



ASSOCIATION
négaWatt

Le lithium : un défi écologique majeur pour une mobilité décarbonée

Projet Minimal – 2024



Rapport réalisé avec le soutien financier de l'ADEME et d'European Climate Foundation

Association négaWatt – BP 16280 Alixan – 26958 VALENCE Cedex 9

contact@negawatt.org – www.negawatt.org



Le projet Minimal

La lutte contre le dérèglement climatique est aujourd’hui un enjeu majeur ; elle est indispensable pour maintenir les conditions de vie actuelles sur Terre. Néanmoins, aussi important qu’il soit, cet enjeu environnemental est loin d’être le seul. Effondrement de la biodiversité, pollution de l’air, de l’eau et des sols, eutrophisation des milieux aquatiques, sont autant d’autres sujets de préoccupation, souvent liés les uns aux autres. Les causes de ces phénomènes sont bien connues, de nombreuses activités humaines y contribuent, dont l’extraction minière et la métallurgie. Peut-on pour autant stopper, à court, moyen ou long terme, cette extraction ?

Pour réduire autant que possible l’élévation de température à la surface de la Terre, il est indispensable de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Or dans différents secteurs, la décarbonation des activités humaines passe par une augmentation de la consommation de ressources minières ; et donc des impacts environnementaux associés. Cet enjeu est un défi pour demain, car aujourd’hui la part de responsabilité de la transition énergétique dans l’ensemble des impacts environnementaux de l’extraction minière et de la métallurgie reste minime. Pour prendre en compte les impacts liés à l’extraction et à la métallurgie, il faut donc prendre en compte les usages des métaux dans leur ensemble et non les seuls usages liés à la transition.

Face à ces constats, quels sont les réels besoins en métaux pour assurer de bonnes conditions de vie sur terre et pour assurer la transition énergétique ? Comment prioriser les besoins pour concilier transition énergétique et réduction de l’extraction ? Et enfin, comment permettre un minimum d’équité au niveau mondial dans l’accès aux ressources minières ?

C’est à l’ensemble de ces questions, et bien d’autres, que vise à répondre le projet Minimal développé au sein de l’Association négaWatt. Ce projet va étudier en détail les évolutions possibles de production et de consommation de différents métaux clés pour la transition énergétique et/ou dont l’extraction est particulièrement préjudiciable pour l’environnement. Les métaux sélectionnés pour le projet sont :

- **des grands métaux industriels** : le cuivre, le nickel, l’aluminium et le fer sont des métaux produits en grande quantité, pour d’importantes utilisations dans nos sociétés (infrastructures, bâtiment, transport, industrie et transport d’électricité), avec des impacts tout aussi massifs.
- **des métaux produits en plus petites quantités** : le lithium, le néodyme et le cobalt, dits “petits métaux” car les quantités utilisées chaque année sont assez faibles. Il s’agit néanmoins de métaux stratégiques pour certaines applications dans la transition énergétique.
- **un métal précieux** : l’or représente un volume de production très faible, mais avec une teneur également très faible. L’extraction de l’or est donc réalisée dans de très grandes mines avec des impacts importants alors même que ce métal est majoritairement destiné à des usages non-essentiels.

Ce rapport commence donc par l’étude d’un premier métal dans le cadre du projet Minimal : le lithium.

Rédaction : Judith Pigneur, Adrien Toledano, Stéphane Chatelin, Nicolas Taillard

Contributions : Mathilde Djelali, Adrien Jacob

Relecture : Emile Balembois, Julien Dezombre, Pierre De Pasquale, Natacha Gondran, Emmanuel Hache, Jean-Philippe Hermine, Diana Huet de Guerville, Rose Rondelez, Marie Sauze, Thomas Van Nieuwenhuyse

Sommaire

Le projet Minimal.....	2
Sommaire.....	3
Liste des figures et tableaux.....	4
Contexte.....	10
Politique.....	10
Scientifique.....	10
Problématique.....	11
1. Plancher social : quels sont les besoins essentiels en lithium pour l’Europe ?.....	12
1.1. Périmètre : principal usage pris en compte pour la modélisation des besoins.....	12
1.2. Définition du minimum social.....	13
1.3. Besoin en lithium pour un scénario de minimum social en Europe.....	15
2. Plafond environnemental : budget écologique d’extraction du lithium.....	17
2.1. Pourquoi fixer un plafond à la production minière du lithium ?.....	17
2.2. Comment rester dans les limites planétaires ?.....	19
3. Discussion sur le corridor de soutenabilité.....	23
3.1. Le concept de corridor de soutenabilité est-il applicable ?.....	23
3.2 Comment se situent le scénario Clever et un scénario de référence par rapport au corridor de soutenabilité ?.....	23
3.2. Comment se situent le scénario Clever et le scénario de référence par rapport aux principaux scénarios de la littérature ?.....	27
4. Les leviers à activer pour respecter le corridor de soutenabilité.....	30
4.1. Sobriété : consommer moins de lithium.....	31
4.2. Efficacité : diminuer l’impact environnemental de la production et de la consommation de chaque tonne de lithium.....	35
4.3. Substitution écologique.....	63
Conclusions.....	69
Bibliographie.....	72
Annexe 1 : Méthodologie pour le budget écologique des métaux : hypothèses et améliorations possibles.....	76
Annexe 2 : Détails du calcul pour la production de déchets miniers aux différentes étapes de traitement du spodumène.....	79
Annexe 3 : Modèle BAMASI.....	80

Liste des figures et tableaux

<i>Figure 1 : Évolution des usages finaux du lithium dans le monde, en tonnes de lithium contenu par an (Source : traitement données USGS (4)).....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 2 : Prospective sur la demande en cellules de batteries lithium-ion (en GWh) sur la période 2022-2030 (Source : McKinsey, 2023(10)).....</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 1 : Comparaison des besoins de déplacement en kilomètres par personne et par an de quatre études majeures portant sur les niveaux de vie décents (DLS) et des scénarios de basse consommation.....</i>	<i>14</i>
<i>Tableau 2 : Principales hypothèses sur le transport considérées à 2050 lors de l'élaboration du scénario de minimum social pour l'Europe.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 3 : Demande annuelle et demande cumulée de lithium dans le cadre du scénario de minimum social pour l'UE-27 (kt).....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 4 : Les limites planétaires et les impacts de la production des métaux (Source : modifiée d'après Richardson et al. (19)).....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 3 : Modification de l'impact unitaire (UI) pour le CO2 entre 2020 et 2050 d'après le scénario "equitability first" (Source : Van der Voet et al., 2019 (31)).....</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 4 : Part du lithium dans la production mondiale de métaux, en 2022 et 2050.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 5 : Représentation schématique de la probabilité de dépassement des limites planétaires, qui résulte du chevauchement de la distribution de probabilité des impacts environnementaux avec la distribution de la limite correspondante (Source : Desing et al., 2020 (29)).....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 5 : Principales hypothèses sur le transport et les capacités de batteries du scénario Clever et du scénario de référence.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 6 : Évolution de la demande annuelle et cumulée en lithium dans le scénario de référence et dans le scénario Clever pour l'UE.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 7 : Consommation cumulée (à gauche) de lithium primaire des scénarios Clever, de référence et Minimum social et comparaison de la consommation annuelle de ces scénarios avec le corridor de soutenabilité en 2050 pour l'UE (à droite).....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 8 : Comparaison de la demande annuelle totale (primaire et secondaire) en lithium de différents scénarios pour les années 2030 (à gauche) et 2050 (à droite). La figure distingue la mobilité des passagers (en bleu clair) et le transport routier total (en bleu foncé).....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 9 : Comparaison entre différents scénarios de la part de la demande annuelle européenne en lithium primaire dans la production mondiale estimée par Wood Mackenzie.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 10 : Contributions de chaque levier à la réduction de la consommation de lithium de l'UE dans le scénario Clever comparée au scénario de référence, exprimées en pourcentage de la consommation cumulée de lithium primaire du scénario de référence entre l'année 2018 et 2050.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 11 : Illustration de la "Carbon Tunnel Vision", expression utilisée pour décrire la tendance à se concentrer exclusivement sur les émissions de gaz à effet de serre (Source : image réalisée par Konietzko (37)).....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 12 : Chaîne de production du lithium : les deux grands types d'extraction et de produits actuellement utilisés, traduit de l'IEA, 2021 (6).....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 13 : Capacité de production installée pour le lithium affiné, par produit et qualité, en 2020 dans le monde, en pourcentage massique (Source : Commission Européenne (44)).....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 6 : Définition de termes techniques liés à l'exploitation minière (Sources disponibles dans Pigneur, 2019 (46)).....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 14 : Étapes de production des déchets d'exploitation minière et de concentration (Source :Mabroum et al., 2020 (47)).....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 15 : Ratio de roches extraites par rapport au métal produit, en tonnes/tonne, échelle logarithmique (Source : IEA 2023 (3)).....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 16 : Production de déchets miniers aux différentes étapes de traitement du spodumène, en tonnes par tonne de lithium (Calculs d'après DERA, 2023 (45) et Vignes, 2024 (43)).....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 17 : Estimation de la production de stériles (en orange) et de résidus (en bleu) en bas, liés à la production de lithium (en haut) dans le monde (Source : Valenta et al., 2023 (49)).....</i>	<i>44</i>
<i>Figure 18 : Consommation d'eau apparente et part de la production dans des zones arides pour différents métaux et pour le charbon, les données pour le lithium concernent la production de saumures (Source: IEA, 2023 (3)).....</i>	<i>49</i>
<i>Figure 19 : Illustration du phénomène de rabattement de la nappe dans le Salar de Atacama. Q est le lac Quelana, SLS est le système du lac Soncor, Tb est le lac Tebenquiche et SP est le cône alluvial de San Pedro (Source : Marazuela, 2019 (61)).....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 20 : Intensité moyenne mondiale d'émissions de gaz à effet de serre le long du cycle de vie des</i>	

véhicules légers (utilitaires et particuliers) pour les véhicules électriques (EV, electric vehicles) et les véhicules thermiques (ICE, internal combustion engine) (Source : traduit de IEA, 2023 (3))..... 54

Figure 21: Intensité d'émission de gaz à effet de serre (Scope 1 et 2) pour la production du lithium (mine, concentration, traitement chimique) par type de ressource et de procédé, en tCO2eq/t LCE. Pour la saumure les valeurs sont données basées sur les données chiliennes, et pour l'extraction en roche dure sur le spodumène australien pour la mine et sur la Chine pour le traitement (Source : IEA, 2022 (6))..... 55

Figure 22 : Intensité des émissions de CO2 pour les différentes filières de production d'hydroxyde en fonction des combustibles et de la chaleur utilisés. L'étape minière n'est pas incluse. Seules les émissions directes sont considérées. (Source : IEA 2023 (3))..... 56

Figure 23 : Schéma de principe de la collecte, du recyclage des batteries Li-ion, ainsi que du taux de récupération et du contenu recyclé en lithium (Source : élaboration propre)..... 58

Tableau 7 : Comparaison des objectifs de l'Union européenne et des hypothèses du scénario Clever en termes de collecte, recyclage des batteries Li-ion, ainsi que du recyclage et de la valorisation du lithium dans les procédés de traitement. (Sources : élaboration propre à partir des données négaWatt et celles de la réglementation européenne de 2023 (18))..... 61

Figure 24 : Quantités (kg) de lithium et d'autres métaux par kWh de capacité de batterie pour différentes technologies en 2022 (Source : Calculs à partir des données du modèle BatPaC 5.1 (79))..... 66

Figure 25 : Évolution des combinaisons de technologies envisagées dans le modèle BAMASI jusqu'en 2050 au sein de l'UE-27..... 67

Figure 26 : Évolution de la teneur moyenne en lithium par kWh de capacité de batterie jusqu'en 2050 retenue pour la modélisation BAMASI (Source : Calculs à partir des données du modèle BatPac 5.1 (79))..... 68

Abréviations et glossaire

Li ₂ CO ₃	Carbonate de lithium.
LiOH·H ₂ O	Hydroxyde de lithium monohydraté, parfois on parle abusivement de LiOH ou hydroxyde de lithium par souci de simplification, mais dans les conditions ambiantes (et donc dans les échanges commerciaux) le produit est bien sous forme de LiOH·H ₂ O
CRMA	<p>Le règlement européen sur les matières premières critiques (Critical Raw Materials Act, CRMA) vise à réduire la dépendance de l'UE à l'égard des pays tiers.</p> <p>La législation établit une liste de 17 matières premières stratégiques, ainsi qu'une liste élargie de 34 matières premières critiques et fixe des objectifs pour l'approvisionnement en matières premières stratégiques.</p> <p>Le lithium fait partie de ces deux listes.</p> <p>Le règlement est entré en vigueur le 18 mars 2024.</p>
GES	Gaz à effet de serre.
DLE	<i>Direct Lithium Extraction</i> , extraction directe du lithium.
Véhicules légers	Cette catégorie correspond à la catégorie LDV (<i>light duty vehicle</i>) de l'IEA et comprend les voitures particulières et les véhicules utilitaires légers (par exemple, les camionnettes et les fourgonnettes de livraison) et se réfère aux véhicules dont le poids est inférieur à 4 500 kg, ainsi que les deux roues.
Véhicules lourds	Poids lourds, bus, cars.
NORM	<i>Natural-Occurring Radioactive Materials</i> , matériaux contenant des radioéléments d'origine naturelle.
IEA ou AIE	<i>International Energy Agency</i> . L'Agence internationale de l'énergie est une organisation internationale fondée à l'OCDE en 1974, basée à Paris.
LCE	<i>Lithium Carbonate Equivalent</i> , équivalent en tonne de carbonate de lithium.
DCE	Directive cadre sur l'eau.
DERA	Agence allemande des ressources minérales.
UE	Union Européenne.

<p>Les limites planétaires</p>	<p>Le concept des limites planétaires cherche à garantir l’habitabilité du système Terre : le franchissement des limites augmente le risque de provoquer des changements environnementaux brusques ou irréversibles à grande échelle. Des changements radicaux ne se produiront pas nécessairement du jour au lendemain, mais ensemble, les limites définies marquent un seuil critique d’augmentation des risques pour les personnes et les écosystèmes. Les limites sont des processus interdépendants au sein du système biophysique complexe de la Terre. https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html</p>
<p>Corridor de soutenabilité</p>	<p>Proposition pour définir un espace de fonctionnement sûr et juste (au sens de la théorie du Doughnut de Kate Raworth) en termes de consommation du lithium par an. Ce corridor de soutenabilité est défini par la différence de niveau de consommation du lithium entre un plancher social, appelé trajectoire de minimum social, en dessous duquel il ne faut pas descendre au risque de ne plus pouvoir aux besoins essentiels, et un plafond environnemental, appelé budget écologique d’extraction du lithium, définissant la consommation au-delà de laquelle un risque est pris de porter atteinte aux limites planétaires.</p>
<p>SOH</p>	<p>“<i>State Of Health</i>” en anglais correspond à l’état de santé de la batterie évalué en pourcentage (%) de la capacité initiale de la batterie (en kWh). Cet indicateur mesure ainsi la perte de capacité de la batterie.</p>
<p>BAMASI</p>	<p>BAMASI pour “<i>BAttery MAterials Simulation</i>”. Modèle de parc de véhicules développé par l’Association négaWatt permettant d’évaluer l’empreinte matière d’un scénario de transition du secteur du transport routier. Son fonctionnement est décrit dans l’Annexe 4.</p>
<p>ADEME</p>	<p>L’Agence de l’environnement et de la maîtrise de l’énergie (Ademe) est un établissement public à caractère industriel et commercial français créé en 1991. Elle affiche également le nom d’« Agence de la transition écologique ».</p>
<p>JRC</p>	<p>“<i>Joint Research Centre</i>” en anglais. Centre commun de recherche de la Commission européenne fournissant des connaissances et des données scientifiques indépendantes, soutenant les politiques de l’Union Européenne.</p>
<p>T&E</p>	<p>La Fédération européenne pour le transport et l’environnement, connue aussi sous le nom de Transport et Environnement (avec pour acronyme T&E), est une organisation européenne regroupant une cinquantaine d’organisations non gouvernementales actives dans le domaine du transport et de l’environnement.</p>
<p>PIB</p>	<p>Produit intérieur brut</p>
<p>CO₂</p>	<p>Dioxyde de carbone. Gaz à effet de serre majeur.</p>
<p>GW</p>	<p>Gigawatt. Unité de puissance correspondant à un milliard de watts.</p>
<p>kWh</p>	<p>Kilowatt-heure. Unité de mesure de l’énergie correspondant à mille watt-heures.</p>

<p>kWh/hab/an</p>	<p>Kilowatt-heure par habitant et par an.</p>
<p>DLS</p>	<p>Les DLS (<i>Decent Living Standards</i>) ou niveaux de vie décents sont définis par un corpus de littérature académique se penchant sur la définition des besoins fondamentaux jugés essentiels pour mener une vie décente. Ils couvrent la nutrition, le logement, l'éducation, la santé, et l'énergie, etc. Dans la présente étude, le besoin minimum en lithium est défini en se basant sur des études s'ancrant dans ce corpus des DLS et proposant un besoin minimum de déplacement par personne (en kilomètres par personne et par an). Ce besoin est ensuite traduit en besoin en lithium comme l'explique la partie 1.</p>
<p>TRL</p>	<p>L'échelle TRL (en anglais <i>Technology Readiness Level</i>, qui peut se traduire par niveau de maturité technologique) est un système de mesure employé pour évaluer le niveau de maturité d'une technologie (matériel, composants, périphériques, etc.), notamment en vue de financer la recherche et son développement ou dans la perspective d'intégrer cette technologie dans un système ou un sous-système opérationnel.</p>
<p>UNEP ou PNUE</p>	<p>Le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE, <i>UNEP</i> en anglais) est une organisation dépendante de l'Organisation des Nations unies et ayant pour but de coordonner les activités des Nations unies dans le domaine de l'environnement et d'assister les pays dans la mise en œuvre de politiques environnementales. Depuis que la notion de développement durable a été forgée, le PNUE a cherché à intégrer la problématique environnementale dans des politiques plus globales de développement durable.</p>
<p>Production primaire et secondaire</p>	<p>La production primaire est la production issue de l'extraction minière par opposition à la production secondaire issue du recyclage. Par extension, la consommation de lithium primaire est la consommation de lithium issue de l'extraction minière.</p>
<p>CLEVER</p>	<p>CLEVER (a Collaborative Low Energy Vision for the European Region) est un scénario proposant une voie de décarbonisation ambitieuse et réaliste pour l'Europe. Il a été élaboré selon une approche « bottom-up » qui part des trajectoires nationales élaborées par 26 partenaires nationaux (dont l'Association négaWatt) issus du monde académique, de la recherche ou de la société civile. Le scénario présente une voie qui concilie les impératifs de climat et de durabilité à long terme avec les contraintes de sécurité énergétique à court terme et la faisabilité pratique d'une telle transformation. Une note sectorielle sur la mobilité est disponible sur le site du projet. Dans le présent rapport, afin de respecter la réglementation européenne sur la fin des ventes de véhicules thermiques légers en 2035, la répartition des ventes de véhicules utilitaires légers dans le scénario CLEVER a été modifiée et ne prend désormais en compte que les véhicules électriques et exclut les véhicules fonctionnant au bio-GNV.</p>
<p>GIER ou IRP</p>	<p>Le Groupe international d'experts sur les ressources (IRP, en anglais <i>International Resource Panel</i>) est un groupe d'experts scientifiques indépendant créé en 2007 par l'ONU pour aider les pays à utiliser les ressources naturelles de manière durable et soutenable, c'est-à-dire sans compromettre les besoins humains présents et futurs. Il est hébergé par le PNUE.</p>

<p>NMC</p>	<p>Technologie de batterie lithium-ion couramment utilisée contenant du nickel, du manganèse et du cobalt.</p>
<p>LFP/LFMP</p>	<p>Technologie de batterie lithium-ion contenant du lithium, du fer et du phosphate. Cette technologie contient plus de lithium que les NMC et pas de cobalt ni de nickel. La technologie LMFP contient également du manganèse.</p>
<p>LMO</p>	<p>Technologie de batterie lithium-ion contenant du lithium et de l'oxyde de manganèse. Cette technologie contient plus de lithium que les NMC et pas de cobalt.</p>
<p>NCA</p>	<p>Technologie de batterie lithium-ion contenant du nickel, du cobalt et de l'aluminium.</p>

Contexte

Politique

La mobilité électrique est devenue un enjeu primordial pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. À l'échelle mondiale, des politiques émergentes favorisent cette transition vers des modes de transport plus durables. C'est le cas en Europe, avec le programme "Fit for 55" qui se fixe pour objectif de réduire de 55% les émissions de gaz à effet de serre et introduit en 2035 l'interdiction de la vente des véhicules à moteur à combustion interne dans l'Union Européenne (UE). Mais aussi aux États-Unis avec l'*Inflation Reduction Act*, qui encourage des pratiques plus durables. Ou encore en Inde avec le programme "*Faster Adoption and Manufacture of Hybrid and Electric Vehicles Scheme*", qui encourage l'adoption de véhicules hybrides et électriques. Cette mobilité décarbonée passe inévitablement par une évolution des motorisations, qui va nécessiter l'emploi de davantage de ressources minérales (lithium en particulier).

Pour ces dernières, malgré les efforts politiques réalisés ces dernières années pour sécuriser les approvisionnements, la stratégie industrielle européenne a échoué à prendre en compte des solutions axées sur la consommation et à assurer le maintien de normes environnementales élevées pour les projets d'extraction. Pourtant, il existe un enjeu majeur à montrer que la transition énergétique peut être menée sans compromettre les droits humains, le respect de l'environnement¹ et en assurant une équité dans l'organisation des chaînes de valeurs à l'international. Une stratégie industrielle ambitieuse sur le plan environnemental et social permettrait seule un développement véritablement soutenable.

Scientifique

Pour certains métaux, ce n'est pas la transition énergétique qui entraîne une augmentation de la demande et il faut chercher ailleurs les causes de l'augmentation des impacts environnementaux. Cependant, l'augmentation des besoins en lithium pour l'électrification des transports est réel. En effet, si ce rapport se penche sur les impacts de la production du lithium et donc indirectement, sur les impacts associés à cette électrification, c'est pour pouvoir proposer la transition la plus soutenable et la plus réaliste possible. Cependant, il faut rappeler que la volonté de décarboner les modes de transports est nécessaire et incontournable dans un monde où **les carburants fossiles utilisés pour les véhicules des particuliers représentaient 10% des émissions mondiales de CO₂ d'origine énergétique en 2018 (1,2)**. Un autre rappel incontournable est que **les véhicules électriques sont plus performants d'un point de vue climatique que les véhicules thermiques alimentés en énergie fossile (3)**. Cette performance est amenée à s'améliorer avec la décarbonation des mix électriques, mais aujourd'hui leur performance est déjà meilleure.

L'électrification des transports n'est pas le seul levier à activer. Il doit impérativement être accompagné de mesures permettant de réduire le trafic routier, notamment grâce au développement d'alternatives, ce que proposent les différents scénarios de l'Association négaWatt. Néanmoins, il serait irréaliste d'envisager de se passer du jour au lendemain de la voiture, qui est de loin le mode de déplacement le plus utilisé au sein de l'UE. L'aménagement du territoire ne le permet pas, sans parler des profondes évolutions de nos modes de vie que cela engendrerait. Les véhicules électriques semblent donc incontournables à court terme. Pour autant, l'extraction minière est responsable d'impacts environnementaux et sociaux importants qui ne peuvent être ignorés. Pour le lithium ces impacts sont réels – et s'ils ne représentent à l'heure actuelle qu'une faible part des impacts de l'extraction et de la métallurgie – cela risque de changer demain avec la croissance annoncée de la production et de la consommation de ce métal, et un changement important de la nature de l'extraction à venir avec l'exploitation de nouveaux types de gisements.

¹En juillet 2022, l'ONU a reconnu un droit humain « à un environnement propre, sain et durable », établissant un lien entre le respect de l'environnement et le respect des droits humains.

Problématique

Dès lors, comment peut-on s'assurer que les trajectoires proposées permettent à la fois d'assurer les besoins les plus essentiels, ainsi que la transition énergétique, tout en respectant les limites planétaires ? Comment tracer une voie permettant de mettre en œuvre la transition énergétique en maintenant un haut niveau d'exigence environnementale ?

Pour répondre à ces questions, une proposition est formulée dans ce rapport pour établir **un corridor de soutenabilité** définissant un espace sûr et juste en termes de consommation du lithium par an. Ce corridor de soutenabilité est défini par les différentes valeurs possibles de consommation du lithium entre un plancher social et un plafond environnemental. **Ce plancher social est décrit sous la forme d'une trajectoire entre 2015 et 2050**, qui définit **un minimum social de besoin en lithium** par an pour pouvoir assurer nos déplacements. Il s'agit d'un minimum social en dessous duquel il ne faut pas descendre au risque de ne plus pouvoir aux besoins essentiels. Le plafond environnemental est appelé **budget écologique d'extraction du lithium**, et permet d'établir la consommation au-delà de laquelle un risque est pris de porter atteinte aux limites planétaires. Dans ce rapport, le plafond environnemental est uniquement déterminé pour l'année 2050.

Ensuite, le rapport détaillera les leviers pour rester dans ce corridor de soutenabilité. Il s'agit de montrer comment mettre en œuvre une stratégie **de sobriété, d'efficacité et de substitution écologique pour le lithium** présent dans les batteries, afin de maintenir la consommation de l'UE dans ce corridor.

1. Plancher social : quels sont les besoins essentiels en lithium pour l’Europe ?

Ce rapport formule une proposition pour établir un corridor de soutenabilité définissant un espace sûr et juste en termes de consommation du lithium par an afin de permettre d’assurer les besoins les plus essentiels en lithium tout en respectant les limites planétaires. Ce corridor de soutenabilité est défini par les valeurs possibles de consommation du lithium entre un plancher social et par un plafond environnemental, appelé budget écologique d’extraction du lithium, définissant la consommation au-delà de laquelle un risque est pris de porter atteinte aux limites planétaires.

Dans cette première partie est détaillé le concept de plancher social, sous la forme d’une **trajectoire**, qui définit un minimum social de besoin en lithium par an entre 2015 et 2050 pour pouvoir assurer nos déplacements. Il s’agit donc de discuter de la question **des besoins essentiels en lithium**. Cette partie propose une définition du **plancher social en dessous duquel il ne semble pas souhaitable de descendre. Il ne s’agit donc pas d’un objectif à atteindre** en termes de consommation. La définition d’une trajectoire souhaitable sera discutée dans la partie 3 du rapport.

1.1. Périmètre : principal usage pris en compte pour la modélisation des besoins

La consommation de lithium a été multipliée par 4,5 au cours des huit dernières années en raison de l’explosion de son utilisation dans les batteries (voir Figure 1). Si l’usage du lithium dans les batteries ne représentait que 39 % de la consommation de ce métal dans le monde en 2016, il représente aujourd’hui environ 90 % des usages (4).

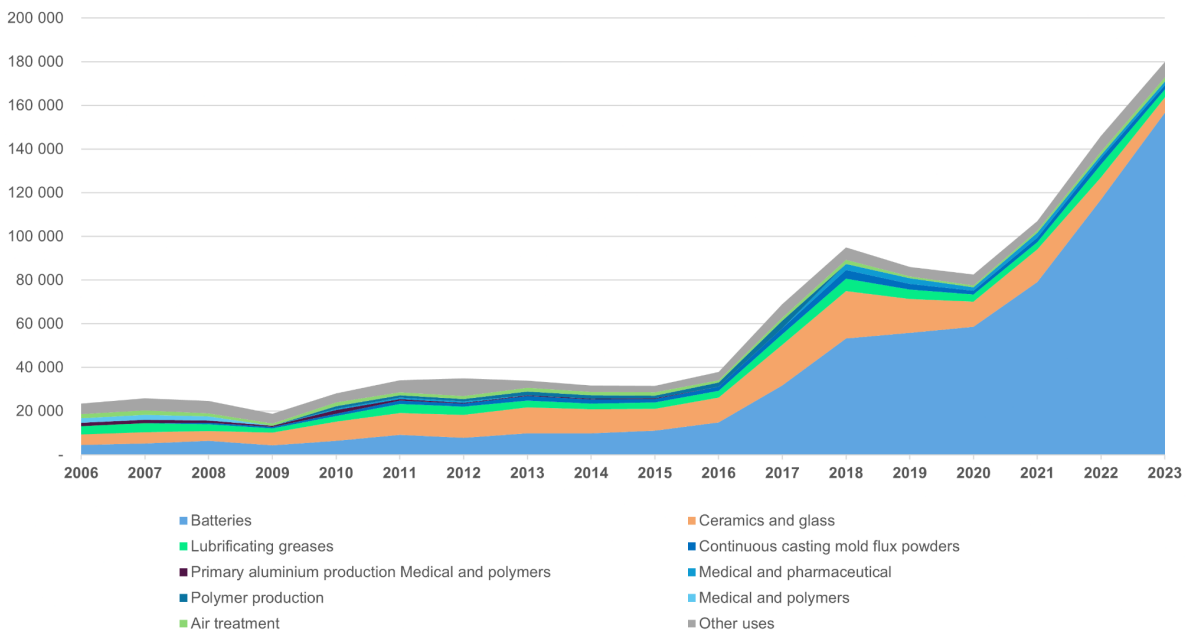


Figure 1 : Évolution des usages finaux du lithium dans le monde, en tonnes de lithium contenu par an (Source : traitement données USGS (4))

Les batteries au lithium sont utilisées dans le secteur de l’électronique au sein des appareils portatifs (smartphones et ordinateurs portables, par exemple), dans le secteur énergétique et industriel pour le stockage stationnaire et dans le secteur des transports pour la mobilité électrique. La mobilité représentait

en 2020 plus de 80 % du lithium utilisé dans les batteries (5), l'électronique représentant 15 %, et le stockage stationnaire moins de 5 %. Dans les décennies à venir, la proportion du lithium utilisée dans la mobilité électrique et hybride est appelée à devenir encore plus fortement majoritaire selon un large éventail de scénarios à l'échelle mondiale, européenne et française : IEA, 2022 (6) ; JRC, 2023 (7) ; Eurométaux, 2022 (8) ; négaWatt, 2022 (9). La Figure 2 ci-dessous souligne ces perspectives de renforcement de la demande en cellule de batterie au lithium sur la période 2022-2030.

C'est pourquoi, concernant l'étude des besoins en lithium, ce rapport se concentrera essentiellement sur l'usage du lithium dans les batteries de véhicules électriques et hybrides.

