'exaltation des trajets toujours plus rapides et sans limites est quant à elle par nature incompatible avec le besoin de modérer l'hypermobilité moderne» et tend à aiguïser les attentes pour des batteries de forte capacité. Les bénéfices de la transition électrique en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre sont quant à eux pratiquement absents de l'imaginaire façonné par la publicité.

Pour Léo Larivière, ce constat sans appel impose d'agir : «À défaut de mettre la force d'influence publicitaire au service de la promotion d'un univers de mobilité durable inspirant et positif, il est *a minima* nécessaire de faire en sorte qu'elle cesse de s'y opposer par la mise en place d'un système de régulation indépendant». Désormais, l'urgence est de considérer l'électrification sobre pour ce qu'elle est : un choix de société et non une simple option industrielle.

# Bibliographie

- Ademe (2023), *Perceptions et attendus du grand public à l'égard de l'électromobilité*
- Aramendia Emmanuel, Brockway Paul, Taylor Peter, Norman Jonathan (2023), *Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060*, Global Environmental Change 83 (2023)
- Aubert Alban, Zoghely Sary, Le Guennec Xavier (2024), *Les minerais dans la transition énergétique*, Direction générale du Trésor, #TrésorEco N 351, Octobre 2024
- Azadi Mehdi, Northey Stephen, Ali Saleem, Edraki Mansour (2020), *Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation*, Nature Geoscience volume 13, pages 100–104 (2020)
- Bonhomme Gérard, Treiner Jacques, Vidal Olivier (2024), *Le poids des ressources minérales dans les systèmes énergétiques*, Reflets de la Physique n°77, février 2024
- Bonnet Tanguy, Grekou Carl, Hache Emmanuel, Mignon Valérie (2022), *Métaux stratégiques : la clairvoyance chinoise*, CEPIL, La Lettre du CEPIL, n°428, juin 2022
- Boutaud Aurélien et Gondran Natacha (2020), *Les Limites planétaires*, Éditions La Découverte, mai 2020
- Carr-Wilson Savannah, Pattanayak Subhrendu, Weinthal Erika, *Critical mineral mining in the energy transition: A systematic review of environmental, social, and governance risks and opportunities*, Energy Research & Social Science 116
- Chabanel Boris (2023), *Crise écologique. Le métabolisme de l'économie au cœur des enjeux*, Métropole de Lyon, Direction de la prospective et du dialogue public
- Chabanel Boris (2025), *Neutralité carbone : pourquoi miser sur la voiture électrique ?*, Métropole de Lyon, Direction de la prospective et du dialogue public
- Chabanel Boris (2025), *Une démocratisation de la voiture électrique qui se fait attendre*, Métropole de Lyon, Direction de la prospective et du dialogue public
- Commissariat général au développement durable (2023), *La France face aux neuf limites planétaires*
- Creutzig Felix, Simoes Sofia, Leipold Sina... (2024), *Demand-side strategies key for mitigating material impacts of energy transitions*, Nature Climate Change, 14, 561–572 (2024)
- De Haes, S. and Lucas, P.L. (2024), *Environmental impacts of extraction and processing of raw materials for the energy transition*, Netherlands Environmental Assessment Agency
- De Rochette François et De Temmerman Greg (2022), *Fluxes, not stocks: the real challenges of metallic resources for the energy transition*, Zenon Research
- Desing Harald, Widmer Rolf, Bardi Ugo... (2024), *Mobilizing materials to enable a fast energy transition: A conceptual framework*, Resources, Conservation & Recycling 200 (2024)
- European Commission (2023), *Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023*
- Eyl-Mazzega Marc-Antoine et alii (2023), *Comment gagner le pari industriel de la mobilité électrique en France et en Europe ?*, Études de l'Ifri, Ifri, novembre 2023
- Gupta Joyeeta, Bai Xuemei, Liverman Diana M, Rockström Johan et alii. (2024), *A just world on a safe planet: a Lancet Planetary Health— Earth Commission report on Earth-system boundaries, translations, and transformations*, The Lancet Planetary Health Commission, Volume 8, Issue 10
- Hache Emmanuel (2024), *L'âge des puissances sobres*, Constructif n°69, novembre 2024
- Hache Emmanuel, Sokhna Gondia Seck, Barnet Charlène, Guedes Fernand, 2021. *Vers une nouvelle géopolitique des matériaux de la transition énergétique*, in *L'économie des ressources minérales et le défi de la soutenabilité 2*, ISTE Éditions, 2021
- Hu Xueyue, Wang Chunying, Elshkaki Ayman, 2024. *Material-energy Nexus: A systematic literature review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 192
- Ineris, 2022. *Mine tailings dam failures: review and assessment of the phenomenon*