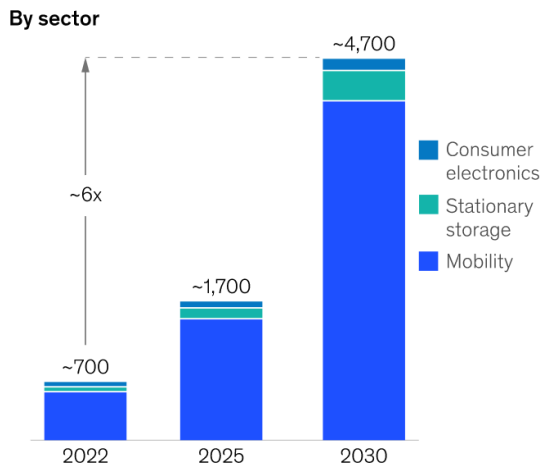


Figure 2 : Prospective sur la demande en cellules de batteries lithium-ion (en GWh) sur la période 2022-2030 (Source : McKinsey, 2023(10))

Conjuguer extraction soutenable de lithium et transition énergétique signifie donc avant tout répondre aux besoins essentiels de ce métal pour électrifier les transports – la présente étude se concentrera donc sur cet usage. Mais quels sont ces besoins essentiels ? Comment les définir ?

1.2. Définition du minimum social

L'évaluation du besoin en lithium pour répondre à un minimum social en Europe repose sur les besoins de mobilité et de fret minimaux tels que définis dans la littérature scientifique par un corpus de littérature académique portant sur les DLS (*Decent Living Standards*) ou niveaux de vie décents. Cette littérature se penche en effet sur la définition des besoins fondamentaux jugés essentiels pour mener une vie décente. Ces besoins couvrent la nutrition, le logement, l'éducation, la santé, et l'énergie, etc. Dans la présente étude, le besoin minimum en lithium est défini en se basant sur des études proposant un besoin minimum de déplacement par personne (en kilomètres par personne et par an) basé sur les DLS et par des scénarios de basse consommation, besoin qui est ensuite traduit en besoin matériel.

Quatre études (11-14) proposent un minimum de mobilité par personne (en kilomètres par personne et par an), tous modes confondus, afin de répondre aux besoins essentiels en déplacement. Ce minimum intègre différents paramètres comme par exemple la répartition urbain/rural au sein d'un territoire (12). Il permet à chacun de se déplacer pour se rendre à son lieu de travail, acheter de la nourriture, se soigner, etc. Les minimums de mobilité tels que définis par ces quatre études sont présentés dans le Tableau 1. Millward-Hopkins et ses collaborateurs définissent, en plus de ce minimum de mobilité par personne, une répartition entre les différents modes de transports correspondant à ce besoin minimum de déplacement dans une variante dite de "basse consommation" et proposent des taux d'occupation des voitures. Les auteurs définissent également un besoin minimum de fret de marchandises en tonnes-kilomètres *per capita*.

	Millward-Hopkins (2020) fourchette monde	Millward-Hopkins (2020) ratio européen urbain/rural	Rao et al. (2019)	Grubler et al. (2018)	Kikstra et al. (2021)
Besoin de déplacement en kilomètres par personne et par an	4 900 - 15 000	6 156	10 000	9 544 - 17 117	8 274

Tableau 1 : Comparaison des besoins de déplacement en kilomètres par personne et par an de quatre études majeures portant sur les niveaux de vie décents (DLS) et des scénarios de basse consommation

Le niveau de mobilité retenu ici pour l'évaluation du besoin minimum social de lithium en Europe est de 8 000 kilomètres par habitant (tous modes de transport confondus) ; c'est une valeur intermédiaire des différentes études connues. Les autres paramètres permettant l'évaluation du besoin matière minimum (comme le taux d'occupation des voitures ou la part de mobilités actives) ont été principalement définis sur la base de l'étude de Millward-Hopkins (2020) qui détaille finement les hypothèses retenues, et complétés lors d'échanges entre prospectivistes français et européens. Le Tableau 2 synthétise les principales hypothèses retenues à l'horizon 2050. Afin de construire un scénario sur la période 2018-2050, des tendances linéaires entre les niveaux historiques et les niveaux prospectifs ont été appliquées de façon à progressivement tendre vers un niveau de déplacement répondant uniquement aux besoins essentiels. Concernant les ventes de véhicules neufs, le scénario intègre l'hypothèse que 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. De plus, le scénario intègre l'hypothèse que la moitié des véhicules lourds (poids lourds, camions, bus et cars) seront électrifiés et munis de batteries d'ici 2050 (l'autre moitié étant réservée à d'autres technologies décarbonées telles que le bioGNV ou les piles à combustibles à hydrogène). L'ensemble de ces hypothèses de transport sont traduites en besoin annuel de lithium d'ici 2050 grâce au modèle de parc BAMASI² ("BAttery MAterials Simulation") développé par l'Association négaWatt.

Indicateur	Unité	Type de véhicule	Scénario Minimum à 2050	Index 2018=100%
Besoin de déplacement	km per capita	Total	8.000	62%
Besoin de déplacement	km per capita	Voiture particulière	3.891	41%
Taux d'occupation	personnes par véhicule	Voiture particulière	3	184%
Besoin de déplacement	km per capita	Bus et cars	1.024	91%
Besoin de déplacement	km per capita	Deux roues motorisées	205	84%
Besoin de fret	tonnes per capita	Véhicules utilitaires	174	77%
Besoin de fret	tonnes per capita	Poids lourds et camions	1.495	38%

Tableau 2 : Principales hypothèses sur le transport considérées à 2050 lors de l'élaboration du scénario de minimum social pour l'Europe

² Le fonctionnement du modèle BAMASI est brièvement décrit dans l'Annexe 3.

Le besoin minimum en lithium pour le secteur des **appareils électroniques**, bien que minoritaire par rapport au secteur des transports, peut être défini à partir d'une approche similaire en se basant sur les standards de vie décents. Vélez-Henao & Pauliuk (15) proposent 0,83 smartphone par habitant et par an et 0,25 ordinateur portable par habitant et par an afin de répondre aux besoins minimaux de communication. Cela représenterait environ 0,04 kWh/hab/an de capacité de batterie ; soit un montant bien plus faible que pour le secteur du transport routier (environ 18 kWh/hab/an).

Les besoins de **batteries stationnaires** pour l'équilibrage du réseau électrique dépendent de l'évolution du mix de production d'électricité, du profil de consommation et des autres moyens de flexibilité et stockage déployés. Dans une approche conservatrice, le scénario S3 de la Commission Européenne (16) a été défini comme scénario de référence (150 GW de nouvelles capacités de batteries installées en 2050). Cette valeur pourrait être inférieure dans un scénario de type "minimum social" étant donné que la demande électrique serait plus faible et donc les besoins de stockage le seraient aussi (comme le montre l'étude réalisée par l'ADEME (2024) (17) à l'échelle française).

Toujours dans une approche conservatrice, les autres usages du **lithium hors batteries** (céramiques, verre, lubrifiants, etc.) pourraient être considérés identiques entre aujourd'hui et 2050 dans le cadre d'un scénario de minimum social.

1.3. Besoin en lithium pour un scénario de minimum social en Europe

L'ensemble de ces hypothèses, généralement basées sur la littérature existante, ont été traduites en besoin annuel de lithium sur la période 2018-2050. Afin de définir le besoin en lithium primaire (c'est-à-dire issu de l'extraction minière par opposition au lithium secondaire issu du recyclage), des hypothèses d'économie circulaire doivent être considérées. Le scénario de minimum social intègre des hypothèses qui vont au-delà de la réglementation européenne (18) imposant un taux de valorisation du lithium à 50 % en 2027 et 80 % en 2031 sans fixer de taux de collecte des batteries des véhicules électriques en fin de vie. En effet, le scénario minimum social considère malgré les orientations industrielles et réglementaires actuelles les hypothèses suivantes dont la faisabilité technique est prouvée³ :

- l'ensemble des batteries en fin de vie sont collectées et intégrant l'hypothèse stratégique que les procédés de recyclage développés en Europe permettent de produire du lithium de haute qualité et permettent ainsi sa réutilisation dans de nouvelles batteries ;
- le lithium des batteries en fin de vie est recyclé à hauteur de 50% en 2026, 80% en 2031 et 90% en 2035 ; excluant les valorisations du lithium en *downcycling* (comme dans les laitiers en soubassement de route ou dans la fabrication de ciments) ;

Les hypothèses d'économie circulaire sur le taux de collecte des batteries en fin de vie, sur les taux de recyclage (et non de valorisation), et sur la production d'un lithium de qualité batterie sont volontairement très ambitieuses (tout en étant viables techniquement) et permettent d'évaluer la proportion de lithium à extraire nécessairement pour répondre aux standards de vie décente tout en électrifiant le secteur du transport routier.

La Figure 3 ci-dessous représente la consommation annuelle en lithium primaire sur la période 2018-2050 ainsi que le besoin en lithium primaire cumulé de ce scénario minimum. **La consommation en lithium primaire nécessaire afin de répondre aux besoins minimaux de l'Europe est de 3000 tonnes de lithium par an en 2050 et de 790 000 tonnes de lithium sur la période 2018-2050.** En raison de l'électrification rapide des véhicules neufs vendus comparativement à la diminution plus progressive des besoins de mobilité, 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 réincorporé qui augmente progressivement pour atteindre 85 % en 2050.

³ Les procédés de recyclage du lithium ainsi que les enjeux, les limites et les recommandations politiques sont détaillées dans la section "Recyclage" de la partie 4.2 du rapport.

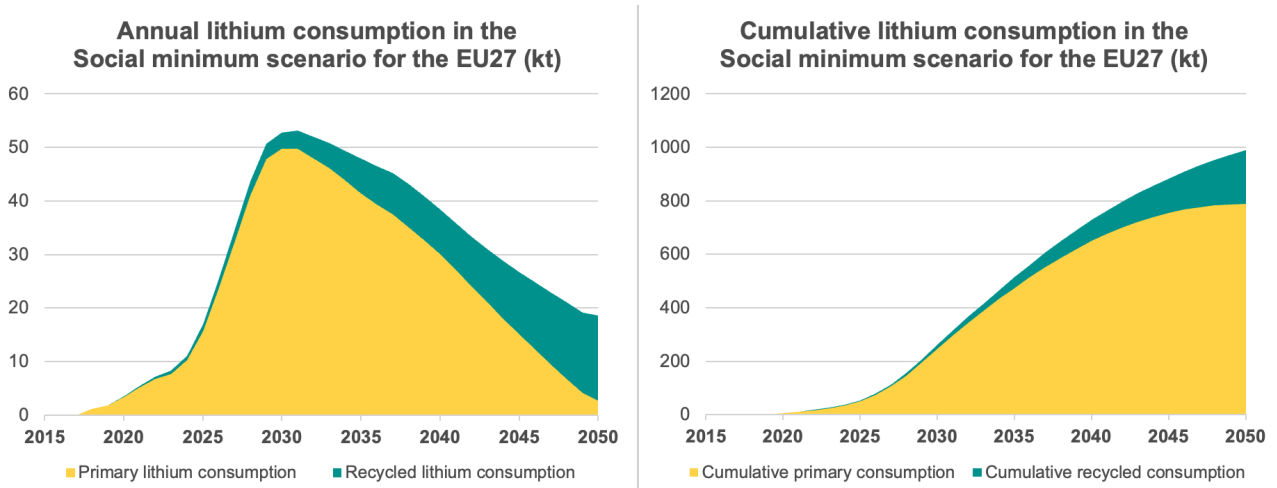


Figure 3 : Demande annuelle et demande cumulée de lithium dans le cadre du scénario de minimum social pour l'UE-27 (kt)

2. Plafond environnemental : budget écologique d'extraction du lithium

Pour établir un **corridor de soutenabilité** définissant un espace sûr et juste en termes de consommation de lithium par an, ce rapport a d'abord établi un plancher social, défini par une **trajectoire de minimum social**. Dans cette partie, il s'agit de définir un plafond environnemental, proposé ici sous la forme d'un **budget écologique d'extraction du lithium** qui permet d'établir la consommation au-delà de laquelle un risque est pris de porter atteinte aux limites planétaires. Dans ce rapport, le plafond environnemental est uniquement déterminé pour l'année 2050.

2.1. Pourquoi fixer un plafond à la production minière du lithium ?

Le recyclage est insuffisant à l'heure actuelle

Le recyclage ne suffira pas à sortir de l'extraction à court terme, car pour le lithium les stocks disponibles ne sont pas assez importants pour soutenir des besoins croissants.

Les bénéfices environnementaux apportés par l'utilisation du lithium pourraient-ils justifier un passe-droit environnemental et social ?

Le règlement européen sur les matières premières critiques (CRMA) compromet aujourd'hui l'atteinte d'un haut niveau d'exigence environnementale pour les projets d'extraction en proposant le contournement des directives cadre sur l'eau, habitat et oiseaux, pour les substances jugées stratégiques comme le lithium.

Le fait d'accorder des passe-droits environnementaux à l'extraction minière est aujourd'hui justifié par le caractère stratégique de ces métaux et le risque lié à l'approvisionnement, mais parfois aussi par les gains environnementaux de leurs usages dans la transition.

Cependant, la liste est longue des matières premières minérales qui pourraient être utilisées pour la transition et elles ne le sont pas toutes au même niveau. Pour que la transition ne devienne pas une caution pour un laissez-faire environnemental pour tous projets industriels, il faut donc :

- **étudier au cas par cas la nécessité réelle de ces matières premières pour la transition.** Le terme de nécessité réelle renvoie à la possibilité de mettre en oeuvre une stratégie de sobriété, d'efficacité et de substitution écologique (et non la remise en cause de la nécessité de la transition écologique en elle-même) ;
- **prendre en compte le fait que les activités humaines évoluent en contexte contraint.** Les activités humaines ont en effet déjà conduit au dépassement d'une sixième limite planétaire (19) sur les neuf dénombrées⁴. Ces limites comprennent bien sûr le changement climatique, mais ne se limitent pas à ce seul phénomène, dont l'étude est insuffisante pour garantir la durabilité de nos écosystèmes. Il est donc essentiel que le critère des émissions de gaz à effet de serre ne soit pas le seul à être pris en compte pour planifier la transition écologique et les besoins en métaux. **C'est l'habitabilité de la planète Terre qui est en jeu.**

⁴ Le concept des limites de la planète cherche à garantir l'habitabilité du système Terre : le franchissement des limites augmente le risque de provoquer des changements environnementaux brusques ou irréversibles à grande échelle. Des changements radicaux ne se produiront pas nécessairement du jour au lendemain, mais ensemble, les limites définies marquent un seuil critique d'augmentation des risques pour les personnes et les écosystèmes dont nous faisons partie. Les limites sont des processus interdépendants au sein du système biophysique complexe de la Terre.
<https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>

Or, le secteur extractif et métallurgique fait directement pression sur les limites suivantes : changement climatique, la production d’aérosols, la perturbation du cycle de l’eau douce, le changement d’usage des sols, l’intégrité de la biosphère (20–25). Sur ces 5 limites planétaires sur lesquelles l’extraction a une influence, 4 sont déjà dépassées (voir Figure 4).

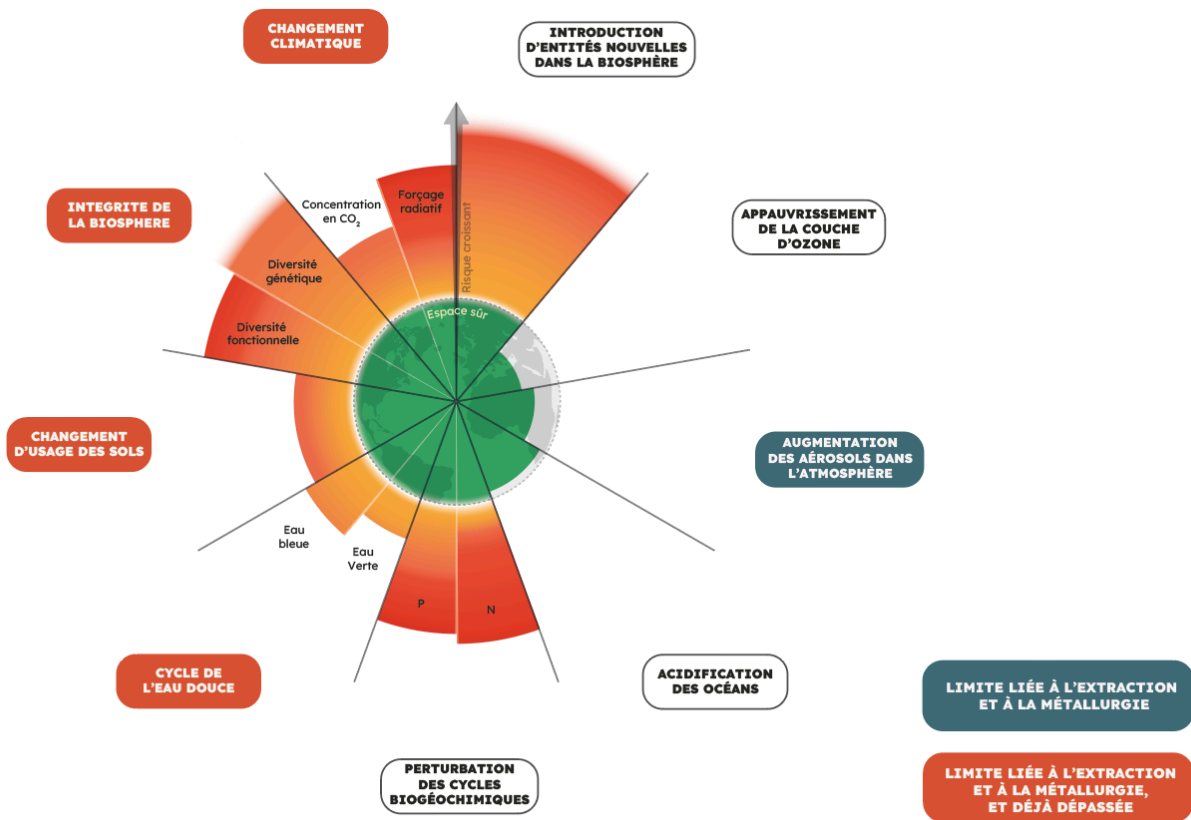


Figure 4 : Les limites planétaires et les impacts de la production des métaux (Source : modifiée d’après Richardson et al. (19))

Cela, sans compter les impacts non comptabilisés dans le cadre des limites planétaires, comme les impacts irréversibles sur la pollution des sols dus au stockage des déchets miniers (voir partie 4.2). En effet, les pollutions issues des déchets miniers persistent après l’activité d’extraction, car il n’existe aucune solution vraiment satisfaisante pour traiter les roches broyées (les stériles) et les résidus de production. Seules des solutions de confinement de la pollution sont mises en œuvre sur le long terme. Cela conduit à la dissémination lente des pollutions liées aux déchets restés sur place, dont l’ampleur est aujourd’hui mal évaluée. Une première étude menée pour les anciens barrages à résidus pour le plomb, le zinc, le cuivre et l’arsenic évalue que la pollution issue de ces sites de stockage toucherait 479 200 kilomètres de cours d’eau (soit plus de 70 fois la longueur du fleuve Amazone), 164 000 kilomètres carrés de plaines inondables et environ 20 millions de personnes vivant sur ces sols contaminés (25).

Les conséquences négatives liées à l’industrie minière sont telles que son expansion pourrait s’avérer contradictoire avec les objectifs affichés de réponse à l’urgence climatique et de contribution à l’accomplissement des Objectifs de Développement Durable des Nations Unies (ODD) comme le montre notamment le rapport du Columbia Center on Sustainable Investment et de la RMF (26).

En plus de ces conséquences environnementales dramatiques, environ 80% des réserves mondiales de lithium sont situées sur les territoires de Peuples Autochtones (ou à proximité immédiate) (27). La *Convention 169 de l’Organisation Internationale du Travail (OIT) relative aux Peuples Autochtones et Tribaux* adoptée en 1989 et la *Déclaration des Nations Unies sur les Droits des Peuples Autochtones* adoptée par l’Assemblée Générale de l’ONU en 2007 ont établi de nombreux droits fondamentaux spécifiques à ces

populations, et notamment leur droit à donner – ou non – leur Consentement Libre, Informé, et Préalable (CLIP) pour l'utilisation et l'exploitation de leurs terres. De manière générale (et non spécifique au lithium), ce droit a été jusqu'à présent largement contourné (28), notamment au sein de l'Union Européenne⁵. La criminalisation, les menaces, et les assassinats de représentant-es et défenseur-ses des Peuples Autochtones (mais aussi d'activistes non-Autochtones) luttant pour la défense de leurs droits et la préservation de leurs environnements et modes de vie dans un contexte minier sont largement documentés depuis 2012 dans un rapport annuel de Global Witness⁶.

La programmation d'un usage exponentiel des métaux ne peut donc pas se faire de manière inconsidérée et risque d'entraîner des impacts majeurs que ce soit en termes sociaux ou environnementaux, avec le risque d'un transfert d'impact du changement climatique vers des problématiques de surconsommation de la ressource en eau, d'artificialisation des sols, de toxicité et de perte de biodiversité.

Les impacts environnementaux et sociaux de l'extraction et de la métallurgie ne peuvent pas continuer à augmenter indéfiniment et une limite environnementale doit être posée sur le volume de consommation des métaux afin de guider les choix industriels et technologiques.

Afin d'aider à la décision, dans le domaine de la planification des besoins en métaux, **il s'agit de concevoir, à l'image du budget carbone, un budget écologique matière appliqué à l'extraction minière pouvant être compatible avec le respect des limites planétaires.**

Dans le cadre du respect des limites planétaires, il s'agit ensuite d'attribuer aux différents métaux des parts de ce budget proportionnelles à leur potentiel pour subvenir aux besoins sociaux et à leur utilité dans la transition énergétique.

Pour le lithium, ce budget ne permettra pas de trancher les débats liés à la législation environnementale ou aux impacts locaux. Néanmoins, **il permettra de mettre en regard les trajectoires de consommation et de production de lithium européenne à l'aune de nos besoins et des limites planétaires.**

2.2. Comment rester dans les limites planétaires ?

L'objectif est donc de définir un budget écologique par métal pour 2050, comme un maximum de tonnes extraites par an dont la production (mine et métallurgie) est compatible avec les limites planétaires.

Pour poser cette limite, la méthodologie utilisée a été bâtie sur l'article de Harald Desing, Gregor Braun et Roland Hischier, qui cherche à établir des budgets écologiques de ressources pour chaque métal (29). Pour définir un budget écologique par métal sur l'année actuelle, les auteurs de cette méthodologie, ont suivi les grandes étapes suivantes (**les modifications apportées par l'Association négaWatt sont en bleu**) :

1. **Traduction des limites planétaires en variables de contrôle** (une ou deux variables de contrôle par limite planétaire par exemple pour le changement climatique les variables de contrôle sont la concentration atmosphérique en CO₂ et le déséquilibre énergétique au sommet de l'atmosphère).
2. **Définition du segment étudié, ici le secteur des métaux.** Ce secteur est défini comme constitué de plusieurs étapes : l'extraction, la minéralurgie et métallurgie, la gestion des déchets, **mais le recyclage est exclu.** Les auteurs considèrent que le secteur comprend 12 métaux différents : aluminium, cuivre, fer, zinc, plomb, étain, nickel, or, argent, platine, titane, chrome. **Ont été ajoutés à cette liste le lithium, le cobalt et le néodyme pour que les métaux étudiés dans le projet Minimal soient couverts, ainsi que le manganèse qui représente une production importante.**
3. **Attribution d'une part des limites planétaires au secteur des métaux.** Pour chaque limite planétaire, Desing et ses collaborateurs attribuent à ce secteur une part de l'espace de fonctionnement sûr correspondant à sa contribution actuelle aux impacts environnementaux pesant sur cette limite (méthode basée sur l'allocation historique ou *grandfathering*). Ce type d'allocation pose plusieurs problèmes, il est mal adapté à de la prospective (non proportionnel aux efforts que peuvent fournir

⁵ En particulier vis-à-vis des Sámi qui vivent sur des terres situées en Suède et en Finlande (UE) ainsi qu'en Norvège (hors UE). Voir notamment <https://news.mongabay.com/2023/03/sami-rights-must-not-be-sacrificed-for-green-energy-goals-of-europe-commentary/>

⁶ Global Witness, Rapports annuels sur les Défenseur-ses des Droits, 2012-2023.

<https://www.globalwitness.org/en/campaigns/environmental-activists/land-and-environmental-defenders-annual-report-archive/>

les différents secteurs) et les secteurs qui ont fait peu de progrès dans le passé reçoivent une allocation plus élevée, ce qui ne semble pas équitable par rapport au secteur ayant déjà produit des efforts pour réduire leur empreinte environnementale. Pour ce rapport, cette méthode d'allocation n'a pas été modifiée par l'Association négaWatt (voir Annexe 1 pour les compléments d'information). La méthode d'allocation *grandfathering* est plutôt favorable au secteur, si l'on considère que dans des scénarios "idéaux" de consommation respectant au niveau mondiale les limites planétaires et des niveaux de vie décents pour tous (*Decent Living Standards*), la part attribuée aux métaux est bien plus faible que la part actuelle (comme le montre le papier de Schlesier et al. paru en 2024 (30)). Ce choix a été retenu faute de méthodologie suffisamment robuste permettant de définir un autre niveau d'allocation au secteur des métaux.

Dans l'article (29), il s'avère que la limite planétaire la plus contraignante pour la production des métaux en 2016 est le changement climatique et en particulier l'indicateur des émissions de CO₂. L'hypothèse a été faite que d'ici à 2050, cette limite planétaire reste la plus contraignante et le modèle a été simplifié pour ne calculer le budget qu'en fonction de cette limite. Si l'hypothèse est juste, le budget quantifié permet alors de respecter également les autres limites planétaires (car c'est le plus bas).

4. **Attribution de l'impact environnemental de chaque métal** Pour chaque métal et chaque variable de contrôle (par exemple pour le cuivre et pour la variable de contrôle CO₂) **un impact unitaire est attribué (UI)** à chaque kg de métal à partir de la base de données ecoinvent v3.5 (par exemple pour le cuivre 3,83 kg CO₂/kg de métal). Ces valeurs reflètent la situation actuelle, mais sont amenées à évoluer dans le temps. Pour adapter les résultats à l'année 2050 les impacts unitaires pour 7 métaux (fer, aluminium, cuivre, zinc, plomb, nickel, manganèse) ont été modifiés pour tenir compte des gains en efficacité, de la baisse des teneurs et de l'évolution des mix électriques d'ici à 2050 sur la base des travaux de Van der Voet et de ses collaborateurs (31), voir Tableau 3.

Fe	Al	Cu	Zn	Pb	Ni	Mn
-1,44%	-42,88%	-21,95%	-30,58%	5,83%	-7,76%	-0,99%

Tableau 3 : Modification de l'impact unitaire (UI) pour le CO₂ entre 2020 et 2050 d'après le scénario "equitability first" (Source : Van der Voet et al., 2019 (31))

5. **Part de la production d'un métal dans le secteur** : Il s'agit ici de définir quel est le poids attribué à chaque métal dans le secteur de la production des métaux.. Cette allocation se fait via des pourcentages massiques ou parts de production (PP). Le budget écologique d'extraction calculé est donc dépendant des différentes parts de production choisies (PP) pour les métaux (plus une part importante est attribuée à des métaux très impactants plus le budget écologique calculé sera petit). Dans cet article, les auteurs se sont basés sur les parts de production réelles en 2016. Pour le résultat présenté pour le lithium dans ce rapport, la part de chaque métal dans la production totale a été calculée sur la base du besoin cumulé entre 2020 et 2050 dans le scénario négaMat et modifiée pour tenir compte du changement de périmètre géographique (le scénario négaMat s'intéressant à la France et les besoins européens n'étant pas tout à fait les mêmes). Cette augmentation de la part de production du lithium (voir Tableau 4) correspond à une multiplication par 164 par rapport aux chiffres réels en 2022 (attention en proportion pas en valeur absolue!). Cette augmentation découle de la prise en compte du besoin en lithium pour mener à bien la transition énergétique, et donc des bénéfices environnementaux associés à son utilisation.

Part attribuée au lithium pour le calcul du budget écologique en 2050 en % de la masse totale de métaux produite	1,16%
Part réelle du lithium dans la production mondiale de métaux en 2022 en % de la masse totale de métaux produite (USGS)	0,01%

Tableau 4 : Part du lithium dans la production mondiale de métaux, en 2022 et 2050

6. **Agrandissement du système de production de ressources jusqu'à dépassement.** Le volume de production du mélange de ressources (avec les PP choisies à l'étape précédente) et ses impacts (UI) est ensuite augmenté progressivement, jusqu'à ce qu'une des limites planétaires soit dépassée. Le franchissement de la première limite planétaire détermine le budget écologique d'extraction qui ne doit pas être dépassé. Ce budget écologique est déterminé pour l'ensemble du secteur des métaux. Ce budget est ensuite alloué à chaque métal en utilisant les PP définies à l'étape 5. **Le résultat est dépendant de la probabilité de dépassement choisie (voir Annexe 1). La probabilité fixée par l'Association négaWatt est de 50%.**

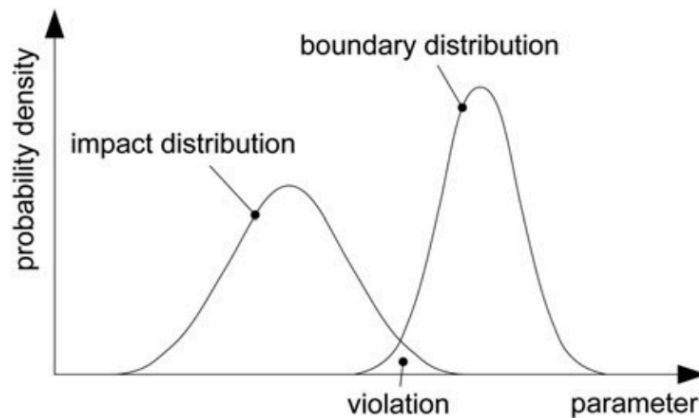


Figure 5 : Représentation schématique de la probabilité de dépassement des limites planétaires, qui résulte du chevauchement de la distribution de probabilité des impacts environnementaux avec la distribution de la limite correspondante (Source : Desing et al., 2020 (29))

Le budget écologique pour le lithium en 2050 ainsi calculé est de 20 000 tonnes pour l'UE-27, en considérant que l'Union européenne représente 4,36% de la population mondiale en 2050⁷ et qu'elle bénéficie d'un accès aux ressources proportionnel à sa population, pour des raisons d'équité. Cette clef de répartition géographique basée sur l'équité est un choix structurant de l'Association négaWatt (cohérent avec l'empreinte matière, négaMat du scénario négaWatt 2022). Il existe bien sûr d'autres approches concurrentes beaucoup moins restrictives pour l'UE (en utilisant le PIB ou *grandfathering*), mais qui mettent en péril l'accès aux ressources des pays pauvres et émergents, et donc à terme leur développement et la transition énergétique. Dans la partie 3, un scénario tendanciel est exposé qui atteint une consommation pour l'UE de 88 000 tonnes de lithium, **soit 4,4 fois plus grande que le budget écologique pour l'UE en 2050.**

Ce budget écologique pour l'UE correspond à une limite de 459 000 tonnes de lithium pour le monde en 2050, soit un peu plus de 3 fois la production mondiale de lithium en 2022 (4). L'Agence internationale de

⁷ D'après la base de données de la Banque mondiale (Population estimates and projections), version du 01/07/2024.

l'énergie (6) estime que, dans une trajectoire de transition vers la voiture électrique sans hypothèse majeure de sobriété, la consommation annuelle mondiale de lithium pourrait atteindre 800 000 tonnes en 2040 pour les véhicules électriques, **soit 1,7 fois plus que le budget écologique d'extraction calculé pour 2050 par l'Association négaWatt.**

Le budget écologique ainsi calculé par l'Association négaWatt pour toutes les productions métalliques est de 39,54 millions de tonnes en 2050, soit 43 fois moins que la production mondiale de métaux en 2022 (4). Or, selon les tendances actuelles, il est prévu que la production mondiale augmente encore considérablement d'ici à 2050.

Ce budget écologique est donc beaucoup moins contraignant pour la production du lithium qu'il ne l'est pour les grands métaux industriels.

Une méthodologie innovante permettant le débat

Ce rapport s'ancre dans une série de publications issues du projet Minimal. L'objectif du projet Minimal est de proposer une feuille de route pour pouvoir se passer de l'extraction minière à long terme et de proposer un mode d'approvisionnement responsable en matières premières minérales, basé sur le triptyque sobriété/efficacité/substitution écologique⁸.

La méthodologie du minimum social et du maximum environnemental sera appliquée à d'autres métaux par la suite, à commencer par le cuivre.

La méthodologie pour établir un budget écologique pour un métal est une première proposition pour proposer un plafond de consommation basé sur des travaux scientifiques. Ce travail est innovant et il est récent que la littérature académique s'intéresse à cette question (voir Annexe 1).

L'Association négaWatt a conscience que la méthode de calcul devra faire l'objet d'améliorations et de mises à jour dans le futur pour affiner ce travail prospectif : prise en compte de l'efficacité des technologies, de la baisse des teneurs, choix politique de l'allocation entre les secteurs et les pays qui peut évoluer, etc. Néanmoins, il paraît crucial de publier ces premiers résultats afin de pouvoir lancer un débat important sur une transition matière visant à limiter l'augmentation de l'extraction dans certaines filières et à la diminuer dans d'autres afin de garantir l'habitabilité de la planète.

Ce travail fournira un budget écologique d'extraction (en tonnes) pour chaque métal qui peut être réalisé dans un espace de fonctionnement sûr (à l'échelle mondiale et d'ici à 2050).

⁸ Ce triptyque sobriété/efficacité/substitution écologique est une adaptation au sujet des matériaux du triptyque de l'Association négaWatt sobriété/efficacité/renouvelables qui a été développé sur l'énergie. Les concepts de sobriété matière, d'efficacité matière et de substitution écologique seront développés dans la 4ème partie de ce rapport.

3. Discussion sur le corridor de soutenabilité

Les évaluations du minimum social et du budget écologique d'extraction pour le lithium développées dans les parties 1 et 2 permettent de définir un corridor de soutenabilité pour la consommation de lithium dans lequel les besoins essentiels pour l'Europe sont satisfaits tout en respectant les limites planétaires. Il s'agit dans cette partie de vérifier que le concept de corridor est bien applicable, c'est-à-dire de vérifier que le plancher social tel que défini dans la partie 1 est bien en dessous du plafond environnemental tel que défini dans la partie 2. Puis d'étudier le respect par différents scénarios de ce corridor de soutenabilité. Et enfin, de comparer ce corridor à d'autres travaux de prospective déjà existants.

3.1. Le concept de corridor de soutenabilité est-il applicable ?

Dans les parties 1 et 2, le plancher social a été défini sous la forme d'une courbe (une trajectoire entre 2015 et 2050), alors que le budget écologique d'extraction du lithium n'a – à ce jour – été calculé que pour l'année 2050. Le concept de corridor de soutenabilité n'est donc applicable que pour l'année 2050 dans ce rapport et ne permet pas de valider la soutenabilité de l'entièreté de la trajectoire proposée.

Pour l'année 2050, le **budget écologique d'extraction du lithium** (calculé dans la partie 2) est de **20 mille tonnes de lithium pour l'UE** (point vert en 2050 sur la Figure 7). La trajectoire de **minimum social**, décrite en partie 1, fait état d'un besoin essentiel d'extraction de **3 mille tonnes de lithium pour l'UE** (point orange en 2050 sur la Figure 7) pour 2050. Il est à noter que pour l'année 2050, la consommation totale (primaire et recyclé) de lithium de l'UE dans la trajectoire de minimum social est de 19 mille tonnes de lithium, mais dont 85% proviennent du recyclage (voir Figure 3 de la partie 1), production à laquelle le budget écologique calculé ne s'applique pas. Cette part importante du recyclage en 2050 pour la trajectoire de minimum social est permise par des hypothèses ambitieuses sur le développement du recyclage, mais également par la sobriété poussée mise en œuvre dans ce scénario.

Le plafond environnemental est donc supérieur au plancher social pour l'année 2050, ce qui rend le concept de corridor de soutenabilité applicable.

3.2 Comment se situent le scénario Clever et un scénario de référence par rapport au corridor de soutenabilité ?

À partir de l'outil de modélisation BAMASI et du jeu d'hypothèses présenté dans le Tableau 5, l'évaluation des empreintes en lithium primaire du scénario européen **Clever**⁹ (33), basé sur le triptyque sobriété/efficacité/renouvelables, et d'un scénario de référence (tendanciel sur l'évolution du transport routier) ont été effectuées et comparées au corridor de soutenabilité pour le lithium. Les hypothèses de transport et d'économie circulaire sont présentées dans les paragraphes suivants.

Les deux scénarios, Clever et celui de référence, bien que présentant des hypothèses différentes sur le **transport, répondent aux objectifs climatiques en décarbonant ce secteur d'ici à 2050**. Ils présentent les mêmes niveaux relatifs d'électrification des ventes de véhicules légers (voitures, utilitaires légers, 2 roues) mais diffèrent légèrement sur le mix de motorisation des véhicules lourds (poids lourds, bus, cars). **En revanche, le niveau absolu de ventes de véhicules varie fortement entre ces deux exercices.**

Les deux scénarios considèrent la même évolution technologique des batteries au lithium telle que détaillée dans la partie 4. Le scénario de référence de cette étude intègre les hypothèses d'augmentation de la

⁹ CLEVER (a Collaborative Low Energy Vision for the European Region) est un scénario proposant une voie de décarbonisation ambitieuse et réaliste pour l'Europe. Il a été élaboré selon une approche « bottom-up » qui part des trajectoires nationales élaborées par 26 partenaires nationaux (dont l'Association négaWatt) issus du monde académique, de la recherche ou de la société civile. Le scénario présente une voie qui concilie les impératifs de climat et de durabilité à long terme avec les contraintes de sécurité énergétique à court terme et la faisabilité pratique d'une telle transformation. Une note sectorielle sur la mobilité est disponible sur le site du projet. Afin de respecter la réglementation européenne (32) sur la fin des ventes de véhicules thermiques légers en 2035, la répartition des ventes de véhicules utilitaires légers dans le scénario CLEVER a été modifiée et ne prend désormais en compte que les véhicules électriques et exclut les véhicules fonctionnant au bio-GNV.

demande de transport routier du scénario de référence de la Commission Européenne de 2020, une stabilisation du taux d'occupation des voitures et du taux de remplissage des poids lourds et suit la tendance actuelle de course à l'autonomie des véhicules électriques (qui engendre une hausse de la taille des batteries). Le scénario Clever présente quant à lui **une réduction générale du besoin de déplacement** et de transport de marchandises, **un report modal conséquent vers les modes actifs et les transports en commun**, une **augmentation des taux d'occupation des voitures et de remplissage des poids lourds**, et une moins grande augmentation de l'autonomie des véhicules munis d'une batterie. **Ces leviers** sur la mobilité qui font partie des mesures de sobriété à mettre en œuvre **seront détaillés et chiffrés en partie 4**.

Indicateur	Unité	Type de véhicule	2018	2050		2050	
			Historique	Scénario Clever	Index 2018=100%	Scénario de référence	Index 2018=100%
Taux d'occupation	personnes par véhicule	voiture particulière	1,63	1,98	121%	1,63	100%
Besoin de déplacement	milliard de km	voiture particulière	4.254	3.105	73%	5.076	119%
Part de micro-voitures	%	voiture particulière	0%	20%		0%	
Capacité de la batterie	kWh	voiture particulière "classique"	50	60		75	
Capacité de la batterie	kWh	voiture particulière "micro"	7	10		15	
Besoin de déplacement	milliard de km	bus et cars	501	705	141%	535	107%
Capacité de la batterie	kWh	bus et cars	650	650		650	
Besoin de déplacement	milliard de km	Deux roues	108	195	181%	154	143%
Capacité de la batterie	kWh	Deux roues	5	7		12	
Besoin de fret	milliard de km	Véhicules utilitaires	101	98	97%	101	100%
Capacité de la batterie	kWh	Véhicules utilitaires	70	75		80	
Taux de remplissage	tonnes par véhicule	poids lourds et camions	11,01	12,21	111%	11,01	100%
Besoin de fret	milliard de km	poids lourds et camions	1.764	1.219	69%	2.458	139%
Capacité de la batterie	kWh	poids lourds et camions	590	550		700	

Tableau 5 : Principales hypothèses sur le transport et les capacités de batteries du scénario Clever et du scénario de référence

Concernant les hypothèses d'économie circulaire¹⁰, le scénario Clever et le scénario de référence suivent la tendance historique sur la période 2018-2021 puis font des hypothèses qui vont bien au-delà de la réglementation européenne (18) adoptée en 2023 sur la fin de vie des batteries. Cette dernière impose un taux de valorisation du lithium à 50 % en 2027 et 80 % en 2031, alors que les deux scénarios de cette étude intègrent les hypothèses suivantes :

- l'ensemble des batteries en fin de vie sont collectées et intégrant l'hypothèse stratégique que les procédés de recyclage développés en Europe permettent de produire du lithium de haute qualité et permettent ainsi sa réutilisation dans de nouvelles batteries ;
- le lithium des batteries en fin de vie est recyclé (et non valorisé) à hauteur de 50% en 2027, 80% en 2031 ; excluant les valorisations du lithium en *downcycling* (comme dans les laitiers en sous-bassement de route ou dans la fabrication de ciments) ;

Par ailleurs, le scénario Clever (tout comme la trajectoire de minimum social détaillée dans la partie 1) intègre une hypothèse de 90 % de recyclage du lithium à partir de 2035 jusqu'en 2050, contre 80 % dans le scénario de référence.

Les hypothèses d'économie circulaire – sur la collecte des batteries en fin de vie et sur les taux de recyclage permettant de produire du lithium de qualité batterie – considérées dans les scénarios de cette étude sont très ambitieuses. Bien qu'elles soient éloignées des pratiques actuelles de l'industrie et que la réglementation adoptée ne soit pas suffisamment contraignante sur ces points, elles sont viables du point de vue technique et stratégique. Elles sont également souhaitables pour renforcer la résilience de l'approvisionnement de l'UE et d'un point de vue environnemental (voir le paragraphe dédié au recyclage dans la partie 4 du rapport). Ce choix de modélisation permet de mettre l'accent sur les limites environnementales du scénario de référence malgré des hypothèses ambitieuses de collecte et de recyclage du lithium (voir Figure 6 ci-dessous).

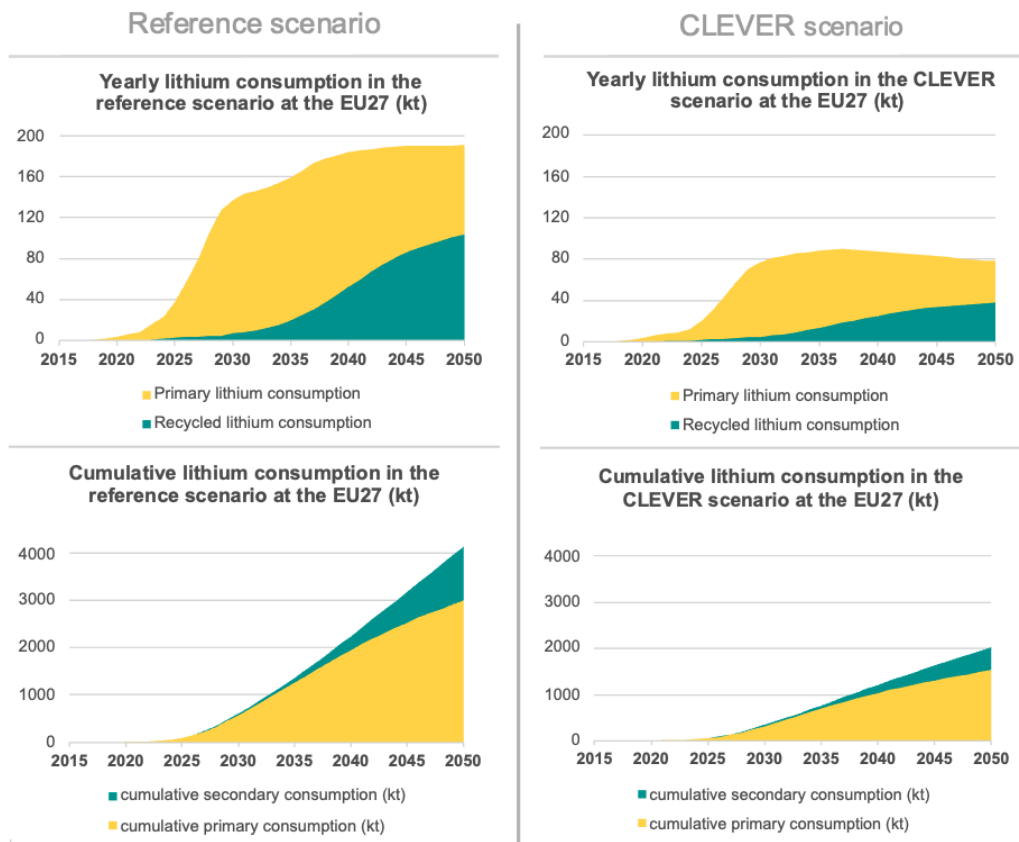


Figure 6 : Évolution de la demande annuelle et cumulée en lithium dans le scénario de référence et dans le scénario Clever pour l'UE

¹⁰ Les enjeux, les limites et les recommandations politiques liées à l'économie circulaire sont présentés dans la section "Recyclage" de la partie 4.2 du rapport.

Le scénario de référence présente une consommation de lithium primaire de 88 000 tonnes en 2050 et 2,99 millions de tonnes sur la période 2020-2050 (voir Figure 7). **Cette consommation est largement supérieure à ce qui est nécessaire pour subvenir aux besoins minimaux en termes de déplacement**, c'est-à-dire à la trajectoire de consommation de lithium correspondant au minimum social défini dans la partie 1 (790 000 tonnes de lithium sur la période 2020-2050, donc 3,8 fois moins que le scénario de référence). D'autre part, **cette trajectoire est également très au-dessus des 20 000 tonnes d'extraction de lithium en 2050**, c'est-à-dire **du budget écologique proposé pour le lithium en 2050** dans la partie 2. **Selon la méthodologie utilisée dans ce rapport, ce scénario n'est pas cohérent avec le respect des limites planétaires.**

Le scénario Clever atteint une consommation annuelle en lithium primaire de 40 500 tonnes en 2050 et une consommation cumulée sur la période 2020-2050 de 1,530 millions de tonnes (voir Figure 7). Ce scénario **satisfait pleinement les besoins minimaux**. Malheureusement, le scénario **ne respecte pas non plus le plafond environnemental de 20 000 tonnes établi pour l'horizon 2050**. Cependant, il en est nettement plus proche que le scénario de référence (20 500 tonnes sépare Clever du plafond environnemental en 2050, alors que le scénario de référence est 68 000 tonnes au-dessus du plafond) grâce aux hypothèses de sobriété. Le scénario Clever pourrait se situer sous ce plafond après 2050.

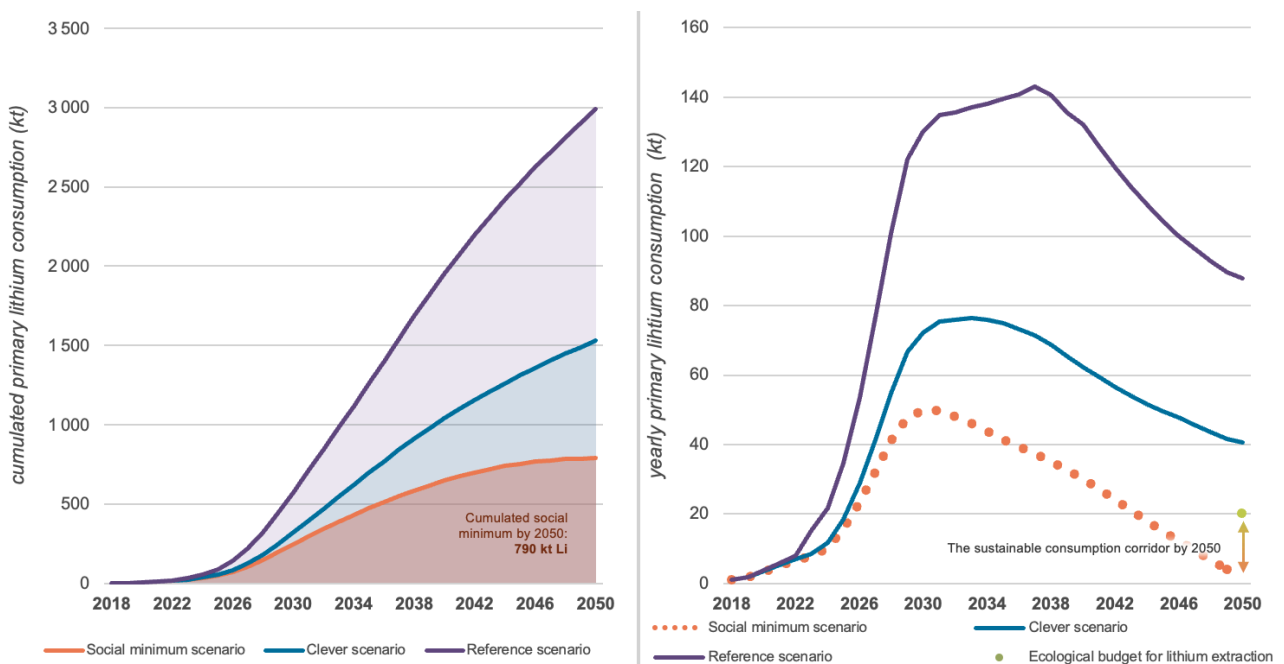


Figure 7 : Consommation cumulée (à gauche) de lithium primaire des scénarios Clever, de référence et Minimum social et comparaison de la consommation annuelle de ces scénarios avec le corridor de soutenabilité en 2050 pour l'UE (à droite)

Le fait que Clever – scénario idéal car il permet de conjuguer au mieux électrification rapide et besoins modérés en lithium en se reposant sur le triptyque sobriété/efficacité/renouvelables – reste à ce jour au-dessus du plafond environnemental calculé dans ce rapport pour 2050 permet de soulever deux enjeux. Le premier enjeu est **le défi posé par la prise en compte des impacts environnementaux liés à l'extraction minière et la métallurgie**, et plus largement aux impacts de l'extraction des ressources. En effet, ce rapport pose un premier jalon pour tenter de prendre en compte ces enjeux et il n'est pas étonnant que les scénarios précédemment réalisés ne rentrent pas dans le corridor de soutenabilité qui n'était pas encore défini. Cela souligne d'autant plus l'urgence de la mise en œuvre d'une politique de sobriété, en conformité avec le dernier rapport du GIER qui établit l'urgence de développer des "solutions orientées demande" visant une gestion plus soutenable des ressources (34).

Le deuxième enjeu est celui du calibrage de la méthodologie choisie, et notamment, le fait qu'il soit difficile de respecter la part des limites planétaires attribuée au lithium pose la question de **l'allocation au secteur extractif et métallurgie par rapport aux autres secteurs** (voir Annexe 1). Il pourrait être envisagé d'allouer une

part plus importante des limites planétaires au secteur extractif comparativement à sa part actuelle (développer une autre approche que le *grandfathering*). Cependant, **à ce jour, l'Association négaWatt considère que pour augmenter cette allocation il faudrait faire la preuve de la diminution réelle des impacts environnementaux des autres secteurs**, pour que cette augmentation de la part du secteur extractif ne se fasse pas au détriment du respect des limites planétaires.

3.2. Comment se situent le scénario Clever et le scénario de référence par rapport aux principaux scénarios de la littérature ?

La Figure 8 situe le scénario Clever et le scénario de référence – réalisés à partir de l'outil BAMASI – par rapport à d'autres scénarios présents dans la littérature ayant effectué un travail prospectif sur la consommation de lithium. Il s'agit notamment de scénarios à l'échelle européenne : T&E (2023)(35), JRC (2022)(7), Eurométaux (2023)(8) et de l'extrapolation du scénario mondial Net Zero de l'IEA (3) au prorata du PIB de l'Union Européenne en 2020. En raison des données disponibles dans les différents scénarios, cette comparaison se limite au besoin total en lithium (primaire et recyclé) pour les années 2030 et 2050. La comparaison des trajectoires est complexe et appelle à la prudence en raison des différences de périmètre (parfois difficiles à déterminer dans les rapports), mais aussi, et surtout, de la différence de méthodologie.

La comparaison à l'année 2030 permet notamment d'évaluer le niveau d'ambition des scénarios en termes de rythme d'électrification du parc de véhicules. Les scénarios de T&E, le scénario de l'IEA, le scénario Clever et le scénario de référence présentent les niveaux les plus élevés de demande annuelle en lithium en 2030 variant de 60 000 à 140 000 tonnes, montrant ainsi une ambition forte sur le rythme d'électrification. Les autres scénarios oscillent entre 25 000 et 55 000 tonnes de lithium. Par ailleurs, le scénario Clever, qui intègre des hypothèses ambitieuses de sobriété, présente un besoin en lithium 44 % inférieur à celui du scénario de référence de l'étude.

La comparaison à l'année 2050 permet de mettre en perspective les besoins en lithium des différents scénarios en fonction du périmètre étudié (mobilité de voyageurs uniquement ou tout transport routier intégrant aussi le fret). Au périmètre restreint de la mobilité des voyageurs, les scénarios présentent généralement un besoin en lithium compris entre 30 000 et 80 000 tonnes, mais peuvent monter à 120 000 tonnes de lithium pour les scénarios de type "business as usual". Le scénario Clever se situe dans la moyenne basse avec 60 000 tonnes de besoin en lithium en 2050, dans une logique de basse consommation. Au périmètre de l'ensemble du transport routier, le besoin en lithium varie entre 80 et 190 000 tonnes de lithium ; **et le scénario Clever constitue la borne basse de ce corridor avec une réduction de près de 60 % par rapport au scénario de référence.**

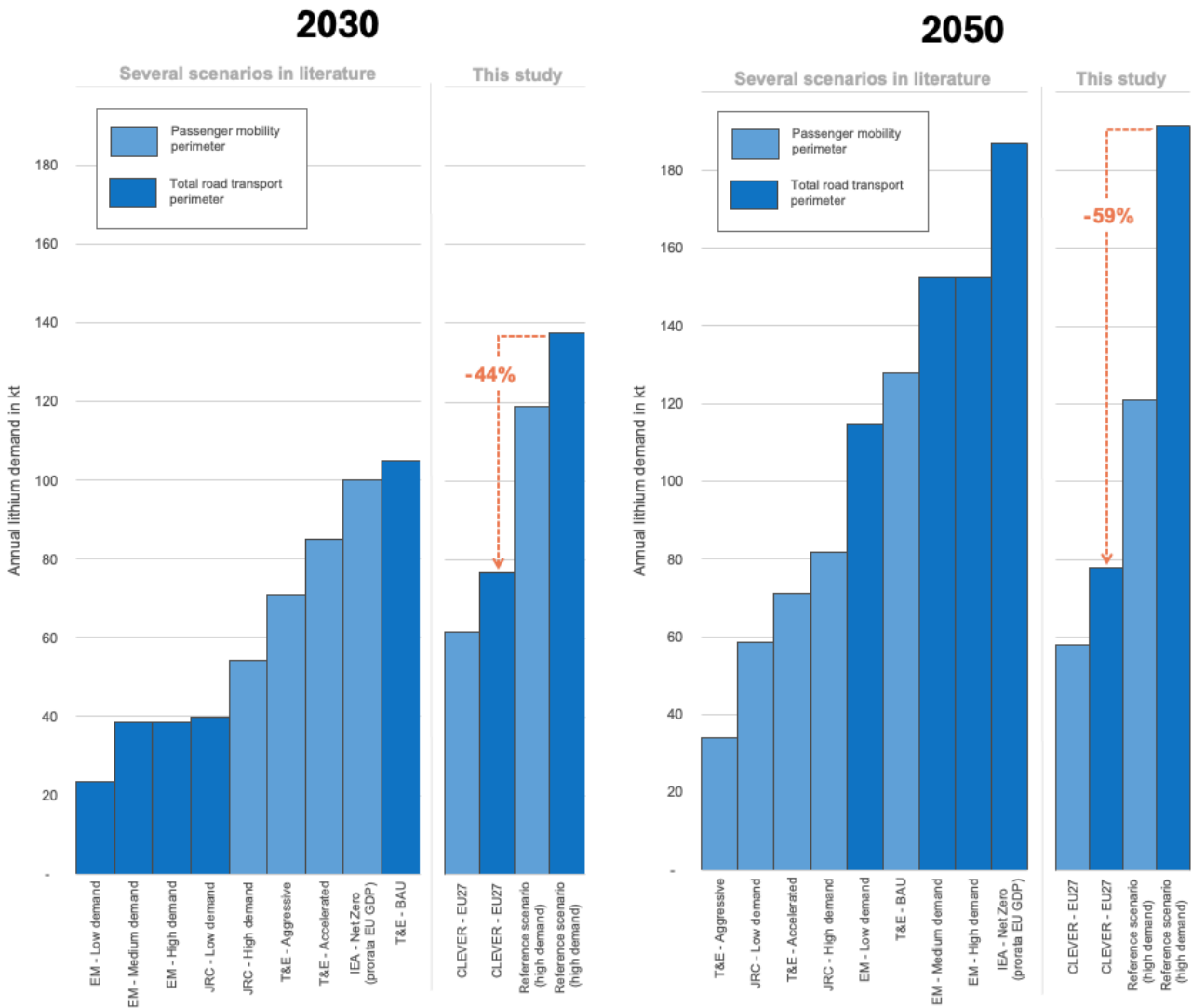


Figure 8 : Comparaison de la demande annuelle totale (primaire et secondaire) en lithium de différents scénarios pour les années 2030 (à gauche) et 2050 (à droite). La figure distingue la mobilité des passagers (en bleu clair) et le transport routier total (en bleu foncé)

La Figure 9 ci-dessous illustre comment les demandes en lithium primaire du scénario Clever et du scénario de référence se comparent à l'estimation de la production mondiale de lithium réalisée par Wood Mackenzie pour les années 2030 et 2035. **Selon le scénario de référence, la demande en lithium de l'Union Européenne représenterait 27 % de la production mondiale en 2030 et entre 26 % et 32 % en 2035. Dans le cadre du scénario Clever, cette demande représenterait 15 % de la production mondiale en 2030 et entre 14 % et 17 % en 2035.** Ces proportions doivent être mises en perspective avec la part de la population de l'Union Européenne par rapport à la population mondiale. En 2022, l'Union Européenne représentait 5,6 % de la population mondiale ; et selon les estimations de la Banque Mondiale, cette proportion devrait descendre à 5,2 % en 2030, 4,9 % en 2035, et 4,3 % en 2050.

Les risques d'approvisionnement de lithium pour l'Union Européenne sont réels, avec notamment un écart prévu dans les années à venir entre l'offre et la demande en lithium (36). Cet écart est prévu par de nombreux acteurs, comme la cour des comptes européenne ou encore la JRC. Bien que le "Critical Raw Materials Act" (CRMA) adopté en 2024 tente de limiter ce risque en favorisant les projets d'extraction en Europe, il paraît irréaliste, au vue des délais de développement industriel des projets miniers et de l'incertitude inhérente à ces projets, de ne s'attaquer qu'à l'offre et de ne développer aucune politique publique portant sur la demande. **La sobriété – aujourd'hui absente du règlement européen – est un levier**

majeur pour limiter ces risques, avec certaines mesures pouvant avoir un effet immédiat comme les actions visant à diminuer la taille et le poids des véhicules.

Ainsi, les mesures de sobriété présentées dans la partie 4 permettraient non seulement de développer une résilience vis-à-vis des approvisionnements en lithium pour l'électrification des transports, mais aussi de favoriser une équité globale et enfin de permettre aux autres régions du monde d'entamer cette décarbonation. La sobriété permet également de limiter les impacts environnementaux de la production abordés dans la partie 4.

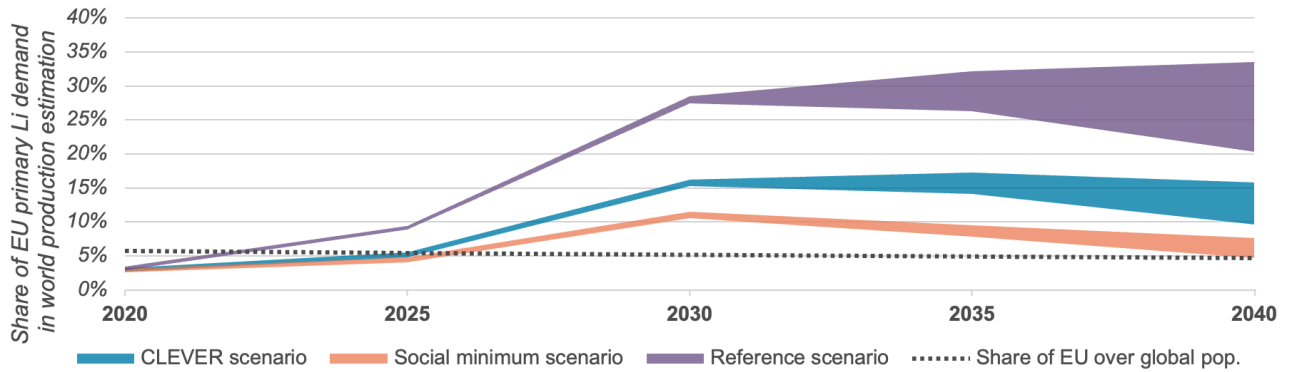


Figure 9 : Comparaison entre différents scénarios de la part de la demande annuelle européenne en lithium primaire dans la production mondiale estimée par Wood Mackenzie

Quel cadre de politique publique pour garder la consommation de métaux de l'UE dans les limites planétaires ?