- International Energy Agency, 2021. *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. World Energy Outlook Special Report
- International Energy Agency, 2021. *Minerals used in clean energy technologies compared to other power generation sources*
- International Energy Agency, 2023. *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach*, 2023 Update
- International Energy Agency, 2024. *Global Critical Minerals Outlook 2024*
- International Resource Panel — *Global Material Flows Database*
- Izoard Celia, 2024. *La Ruée minière au XXIe siècle. Enquête sur les métaux à l'ère de la transition*, Le Seuil
- Larivière Léo (2025), *Quand la publicité s'oppose à la transition écologique. Immersion dans l'univers des marques automobile*, Éditions de l'Aube
- Le Boulzec Hugo, Delannoy Louis, Andrieu Baptiste, Verzier François, Vidal Olivier and Mathye Sandrine, 2022. *Dynamic modeling of global fossil fuel infrastructure and materials needs: overcoming a lack of available data*, Applied Energy, Volume 326, 15 November 2022
- Macklin MG, Thomas CJ, Mudbhakat A, Brewer PA, Hudson-Edwards KA, Lewin J, Scussolini P, Eilander D, Lechner A, Owen J, Bird G, Kemp D and Mangalaa KR., 2023. *Impacts of metal mining on river systems: a global assessment*, Science 381
- Maus Victor, Werner Tim, 2024. *Impacts for half of the world's mining areas are undocumented*, Nature, Vol. 625
- Maus V., Giljum S, da Silva DM, Gutschlhofer J, da Rosa RP, Luckeneder S, Gass SLB, Lieber M and McCallum I., 2022. *An update on global mining land use*, Scientific Data 9 (1): 433
- Meissner S., 2021. *The Impact of Metal Mining on Global Water Stress and Regional Carrying Capacities—A GIS-Based Water Impact Assessment*. Resources 10: 120
- Nassar Nedal, Lederer Graham, Brainard Jamie, Padilla Abraham., and. Lessard Joseph 2022. *Rock-to-Metal Ratio: A Foundational Metric for Understanding Mine Wastes*, Environmental Science & Technology, 2022, 56
- Nijens Joey, Behrens Paul, Kraan Oscar, Sprecher Benjamin, Kleijn Rene, 2023. *Energy transition will require substantially less mining than the current fossil system*, Joule 7, 2403–2413, November 15, 2023
- Philibert Cédric, 2024. *Pourquoi la voiture électrique est bonne pour le climat*, Les petits matins
- Pigneur Judith, Toledano Adrien, Chatelin Stéphane, Nicolas Taillard, 2024. *Le lithium : un défi écologique majeur pour une mobilité décarbonée*, Association Négawatt, Projet Minimal
- Raworth Kate (2018), *La théorie du donut : l'économie de demain en 7 principes*, Plon
- Sonter LJ, Maron M, Bull JW, Giljum S, Luckeneder S, Maus V, McDonald-Madden E, Northey SA, Sánchez LE, Valenta R, Visconti P, Werner TT and Watson JEM. (2023). *How to fuel an energy transition with ecologically responsible mining*. Proceedings of the National Academy of Sciences 120 (35).
- Transport & Environment, 2023. *Clean and lean: Battery metals demand from electrifying passenger transport*
- United States Geological Survey, 2025. *Mineral commodity summaries 2025*
- Watari Takuma, Yokoi Ryosuke (2021), *International inequality in in-use metal stocks: What it portends for the future*, Resources Policy 70 (2021)
- WRI ,2024. *More Critical Minerals Mining Could Strain Water Supplies in Stressed Regions*
- WWF, 2023. *Métaux critiques : l'impasse des SUV*
- WWF, 2023. *Extracted forests, unearthing the role of mining-related deforestation as a driver of global deforestation*
- Zhang Chunbo, Yan Jinyue, You Fengqi (2023), *Critical metal requirement for clean energy transition: A quantitative review on the case of transportation electrification*, Advances in Applied Energy 9

Retrouvez toutes les ressources

# millenaire3.com

le site de la prospective de la Métropole de Lyon

Métropole de Lyon  
20 rue du Lac  
CS 33569 - 69505 Lyon cedex 03

**MÉTROPOLE**

**GRAND LYON**

**grandlyon.com**