L'Association négaWatt a co-rédigé [une lettre ouverte signée par plus de 100 organisations](#) (ONG, universitaires, think tanks, syndicats et industries) adressée à plusieurs décideurs européens, et demandant la mise en place d'une législation européenne en faveur d'une gestion durable des ressources. Cette demande est appuyée par la publication d'un document plus complet exposant les enjeux associés : le [livre blanc pour la gestion durable des ressources](#) publié en février 2024. Ces deux publications sont disponibles sur le site de l'Association négaWatt.

Cette initiative demande **des objectifs contraignants en matière de consommation des ressources** et souligne le besoin d'objectifs spécifiques par secteur. Le présent rapport et le budget écologique pour le lithium de **20 000 tonnes de production primaire consommée par l'UE en 2050**, constitue une première proposition d'objectif contraignant concernant le lithium.

4. Les leviers à activer pour respecter le corridor de soutenabilité

Pour respecter le corridor de soutenabilité préalablement défini, des leviers doivent être actionnés pour consommer moins de lithium, pour diminuer l'impact environnemental et social de la consommation et de la production de chaque tonne de lithium et pour favoriser d'éventuelles alternatives à la consommation du lithium.

Comme vu précédemment, seuls les scénarios activant l'ensemble de ces leviers sont susceptibles de rester dans les limites planétaires tout en assurant un minimum d'approvisionnement nécessaire pour garantir des conditions de vie décentes pour tous. Cette partie décrit plus en détail ces différents leviers, leurs impacts ainsi que les politiques et mesures associées permettant à l'Europe de respecter ce minimum social et ce plafond environnemental.

Cette analyse s'appuie sur la comparaison du scénario européen Clever avec le scénario de référence réalisé pour l'étude, tous deux présentés auparavant dans la partie 3. L'architecture du modèle BAMASI et son niveau de désagrégation permettent de décomposer l'impact de chaque indicateur dans la consommation primaire cumulée de lithium entre l'année 2018 et 2050.

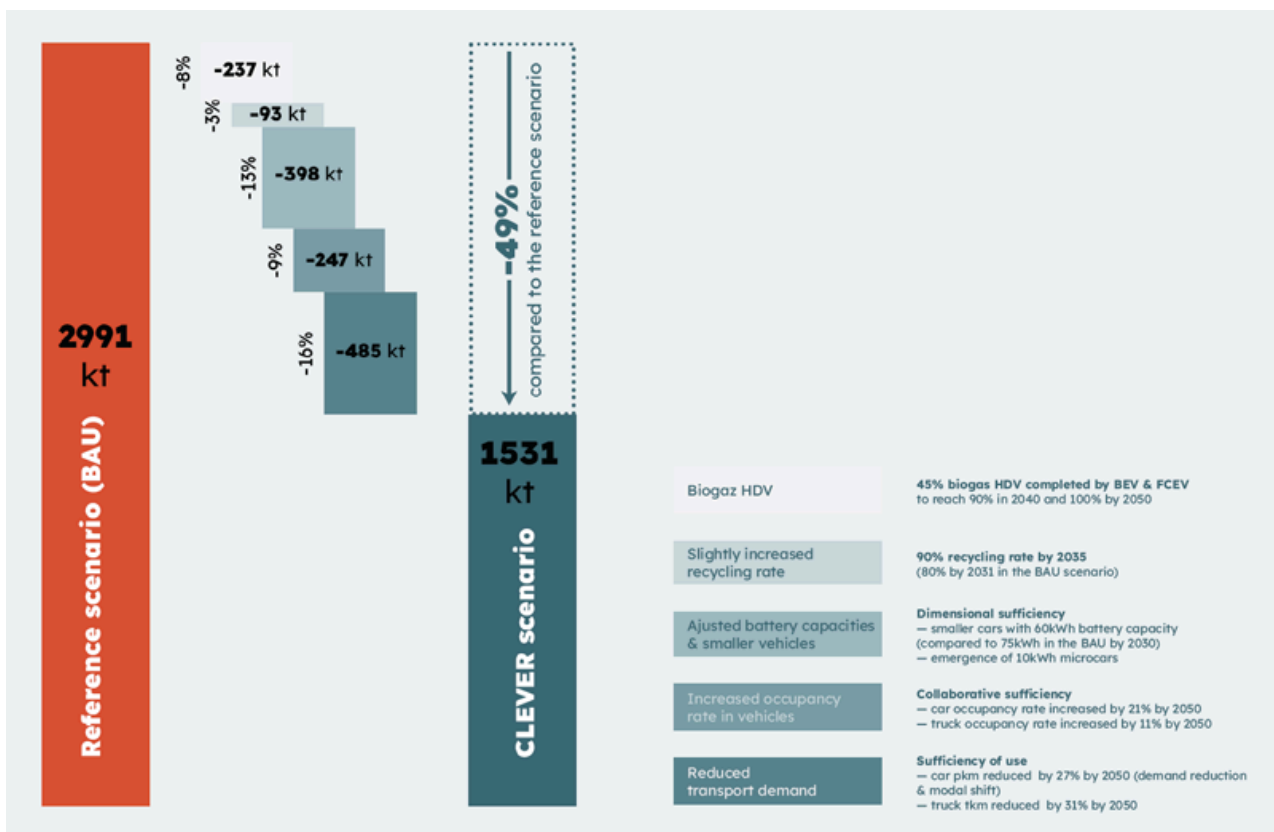


Figure 10 : Contributions de chaque levier à la réduction de la consommation de lithium de l'UE dans le scénario Clever comparée au scénario de référence, exprimées en pourcentage de la consommation cumulée de lithium primaire du scénario de référence entre l'année 2018 et 2050

La Figure 10 ci-dessus montre l'impact de chaque levier dans la réduction de la consommation cumulée de lithium primaire de l'UE du scénario Clever par rapport au scénario de référence. Au total, l'ensemble des leviers identifiés permet de diviser presque par deux l'empreinte primaire cumulée de lithium. La sobriété d'usage réduit la demande de transport, la sobriété dimensionnelle ajuste la taille et la capacité des batteries de véhicules, et la sobriété collaborative augmente le taux d'occupation des véhicules et donc

diminue le trafic. La somme de ces leviers joue un rôle majeur en représentant environ 80 % de la réduction totale. Ces différents leviers de sobriété sont développés dans les sous-parties suivantes et sont accompagnés de politiques et mesures permettant de les actionner.

4.1. Sobriété : consommer moins de lithium

Pour diminuer la consommation de lithium, il s'agit de réduire le besoin "à la source", c'est-à-dire en concevant mieux les services nécessitant du lithium pour qu'ils remplissent un besoin, tout en étant moins consommateurs. Dans cette partie sont détaillés les leviers de sobriété retenus dans Clever pour réduire les besoins de mobilité et donc en lithium, ainsi que les politiques et mesures associées.

Taille des voitures et des batteries (sobriété dimensionnelle)

Le poids et la taille des véhicules jouent un rôle déterminant dans leur consommation d'énergie. Dans le cas de véhicules électriques, ces facteurs influencent donc l'autonomie d'un véhicule, ou plus précisément la taille de batterie nécessaire pour une même autonomie. Si choisir un véhicule plus petit et plus léger permet de réduire de 20 % la consommation d'énergie par rapport à un autre modèle, pour une même autonomie la taille de la batterie sera réduite d'autant. Ce levier permet donc de jouer directement sur la quantité de métaux utilisés pour la fabrication des batteries, avec notamment une baisse de 13% de la consommation de lithium cumulée (entre 2018 et 2050) entre le scénario Clever et le scénario de référence (voir Figure 10). Plus largement, c'est le cas de l'ensemble des matériaux constitutifs d'un véhicule.

Réduire la capacité des batteries présente par ailleurs un autre avantage, celui de réduire la puissance de charge nécessaire pour recharger la batterie (pour une même durée). Bien que plus anecdotique, cela s'inscrit là aussi dans une logique de sobriété dimensionnelle et de sobriété matière.

Sobriété matière et efficacité matière, quelle différence ?

Pour les matériaux, la distinction entre sobriété et efficacité reste assez similaire aux définitions pour l'énergie¹¹.

Par exemple :

- en choisissant une voiture électrique plus petite que celle que j'avais auparavant, en télétravaillant pour réduire mes déplacements (et donc en augmentant la durée de vie de mon véhicule), ou en prenant les transports en commun, je fais preuve de sobriété ;
- en utilisant une batterie plus performante (masse inférieure pour capacité égale), je compte sur l'efficacité de la batterie pour consommer moins de matériaux.

L'efficacité correspond plutôt à la performance (énergie, matière, environnementale) des équipements ou des procédés de production, alors que la sobriété est liée aux usages et habitudes, influencés eux-mêmes par l'aménagement du territoire (la distance entre habitations et commerces), aux conditions de travail (revenus, possibilité de télétravailler) ou encore au développement des services publics (la présence de transports en commun). L'État, les collectivités et les entreprises ont un rôle fort à jouer pour organiser ces aménagements et plus globalement pour permettre ces évolutions, en mettant en place les conditions pour pouvoir se déplacer au maximum sans voiture.

Dans les scénarios proposés par l'Association négaWatt – le [scénario négaWatt 2022](#) pour la France et le [scénario Clever](#) pour l'Europe – tout comme dans ceux proposés par d'autres acteurs, des hypothèses sont

¹¹ <https://negawatt.org/sobriete-efficacite>

prises sur la réduction de la taille et du poids des véhicules, permettant de limiter la hausse déjà constatée de la taille des batteries.

L'IEA constate aussi que le “maintien de l'autonomie moyenne actuelle des voitures électriques, plutôt que son augmentation, permettrait de réduire la taille des batteries de 20 à 25 % par rapport au scénario mondial Net Zero de l'IEA en 2030 et 2050, ce qui se traduirait par une réduction de 20 % des besoins en matériaux critiques pour la fabrication des batteries des véhicules électriques”(3).

Quelles politiques publiques mettre en œuvre ?

La réduction de la taille et du poids des véhicules, et donc de la taille des batteries, peut être incitée par différentes politiques publiques, de l'échelon européen à l'échelon local.

Au niveau européen, il n'existe pour l'instant pas de réglementation visant spécifiquement à réduire la capacité des batteries. On pourrait en envisager, par exemple en imposant une valeur cible à respecter de capacité moyenne de batterie, tous véhicules confondus vendus par un constructeur, à l'instar de ce qui existe déjà en matière d'émissions de CO₂.

À l'échelon national, le bonus-malus peut lui aussi prendre en compte la taille des batteries et/ou le poids des véhicules pour les limiter. Il existe déjà en France un “malus masse” sur la vente de véhicules neufs, mais celui-ci ne s'applique pas aux véhicules électriques, et n'a donc aucun effet sur la taille de ces derniers tout comme sur celle de leur batterie. De surcroît, il ne s'applique qu'aux véhicules de plus de 1,6 tonnes. Pour rendre plus efficace ce dispositif il est indispensable de :

- abaisser le seuil de déclenchement de ce malus, à 1,2 tonne
- mettre en place un bonus masse, pour les véhicules dont le poids est inférieur à ce seuil
- étendre le champ d'application du bonus-malus masse aux véhicules dits “zéro émission”, (avec un seuil de déclenchement qui pourra être hors poids de la batterie)
- coupler le bonus-malus masse à un bonus-malus “capacité de la batterie”

Au niveau local, les collectivités peuvent mettre en place une tarification progressive de stationnement, en fonction du poids du véhicule. Les villes de Lyon¹² et Paris le font déjà pour les véhicules thermiques.

L'ensemble de ces mesures porte sur la mobilité des voyageurs. Le fret routier électrique est quant à lui très peu développé, et donc peu concerné à ce stade. Néanmoins, les nouvelles réglementations européennes annoncent son développement. Il faudrait là aussi mettre en place des politiques publiques permettant de limiter la consommation de ressources, et donc limiter la taille des batteries des poids lourds.

Diminution des déplacements

Plus il y a de déplacements, plus il faut renouveler le parc de véhicules, ce qui engendre de fait une consommation de métaux. Il y a donc un enjeu à réduire le nombre et la longueur des déplacements effectués. Dans cette perspective, plusieurs leviers existent (liste non exhaustive) :

- le développement du télétravail et de la visioconférence là où des marges de manœuvre existent encore ;
- lorsque cela est pertinent et possible, le changement de site professionnel au sein d'un même employeur¹³ ;
- le choix de destinations de vacances moins lointaines.

¹² <https://www.lyon.fr/actualite/mobilites/stationnement-une-nouvelle-tarification-plus-juste-et-plus-progressive>

¹³ voir par exemple ce que propose <https://www.1kmapied.com/>

Quelles politiques publiques mettre en œuvre ?

La première mesure à mettre en place s'inscrit dans celle plus large portée par négaWatt d'interdiction de la publicité pour des produits/services particulièrement nocifs pour le climat et incompatibles avec une trajectoire de neutralité carbone. Dans ce cas précis, il conviendrait d'interdire la publicité pour des déplacements de plus de 1000 km par exemple. En lien avec le levier précédent (taille des batteries), on pourrait aussi imaginer l'interdiction de la publicité pour tout véhicule soumis à un malus : si l'idée du malus est de décourager la vente de certains véhicules, il paraît totalement aberrant de les promouvoir par ailleurs à travers la publicité.

Par ailleurs les pouvoirs publics, nationaux et locaux, peuvent aussi encourager par différents moyens les deux premiers leviers cités ci-dessus.

Développement des alternatives à la voiture et au fret routier

L'utilisation des modes actifs (vélo et marche à pied), des transports en commun et du fret ferroviaire, en lieu et place des véhicules individuels et des poids lourds, permet de réduire l'utilisation de ces derniers et donc retarde leur renouvellement, consommateur de métaux.

Ces reports modaux peuvent concerner toute typologie de déplacement : domicile-travail, déplacement occasionnel du quotidien, déplacement de loisir longue distance, livraison en centre ville, transport longue distance de marchandises, etc.

Quelles politiques publiques mettre en œuvre ?

Si l'utilisation de ces alternatives dépend *in fine* très souvent du choix de l'utilisateur, leur déploiement est conditionné par leur accessibilité (technique et financière), leur facilité d'utilisation, la création d'infrastructures, etc. et donc *in fine* par la mise en place de politiques ambitieuses en la matière.

La principale mesure à adopter, commune à tous les échelons décisionnels, est l'arrêt des aides allouées à la route et au transport routier, impliquant de fait l'arrêt de la construction de nouvelles infrastructures routières, au profit des différentes alternatives. On ne peut continuer à subventionner un mode de transport qu'il est indispensable de freiner.

En parallèle, la mise en place d'une redevance kilométrique poids lourds permettrait de réduire le fret routier et de financer des infrastructures permettant de développer le fret ferroviaire¹⁴. En complément, les autorités organisatrices de la mobilité ont elles aussi un rôle clé à jouer pour favoriser le développement de ces alternatives.

Covoiturage

Si, comme vu précédemment, une partie des déplacements peut s'effectuer autrement qu'en voiture, ce mode de transport restera prédominant dans les décennies à venir, du fait de sa praticité et de l'absence d'alternatives dans de nombreux cas.

¹⁴ voir notamment le retour d'expérience Suisse : https://www.negawatt.org/IMG/pdf/la_redevance_pl_en_suisse.pdf

Pour autant, si les déplacements en voiture restent importants, le trafic routier pourrait lui diminuer de manière plus conséquente en augmentant le taux d'occupation des véhicules. Moins de trafic routier c'est moins de véhicules à remplacer, et donc moins de métaux consommés pour leur fabrication.

Le covoiturage peut concerner deux grandes typologies de déplacement :

- les trajets longue distance, pour lesquels le covoiturage est déjà relativement bien développé. Les éventuelles contraintes engendrées (détours pour récupérer ou déposer un passager ou rejoindre un véhicule, moins de flexibilité sur les horaires pour le conducteur, etc.) sont contrebalancées par un gain financier (et environnemental), et réduites grâce aux services proposés aux usagers (plateformes en ligne)
- les trajets courte distance, où tout reste à faire pour augmenter les taux d'occupation des véhicules. Pour ces déplacements, les services traditionnels de covoiturage ne fonctionnent pas ou peu, les contraintes étant supérieures aux bénéfices apportés à l'utilisateur. D'autres services sont à penser/déployer, comme les lignes de covoiturage développées par certaines collectivités / par certains opérateurs¹⁵.

Les pouvoirs publics peuvent là aussi encourager le développement du covoiturage, à l'échelon national comme local¹⁶.

Autopartage

L'autopartage, c'est à dire la mutualisation de véhicules individuels entre différents usagers qui font le choix de ne pas posséder eux-mêmes de véhicule individuel (ou de posséder un seul véhicule au lieu de deux) présente plusieurs avantages :

- cela réduit le nombre de véhicules en circulation, libérant de la place pour d'autres modes de transport (modes actifs et transports en commun) ;
- si le nombre de véhicules en circulation est réduit, l'utilisation de chacun d'entre eux est augmentée ; le renouvellement du parc est ainsi accéléré, permettant de bénéficier plus rapidement des meilleures solutions techniques disponibles ;
- l'autopartage permet aux usagers d'adapter beaucoup plus facilement la taille du véhicule à leurs besoins pour chaque déplacement, et donc d'utiliser plus fréquemment un véhicule plus petit, moins consommateur de métaux.

Quelles politiques publiques mettre en œuvre ?

Au niveau national, plusieurs mesures peuvent être mises en place :

- sur le même principe que le bonus covoiturage, créer un bonus autopartage de 100 € financé par un dispositif comme les Certificats d'économie d'énergie en France
- mettre en place ou élargir la prime à la conversion à l'autopartage, pour récompenser aussi, financièrement, ceux qui font le choix d'abandonner leur vieille voiture au profit d'un abonnement à un service d'autopartage
- mettre en avant l'autopartage dans les publicités automobiles, au même titre que le covoiturage et les mobilités actives
- créer une obligation de places réservées à l'autopartage dans différents lieux (gares, ...)
- soutenir financièrement le développement de l'autopartage

En complément, d'autres mesures sont à prendre au niveau local, comme le fait de dédier à l'autopartage une part suffisante du stationnement en voirie.

¹⁵ <https://www.ecov.fr/fr>

¹⁶ Voir par exemple le livre blanc proposé par ecov : https://ressources.ecov.fr/livre_blanc

4.2. Efficacité : diminuer l’impact environnemental de la production et de la consommation de chaque tonne de lithium

L’efficacité correspond à la performance (énergie, matière, environnementale) des équipements ou des procédés de production.

La diminution de l’empreinte environnementale de chaque tonne de lithium consommée sera étudiée dans cette partie. Puisque les estimations précédemment réalisées des besoins minimums montrent que l’extraction du lithium reste nécessaire encore de nombreuses années pour assurer l’électrification indispensable des transports, il s’agit de le faire de la manière la plus responsable possible. Que peut-on mettre en place pour produire mieux ?¹⁷

Pour établir le budget écologique (voir partie 2) de la production des métaux en général, et du lithium en particulier, les émissions de CO₂ ont été utilisées. Cet indicateur est pertinent pour établir une limite, car c’est la limite planétaire actuellement la plus contraignante pour la production. Néanmoins, l’Association négaWatt souhaite développer une approche la plus systémique possible et ne pas participer à un “effet tunnel”(voir Figure 11), en se concentrant sur les seules émissions de CO₂ pour planifier la transition écologique.

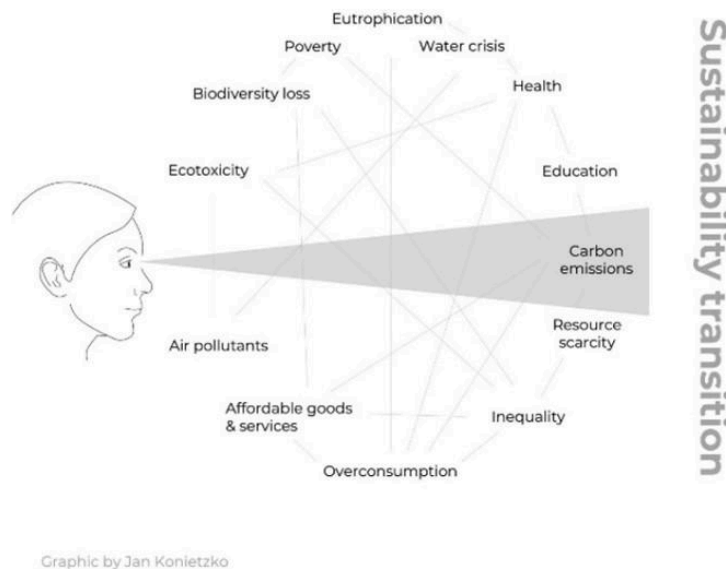


Figure 11 : Illustration de la “Carbon Tunnel Vision”, expression utilisée pour décrire la tendance à se concentrer exclusivement sur les émissions de gaz à effet de serre (Source : image réalisée par Konietzko (37))

Il s’agit donc dans cette partie d’élargir le champ d’étude et d’aborder les principaux impacts environnementaux actuels et potentiels dans la chaîne de production du lithium, ainsi que les leviers permettant de les diminuer.

Le périmètre de l’étude de ces impacts va de l’extraction minière à la production des principaux produits chimiques à base de lithium utilisés dans la fabrication des batteries. Les impacts des étapes ultérieures de la production des batteries ne seront pas discutés ici et la question de la substitution d’une technologie par une autre sera abordée dans la partie 4.2.

De manière non exhaustive, les impacts environnementaux suivants seront abordés dans cette partie :

- la problématique des déchets miniers et le changement d’usage des sols ;
- les impacts sur la ressource en eau;
- les émissions de gaz à effet de serre ;
- les impacts sur la biodiversité ;

¹⁷ NB : l’IEA inclut dans l’efficacité matière la conception de véhicules plus légers (3), qui a été classée ici dans les leviers de sobriété.

Les problématiques liées à l'acidification ne seront pas traitées ici. En effet, pour certains métaux le drainage minier acide est un phénomène conséquent, conduisant à l'acidification des eaux de surface et participant à polluer les cours d'eau et les eaux souterraines. Mais le lithium est généralement extrait des saumures¹⁸ ou des pegmatites (voir ci-après), ne présentant pas de minéraux sulfurés, responsables du drainage minier acide. L'occurrence d'un tel phénomène dans l'exploitation du lithium est donc improbable (38).

Il s'agira à chaque fois de distinguer les voies de production les moins impactantes, celles à éviter, et d'essayer d'évaluer leur potentiel d'amélioration.

La chaîne de production du lithium

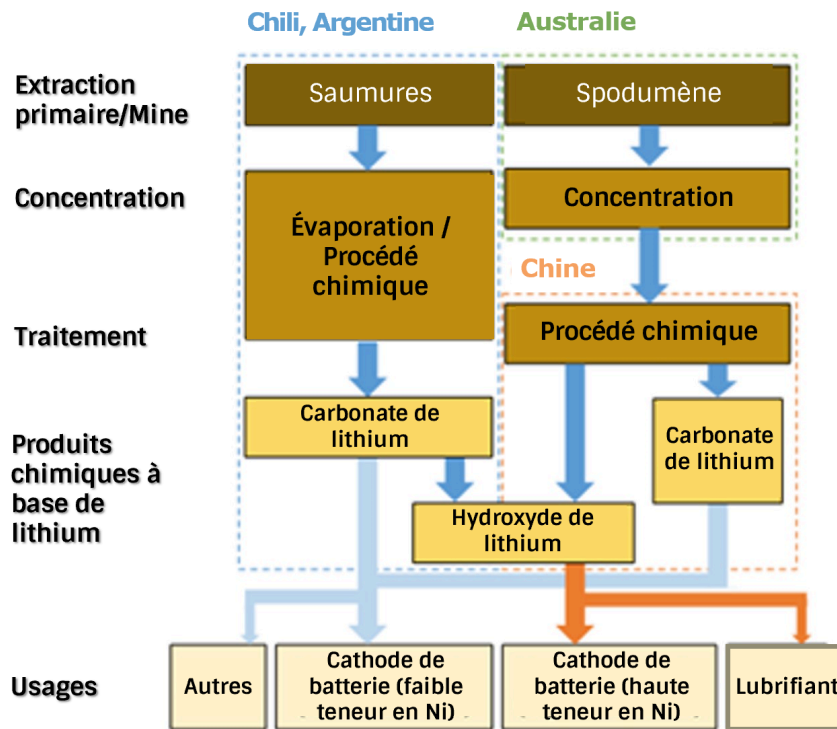
Dans cette partie est expliquée la structuration de la filière de production du lithium utilisé dans les batteries afin de pouvoir en décrire les impacts associés dans un second temps.

L'extraction minière du lithium se fait actuellement sur deux principaux types de gisements (voir Figure 12) :

1. (à gauche) **Production dans les salars** à partir du pompage en profondeur des **saumures** contenant du lithium. Les plus grandes réserves de lithium se trouvent dans les salars du triangle du lithium, entre le sud de la Bolivie, le nord du Chili et le nord-ouest de l'Argentine. Le triangle du lithium est actuellement la première zone de production du lithium à partir de saumure, bien que la Chine en produise également. Jusqu'à récemment une étape d'évaporation en plein air des saumures était nécessaire pour concentrer le lithium et précipiter les autres éléments, ce qui nécessite un climat très aride. La saumure passe dans des bassins d'évaporation connectés en série. Les bassins sont conçus de manière à ce que, dans des conditions optimales, un seul sel commercialisable cristallise par bassin (gypse, puis chlorure de sodium, etc.), pour finalement former le **concentré** qui est **sous forme de saumure enrichi en lithium** (contenant environ 6% de lithium). Certaines améliorations technologiques pourraient permettre de se passer de cette étape, ce qui sera discuté dans le paragraphe sur l'eau. La teneur initiale de lithium dans la saumure reste un facteur décisif pour la rentabilité de l'exploitation (38).
2. (à droite) **Extraction de roches dures**, forme plus classique d'extraction minière. La plupart du temps, pour l'extraction du lithium, ces roches sont des **pegmatites**, le minéral exploité est le spodumène. En raison de la valeur relativement faible du minerai, la production de roche dure se fait actuellement par extraction à ciel ouvert dans toutes les grandes mines. Le minerai de pegmatite est extrait selon la méthode traditionnelle de dynamitage et de chargement, puis transporté de la mine à l'installation de traitement. La roche y est concassée et broyée. Puis différentes étapes de concentration sont menées pour obtenir un produit commercialisable avec moins d'impuretés : **un concentré de spodumène** (contenant environ 6% d'oxyde de lithium Li_2O). Les procédés de concentration fréquemment utilisés sont la séparation densimétrique, la flottation et la séparation magnétique. Les pegmatites à lithium sont présentes dans le monde entier, mais les teneurs et les tonnages en Australie sont plus importants que dans la plupart des autres régions du monde. L'Australie est actuellement le premier producteur minier de lithium avec 51% de la production mondiale (4), et a la plus grande capacité de production au monde, cependant jusqu'à récemment, le concentré de spodumène était entièrement affiné en Chine. D'autres gisements importants de pegmatites existent au Zimbabwe, en République démocratique du Congo, au Portugal, en Chine et au Brésil. L'extraction du lithium peut se faire conjointement avec d'autres substances valorisables : le tantale et l'étain sont notamment d'importants coproduits de l'extraction du lithium (38).

¹⁸ Les saumures sont composées d'eau et de sels en forte concentration. Dans le cas des salars (Argentine, Bolivie, Chili), les saumures contiennent du lithium, du sodium, du potassium, du magnésium, du calcium, du chlore, des sulfates, et du bore.

3. Les autres gisements actuellement exploités¹⁹ sont :
- la lépidolite qui représentait 20,12% de la production chinoise en 2021 (39), soit 11,28 kt de lithium métal produit en Chine à partir de lépidolite, soit environ 10% de la production mondiale en 2021. C’est le minéral d’intérêt présent dans le gisement de Beauvoir dans l’Allier en France (projet EMILI) ;
 - l’exploitation de résidus de production (déchets miniers), qui a notamment lieu au Brésil (4) ;



NB: Une partie du minerai de spodumène est directement utilisée dans les céramiques

Figure 12 : Chaîne de production du lithium : les deux grands types d’extraction et de produits actuellement utilisés, traduit de l’IEA, 2021 (6)

L’extraction primaire du lithium dans l’eau saline (saumure) provenant de puits de pétrole ou de production d’énergie géothermique est également à l’étude. C’est le cas par exemple du projet géothermique de Vulcan Energy Resources en Allemagne²⁰, près de Karlsruhe, ou en Alsace du projet d’Eramet et Electricité de Strasbourg, ou encore du projet de Lithium de France, propriété du groupe français Arverne, spécialiste des forages géothermiques (41). L’objectif est d’extraire du lithium tout en produisant de l’énergie géothermique. La saumure pompée pour la production géothermique contient en effet du lithium. Cependant, avec moins de 200 milligrammes de lithium par litre de saumure pompée, les concentrations sont plutôt faibles. Le climat de ces régions d’extraction ne permet pas l’étape de préconcentration par évaporation comme dans les salars sud-américains situés dans des régions arides.

D’autres procédés sont employés pour récupérer le lithium : extraction sélective par solvant organique, échangeurs d’ions, nano-membranes pour concentrer le lithium sous haute pression. L’ensemble de ces procédés sont regroupés sous le nom d’extraction directe du lithium (*direct lithium extraction*, DLE). Cette

¹⁹ Actuellement les opérations minières en activités se répartissent comme suit : sept exploitations minières en Australie, une exploitation de résidus miniers au Brésil, deux exploitations de saumure en Argentine et au Chili, deux exploitations minières au Canada, cinq exploitations minières et quatre exploitations de saumure en Chine, et une exploitation minière au Zimbabwe ont représenté la majorité de la production mondiale de lithium. En outre, de plus petites exploitations en Argentine, en Australie, au Brésil, en Chine, au Portugal, aux États-Unis et au Zimbabwe ont également contribué à la production mondiale de lithium (USGS, 2024)

²⁰ Selon une étude de faisabilité publiée en février 2023 l’entreprise envisage de produire 24 000 tonnes d’hydroxyde de lithium par an à partir de 2027 (40).

technique peut également être utilisée dans les salars, et sera discutée dans le paragraphe sur l'impact sur la ressource en eau.

Il est probable que la production des pegmatites augmentera davantage que celle des salars, car le potentiel directement disponible est plus important. En outre, les salars présentent des risques liés au processus de production, tels que la contamination de la saumure ou une extraction insuffisante (38).

Après l'étape minière (production primaire) et l'étape de concentration du minerai, vient **l'étape de traitement chimique** pour la production du lithium affiné (ou produits chimiques à base de lithium). Les deux produits chimiques à base de lithium les plus utilisés dans les batteries sont l'hydroxyde de lithium monohydraté ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$) et le carbonate de lithium (Li_2CO_3).

Étape de traitement pour la production de carbonate de lithium

Dans le cas de l'extraction en roche dure, le concentré de spodumène est traité par attaque acide après grillage (calcination). Le concentré est calciné à environ 1 100 °C pour convertir les minéraux en une forme soluble dans l'acide sulfurique. En ajoutant d'abord du carbonate de calcium, puis de la soude, les éléments indésirables tels que le fer, le manganèse, l'aluminium et le calcium sont éliminés. En passant par des étapes supplémentaires de neutralisation et de chauffage (90°C-100°C) du mélange, on parvient à l'obtention du carbonate de lithium. Des échangeurs d'ions sont utilisés pour augmenter encore la pureté (38).

Le traitement chimique de la saumure consiste à éliminer le bore au moyen d'une extraction par solvant. Puis le magnésium et le sulfate restants sont précipités (avec de la chaux vive et du carbonate de sodium). Le lithium est ensuite extrait sous forme de carbonate du liquide concentré et pur. Des échangeurs d'ions et des étapes de lavage sont utilisés pour augmenter encore la pureté (38).

Étape de traitement pour la production de l'hydroxyde de lithium monohydraté

La production d'hydroxyde à partir des saumures se fait exclusivement à partir de carbonate de lithium (Li_2CO_3), qui réagit en plusieurs étapes avec un mélange de chaux vive et d'eau pour produire de l'hydroxyde de lithium monohydraté (42).

La production d'hydroxyde à partir de concentré de spodumène se fait par voie basique : calcination initiale du concentré, en présence de chaux qui donne du silicate de calcium et de l'oxyde de lithium. Après calcination, une lixiviation, à l'eau chaude, permet d'extraire une solution d'hydroxyde de lithium qui après concentration cristallise en hydroxyde de lithium monohydraté (43).

En 2020, la capacité de production des carbonates de lithium toutes qualités confondues (et donc tous usages confondus) est majoritaire et représente 68% de la capacité de production des produits chimiques à base de lithium (44). Pour les produits utilisés pour la fabrication des batteries, exigeant un degré de pureté supérieur, les carbonates de lithium qualité batterie représentent 38% de la capacité de production mondiale et les hydroxydes qualité batterie représentent 13%.

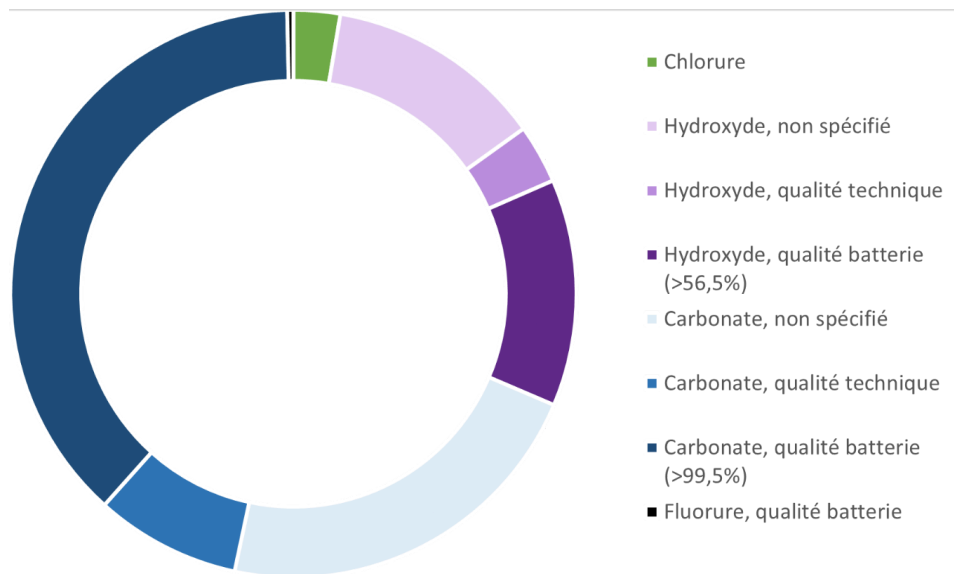


Figure 13 : Capacité de production installée pour le lithium affiné, par produit et qualité, en 2020 dans le monde, en pourcentage massique (Source : Commission Européenne (44))

Cependant, dans la plupart des projections, il est attendu que l’usage de l’hydroxyde de lithium se renforce du fait de son utilisation dans les batteries à forte teneur en nickel qui sont également les batteries avec la densité énergétique la plus élevée (pour le même nombre de kWh cela allège le poids de la batterie). Les nouvelles capacités de production installées sont donc plutôt axées sur l’hydroxyde de lithium (45).

En 2021, pour cette production d’hydroxyde de lithium, la Chine est le premier exportateur mondial avec environ 68 % des exportations, le Chili arrive en seconde position avec 11% des exportations. La production d’hydroxyde de lithium en Chine provient en partie de gisements locaux, mais en grande partie d’importations de concentrés de spodumène en provenance d’Australie. L’hydroxyde de lithium est ensuite injecté dans la création de valeur locale ou exporté vers d’autres pays comme la Corée du Sud et le Japon (45).

Cette situation tend à se modifier nettement, car les capacités de production d’hydroxyde de lithium se développent, notamment en Australie, avec environ 100 000 tonnes d’hydroxyde de lithium de capacité installée (comparé à 70 000 tonnes livrées par la Chine en 2021) faisant de l’Australie un futur exportateur. Les pays du triangle du lithium tentent de s’approprier une plus grande partie de la chaîne de valeur, mais les investissements manquent encore, même si l’État bolivien s’est impliqué en ce sens (38). Si le présent rapport n’aborde pas de manière approfondie les questions géopolitiques et de commerce international, il est à noter que cette diversification des pays exportateurs ne se départit pas totalement de l’influence des sociétés chinoises qui sont assez présentes dans l’actionnariat des projets à l’étranger²¹.

²¹Le projet Kwinana en Australie par exemple, un des deux grands projets récents de production d’hydroxyde de lithium dans le pays, est le fait d’une joint venture dont Tianqi Lithium est actionnaire à 51%.

La problématique des déchets miniers et du changement d’usage des sols

Pour la production des métaux issus de l’extraction en roche dure, la quantité et le mode de gestion des déchets miniers et métallurgiques sont souvent centraux dans l’émergence d’impacts environnementaux, sanitaires et sociaux.

Terminologie	Description
<p>Stériles (<i>overburden, interburden or waste rock</i>)</p>	<p>Déchets miniers produits (en général, sols ou roches grossièrement broyées) pour permettre l'accès au gisement, i.e. au minerai. On distingue : les terrains de recouvrement (stériles francs ou de couverture, <i>overburden</i>), les parties du gisement jugées insuffisamment riches d'un point de vue économique (stériles de sélectivité, <i>interburden</i>) ou un mélange des deux précédents (stériles mixtes).</p>
<p>Résidus (<i>tailings</i>)</p>	<p>Déchets miniers produits lors de la phase de production du concentré. Peut aussi désigner des déchets produits dans les phases ultérieures d’affinage ou de traitement chimique.</p>
<p>Déchets miniers (<i>mining waste</i>)</p>	<p>Regroupe les stériles et les résidus.</p>
<p>Tout-venant, minerai brut (<i>Run of mine, gross ore, crude ore</i>)</p>	<p>Roche contenant des minéraux ou des substances utiles (comme les métaux) en proportion économiquement intéressante pour justifier l'exploitation, et nécessitant une transformation pour être utilisée par l'industrie. Le minerai est distingué des stériles de sélectivité par la teneur de coupure (<i>cut-off grade</i>, teneur minimale en dessous de laquelle l'exploitation n'est pas rentable), qui varie en fonction du prix, des coûts d'opération, etc. Ainsi, à l'échelle d'une exploitation, la taille du gisement est changeante dans le temps et l'espace : tout comme la notion de ressource, la notion de minerai est une notion socio-économique.</p>
<p>Concentré (<i>Ore concentrate</i>)</p>	<p>Minerai ayant subi des étapes de concentration : le traitement du minerai, ou minéralurgie (<i>mineral processing</i>). La minéralurgie regroupe un ensemble de techniques de traitement physiques et physico-chimiques ayant pour objet d'obtenir des produits ayant une valeur commerciale et transformables par la métallurgie (transformation du concentré en métal ou en alliage).</p>
<p>Métal et teneur du minerai (<i>Net ore or metal content and grade</i>)</p>	<p>La teneur (généralement en g/t ou ppm) désigne la quantité de la substance recherchée contenue (<i>metal content or net ore</i>) dans le minerai brut extrait :</p> <p>Teneur = quantité métal dans le minerai / minerai brut</p>

Tableau 6 : Définition de termes techniques liés à l’exploitation minière (Sources disponibles dans Pigneur, 2019 (46))

L'extraction du lithium des roches solides se fait généralement à ciel ouvert, la roche extraite est broyée pour en extraire le minéral porteur de la substance d’intérêt, produisant un concentré, puis celui-ci est traité pour obtenir le métal (voir paragraphe précédent). A chacune de ces étapes, la part de la roche qui n’est pas intéressante pour l’exploitant est rejetée, créant des déchets miniers (voir Tableau 6). Le premier déchet est

créé à l'étape d'extraction où il faut d'abord enlever des déblais et **des stériles** (voir à gauche sur la Figure 14) pour atteindre le gisement qui sont ensuite stockés sous forme de **verses à stériles** (ressemblant à des collines artificielles). Cette opération peut générer de la poussière. La production de concentrés à partir de roches solides génère des résidus qui sont dirigés vers des bassins de décantation appelés parc à résidus (lac artificiels retenus généralement par une digue ou des bords surélevés, voir Figure 14) (45).

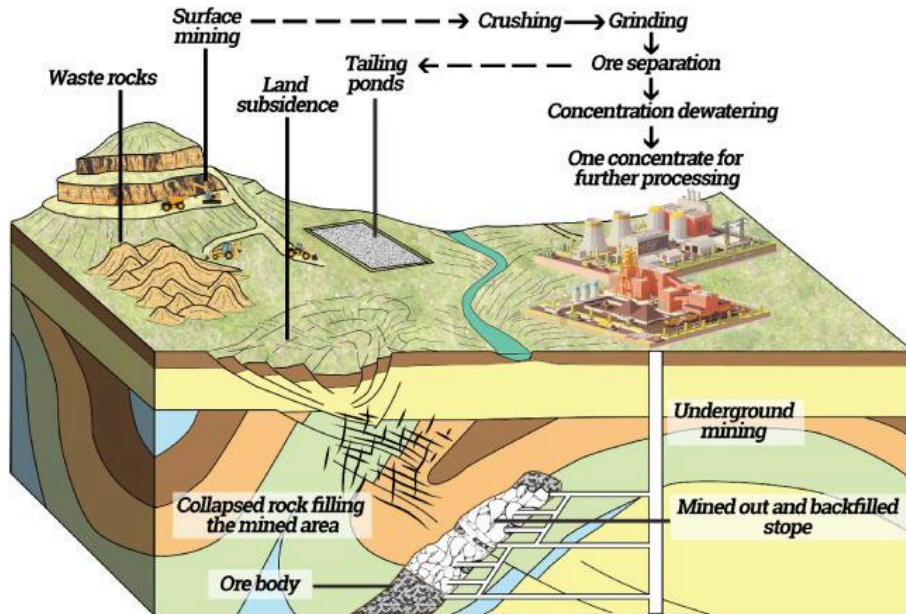


Figure 14 : Étapes de production des déchets d'exploitation minière et de concentration (Source :Mabroum et al., 2020 (47))

Le stockage de ces déchets en extérieur (versés à stériles et parc à résidus) est la norme, et peut dans certains types de mines, contribuer à l'acidification des cours d'eau due au drainage minier acide, la dissémination de substances toxiques (ayant un impact en termes de toxicité humaine et d'écotoxicité) ou radioactives naturellement présentes dans les gisements. Cette diffusion peut se faire via le stockage, les fuites, le déversement volontaire (mauvaise pratique) et les accidents impliquant des déchets. Ces accidents, comme les ruptures de digue (48) n'étant malheureusement pas rares. Ces digues sont estimées à environ 3 500 dans le monde et comptent parmi les plus grands ouvrages de génie civil de la planète. Ils sont généralement destinés à un stockage à long terme ou permanent et le taux de défaillance des barrages de résidus est estimé à deux ordres de grandeur plus élevé que celui des barrages hydrauliques conventionnels (3).

Ces éléments toxiques ou radioactifs peuvent être naturellement présents dans la roche exploitée, mais les opérations de broyage, de traitement et le stockage en extérieur vont augmenter leur réactivité avec l'environnement et leur dissémination. Des intrants chimiques ayant réagi avec les minéraux peuvent également être présents dans les résidus.

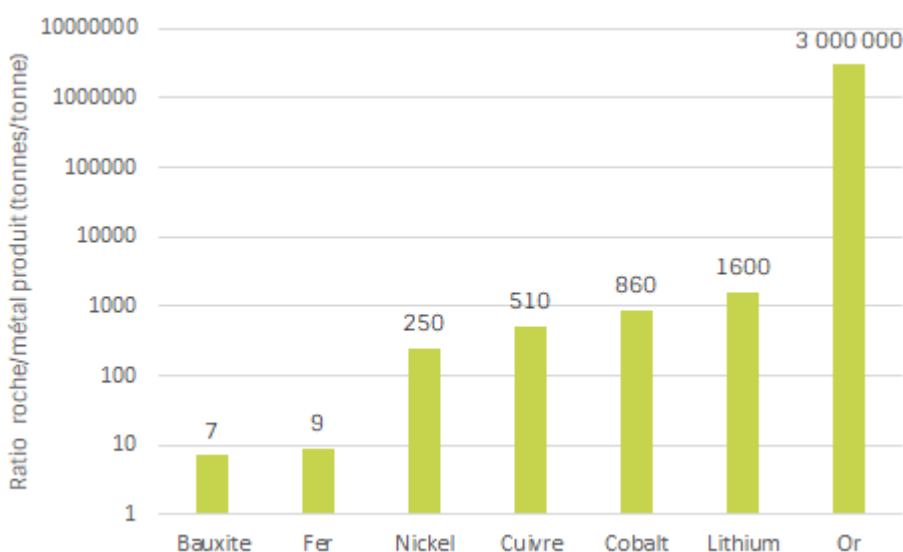


Figure 15 : Ratio de roches extraites par rapport au métal produit, en tonnes/tonne, échelle logarithmique (Source : IEA 2023 (3))

Or, le lithium étant peu concentré dans les gisements, **la production de lithium en roche dure est une production mobilisant des volumes importants de roches et donc générant beaucoup de déchets.** D'après l'IEA (3) le ratio roche pour métal de la production de lithium en exploitation en roche dure (spodumène) est de 1600 tonnes de roches extraites pour une tonne de lithium produit. D'après DERA (38) les pegmatites à lithium donnent entre 3 à 10 tonnes de stériles par tonne de minerai, d'après nos calculs (voir Annexe 2), le ratio roche pour métal de l'IEA correspond à l'hypothèse haute de DERA sur la production de déchets des spodumènes.

Ce chiffre ne peut être directement traduit en volume de déchets, car il ne tient pas compte de la potentielle valorisation de coproduits, mais il donne à voir que **la production de lithium se situe à un niveau élevé de production de déchets miniers comparée à d'autres métaux comme cela apparaît sur la Figure 15.** Il est à noter que plus ce volume est important plus le confinement total de la pollution potentielle devient compliqué, d'autant plus que les installations de stockage des déchets ont vocation à rester sur place après l'exploitation de manière permanente.

De ce volume important de déchets, la majeure partie est composée par des stériles (voir Figure 16) et une petite partie par des résidus de traitement. Le résultat du calcul présenté sur cette figure ne tient pas compte des coproduits et est détaillé en Annexe 2.

Avec la baisse des teneurs (Greenbushes une des plus grosses mines de spodumène en Australie étant le gisement connu le plus concentré, tous les autres gisements sont de teneurs plus faibles), **l'augmentation de la part de lithium produit en extraction en roche dure et l'augmentation de la consommation, il est à prévoir que l'augmentation de la masse de déchets miniers liés à la production de lithium soit très importante** (voir Figure 17).

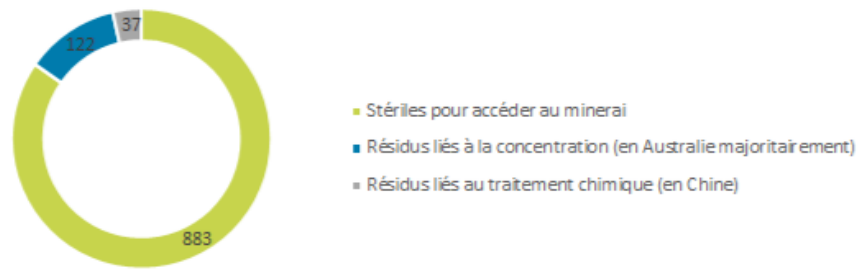


Figure 16 : Production de déchets miniers aux différentes étapes de traitement du spodumène, en tonnes par tonne de lithium (Calculs d'après DERA, 2023 (45) et Vignes, 2024 (43))

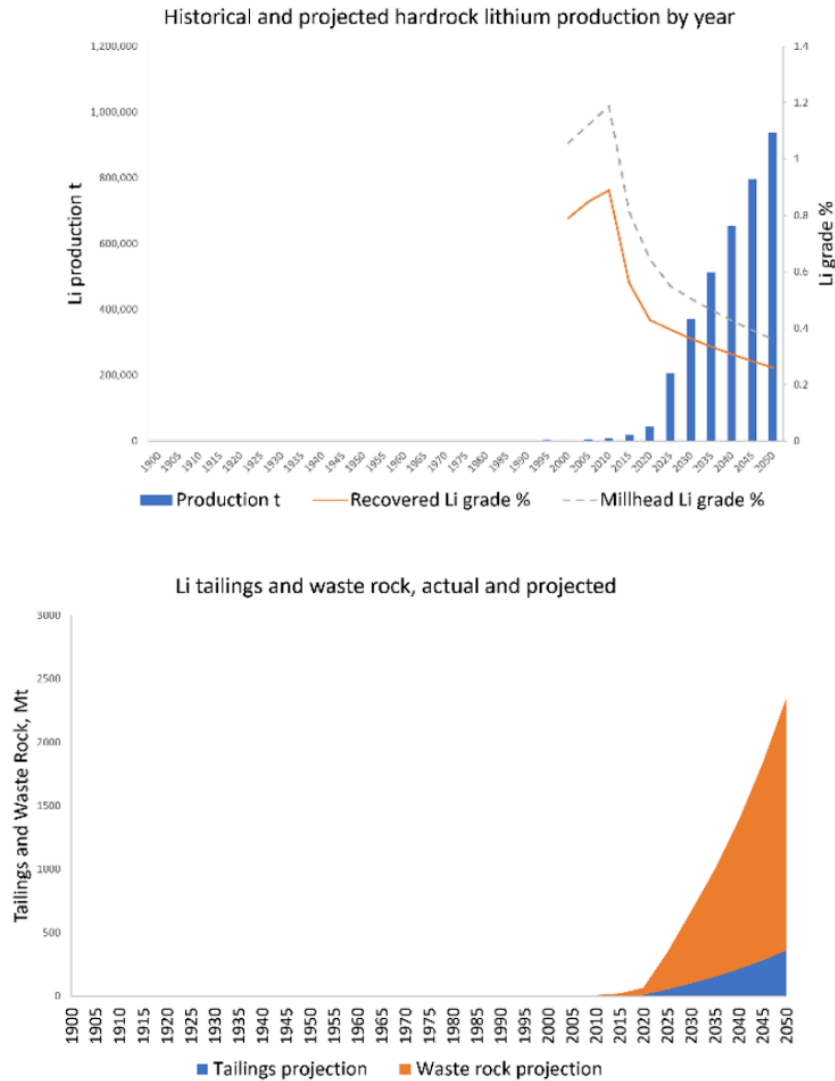


Figure 17 : Estimation de la production de stériles (en orange) et de résidus (en bleu) en bas, liés à la production de lithium (en haut) dans le monde (Source : Valenta et al., 2023 (49))

Dans le cas du lithium, il semblerait que **les stériles issus de l'extraction en roche dure des pegmatites ne présentent pas de toxicité particulière**, et ne sont pas à l'origine du phénomène de drainage minier acide, du fait de l'absence de minéraux sulfurés dans les gisements (3,38,50). Cependant, le potentiel de diffusion d'éléments toxiques ou radioactifs s'étudie au cas par cas, car il varie selon les gisements, les conditions climatiques locales, les procédés utilisés etc. Par exemple, une étude sur le traitement du spodumène australien pointe que même en l'absence de minéraux sulfurés, l'emploi de produits chimiques à base de sulfate, comme l'acide sulfurique, lors des pratiques d'excavation et de traitement, peut conduire à du drainage minier acide (50). Il est aussi à noter que le site de stockage des résidus de la mine de Jiajika, de type pegmatite (spodumène) en Chine, a été responsable de la dissémination d'arsenic, de chrome et de vanadium, avec des valeurs pour l'arsenic dans les cours d'eau dépassant par endroit les valeurs de potabilité de l'OMS (51). Les auteurs soulignent également dans son article le manque d'étude de l'impact sur les eaux de surface du stockage des déchets de mine de lithium en extraction en roche dure. Des mines de spodumène situées dans le Sichuan ont également été liées avec des scandales de pollutions, mais le peu d'informations disponibles ne permet pas de déterminer si cette pollution est liée à la présence

d'éléments toxiques dans les déchets miniers ou à des mauvaises pratiques comme le rejet direct de produits toxiques utilisés pour le traitement dans les cours d'eaux (52).

Peu d'informations sont disponibles sur le stockage des déchets miniers des **gisements de lépidolites** actuellement exploités en Chine. Cependant la gestion de ces déchets semble associée avec un **risque: celui de la pollution au thallium**. Une étude réalisée sur des résidus miniers fournis par l'entreprise Lepidico Ltd. (s'approvisionnant en Namibie), produits suite à l'affinage du lithium, montrent que **les niveaux de thallium dans ces résidus étaient environ sept fois supérieurs à la valeur de référence canadienne pour la pollution des sols** (53). La présence de thallium dans les résidus de traitement pourrait expliquer la pollution de l'eau dans la province chinoise du Jiangxi, comme détaillé dans la partie suivante. Il semblerait que le traitement des résidus par de l'eau légèrement acide avant leur stockage puisse extraire la moitié du thallium et pourrait atténuer considérablement le risque de rejet de thallium dans les eaux de surface et souterraines (53). **Dans tous les cas, les résidus issus de cette extraction doivent faire l'objet d'une étude spécifique pour évaluer les risques liés à la toxicité, trouver des méthodes de traitement et de stockage adaptées pour diminuer les risques écotoxiques.**

Au delà du risque de dissémination d'éléments toxiques pouvant avoir des impacts sur la santé ou sur les écosystèmes, les installations de stockage des déchets participent à augmenter l'occupation des sols de l'extraction minière ce qui génère de l'artificialisation des sols²². Cette artificialisation rend périlleuse, sinon impossible, une future utilisation agricole sur les lieux de stockage des déchets et peut créer des conflits d'usage. A l'échelle mondiale et pour tous les matériaux, l'impact des opérations minières en termes d'emprise foncière, comprenant les mines elles-mêmes, les parcs à résidus et les usines, sur la terre est loin d'être négligeable. Sans compter les installations de stockage de déchets miniers qui s'accumulent au cours du temps et sur les seules mines en activités, il est estimé qu'elles couvrent 100 000 km² de la surface de la planète, soit une superficie comparable à celle de l'Islande (24). **Les déchets miniers peuvent également contribuer de manière importante à l'érosion ou au comblement des cours d'eau et des fonds marins** (54). Particulièrement dans le cas de mauvaises pratiques telles que le déversement volontaire des déchets dans les cours d'eau ou dans l'océan, ou encore une gestion inadéquate conduisant à une rupture de digue. **Dans ce cadre, la forte augmentation à prévoir du volume de déchets lié à l'extraction minière du lithium (voir Figure 17) pose problème.**

Les conflits liés à l'usage des sols des mines de lithium dépendent de leur localisation et varie fortement en conséquence. Ces conflits sont moins présents dans les régions arides et peu peuplées, comme le nord-ouest de l'Australie, que dans les régions densément peuplées. Cela peut également conduire à un effet insidieux : les exploitants miniers occupent des surfaces plus importantes dans les zones moins peuplées, cet étalement pouvant contribuer à un effet accru sur les écosystèmes. Ainsi, des données provenant d'études de faisabilité et de documents de demande de licence, publiées par le gouvernement de l'Australie occidentale, révèlent qu'**une superficie de seulement 4 m² est nécessaire pour la production d'une tonne de carbonate de lithium dans la mine de Greenbushes, située dans une zone climatique tempérée, tandis que les mines de Pilgangoora et de Mount Marion, situées en zones semi-arides, nécessitent 12 à 13 m²/t de carbonate de lithium produit.** Cela s'explique en partie par la teneur plus élevée de Greenbushes en lithium, mais il est probable que les zones d'exploitation et de stockage dans les régions semi-arides ont été demandées et approuvées beaucoup plus généreusement, parce que les conflits d'utilisation avec d'autres parties sont beaucoup plus faibles dans ces deux zones. À titre de comparaison, la production d'une tonne de cuivre nécessite 3 à 4 m² de terrain et la production d'aluminium environ 1 m²/t (45).

Les conflits d'usage peuvent se traduire par des déplacements de population y compris pour l'installation d'infrastructures de stockage des déchets (55). En Chine, plusieurs conflits autour de l'extraction du lithium ont été recensés, notamment dans le Sichuan, mais il est difficile de dire si ces conflits concernent en particulier la gestion des déchets (56).

²² Transformation d'un sol à caractère agricole, naturel ou forestier par des actions d'aménagement, pouvant entraîner son imperméabilisation totale ou partielle. Ce changement d'usage des sols, le plus souvent irréversible, a des conséquences qui peuvent être préjudiciables à l'environnement et à la production agricole. L'artificialisation des sols, et notamment leur imperméabilisation, amplifie le ruissellement de l'eau au détriment de son infiltration, et participe ainsi à l'érosion des sols, est à l'origine de coulées d'eau boueuse et accentue le risque d'inondation. Le ruissellement contribue également à la dégradation de la qualité chimique et écologique des eaux en intensifiant le transfert de sédiments chargés de contaminants des sols vers les cours d'eau. L'artificialisation des sols peut aussi provoquer un déstockage de carbone rapide et conséquent, qui contribue au changement climatique lorsque le sol n'est pas très vite couvert (végétation, revêtement). Enfin, elle affecte la biodiversité en fragmentant les habitats naturels et en transformant irrémédiablement les écosystèmes et les paysages (Source : INSEE).

Aujourd’hui, il existe peu d’études traitant de la déforestation liée à l’exploitation du lithium, et l’impact paraît à première vue négligeable par rapport à d’autres filières d’extraction comme l’or ou le charbon. Cependant, il est à noter que la majorité de l’extraction reste à venir et que des projets sont à des stades de développement variés dans les pays suivants : Australie, Brésil, Canada, Ghana, Pérou, Russie, États-Unis (4). Or ces pays font partie de la liste des 10 pays ayant la plus forte tendance à pratiquer la déforestation liée à l’extraction minière, concentrant 84 % des cas de déforestation minière directement liée à la mine dans le monde au cours des 20 dernières années (57).

Dans les salars, la production étant effectuée par pompage, elle ne produit pas de déchets miniers, au sens de stériles ou résidus. En revanche, ces régions arides subissent des chaleurs extrêmes, mais aussi des inondations (par exemple en 2015 dans le désert d’Atacama au Chili). Ces inondations peuvent propager la pollution des bassins d’évaporation, qui abritent des débris ou « gangues » contenant des métaux lourds tels que l’arsenic, le thallium et le chrome, ainsi que de l’uranium et du thorium, des éléments radioactifs naturels qui sont également présents dans les minerais de lithium (58).

L’utilisation des terres sur les salars, principalement des bassins d’évaporation, est relativement importante, mais aucune donnée n’est disponible concernant le nombre de mètres carrés par tonne de carbonate de lithium. Cependant, les salars ne sont pas utilisés par d’autres parties prenantes, car il s’agit de plaines salées extrêmement arides. Les conflits d’usage liés à l’extraction de lithium dans salars sont plutôt liés à l’eau et concernent les zones situées en dehors des bassins d’évaporation (38) (voir partie suivante).

En termes de bonnes pratiques, **la priorité est d’éviter la production des déchets miniers**. Pour cela la sobriété (partie 4.1) est bien sûr incontournable, mais il s’agit ici de discuter la diminution de production des déchets à volume de production constant et la diminution de leur dangerosité. Pour cela, il faut :

- privilégier les gisements avec les teneurs les plus élevées (ce qui tendrait à éviter l’exploitation des lépidolites (45)) ou privilégier les gisements où la valorisation des co-produits est significative ;
- prévoir, dès la conception du projet, et inclure dans l’étude d’impact environnementale une **analyse des aspects de prévention de génération des déchets** cités ci-après ;
 - réintégrer les résidus miniers dans les flux de traitement, pour éviter la perte de minéraux critiques et réduire la production de déchets. Ce type de procédé existe déjà comme par exemple dans le cas du projet de retraitement des résidus par Talison Lithium Pty. Ltd. (50) ;
 - valoriser le plus de coproduits possible (50) :
 - le β spodumène pauvre en lithium suite à l’extraction peut être utilisé pour l’extraction de Li dans les effluents industriels et les eaux usées ;
 - les stériles contiennent du silicium et de l’aluminium, qui peuvent être transformés en sous-produits valorisables tels que l’hydroxysodalite ;
 - les aluminosilicates de lithium résiduels peuvent également renforcer de manière significative la résistance des mélanges de béton conventionnels, et peuvent être utilisés comme précurseurs de matériaux géopolymères ;
 - les résidus de traitement peuvent être transformés en adsorbants, en catalyseurs et en filtres à membrane pour l’élimination des substances dangereuses des eaux usées ;
 - de la même manière, concernant les salars, actuellement, certaines extractions concernent uniquement la production de borates, d’autres le carbonate de lithium et d’autres encore le chlorure de sodium. **La récupération simultanée d’un maximum de sous-produits** dans un seul gisement pourrait nécessiter moins d’installations minières et produire moins de déchets (59).
- prévoir, dès la conception du projet, et inclure dans l’étude d’impact environnemental **une analyse des procédés à utiliser pour séparer les substances les plus dangereuses des stériles et résidus**, afin de

stocker les déchets dangereux de manière adaptée. En effet, le diagnostic environnemental de pollution des sols après la fin de l'activité arrive trop tard, car la remédiation environnementale est souvent coûteuse et demande de mobiliser des volumes importants de déchets ce qui a un coût énergétique non nul. **L'anticipation et la surveillance de la présence d'éléments toxiques dans les déchets est bien plus efficace en amont et pendant l'activité afin de pouvoir concevoir des procédés séparant les substances les plus dangereuses des stériles et résidus avant stockage ;**

- Par exemple, le risque de contamination au thallium doit être évalué pour tout projet concernant l'exploitation de lépidolite et des traitements pour le thallium doivent être envisagés avant stockage des déchets (53)
- prévoir un plan de gestion des risques associés à la rupture de digue ;
- des modes de stockage alternatifs des déchets (comme le stockage à sec, qui consiste à extraire l'eau des déchets miniers afin de pouvoir mieux contenir la pollution), en particulier pour les parcs à résidus, n'ont pas fait leur preuve jusqu'à présent et reste trop chères pour pouvoir maintenir la rentabilité de l'exploitation (3) ;

Les mesures suivantes favoriseraient une meilleure gestion des déchets :

- Créer un « **Fonds d'indemnisation européen de la gestion des déchets miniers** », abondé par les entreprises minières, avec une participation financière pour alimenter ce fonds lorsqu'elles sont en activité sur le territoire européen, afin de financer la remédiation environnementale des sites miniers anciens ou à venir, qui incombe trop souvent aux états suite à défaillance de l'opérateur, et de financer la recherche pour une meilleure gestion des déchets minier. Cette proposition constitue une version étendue de la garantie financière de la directive européenne sur les déchets miniers, directive 2006/21 (qui ne permet pas de financer la dépollution passée ou la recherche) ;
- **L'augmentation des moyens humains et financiers des services étatiques en charge de contrôler les installations de stockage des déchets miniers**, ainsi qu'un plan européen de formation dédié à ces services étatiques afin de s'assurer que les spécificités des risques environnementaux et sanitaires associés aux déchets miniers sont maîtrisées de manière uniforme sur le territoire européen. Cette mesure vise à rendre opérationnelle l'Article 17 de de la directive européenne 2006/21 ;
- Amender l'Annexe II de la directive sur les déchets miniers pour que **le risque sanitaire soit mieux évalué**. En effet, la directive propose une caractérisation des déchets qui doit être incluse dans le plan de gestion des déchets, décrite à l'Annexe II et une déclaration des quantités totales estimées de déchets d'extraction qui sont produites pendant la phase d'exploitation. Cette caractérisation évalue essentiellement le caractère de déchets dangereux (2000/532/CE) des résidus et stériles miniers, ce qui est nécessaire, mais pas suffisant, car ce critère est uniquement basé sur la teneur en substance toxique des déchets sans évaluer leur mobilité. En effet, les très nombreux cas d'impacts sanitaires avérés dans le monde liés au stockage des déchets miniers témoignent de la mobilité des substances toxiques contenues dans les déchets miniers et **plaident pour une démarche combinant interprétation de l'état des milieux et évaluation prospective des risques sanitaires**. Cette démarche se découpe en 4 étapes :
 - **évaluation des émissions de l'installation**
 - **évaluation des enjeux et des voies d'exposition (les sources de pollutions et les substances émises des différents milieux et vecteurs de transfert des usages, et les populations exposées)**

- évaluation de l'état des milieux (déterminer si les émissions de l'installation contribuent à une dégradation des milieux)
- évaluation prospective des risques sanitaires pour identifier les risques réels d'exposition

Cette meilleure évaluation du risque sanitaire pourrait également passer par une intégration des activités minières à l'Annexe I directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles, appelée directive IED (aujourd'hui seules les activités de concentration et de métallurgie sont intégrées), ainsi que l'ajout des installations de stockage des déchets miniers.

- **Les informations disponibles** dans les rapports sur la gestion des déchets miniers transmis par les États membres (Article 18 de la directive européenne 2006/21) **devraient comprendre** cette évaluation sanitaire préalablement citée, ainsi qu'**une évaluation des modes de dissémination et risques sanitaires associés. Les délais de mise à disposition des informations sanitaires contenus dans ces rapports devraient être réduits.**

Impact sur la ressource en eau de la production de lithium

L'impact sur la ressource en eau de l'extraction minière et de la métallurgie porte à la fois sur la quantité d'eau douce utilisée et sur la qualité de l'eau. Comme pour la partie précédente, il s'agit de distinguer deux voies principales : l'exploitation des saumures et l'exploitation en roche dure.

Impact sur l'eau de l'extraction des saumures et du lithium géothermal

Pour les saumures, pour l'aspect quantitatif de l'utilisation de l'eau, l'IEA (6,60) indique que la production nécessite en moyenne 775 m³ d'eau par tonne de carbonate de lithium²³, comparé au cuivre ou au cobalt à respectivement 30 m³/tonne à 60 m³/tonne (3) (voir Figure 18). Sur la figure ci-dessous, la part de la production dans des zones de pénuries d'eau représente la part de production située dans des pays avec des risques de pénuries d'eau de modéré à élevé selon le WWF (3). Sur cette figure, on visualise que **la production de lithium présente une consommation d'eau élevée dans un contexte de stress hydrique, comme c'est le cas de la région du désert d'Atacama.**

²³ Les publications de l'IEA (Energy Technology Perspectives 2023. (2023). IEA. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (World Energy Outlook Special Report, p. 287). (2021). IEA.) sont basées sur la publication (Jiang, S., Zhang, L., Li, F., Hua, H., Liu, X., Yuan, Z., & Wu, H. (2020). Environmental impacts of lithium production showing the importance of primary data of upstream process in life-cycle assessment. Journal of Environmental Management, 262, 110253.), dont le tableau 2 mentionne une consommation d'eau pour la production à base de saumure (LBT) de 773 kg d'eau/kg de carbonate de lithium soit 775 m³/tonne de carbonate de lithium.

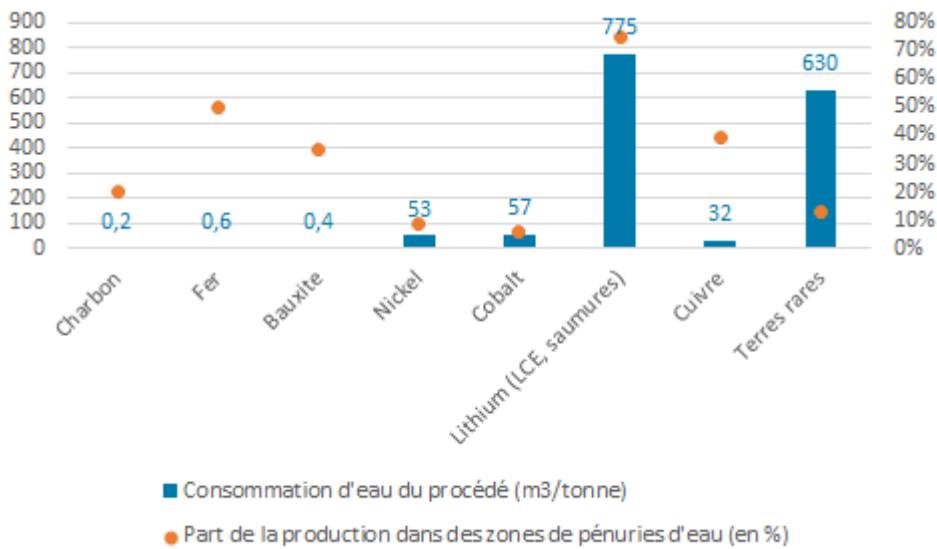


Figure 18 : Consommation d’eau apparente et part de la production dans des zones arides pour différents métaux et pour le charbon, les données pour le lithium concernent la production de saumures (Source: IEA, 2023 (3))

Il faut cependant aller au-delà de ce constat quantitatif pour évaluer la nature de l’impact sur la ressource en eau de l’exploitation dans les saumures. En effet, le terme de "consommation apparente" a été employé ci-avant, car le chiffre de 775 m³ d’eau par tonne de carbonate de lithium semble comprendre l’eau contenue dans la saumure elle-même, qui est une eau impropre à la consommation. En effet, la technologie évaporitique actuellement utilisée pour extraire le lithium des gisements de saumure repose sur l’évaporation à l’air libre pour concentrer la saumure. D’importants volumes d’eau, de 100 à 800 m³ par tonne de carbonate de lithium, selon le gisement, sont perdus par évaporation (59).

La consommation d’eau douce du procédé de transformation avec la technologie d’évaporation actuelle **est de 22,5 et 50 m³ par tonne de carbonate de lithium**, pour le Salar d’Atacama et le Salar d’Olaroz, respectivement (59), volume qui est plus comparable à la production du cobalt ou du cuivre.

S’il paraît évident que la consommation d’eau douce doit être prise en compte comme un impact environnemental, la prise en compte du volume de saumure dans l’empreinte hydrique fait débat. En effet, la saumure est impropre à la consommation humaine ou à une utilisation en agriculture. Donc finalement, quel est l’impact réel de son extraction ? La réponse n’est pas immédiate et est de nature hydrogéologique. **En effet, le volume de saumure qui est pompé a un impact sur la quantité d’eau douce qui s’écoule des bords du salar vers la zone centrale où se situe la saumure** (voir "nucleus" sur la Figure 19). L’eau douce se trouve à la limite du bassin du salar, dans des aquifères libres et captifs. Même dans des salars non exploités, l’eau douce qui s’infiltré dans le salar est en partie mélangée à la saumure (zone de mélange) ou devient de la saumure. Cependant l’analyse de 4 articles (59) suggère que le pompage de saumure pourrait provoquer une augmentation de ce mouvement des eaux douces souterraines vers les dépôts de saumure (voir la Figure 19, flèches bleues). Si ce mouvement de recharge est trop important, il affecte le niveau des lagunes d’eau douce, des rivières et des ruisseaux situés à proximité, ainsi que le niveau de la nappe phréatique dans la zone environnante. Cela crée **un phénomène de rabattement du niveau de la nappe phréatique** (voir ligne bleue sur la Figure 19).

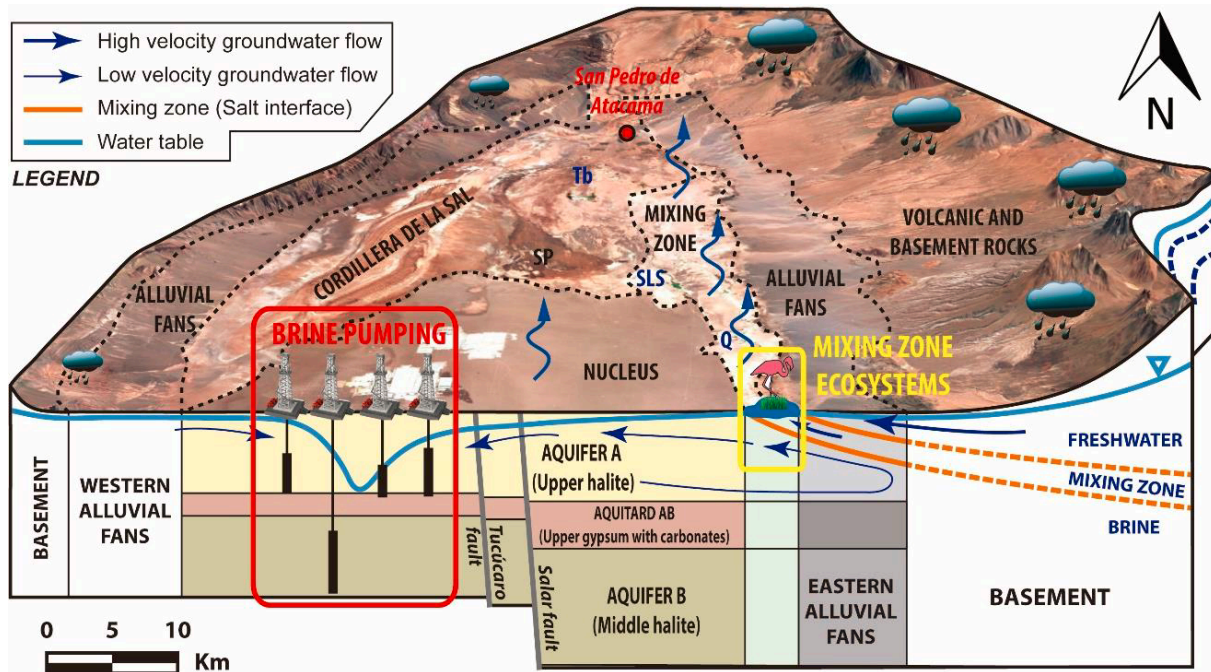


Figure 19 : Illustration du phénomène de rabattement de la nappe dans le Salar de Atacama. Q est le lac Quelana, SLS est le système du lac Soncor, Tb est le lac Tebenquiche et SP est le cône alluvial de San Pedro (Source : Marazuela, 2019 (61))

En pompant la saumure, le niveau de l'eau peut donc être abaissé (38). Le mélange d'eau salée et d'eau douce peut ainsi rendre l'eau inutilisable pour l'eau de boisson et pour l'agriculture traditionnelle des communautés voisines. Or, **une diminution du niveau de la nappe a bien été observée dans le salar d'Atacama**. L'assèchement de puits ont été signalés et l'humidité du sol semble elle aussi diminuer (38,59).

S'il est aujourd'hui clair qu'il y a un impact négatif sur la ressource en eau de l'extraction du lithium dans la région du salar d'Atacama (59), il est cependant difficile de quantifier l'ampleur de l'impact et d'attribuer une part précise de la diminution observée des niveaux des nappes phréatiques à l'extraction du lithium. Cela en raison de la nature complexe des études hydrogéologiques, et du manque de données. En effet, il existe d'autres causes d'assèchement des nappes dans la région, comme l'exploitation du cuivre, dont le prélèvement direct d'eau douce dans le bassin versant est 15 fois plus élevé que celui du lithium (38), la réduction des précipitations dans la région, et l'augmentation de la pression sur l'eau due au tourisme.

Les conflits concernant l'extraction de la saumure et son impact sur les réserves locales d'eau douce ne sont pas un phénomène spécifiquement chilien, mais ont également lieu en Argentine et en Bolivie (38). Ces conflits autour de l'accès à l'eau sont d'autant plus inquiétants qu'ils ont empiré en contexte de changement climatique.

Les solutions principales pour diminuer les pénuries dans les zones arides que sont les salars consistent à diminuer les pressions. Il s'agit donc de diminuer le rythme d'extraction du lithium mais aussi du cuivre qui constitue une pression encore plus importante sur la ressource. Une partie de l'industrie du cuivre, également implantée dans la région, envisage de ne plus prélever d'eau douce dans le bassin versant des salars et d'utiliser à l'avenir de l'eau de mer dessalée. Cette solution devrait être étudiée pour le lithium, ce qui ne réglerait pas le problème de rabattement de la nappe, mais diminuerait l'utilisation d'eau douce. Mais à ce jour aucune étude technico-économique ne semble avoir étudié cette éventualité.

Enfin, concernant les risques spécifiques sur l'eau de l'exploitation du **lithium couplé à la géothermie**, il s'agit du **risque d'un défaut d'imperméabilité des puits** de pompage et de réinjection des fluides hydrothermaux, **créant un risque de contamination de l'aquifère** (si présent). Ce risque est par exemple identifié pour l'aquifère Rhénan (une des ressources en eau les plus importantes en Europe) dans les zones où il est présent lors de l'exploitation des fluides hydrothermaux qui contiennent naturellement des

éléments toxiques (plomb, arsenic, antimoine, radioéléments (62), etc.). Ainsi une étude note que “la conception des puits géothermiques prévoit d'isoler les fluides hydrothermaux de l'aquifère par trois tubages cimentés. Pendant la durée de vie d'une installation, celles-ci doivent être inspectées tous les trois ans pour le puits d'injection et tous les six ans pour le puits de production. Toutes ces inspections doivent être signalées aux autorités minières. En plus de ces barrières mécaniques, un réseau de surveillance piézométrique a été mis en place. Par exemple, [...] à Illkirch, un résultat important a été que l'eau de l'aquifère rhénan est restée potable et non polluée pendant toute la durée des travaux.” (63)

Comme évoqué au début de cette partie sur l'efficacité environnementale, **les techniques de DLE (Direct Lithium Extraction) sont parfois évoquées pour diminuer la pression sur l'eau**, et la pression sur l'occupation des sols. En effet, ces techniques permettent en théorie de se passer de bassin d'évaporation et d'extraire directement le lithium de la saumure. L'idée, pour éviter le phénomène de rabattement de la nappe phréatique, serait de réinjecter la saumure traitée dans la couche géologique où est situé le réservoir. Cependant, en pratique cette idée semble se heurter à deux écueils. Tout d'abord la réinjection de la saumure pauvre en lithium dilue le gisement et diminue donc la rentabilité de l'exploitation de la saumure (37, 57). Dans le cas de l'exploitation du lithium géothermal, la réinjection montre dans 80% des cas une interférence avec la production géothermique. Ensuite, les saumures en sortie de procédé sont susceptibles de contenir des espèces chimiques exogènes au salar ou au réservoir géothermal, ce qui peut contaminer les écosystèmes environnants. Le sort le plus probable de cette saumure en sortie de procédé est donc d'être rejetée dans un bassin d'évaporation, comme c'est le cas actuellement. **Ce qui ne crée pas d'avantage en termes de rabattement de nappe ou en termes d'utilisation des sols.** Enfin, 16% des études prévoient un besoin d'apport en eau douce pour les procédés DLE similaires à ceux actuels, et un quart des études estiment que le procédé a des besoins supérieurs au procédé évaporitif. Le procédé étant encore en développement, des progrès peuvent encore être réalisés, cependant le procédé DLE déjà en cours d'utilisation au Salar del Hombre Muerto présente une consommation d'eau supérieure aux procédés évaporitifs actuellement employés (59). **L'avantage sur la consommation d'eau douce est donc lui aussi incertain. Au vue de ces informations, il peut être conclu que le DLE constitue à ce jour une solution très incertaine au problème de pression sur la ressource en eau.** Ce procédé a surtout l'avantage de rendre le procédé d'extraction du lithium plus rapide et donc plus performante dans les zones arides comme les salars, mais surtout de rendre possible l'extraction du lithium dans les gisements géothermaux qui ne sont pas situés en zone aride, ce qui rend impossible l'évaporation.

L'extraction du lithium en salars comme en contexte géothermal doit faire l'objet d'une surveillance hydrogéologique continue dès le début de l'exploitation, car les incidences sur l'environnement ne peuvent être observées qu'à long terme. En plus de la surveillance par les exploitants minières eux-mêmes, **davantage de mesures devraient être effectuées par des experts indépendants ou des autorités nationales** (57).

Impact sur l'eau de l'extraction des spodumènes

D'après DERA, la mine de Pilgangoora, consomme environ 875 000 m³ d'eau pour une production de 5 Mt de minerai, par an, soit **environ 5,3m³ d'eau par tonne d'équivalent de carbonate de lithium (LCE)**. Cette consommation représente seulement les besoins de la mine et de la concentration, sachant que **la consommation d'eau totale, de la mine de spodumène à la production de carbonate de lithium en Chine équivaut à 40m³ d'eau/tonne de carbonate de lithium**.

Dans les mines en roche dure, l'eau est nécessaire en particulier pour le broyage du minerai, ainsi que pour les étapes de concentration ultérieures (trilage par densité, séparation magnétique, flottation). Les résidus de traitement sont déposés dans des bassins de décantation. Une partie de l'eau peut être réutilisée, mais une autre reste dans les résidus sous forme d'eau interstitielle. **L'utilisation d'épaississants et de filtres-presses pour déshydrater les résidus pourrait permettre de minimiser les pertes d'eau, mais cela n'est pas prévu pour l'instant dans la plupart des projets**. Selon l'étude de faisabilité de la mine de Pilgangoora, pour un débit de minerai de 5 Mt par an, **environ 500 000 m³ d'eau sont irrécupérables, soit environ 33% des besoins en eau pour le broyage et la concentration** (37).

L'avantage des mines en roches dures pour la consommation d'eau, c'est que contrairement au salar, elles ne sont pas systématiquement situées dans des zones arides. Si cette consommation est moins problématique dans les régions relativement humides, **il est cependant nécessaire de choisir l'emplacement des exploitations en fonction de ce critère, de limiter la consommation au maximum grâce entre autres au recyclage de l'eau et au pressage des résidus, et de planifier les besoins en eau**.

Impact sur l'eau de l'extraction de la lépidolite

Pour les procédés de transformation de la lépidolite certaines études en Chine pointent des pollutions au lithium dans les eaux en aval des usines de production du carbonate de lithium (64). Comme évoqué dans le paragraphe précédent, concernant la teneur élevée en thallium des résidus de traitement de la lépidolite, plusieurs médias rapportent des fermetures de sites de production de lithium à Yichun, dans la province de Jiangxi, haut lieu de production du carbonate de lithium en Chine, dû à la contamination au thallium (63, 64). Plusieurs scientifiques chinois ont appelé à réguler ces émissions de thallium appelant à "établir des normes strictes [...] en mettant l'accent sur les polluants de l'eau, en donnant la priorité aux industries liées au lithium dans le monde entier afin de traiter ce problème à l'échelle mondiale. Comme pour la convention de Minamata du PNUE [Programmes des Nations Unies pour l'Environnement], des mesures de gestion internationales sont nécessaires pour atténuer les émissions de thallium au niveau mondial et réduire l'exposition" (67).

Impact sur l'eau du rejet de lithium résiduel

En Chine, toujours dans la province du Jiangxi, la pollution au lithium du bassin de la rivière Jinjiang a également été analysée. L'étude montre que la concentration de lithium dans les plantes aquatiques et les poissons a augmenté de manière significative en aval de l'exploitation du lithium. Cette contamination s'accompagne d'une exposition à des risques sanitaires chroniques des résidents locaux, principalement en raison de la consommation d'eau et de légumes contaminés (64). En effet, à des doses élevées (par exemple, des concentrations sanguines de 15 à 20 mg par litre), le lithium est toxique pour les humains, provoquant des nausées, des troubles visuels et des problèmes rénaux, voire des urgences médicales telles que le coma et l'arrêt cardiaque. Toutefois, hormis une concentration spécifique de 0,005 mg/litre pour le lithium, récemment proposée par le département de la protection de l'environnement de Pennsylvanie, le lithium n'est en grande partie pas réglementé dans les eaux souterraines ou les eaux potables (68).

Si cet exemple est significatif en termes de manque de surveillance des rejets de l'industrie de production de lithium de carbonate en Chine, il montre également l'intérêt du retraitement des résidus pour en récupérer la plus grande part possible de lithium, comme mentionné à la fin de la partie sur la problématique des déchets miniers et du changement d'usage des sols.

Cette partie a finalement montré que l'impact direct en termes de prélèvement d'eau douce de la production de carbonate de lithium issu de spodumène ou de saumure était comparable. Cependant, **l'extraction de saumure** dans les salars provoque en sus un effet indirect sur le niveau des aquifères et **peut avoir un impact plus large sur la disponibilité de la ressource en eau douce**. L'exploitation des salars se situe par définition dans des zones arides où la pression sur la ressource en eau semble d'autant plus intenable. Les solutions technologiques à ce phénomène de rabattement de nappe semblent ne pas avoir fait leurs preuves aujourd'hui. **La diminution de la pression sur les nappes phréatiques dans les salars du triangle du lithium devrait passer prioritairement par une diminution des autres sources de pression** sur la ressource (notamment pour Atacama, la fin des prélèvements pour l'extraction du cuivre), la surveillance de l'impact hydrogéologique de l'extraction de saumure et si nécessaire la limitation du volume d'extraction de saumure. **Concernant l'extraction en roche dure l'utilisation d'épaississants et de filtres-presses pour déshydrater les résidus permettant de minimiser les pertes d'eau dans les résidus devrait systématiquement être étudiée** pour limiter la pression sur la ressource en eau. **Les besoins en eau de l'extraction directe du lithium (DLE) dans les fluides hydrothermaux est plus difficile à évaluer, du fait de la récente émergence de cette technique**. La limitation de son impact semble passer par les conditions suivantes : une exploitation dans des régions où la ressource en eau est plus disponible, avec un procédé limitant le besoin d'apport en eau douce et avec une procédure de surveillance adaptée pour s'assurer de l'étanchéité des puits.

Enfin, **sur la possibilité de contamination de la ressource en eau**, plus d'information sont nécessaire pour établir et éviter les causes de la pollution au lithium présente dans le Jiangxi en Chine. **La présence de pollutions au thallium liée à l'extraction et à la transformation de lépidolite doit alerter** et la faisabilité d'une exploitation de ces gisements dans des conditions environnementales sûres doit être démontrée avant le démarrage de nouveaux projets.

Au-delà des mesures de surveillance, **les besoins en eau de l'industrie extractive devraient être planifiés, et mis en regard des autres usages de l'eau douce et de la raréfaction à venir liée au changement climatique**, afin que les états puissent anticiper et prioriser les besoins en eau. A l'échelle européenne, il s'agit de s'assurer de la conformité d'éventuelles exploitations de lithium avec les plans de gestion des bassins versants de la directive cadre sur l'eau (SDAGE en France).

Le règlement européen sur les matières premières critiques (CRMA, règlement 2024/1252) récemment promulgué cite l'article 4, paragraphe 7, de la directive cadre sur l'eau (DCE), expliquant que les "projets stratégiques" répondent au critère d'intérêt public majeur de la DCE. Or, cet article de la DCE formule des exceptions aux exigences en termes de qualité de l'eau si une activité remplit plusieurs conditions. **Une de ces conditions est de remplir un "intérêt général majeur". S'il ne s'agit donc pas là d'un contournement systématique de la directive cadre sur l'eau instauré par le CRMA pour toutes les substances stratégiques, l'intention de cette déclaration est bien de faciliter pour les industries extractives le contournement des exigences sur la qualité de l'eau. Au vue des impacts majeurs que la mine et la métallurgie peuvent avoir sur la qualité de l'eau et étant donné les risques sanitaires encourus, cette volonté de faciliter le contournement de la DCE, semble aller dans la mauvaise direction.**

Les émissions de gaz à effet de serre

Si ce rapport se penche sur les impacts de la production du lithium et donc indirectement, sur les impacts associés à la transition des mobilités, c'est pour pouvoir proposer la transition la plus soutenable et la plus réaliste possible. Cependant, il faut rappeler que la volonté de décarboner les modes de transports est nécessaire et incontournable dans un monde où **les carburants fossiles utilisés pour les véhicules des particuliers représentaient 10% des émissions mondiales de CO₂ d'origine énergétique** en 2018 (1, 2). Un autre rappel incontournable est que **les véhicules électriques sont déjà aujourd'hui plus performants d'un point de vue climatique que les véhicules thermiques**, comme le montre très bien l'IEA (voir Figure 20 ci-dessous). De plus, cette performance va s'améliorer avec la décarbonation des mix électriques.

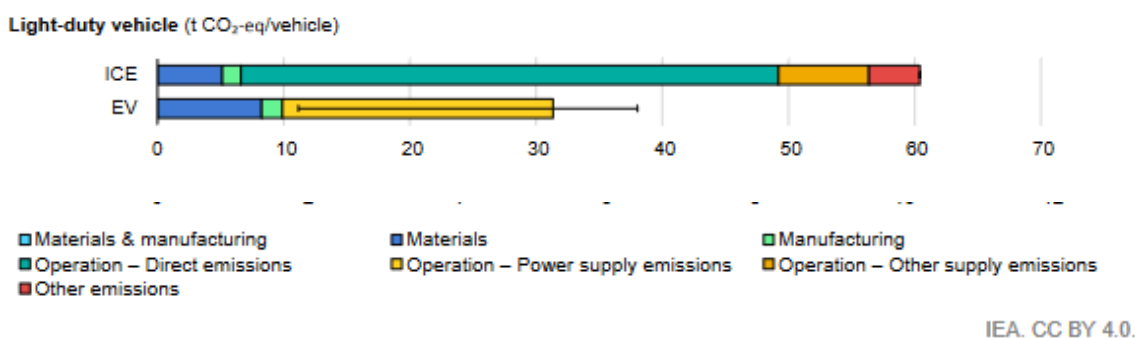


Figure 20 : Intensité moyenne mondiale d'émissions de gaz à effet de serre le long du cycle de vie des véhicules légers (utilitaires et particuliers) pour les véhicules électriques (EV, electric vehicles) et les véhicules thermiques (ICE, internal combustion engine) (Source : traduit de IEA, 2023 (3))

Néanmoins, la Figure 20 montre que la part des matériaux dans les émissions de gaz à effet de serre est plus importante pour un véhicule électrique que pour un véhicule thermique (en proportion et en valeur absolue). Cela souligne d'autant plus l'enjeu de sobriété dans la conception des véhicules (utiliser moins de matériaux) et d'efficacité environnementale dans la production (choisir les gisements et les voies de production les moins impactantes possibles).

En effet, bien que les émissions provenant de la production de matériaux critiques soient modestes aujourd'hui en termes absolus, puisqu'elles ne représentent que 0,04 % des émissions mondiales du secteur de l'énergie, **elles augmenteront rapidement pour fournir les niveaux de demande requis dans scénario mondial Net Zero de l'IEA**. L'IEA montre qu'en supposant des intensités énergétiques et des parts de combustibles constantes, les émissions mondiales de CO₂ liées à la production des cinq principaux matériaux critiques – cuivre, lithium, cobalt, nickel et néodyme – feraient plus que tripler, **le lithium étant le principal responsable de cette augmentation**. L'IEA montre cependant que **l'utilisation accrue de ces métaux pour l'électrification du transport routier permet une réduction nette significative des émissions de gaz à effet de serre par rapport aux véhicules thermiques fossiles (y-compris en intégrant l'ensemble du cycle de vie des véhicules et des métaux qui les composent)** (3). C'est pour tenir compte de cette donnée que la part des limites planétaires attribuée au lithium (dans la partie 2) est très importante, avec une part de la production des métaux allouée au lithium bien plus importante qu'aujourd'hui.

Émissions liées à la production de lithium

Aujourd'hui, toutes les études s'accordent à montrer que les émissions de gaz à effet de serre sont nettement plus importantes pour la production de produits au lithium (que ce soit de l'hydroxyde de lithium monohydraté ou du carbonate de lithium) issus de l'extraction du spodumène, que de l'extraction de saumures ou de fluides hydrothermaux (gisement géothermaux) (3,38,42,69). La production d'hydroxyde de lithium est généralement considérée comme plus impactante que la production de carbonate (6,69) (voir

Figure 21). Cependant, un article académique (42) évalue la production d’hydroxyde comme étant moins impactante que la production de carbonate, dans les deux cas à partir de spodumène.

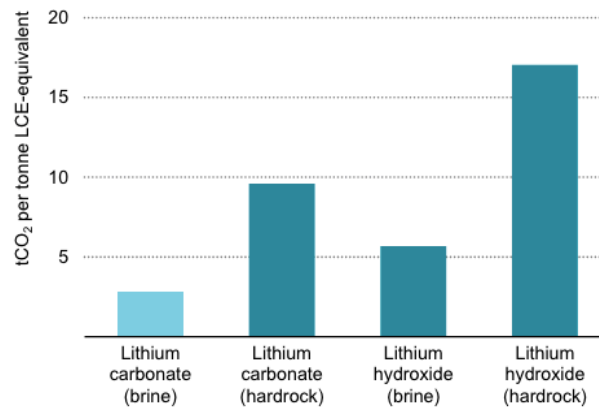


Figure 21: Intensité d’émission de gaz à effet de serre (Scope 1 et 2) pour la production du lithium (mine, concentration, traitement chimique) par type de ressource et de procédé, en tCO₂eq/t LCE. Pour la saumure les valeurs sont données basées sur les données chiliennes, et pour l’extraction en roche dure sur le spodumène australien pour la mine et sur la Chine pour le traitement (Source : IEA, 2022 (6))

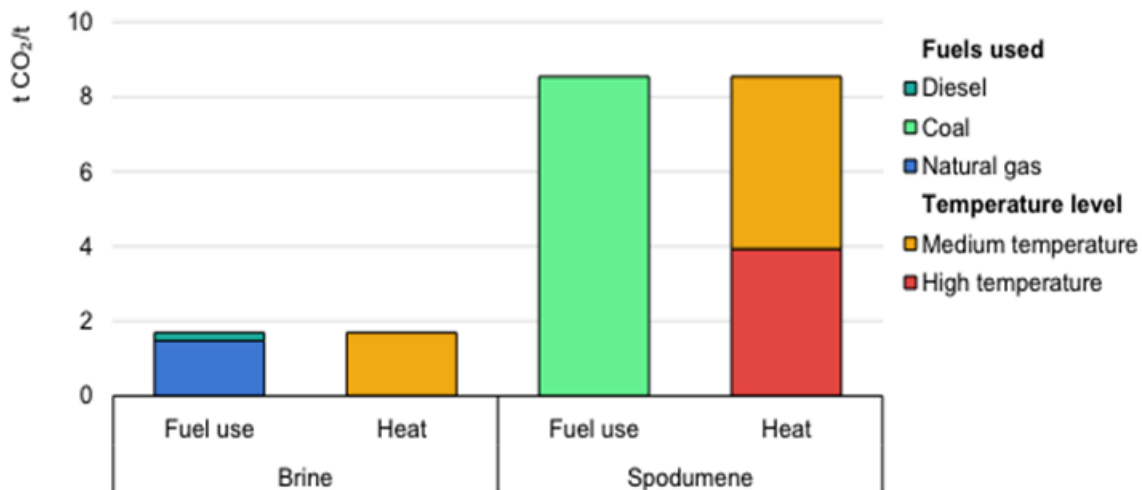
En outre, une détérioration attendue de la qualité du minerai (mesurée par la teneur du minerai), conduira **les nouvelles sources de lithium à être plus gourmandes en énergie que les sources actuelles, ce qui pourrait entraîner une augmentation des émissions, à moins que les entreprises d’extraction et de traitement n’adoptent des combustibles à plus faibles émissions.** Sous l’effet conjugué de l’augmentation de la demande, des prix du marché international et de l’amélioration des technologies, les réserves à faible concentration sont devenues plus économiquement viables que par le passé, ce qui fait baisser la teneur moyenne des minerais à l’échelle mondiale. Les émissions indirectes associées à la fourniture d’électricité ou de produits chimiques augmentent encore l’empreinte carbone (3).

Aujourd’hui la décarbonation des procédés de production de la mine et de la métallurgie reste un défi majoritairement à relever. **La majeure partie de l’énergie actuellement utilisée dans les opérations minières est d’origine fossile** (soit par l’utilisation directe de combustibles fossiles, soit par la production d’électricité à partir de ces combustibles) **et les activités d’extraction et de concentration des minéraux entraînent donc d’importantes émissions de CO₂.** Par exemple, en Australie, le secteur des mines et carrières couvre entre 60 et 70 % de ses besoins énergétiques avec des combustibles fossiles, le reste étant principalement de l’électricité. Cette énergie est nécessaire pour alimenter les différentes machines utilisées pour creuser et extraire la terre et les roches, ainsi que les camions sur le site, la ventilation, le concassage et la séparation du minerai (3).

Pour la partie extraction minière, l’IEA est très optimiste dans son scénario Net zero, estimant une décarbonation complète de l’extraction minière d’ici à 2050 (3), estimant que pour décarboner il suffit d’électrifier les processus de forage, d’excavation, de chargement, de transport, de concassage et de séparation, ainsi que de ventilation de la mine, ce qui “constitue déjà une option pratique”. Les principaux défis recensés par l’IEA sont la taille des engins miniers, nécessitant des batteries conséquentes, un passage à l’hydrogène ou raccordement au réseau électrique des sites d’extraction minière qui en sont souvent isolés. **Ces défis semblent pourtant très conséquents en termes de besoin d’investissement et en termes de besoin de matériaux.** L’exemple suédois de Boliden repose sur l’hydroélectricité et ne peut être répliqué partout. Il faut aussi souligner que la plupart des projets d’électrification et d’action sur l’empreinte carbone se situent dans les pays riches soulignant le besoin de coopération internationale en termes économiques et technologiques pour soutenir ces avancées. D’autre part, à la connaissance des auteurs de ce rapport, il n’existe pas de travaux prospectifs prenant en compte l’empreinte matière d’une telle trajectoire de transition de l’industrie minière pour en estimer la faisabilité. Pour exemple, le nuGen engin minier d’Anglo American doté d’une double motorisation (batterie et hydrogène) a une batterie d’une capacité de 1,2 MWh, soit l’équivalent de plus de 20 batteries de Renault Zoé (52 kWh) (70). Il semble aujourd’hui très improbable que cette décarbonation se fasse spontanément sans régulation spécifique des émissions du secteur.

Pour l’affinage des métaux, les émissions peuvent être réduites grâce à l’amélioration des technologies, à l’électrification et au changement de combustible, néanmoins la plupart des technologies ne sont pas encore prêtes pour le marché et auront des coûts considérablement plus élevés, du moins initialement (3).

En l’occurrence, le traitement chimique du concentré de spodumène implique des étapes de chauffage à haute température (calcination, voir début de cette partie 4.2), et moyenne température (production de vapeur) généralement alimentées par du charbon (voir Figure 22). La calcination/grillage à une température supérieure à 1000°C **paraît peu électrifiable à ce jour** : les développements technologiques en ce sens étaient considérés en 2020 comme encore en phase de recherche ou en phase pilote (71). Il pourrait être possible de remplacer les combustibles fossiles par de l’électricité renouvelable ou de l’hydrogène à faible taux d’émission, mais peu de recherches ont été menées jusqu’à présent (3).



IEA. CC BY 4.0.

Figure 22 : Intensité des émissions de CO2 pour les différentes filières de production d’hydroxyde en fonction des combustibles et de la chaleur utilisés. L’étape minière n’est pas incluse. Seules les émissions directes sont considérées.

(Source : IEA 2023 (3))

Au-delà de l’électrification, des efforts sont en cours pour diminuer l’empreinte carbone de ces voies de production. Pour le **spodumène, le procédé Outotec produit de l’hydroxyde de lithium en utilisant du carbonate de sodium au lieu d’un acide, ce qui permet d’obtenir de meilleurs rendements, bien qu’un traitement à haute température du spodumène soit toujours nécessaire** (3).

Utiliser une toute autre voie de production telle que le DLE est également une possibilité, mais ne s’applique pas à l’extraction en roche dure. Comme évoqué précédemment, cette technologie est encore en cours de développement, notamment dans le bassin Rhénan.

Au vue de la difficulté d’électrifier le traitement chimique des concentrés de minerai de lithium, l’impact climatique d’une éventuelle relocalisation en Europe d’une partie de la production ne sera pas “automatique”, au sens d’un effet immédiat d’un mix électrique avec de plus faibles émissions de gaz à effet de serre, mais devra être démontré avec notamment l’investissement et la mise en place de procédés moins intensifs en carbone et se passant de combustibles fossiles.

Émissions de gaz à effet de serre issues du recyclage

Le recyclage a une empreinte environnementale généralement meilleure que la production primaire (issue de l’extraction minière), dont l’effet le plus mesurable est l’effet sur la production de gaz à effet de serre. Pour le lithium, l’impact CO₂ de la production issue du recyclage est 38% plus faible que la production minière (8)

Pour favoriser la production de lithium bas carbone, les mesures suivantes sont nécessaires :

- **favoriser l'exploitation des gisements les moins impactants** comme les saumures (mais qui sont liés à des problèmes de sécheresse comme on l'a vu précédemment), **ou l'exploitation des gisements géothermaux** ;
- **favoriser l'investissement dans la recherche et le développement de procédés à faibles émissions, par exemple en conditionnant l'accès au fonds publics pour les métaux critiques (en France et en Europe) à l'emploi de technologies ne nécessitant pas de combustibles fossiles** ;
- **créer et renforcer les mécanismes incitant à se fournir** en matériaux ayant une plus faible empreinte carbone, notamment **en matériaux recyclés**.

Biodiversité

Le problème de sécheresse qui augmente dans les salars – un des facteurs d'augmentation de cette sécheresse étant l'extraction du lithium – a des impacts sur la faune et la flore locales. Dans le Salar d'Atacama, les populations de flamants de James et de flamants des Andes ont diminué de 10 % et 12 % respectivement en raison de la réduction des eaux de surface, surtout en hiver. Le succès de la reproduction chez les flamants a également été affecté, mettant en danger la taille de la population

Des observations satellites entre 1997 et 2017, montrent la réduction de la taille des zones végétalisées. Sur une propriété minière de la zone un tiers des caroubiers, une espèce tolérante à la sécheresse, ont disparu entre 2013 et 2017, indiquant une pénurie d'eau souterraine (59).

Aujourd'hui le lithium n'est pas le métal avec l'impact présumé le plus grand en termes de biodiversité. L'IEA répertorie aujourd'hui une part de 2% seulement de la production mondiale dans des zones jugées à risque pour la biodiversité, comparé au cobalt par exemple pour lequel ce risque touche 80% de la production mondiale (3).

Cependant il faut pondérer ce constat pour deux raisons. Premièrement, les mesures de l'impact réel de l'exploitation minière sur la biodiversité sont aujourd'hui trop rares. Deuxièmement, les zones d'exploitation vont changer et s'étendre avec l'augmentation de la production.

Pour limiter l'impact de l'exploitation minière sur la biodiversité, les mesures suivantes sont nécessaires :

- **exclure l'exploitation minière dans les zones protégées, et les biomes les plus riches et les plus fragiles** ;
- De la même manière que pour l'eau, le règlement européen sur les matières premières critiques (CRMA, règlement 2024/1252) facilite le contournement des directives habitats et oiseaux, au vue de l'effondrement en cours de la biodiversité, le droit protégeant la biodiversité ne doit pas être contourné.

Recyclage

Le lithium est très peu recyclé aujourd’hui : seulement 5 à 7 % des batteries Li-ion sont recyclées **dans le monde** (72) et la plupart du temps le lithium n’est pas récupéré, car la voie de recyclage privilégiée pour les batteries est un procédé pyrométallurgique visant principalement à récupérer le nickel, le cobalt et le cuivre, et non le lithium qui finit dans les laitiers (sous-couche routière, fabrication de béton, etc.). Le principal frein est économique : il faudrait diriger les batteries vers des voies permettant de recycler le lithium, ce qui n’était pas rentable jusqu’à présent au vu du prix peu élevé du lithium.

Il existe environ cinquante entreprises dans le monde qui traitent les batteries Li-ion en fin de vie. La petite partie du recyclage mondiale qui permet la récupération réelle du lithium dans les batteries Li-ion en fin de vie se fait majoritairement en Chine, qui concentre 50 % du recyclage des batteries en fin de vie et des résidus de production (73) suivie de la Corée du Sud, puis de l’Union européenne, du Japon, du Canada et des États-Unis (74). La concentration du recyclage en Chine s’explique notamment par l’implantation des étapes de fabrication des batteries, permettant une grande synergie entre les acteurs. En effet, la majorité du recyclage en Chine se fait par hydrométallurgie²⁴, soit par les fabricants de batteries eux-mêmes, soit par des entreprises spécialisées dans la métallurgie. La plupart des acteurs traitant les batteries en fin de vie par hydrométallurgie peuvent alternativement utiliser des produits issus du prétraitement des batteries en fin de vie (la blackmass), des rebuts de fabrication (scraps) ou même du concentré issus des mines. La présence de nombreuses usines de batteries pour véhicules électriques, qui génèrent elles-mêmes des rebuts de fabrication, permet à des recycleurs de disposer de matériaux à recycler en complément des batteries usagées. Ces différents flux permettent de pallier en partie les freins au recyclage du lithium (composition du flux de matière variable, pas assez de matière, etc.).

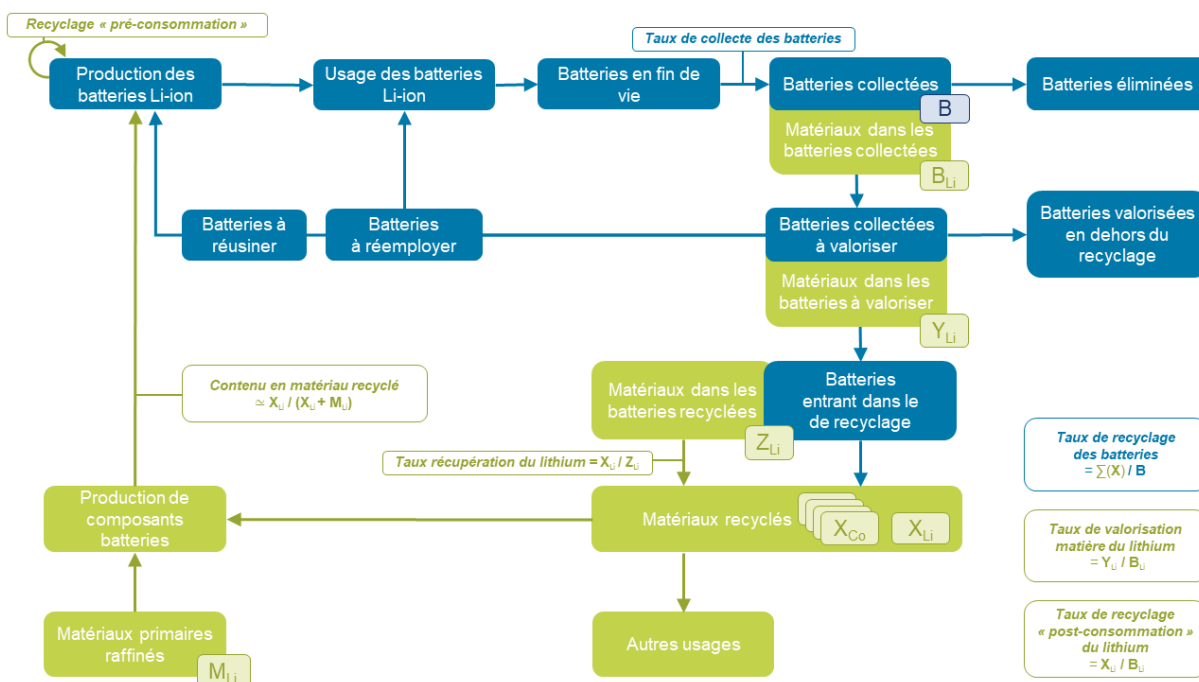


Figure 23 : Schéma de principe de la collecte, du recyclage des batteries Li-ion, ainsi que du taux de récupération et du contenu recyclé en lithium (Source : élaboration propre)

²⁴ Presque toutes les entreprises utilisent des approches hydrométallurgiques en Chine. La principale raison est la possibilité de récupérer de plus grandes quantités de composants de batterie et d’atteindre des puretés très élevées. Dans l’Union européenne, les méthodes de récupération les plus courantes sont la pyrométallurgie, l’hydrométallurgie et des combinaisons des deux (74).

Légende :

1) Variables:

Toutes les variables sont des quantités massiques.

B : batteries collectées

B_{Li} : lithium contenu dans les batteries collectées

Y_{Li} : lithium contenu dans les batteries à valoriser (lithium recyclé, contenu dans les batteries réemployées ou dans tout type de valorisation)

X_{Li} : lithium obtenu en sortie du procédé de recyclage

X_{Co} : cobalt obtenu en sortie du procédé de recyclage

Σ(X) : somme de l'ensemble des matériaux issus du recyclage (Al, Cu, Fe, Li, Mn, Co, Ni, graphite, plastiques)

Z_{Li} : lithium présent dans les batteries à l'entrée du procédé de recyclage

M_{Li} : lithium issu de l'extraction minière

2) Les différents taux liés aux recyclage :

Le taux de collecte des batteries établit le rapport entre la masse de déchets collectés auprès de producteurs identifiés et la masse totale des déchets produits par ces mêmes producteurs.

Le taux de recyclage des batteries est le rapport entre la masse des différents produits recyclés en sortie de procédé de recyclage et la masse totale de batteries pesées en entrée de centre de traitement. Il mesure ainsi la capacité du système de recyclage à transformer les déchets en matières premières secondaires.

Le taux de récupération est le rendement du procédé de recyclage pour une substance spécifique.

Le taux de valorisation est le rapport entre la masse d'une substance valorisée²⁵ et sa masse collectée.

Le contenu en lithium recyclé, appelé aussi parfois taux de réincorporation, d'une batterie Li-ion est le pourcentage en masse de lithium recyclé dans la batterie par rapport à la masse totale de lithium.

²⁵ "Toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières qui auraient été utilisées à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie." (Directive 2008/98/EC, Article 3, p. 8). Il s'agit, autrement dit, de pratiquement tout usage qui évite la mise en décharge. Pour le lithium, par exemple, même le lithium traité en pyrométallurgie qui n'est pas à proprement parlé récupéré, qui se retrouve dans le laitier, valorisé en sous-couche routière ou dans la fabrication de béton est compté comme "valorisé".

Avec l'augmentation de la demande en lithium, il est possible qu'à l'avenir le recyclage du lithium se développe davantage en Europe, comme en témoignent déjà de nombreuses initiatives industrielles en cours. Cependant, certains freins au recyclage demeurent : la baisse progressive de la teneur en cobalt qui a réduit l'intérêt des recycleurs pour les flux de matière issus de la pyrométallurgie, mais aussi la main d'œuvre très qualifiée nécessaire au démantèlement des batteries de véhicule électrique, le manque de standardisation des batteries, et enfin le désintérêt des affineurs de lithium qui vont s'installer en Europe pour le recyclage, moins rentable que d'autres matières premières telles que les sels extraits de saumures provenant d'Argentine et du Chili. Il semble donc nécessaire de revoir à la hausse les incitations des pouvoirs publics français et européens pour renforcer la mise en place de ce recyclage. En effet, une nouvelle législation a été validée pour mettre au point des exigences en termes de recyclage des batteries à l'échelle européenne (18). **En ce qui concerne les exigences sur la phase de collecte des batteries en fin de vie (voir Tableau 7), il est regrettable que celles-ci ne concernent pas les véhicules électriques, pourtant amenés à devenir le principal poste de consommation des batteries Li-ion dans les prochaines années.** Il s'agit également de fixer des objectifs de recyclage spécifiques pour le lithium, et pour chaque substance. Le scénario Clever vise par exemple un taux de récupération du lithium de 80% en 2030 (voir Figure 23 ci-dessus et Tableau 7). A contrario, aujourd'hui les exigences en termes de taux de recyclage (voir Figure 23) sont fixées pour la somme des matériaux recyclés issus des batteries et non spécifiquement pour chaque substance, ce qui tire vers le bas la qualité du recyclage.

L'apparition d'objectifs au niveau européen en termes de contenu en lithium recyclé des nouvelles batteries est à saluer. L'objectif initial d'un taux minimum de contenu en lithium recyclé dans les batteries de 4 % en 2030 et de 10 % en 2035 a été revu à la hausse dans le règlement adopté avec un **contenu en lithium recyclé à 6 % pour 2031 et 12 % en 2036** (18). **Cependant, il est regrettable que l'accord trouvé par le trilogue mette sur un pied d'égalité le lithium recyclé dans les batteries en fin de vie et le lithium issu de "pré-consommation",** c'est-à-dire récupéré à partir de rebuts de fabrication de batteries. Il est certes intéressant de considérer ces deux types de recyclage, car ils peuvent se renforcer mutuellement, mais il s'agit également d'éviter que l'objectif de contenu en lithium recyclé des nouvelles batteries ne soit atteint que par l'apport de rebuts de production, qui est, de plus, un apport beaucoup plus difficile à tracer et à contrôler. Ces objectifs semblent faibles par rapport à la nécessité d'encourager la récupération des futures batteries usagées. Pour des raisons environnementales d'abord : le recyclage des composants des batteries lithium-ion en fin de vie a le potentiel de réduire la consommation d'énergie de production et les émissions de CO₂ (72). Mais aussi en termes de déplétion des ressources : ces dernières, comme le lithium, sont par définition finies, et il est important de pouvoir préserver celles déjà extraites. Pour cela, il y a un besoin de filières spécifiques de recyclage et, en attendant, de stockage afin que le lithium ne soit pas perdu dans des décharges(72) ou encore dans des sous-couches routières ou du béton (pratique courante actuellement).

	Scénario Clever	Objectifs européens
Taux de collecte des batteries	En 2030 : 99 % En 2050 : 99 %	Pour les LMT²⁶ : En déc. 2028 : 51 % En déc. 2031 : 61 % Pour les batteries portables usagées : En déc. 2023 : 45 % En déc. 2027 : 63 % En déc. 2030 : 73 %
Taux de recyclage des batteries	n/a ²⁷	En déc. 2025 : 65 % En déc. 2030 : 70 %
Taux de récupération du lithium	En 2030 : 80 % En 2035 : 90 %	n/a
Taux de valorisation du lithium	n/a	En déc. 2027 : 50 % En déc. 2031 : 80 %
Contenu en lithium recyclé dans une batterie neuve	En 2030 : 6 % En 2035 : 15 % En 2050 : 48 %	En 2031 : 6 % En 2036 : 12 %

Tableau 7 : Comparaison des objectifs de l’Union européenne et des hypothèses du scénario Clever en termes de collecte, recyclage des batteries Li-ion, ainsi que du recyclage et de la valorisation du lithium dans les procédés de traitement. (Sources : élaboration propre à partir des données négaWatt et celles de la réglementation européenne de 2023 (18))

Par ailleurs, il est nécessaire de soutenir la recherche et le développement sur la récupération du lithium permettant d’assurer des taux de recyclage du lithium de qualité batterie supérieurs à 90%. Par exemple, le procédé de récupération précoce du lithium (“early-stage lithium recovery”, en anglais) en amont des filières de recyclage par pyrométallurgie ou hydrométallurgie²⁸ étudié par le RWTH Aachen University est une piste intéressante afin d’atteindre des taux de récupération de lithium supérieurs à 90% (75). Ce procédé peu-énergivore basé sur une lixiviation assisté au CO₂ de la “blackmass” ne requiert pas une modification des procédés actuels de récupération du lithium par pyrométallurgie ou hydrométallurgie et ne réduit la capacité à récupérer les métaux à haute valeur économique comme le nickel ou le cobalt. Un autre exemple pourrait être le recyclage par voie électrochimique dont les rendements sont supérieurs à 90% (76) en laboratoire pour des besoins énergétiques et en solvants qui sont inférieurs aux procédés

²⁶ LMT, “light means of transport” ou “moyen de transport léger”, sont des véhicules à roues équipés d’un moteur électrique de moins de 750 watts, sur lesquels les voyageurs sont assis lorsque le véhicule est en mouvement et qui peuvent être propulsés par le moteur électrique seul ou par une combinaison de force motrice et humaine. Ce sont globalement les deux roues électriques.

²⁷ Le modèle BAMASI tient compte d’une part de réusinage des batteries dans le bilan matière. Il n’y a cependant pas d’objectif fixé en termes de taux de recyclage des batteries à proprement parler, notamment parce que tous les matériaux constitutifs des batteries ne sont pas intégrés dans le modèle matière.

²⁸ Les procédés hydrométallurgiques conventionnels permettent théoriquement la récupération du lithium avec des rendements très élevés à travers l’utilisation de solution acides (comme l’acide sulfurique) et d’agents de précipitation (comme le carbonate de sodium). Cependant, sa récupération est généralement réalisée à la fin d’une longue chaîne d’extraction par solvant ou par précipitation durant laquelle les métaux à plus forte valeur économique comme le nickel, le cobalt et cuivre sont récupérés en priorité ; entraînant ainsi des pertes sur le lithium et un rendement moindre.

pyrométallurgiques et hydrométallurgiques (77). Ces nouveaux procédés doivent maintenant prouver leur faisabilité à l'échelle industrielle avant 2035 lorsque le gisement disponible de batteries en fin de vie commencera à être très conséquent.

Enfin, il faut avoir à l'esprit qu'on ne peut recycler que la quantité disponible dans le gisement de déchets, c'est-à-dire ici les batteries en fin de vie. Or, dans une économie en croissance, ce gisement est nécessairement inférieur à la consommation actuelle et le contenu en matières recyclées est nécessairement limité. **Conséquence : le contenu en matières premières recyclées des batteries est d'autant plus faible que le taux de croissance de la consommation s'accélère ! La sobriété est donc une condition nécessaire pour avoir des objectifs élevés de recyclage.**

Développé en même temps que des leviers de sobriété, le recyclage est un levier essentiel pour diminuer la pression sur l'extraction et pour ne pas perdre la ressource contenue dans les objets en fin de vie.

Finalement, il est important de prioriser en amont du recyclage, les solutions de type réutilisation et réusinage. Le remplacement uniquement des cellules dégradées (SOH²⁹<70-80%) est par exemple une méthode intéressante à développer afin de limiter les besoins en lithium et éviter la mise au rebut de composants de la batteries encore fonctionnels. Le procédé de réusinage nommé "recyclage direct" ("direct recycling", en anglais) qui consiste à retirer le matériau de la cathode ou de l'anode en vue d'un reconditionnement et d'une réutilisation dans une batterie remise à neuf est intéressant dans ce sens bien qu'une réalimentation en lithium est souvent nécessaire pour compenser les pertes dues à la dégradation du matériau pendant l'utilisation de la batterie (78). En revanche, ces procédés n'ont pas encore atteint une maturité industrielle à grande échelle et devront faire face à des contraintes technico-économiques, mais aussi à un défi temporel. En effet, le stock de déchets ne devient disponible pour le réusinage qu'après 10-15 ans, alors que les technologies de cathodes de batteries évoluent très vite. Une description précise et uniforme de chaque batterie produite serait ainsi nécessaire.

Pour permettre un recyclage performant du lithium, les mesures suivantes sont nécessaires :

- améliorer la traçabilité et la connaissance sur le devenir des véhicules hors d'usage (VHU). Fixer des taux de collecte ambitieux spécifiques aux VHU dans la réglementation européenne (aujourd'hui pas de taux de collecte spécifié). Renforcer les politiques contre l'export illégal des véhicules en fin de vie vers l'Europe de l'Est et l'Afrique (pratique existante actuellement).
- fixer des objectifs de recyclage spécifiques pour le lithium en termes de récupération du lithium et non en termes de valorisation (exclure les usages de type *downcycling* des objectifs).
- instaurer une gouvernance sur les filières permettant une meilleure visibilité et permettant de déclencher des capacités d'investissement pour les acteurs du recyclage.
- développer des systèmes de traçabilité des matières dans l'industrie de la métallurgie. Créer une politique industrielle en faveur d'un recyclage optimisé et performant intégrant des objectifs spécifiques en pré-consommation et en post-consommation spécifiques pour le lithium (au-delà des métaux à forte valeur économique : nickel, cobalt et cuivre).
- renforcer les objectifs d'incorporation de matières recyclées permettant une orientation vers un recyclage de qualité batterie du lithium.
- favoriser la recherche et le développement sur des procédés de recyclage innovants tels que la récupération précoce du lithium ou le recyclage par voie électrochimique.

²⁹ SOH : "State Of Health" en anglais correspond à l'état de santé de la batterie évalué en pourcentage (%) de la capacité initiale de la batterie (en kWh). Cet indicateur mesure ainsi la perte de capacité de la batterie.

4.3. Substitution écologique

Le triptyque sobriété/efficacité/substitution écologique est une adaptation au sujet des matériaux du triptyque de l'Association négaWatt sobriété/efficacité/renouvelables.

La partie sur la sobriété étudiait comment ajuster les services de mobilité pour diminuer la consommation de lithium tout en pourvoyant aux besoins de déplacements. L'efficacité matière traitait de la réduction des impacts environnementaux pour chaque tonne de lithium produit. La substitution consiste à remplacer le lithium par d'autres matériaux, en prenant en compte la faisabilité des changements technologiques et les avantages et inconvénients d'un point de vue environnemental.

La substitution du lithium peut être imaginée à plusieurs niveaux:

1. Au niveau du type de motorisation (électrique ou non) ;
2. Au niveau de la batterie :
 - en réduisant le contenu en lithium pour une même technologie de batterie
 - en utilisant une autre typologie de batterie qui utilise moins de lithium ou pas du tout de lithium comme par exemple les batteries au sodium.

Les paragraphes suivants explicitent ces deux leviers et leurs principaux enjeux environnementaux et en conséquence le rôle qu'ils peuvent jouer dans la minimisation de l'utilisation du lithium.

Quel rôle la motorisation électrique est-elle amenée à jouer ? Y-a-t-il des alternatives pertinentes pour réduire les besoins en batterie et donc en lithium?

La place de la motorisation électrique dépend fortement du type de véhicule considéré. Les véhicules routiers qui influent le plus sur les besoins en lithium sont les voitures, les véhicules utilitaires légers (VUL) et les camions. L'électrification partielle ou totale des bus, cars et deux-roues motorisés a quant à elle une influence réduite sur les besoins en lithium en raison d'un volume de ventes bien inférieur et d'une capacité de batterie réduite dans le cas des deux-roues. Le vélo électrique et autres deux roues (trottinette, gyroroue, etc.), très sobres du point de vue énergétique, ne sont pas traités dans ce rapport en raison de l'impact négligeable sur la demande totale en lithium. Par exemple, un vélo électrique a une capacité de batterie autour de 300 à 800 Wh, soit 100 fois inférieure à celle d'une voiture électrique (30 à 80 kWh). En dehors du transport routier, l'électrification des véhicules avec des batteries reste aujourd'hui limitée :

- Aviation et maritime/fluviatile : les applications électriques resteront cantonnées aux applications de très courte distance^{30,31}, qui représentent une part faible des flux
- Ferroviaire : la décarbonation des lignes de train non électrifiées dont la viabilité économique de la mise en place de caténaires est hors d'atteinte dans de nombreux cas – peut s'opérer avec différentes motorisations : électrique à batterie, pile à combustible avec de l'hydrogène décarboné et thermique avec du gaz renouvelable. Les impacts de ces possibles évolutions sur la consommation de lithium devraient néanmoins rester faibles.

La pertinence de l'électrification des principaux véhicules influents sur la demande en lithium (voitures particulières, poids lourds et véhicules utilitaires légers), et les enjeux qui y sont liés, sont étudiés dans la suite de cette partie

Voitures particulières

La voiture électrique présente de nombreux atouts : forts gains d'efficacité par rapport aux moteurs thermiques, pas d'émissions de polluants à l'échappement (mais les émissions de particules fines liées au frottement des pneus sur la route persistent), forte réduction de la pollution sonore et meilleur bilan en termes d'émissions de gaz à effet de serre (voir paragraphe sur les gaz à effets de serre dans la partie 4.2). Ses principales limites proviennent des contraintes liées à la batterie (impacts environnementaux liés à

³⁰ Electric aircrafts present a low TRL (4-5) and are even with technological maturity they are "Unlikely to become available for medium or long haul flights, more suitable for short haul flights with maximum distances of 500-1200 km" <https://www.incarbzero.com/etp-clean-energy-technologies/battery-electric-plane>

³¹ "battery electric ships will mostly find applications on short-distance routes" <https://www.incarbzero.com/etp-clean-energy-technologies/battery-electric-ship>

l'extraction des ressources minières nécessaires pour les moteurs électriques et la batterie, impact carbone à la fabrication, coût, contraintes sur les longues distances, dépendance stratégique aux pays d'extraction et de raffinage de métaux critiques et aux pays producteurs de batteries si importées). En dehors des limites liées aux impacts de l'exploitation des ressources minières (qui font l'objet du présent rapport pour le lithium et seront complétés par d'autres publications), la voiture électrique est bien meilleure que les alternatives diesel/essence sur les critères cités. Par ailleurs, des mesures et progrès en cours permettent en partie de faire face aux limites liées à la voiture électrique : évolutions technologiques récentes améliorant la densité énergétique des batteries, relocalisation en cours d'une part de la production de batteries et de la production de métaux notamment via le développement du recyclage (qui devrait être associée à une politique de sobriété) pour garantir une certaine indépendance stratégique, réduction des coûts.

Enfin, la réglementation UE récente prévoit une fin des moteurs thermiques pour les véhicules légers à 2035, offrant une direction claire à l'ensemble des acteurs.

La seule alternative au véhicule électrique alors permise serait la voiture hydrogène, qui a des coûts bien plus élevés à l'achat et à l'usage. L'efficacité globale est bien plus faible (33 % vs 77 %) ³² puisque le moteur est bien moins performant et que l'hydrogène est produit à partir d'électricité via électrolyse de l'eau à un rendement d'environ 75%. Un développement de l'hydrogène soulève aussi la question des possibilités d'approvisionnement (enjeux associés au besoin d'un nouveau réseau dédié et d'un transport du combustible par camions). Enfin, leur développement massif pourrait poser un problème en termes de consommation en platinoïdes. Les éléments d'analyses actuels orientent le recours au véhicule hydrogène pour des usages de niche.

Le scénario type Clever intègre 100 % de voitures électriques dans le parc en 2050.

Poids lourds

La motorisation électrique des poids lourds présente aussi de nombreux avantages, et notamment du point de vue de l'efficacité énergétique. Les camions électriques sont bien adaptés au transport de courte distance et nécessitent peu de puissance. Dans cette logique, le scénario Clever estime que les camions électriques peuvent être judicieux sur les trajets jusqu'à 150 km, voire jusqu'à 300 km. Cette catégorie de camions peut également être définie comme l'ensemble des véhicules de livraison urbaine et régionale d'une Poids Total Autorisé en Charge inférieur à 26 tonnes et ayant un rayon d'action journalier inférieur à 400 km. Dans un scénario sobre comme Clever, en 2050, 30 % des tkm ³³ étaient estimées être réalisés pour des trajets inférieurs à 150 km (50 % < 300 km) et donc électrifiables (voir notamment p.74 (33)).

L'électrification par batterie de la plus longue distance pose de nombreuses questions en termes d'autonomie et donc de la capacité de batterie nécessaire, d'infrastructures de recharge, de faisabilité technique et de coûts.

L'électrification par caténaire – alternative séduisante présentant les avantages de l'électrification sans les limites liés aux batteries – devrait rester limitée en raison du besoin massif en infrastructures à développer (et ce en parallèle des nouvelles infrastructures ferroviaires aussi considérées dans les scénarios). Les principaux scénarios de transition limitent leur usage à moins de 5 % des tkm.

Bien que les poids lourds à hydrogène présentent les mêmes limites que celles évoquées pour les voitures (efficacité, approvisionnement et matériaux), leur utilisation pour la longue distance est pertinente. En effet, pour ce segment de poids lourds, il est envisageable de considérer un approvisionnement des grands axes routiers en recharge hydrogène. Par ailleurs, le coût des poids lourds longue distance à hydrogène se rapproche des autres motorisations.

Les poids lourds roulant au biogaz peuvent être une solution très pertinente puisque la motorisation est mature et moins chère que ses alternatives zéro-émission. Le réseau de transport et de distribution de gaz dessert déjà une large partie du territoire européen. Dans le cadre d'un scénario de sobriété, les ressources soutenables de biogaz sont suffisantes pour alimenter le transport routier et les autres secteurs difficiles à

³² p.29 https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2020_12_Briefing_feasibility_study_renewables_decarbonisation.pdf

³³ tkm ou tonne-kilomètre est une unité de mesure de quantité de transport correspondant au transport d'une tonne sur un kilomètre. La quantité de transport peut aussi être qualifiée de volume de transport.

décarboner (33). Néanmoins la réglementation européenne, qui se concentre sur les émissions au pot d'échappement, exclut aujourd'hui la technologie biogaz de la définition des poids lourds "zéro émission".

Le scénario Clever intègre 45 % de camions électriques dans le parc en 2050, le reste étant réparti entre hydrogène et biogaz. Ce scénario considère notamment que les trajets inférieurs à 150 km devraient être électrifiés par batterie.

VUL

D'un point de vue industriel, les lignes de production de VUL sont souvent très liées à celles des voitures. Ainsi, une vision 100 % électrique sur les voitures est probablement à articuler avec une vision 100 % électrique sur les VUL. Toutefois, certains segments peuvent se rapprocher des camions et certains usages de VUL peuvent nécessiter une autonomie ou une puissance pouvant justifier le recours à l'hydrogène ou au gaz comme pour les camions.

Les carburants liquides durables sont-ils une solution pour réduire nos besoins en lithium ?

Lorsque l'on parle de décarbonation des transports, le rôle potentiel des biocarburants ou des e-fuels est parfois évoqué comme une solution pour remplacer l'essence et le gazole fossiles des moteurs thermiques (tout en conservant les mêmes véhicules).

Les ressources en biocarburants sont très limitées et doivent donc être orientées en priorité vers les usages avec le moins d'alternatives (aviation et maritime, voire tracteurs).

La production de e-fuels ou carburants synthétiques liquides (à partir d'électricité et de CO₂) présente une maturité assez faible (TRL de 5-6). Les volumes produits seront donc probablement faibles d'ici 2050, et il est risqué de construire une stratégie de décarbonation des poids lourds sur une production massive de e-fuels. Par ailleurs, cette technologie présente des rendements faibles (55 % pour la production et 40-50 % du réservoir à la roue). Enfin, les sources de CO₂ durables pouvant alimenter une production en grande quantité restent à identifier.

Comment réduire le contenu en lithium pour une même capacité de batterie?

Plusieurs leviers peuvent être activés pour réduire le contenu en lithium des batteries.

Tout d'abord, il est possible d'optimiser le contenu en matériaux des batteries pour une même technologie de cathode de batterie lithium-ion. Au sein de la technologie NMC (Nickel-Manganèse-Cobalt), dont le développement industriel est le plus avancé en Europe, les dernières compositions commercialisées "NMC811" (80% de nickel pour 10% de manganèse et 10% cobalt) contiennent 19% moins de lithium par kWh de capacité que les premières compositions "NMC333" principalement en raison d'une meilleure énergie spécifique. Le recours vers les NMC à fort contenu en nickel "NMC811" voire "NMC95" (95% de nickel pour 2,5% de manganèse et 2,5% de cobalt) est un moyen de réduire les besoins en lithium. Cette tendance à faire appel à des technologies plus riches en nickel et plus pauvres en manganèse et cobalt est déjà observée actuellement principalement pour des raisons d'augmentation du prix du cobalt et des impacts sociaux liés à son exploitation en République Démocratique du Congo. Néanmoins, il serait nécessaire de veiller à limiter les autres usages du nickel en vue des impacts de l'exploitation des nouveaux gisements et notamment ceux en Indonésie dont des cas de déforestation et de violation de droits humains sont dénoncés par des ONG.

De plus, il est possible de faire appel à la technologie LFP "Lithium-Fer-Phosphate". Cette technologie de cathode présente une énergie spécifique moindre que la technologie NMC, ce qui la rend légèrement moins adaptée à l'usage mobile. Cependant, elle est aujourd'hui en vogue en raison de son coût moindre en raison

de l'absence de certains matériaux critiques coûteux comme le cobalt ou le nickel et présente la plus faible teneur en lithium par kWh de capacité selon le laboratoire national Argonne (voir Figure 23 ci-dessous). Si elle présente de nombreux atouts, il est important de souligner le fait que cette technologie est aussi la plus consommatrice en cuivre et que la rentabilité économique de son recyclage est moindre en comparaison à la technologie NMC, en l'absence de cobalt et de nickel. Néanmoins, la réglementation européenne présente tout de même des objectifs contraignants sur le recyclage des batteries et l'entreprise ABEE s'implante aujourd'hui en Belgique afin de développer une usine de recyclage de batteries de type LFP. Des compromis et des choix stratégiques sont donc à réaliser tout en intégrant les effets inertiels futurs liés au développement industriel.

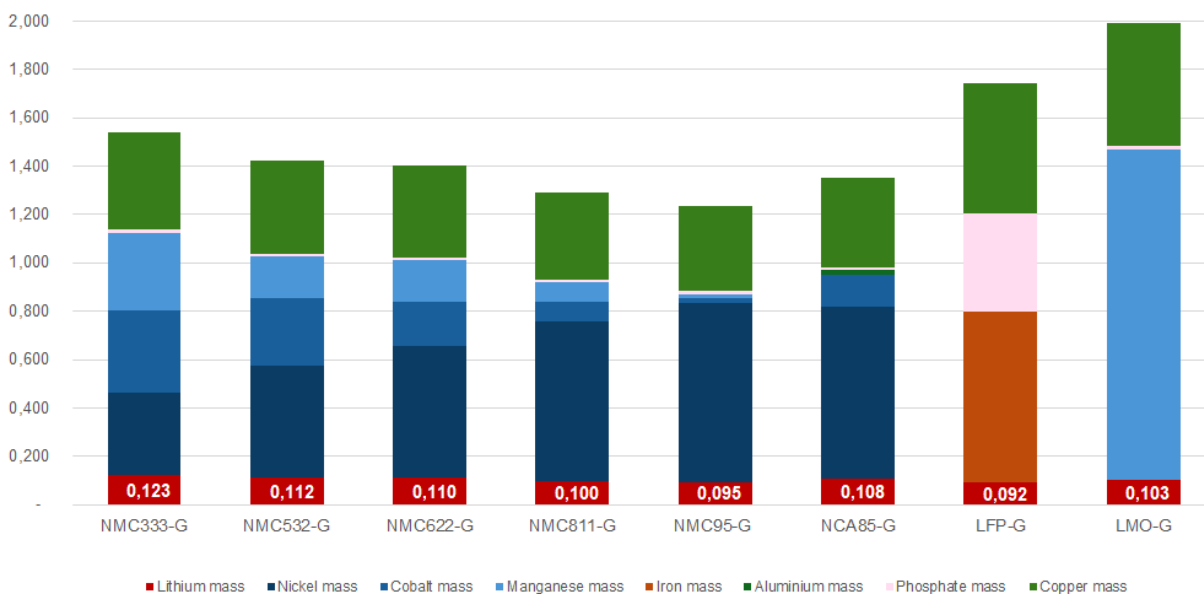


Figure 24 : Quantités (kg) de lithium et d'autres métaux par kWh de capacité de batterie pour différentes technologies en 2022 (Source : Calculs à partir des données du modèle BatPaC 5.1 (79))

Les évolutions liées à l'optimisation du contenu matériaux et à la place de nouvelles technologies au sein d'une famille de batteries sont principalement reprises de l'outil BatPac 5.1 du Argonne National Laboratory.

Le secteur des batteries évolue de façon extrêmement rapide en raison d'un progrès technique continu et des aléas économiques ; et a déjà connu plusieurs sursauts en l'espace de quelques années voire de quelques mois. Après l'émergence de la technologie NMC qui a monopolisé les projets de *gigafactories* européens sur la période 2020-2022, la technologie LFP initialement jugée inadaptée est aujourd'hui en vogue en raison de son plus faible coût. En 2023, le secteur de la batterie est bousculé par l'annonce par le constructeur chinois CATL de la commercialisation d'un véhicule électrique avec une batterie sodium-ion.

La prospective sur les technologies de batteries est donc un exercice très complexe. Comme les précédentes, toute projection sur le très long terme devrait ainsi être caduque dans les années suivantes. Néanmoins, elles permettent de saisir la tendance du marché, des enjeux associés aux différentes technologies et de comprendre quel serait l'impact d'une telle trajectoire sur les besoins matière. Dans cette étude, la trajectoire d'évolution de chaque typologie de batteries dans les ventes futures sont présentées en Figure 25 ci-dessous et ont été guidés par plusieurs principes:

- Maturité technologique : par exemple, bien que très prometteuses, les batteries à électrolyte solide qui permettraient des gains importants de densité énergétique et de réduction du besoin matière (hors lithium) présentent aujourd'hui une maturité technologique limitée se trouvant qu'à l'état de

prototype (TRL de 5-6). Son développement dans la trajectoire proposée est donc limitée et réservée sur le très long terme.

- Résilience : afin de réduire une dépendance trop importante à une seule technologie de batterie, une certaine diversité a été considérée.
- Enjeux environnementaux : priorité aux technologies présentant une consommation réduite de matières premières critiques (notamment lithium mais aussi nickel, cobalt et dans une moindre mesure cuivre).
- Inertie industrielle : le paysage industriel européen s’est déjà positionné sur des technologies de cathode de batterie précises et la conversion à une autre technologie présente une certaine inertie. Ce phénomène pourrait être bien plus important dans le cadre d’une conversion vers un autre type de batterie comme les sodium-ion.

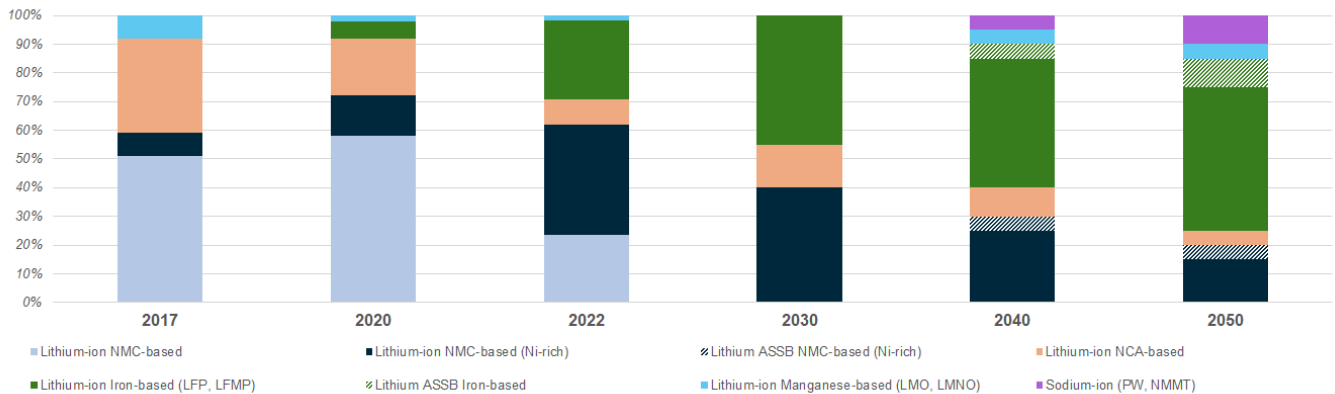


Figure 25 : Évolution des combinaisons de technologies envisagées dans le modèle BAMASI jusqu'en 2050 au sein de l'UE-27

Focus sur les batteries sodium-ion

Une attention particulière est actuellement portée sur les batteries sodium-ion qui pourraient s’avérer moins chères de 20-30 % notamment parce qu’elles utilisent des matériaux moins chers et moins critiques, et éventuellement moins impactant pour l’environnement. En effet, elles ont un fonctionnement similaire aux batteries lithium-ion mais n’utilisent pas de lithium mais du sodium qui s’avère moins cher, moins convoité et potentiellement plus facile à extraire, réduisant ainsi les impacts environnementaux et les risques d’approvisionnement.

Par ailleurs, des bonds de maturité impressionnants ont été observés sur cette technologie (passant d’un TRL de 3-4 à 8 entre 2021 et 2023 selon l’agence internationale de l’énergie). En revanche, les batteries sodium-ion présentent une densité (Wh/kg) 40 % plus faible que leurs homologues lithium-ion, ce qui représente une véritable lacune à combler en matière de mobilité. Par prudence, il n’a été considéré dans cet exercice prospectif qu’un développement limité de cette technologie à long terme en Europe. Cependant, il convient de suivre le développement de cette technologie de près en raison de sa capacité à bousculer fortement le marché de la batterie pour la mobilité électrique.

La démarche de scénarisation adoptée vise la **résilience** en cherchant à développer plusieurs technologies pour diminuer les risques liées à une seule technologie, d’éviter de substituer les batteries lithium-ion par

une seule autre technologie ; tout en favorisant les technologies de type LFP moins coûteuses, techniquement tout aussi recyclables et présentant une moindre consommation en certains métaux critiques comme le lithium, le cobalt, le manganèse et le nickel³⁴.

Comme le montre la figure 26 ci-dessous, les évolutions du mix de typologies de batteries et les avancées technologiques au sein de chaque famille de batteries amènent une forte réduction entre 2020 et 2050 de la quantité de lithium nécessaire pour une même capacité de batterie (-32 %).

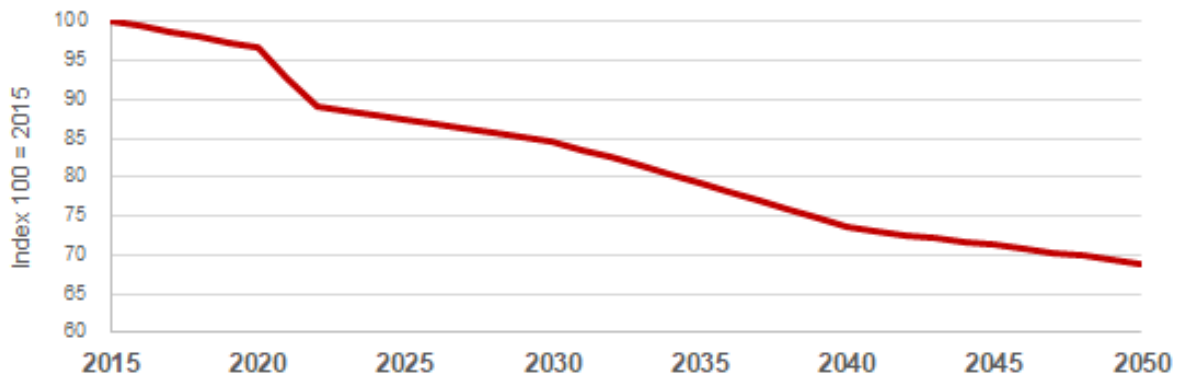


Figure 26 : Évolution de la teneur moyenne en lithium par kWh de capacité de batterie jusqu'en 2050 retenue pour la modélisation BAMASI (Source : Calculs à partir des données du modèle BatPac 5.1 (79))

³⁴ La technologie LFP présente néanmoins une quantité de cuivre, autre métal critique, par kilowatt-heure de capacité supérieure à la technologie NMC. Un compromis entre lithium/nickel/cobalt/manganèse d'un côté et cuivre de l'autre est à définir. Cette question sera approfondie lors de la prochaine étude Minimal qui traitera du cuivre. Cette étude viendra ainsi compléter l'analyse apportée dans ce rapport sur le lithium et pourra éventuellement faire varier les hypothèses prospectives sur les choix de technologies de batterie.

Conclusions

Ce rapport développe une approche innovante et fixe un cap pour limiter la surconsommation de lithium dans les années à venir, tout en menant à bien la transition énergétique.

Pour cela, une proposition est formulée pour établir **un corridor de soutenabilité** définissant un espace sûr et juste en termes de consommation du lithium pour l'année 2050. Ce corridor de soutenabilité est défini par un **budget écologique d'extraction du lithium** (qu'il ne faut pas dépasser pour rester dans une trajectoire compatible avec les limites planétaires) de **20 000 tonnes de lithium pour l'UE** en 2050 et un **minimum social** (en dessous duquel il ne faut pas descendre au risque de compromettre des fonctions essentielles de notre économie) de **3 000 tonnes de lithium pour l'UE** en 2050.

Si les tendances actuelles sont prolongées (augmentation de la demande de transport routier, stabilisation du taux d'occupation des voitures et du taux de remplissage des poids lourds et course à l'autonomie des véhicules électriques et donc hausse de la taille des batteries), **le plafond environnemental défini dans cette étude et représentant les limites planétaires est très largement dépassé**, avec un scénario tendanciel correspondant à 4,4 fois le budget écologique d'extraction du lithium en 2050.

Le scénario Clever – scénario idéal en termes de mobilités reposant sur le triptyque sobriété/efficacité/renouvelables et issu du travail collaboratifs de 26 partenaires européens – présente une consommation de lithium bien plus faible, mais **ne respecte pas non plus le plafond environnemental de 20 000 tonnes établi pour l'horizon 2050, avec une consommation de lithium primaire correspondant à 2 fois le budget écologique d'extraction en 2050.**

Le fait que Clever reste à ce jour au-dessus du plafond environnemental calculé dans ce rapport pour 2050 permet de soulever plusieurs enjeux.

Le premier enjeu est **le défi majeur posé par la prise en compte des impacts environnementaux liés à l'extraction minière et la métallurgie**, et plus largement aux impacts de l'extraction des ressources. Il est ainsi évident que la mise en place de mesures de **sobriété est parfaitement indispensable pour limiter les atteintes aux limites planétaires**. Le scénario Clever consomme deux fois moins de lithium issu de l'extraction entre 2018 et 2050 que le scénario tendanciel. Pour mettre en oeuvre la modération de la consommation, différents leviers sont incontournables : la sobriété d'usage passe par la réduction de la demande de transport, la sobriété dimensionnelle ajuste la taille et la capacité des batteries de véhicules, et la sobriété collaborative augmente le taux d'occupation des véhicules et donc diminue le trafic. **La somme des leviers ayant trait à la sobriété joue un rôle majeur en représentant environ 80 % de la réduction totale de consommation entre le scénario Clever et le scénario tendanciel.**

La mise en oeuvre d'une politique de sobriété va dans le sens du dernier rapport du GIER qui établit l'urgence de développer des "solutions orientées demande" visant une gestion plus soutenable des ressources (34). La mise en oeuvre d'une politique de sobriété sur la consommation du lithium permet également d'être plus résilient dans nos approvisionnements. En effet, **les risques d'approvisionnement de lithium pour l'Union Européenne sont réels, avec notamment un écart prévu dans les années à venir entre l'offre et la demande en lithium** (36). Cet écart est prévu par de nombreux acteurs, comme la cour des comptes européenne ou encore la JRC. Bien que le "Critical Raw Materials Act" (CRMA) adopté en 2024 tente de limiter ce risque en favorisant les projets d'extraction en Europe, **il paraît irréaliste, au vu des délais de développement industriel des projets miniers et de l'incertitude inhérente à ces projets, de ne s'attaquer qu'à l'offre et de ne développer aucune politique publique portant sur la demande. La sobriété – aujourd'hui absente du règlement européen CRMA – est un levier majeur pour limiter ces risques, avec certaines mesures pouvant avoir un effet immédiat comme les actions visant à diminuer la taille et le poids des véhicules.**

Le deuxième enjeu est celui du calibrage de la méthodologie choisie pour le calcul du plafond environnemental, et notamment le fait que les deux scénarios européens étudiés (scénario Clever et scénario de référence) soient hors du corridor de soutenabilité pose la question de **l'allocation au secteur extractif et métallurgique par rapport aux autres secteurs**. Il pourrait être envisagé d'allouer une part plus importante des limites planétaires au secteur extractif comparativement à sa part actuelle. Cependant, **à ce**

jour, l'Association négaWatt considère que pour augmenter cette allocation il faudrait faire la preuve de la diminution réelle des impacts environnementaux des autres secteurs, pour que cette augmentation de la part du secteur extractif ne se fasse pas au détriment du respect des limites planétaires.

Plus globalement, la méthodologie pour établir un budget écologique pour un métal est une première proposition pour proposer un plafond de consommation basé sur des travaux scientifiques. Ce travail est innovant et il est récent que la littérature académique s'intéresse à cette question. L'Association négaWatt a conscience que la méthode de calcul devra faire l'objet d'améliorations et de mises à jour dans le futur pour affiner ce travail prospectif : prise en compte de l'efficacité des technologies, de la baisse des teneurs, choix politique de l'allocation entre les secteurs et les pays qui peut évoluer, etc. **Néanmoins, il paraît crucial de publier ces premiers résultats afin de pouvoir lancer un débat important sur une transition matière visant à limiter l'augmentation de l'extraction dans certaines filières et à la diminuer dans d'autres afin de garantir l'habitabilité de la planète.**

Le respect du budget écologique d'extraction promet d'être un grand défi pour l'UE, car même pour le lithium – qui est l'un des métaux ayant eu une allocation relativement large dans le budget écologique global de l'ensemble des métaux proposé à 2050 – des changements immédiats dans les modes de transport sont nécessaires pour atteindre ces objectifs. Cela présage de **l'ampleur du défi à relever pour respecter les limites planétaires pour les principaux métaux industriels !**

En ce sens, l'Association négaWatt a co-rédigé [une lettre ouverte signée par plus de 100 organisations](#) (ONG, universitaires, think tanks, syndicats et industries) adressée à plusieurs décideurs européens, et demandant une loi européenne permettant la gestion soutenable des ressources, ainsi qu'une proposition plus complète dans le [livre blanc pour la gestion durable des ressources](#) publié en février 2024. Cette initiative demande des objectifs contraignants en matière de consommation des ressources et souligne le besoin d'objectifs spécifiques par secteur. Le présent rapport et le budget écologique proposé pour le lithium souhaite alimenter les discussions sur ces objectifs contraignants.

Enfin, le rapport aborde également des leviers liés à l'efficacité environnementale de la production du lithium présent dans les batteries. Ainsi, des processus de production plus efficaces et un meilleur choix des gisements à exploiter permettront de réduire les impacts locaux. Il s'agit, entre autres, d'**exclure l'exploitation minière dans les zones protégées, et les biomes les plus riches et les plus fragiles**. Il s'agit également d'**éviter la production de déchets miniers, en privilégiant les gisements avec les teneurs les plus élevées, et en valorisant le plus de co-produits possible**. Pour limiter la dangerosité des déchets miniers, les pouvoirs publics devraient **exiger dès l'exploration de bien évaluer la présence de potentiels éléments toxiques et radioactifs naturellement présents dans les gisements**.

Au niveau de l'UE, cette efficacité environnementale dans la gestion des déchets passe également par **l'amélioration de la caractérisation des déchets miniers dans le cadre de la directive européenne sur les déchets miniers (2006/21)** en évaluant mieux les risques sanitaires, notamment ceux liés à la mobilité des substances toxiques. Il s'agit également de créer un « **Fonds d'indemnisation européen de la gestion des déchets miniers** », abondé par les entreprises minières souhaitant exploiter sur le sol européen. Concernant l'impact sur la ressource en eau, il semble malheureusement indissociable de l'exploitation des saumures, et les nouvelles techniques comme l'extraction directe du lithium ne semblent pas permettre d'éviter les phénomènes d'abaissement du niveau des nappes phréatiques. En revanche, dans l'extraction en roche dure, qui présente aujourd'hui un niveau de consommation d'eau élevé, il est possible de mettre en œuvre des techniques pour consommer moins d'eau (pressage des résidus et recyclage de l'eau dans les procédés), mais une quantité non négligeable d'eau reste cependant prisonnière dans les résidus miniers. Une recommandation en ce sens pour l'Union Européenne, **afin de prévenir les potentiels conflits d'usage, est de mettre fin aux facilités de contournement de la directive cadre sur l'eau introduite par le CRMA et de s'assurer de la conformité d'éventuelles exploitations de lithium avec les plans de gestion des bassins versants de la directive cadre sur l'eau** (et du SDAGE en France), afin d'anticiper et prioriser les besoins en eau.

Enfin, pour **diminuer l'empreinte environnementale** de la consommation du lithium, **un levier important reste la promotion du recyclage**. Pour cela l'Association négaWatt propose de **fixer un objectif de collecte des batteries pour la filière automobile, de fixer des objectifs de recyclage spécifiques pour le lithium en termes**

de récupération du lithium et non en termes de valorisation (exclure les usages de type *downcycling* des objectifs) et **d'intégrer des objectifs spécifiques pour le recyclage de pré-consommation et de post-consommation**. Il s'agit également de **renforcer les objectifs d'incorporation de matières recyclées** permettant une orientation vers un recyclage de qualité batterie du lithium.

Bibliographie

1. Transport sector CO₂ emissions by mode in the Sustainable Development Scenario, 2000–2030 – Charts – Data & Statistics [Internet]. IEA. 2019 [cité 6 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/transport-sector-co2-emissions-by-mode-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2030>
2. Le Quéré C, Andrew RM, Friedlingstein P, Sitch S, Hauck J, Pongratz J, et al. Global Carbon Budget 2018. *Earth Syst Sci Data*. 5 déc 2018;10(4):2141-94.
3. Energy Technology Perspectives 2023 [Internet]. IEA; 2023. Disponible sur: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>
4. Mineral commodity summaries 2024 [Internet]. USGS; 2024 [cité 23 mai 2024]. Disponible sur: <https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2024>
5. Liu W, Placke T, Chau KT. Overview of batteries and battery management for electric vehicles. *Energy Rep*. 1 nov 2022;8:4058-84.
6. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. IEA; 2022 mars p. 287. (World Energy Outlook Special Report).
7. Carrara S, Bobba S, Blagoeva D, Alves DP, Cavalli A, Georgitzikis K, et al. Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study [Internet]. JRC; 2023 mars [cité 29 mars 2023]. Disponible sur: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC132889>
8. Gregoir L, van Acker K. Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge. KU Leuven, Report for Eurometaux; 2022.
9. Association negaWatt. Scénario négaWatt 2022 [Internet]. NegaWatt; 2022 [cité 4 mars 2022]. Disponible sur: <https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2022>
10. Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular [Internet]. McKinsey & Company; 2023 janv [cité 13 févr 2023]. Disponible sur: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular>
11. Rao ND, Min J, Mastrucci A. Energy requirements for decent living in India, Brazil and South Africa. *Nat Energy*. déc 2019;4(12):1025-32.
12. Millward-Hopkins J, Steinberger JK, Rao ND, Oswald Y. Providing decent living with minimum energy: A global scenario. *Glob Environ Change*. 1 nov 2020;65:102168.
13. Grubler A, Wilson C, Bento N, Boza-Kiss B, Krey V, McCollum DL, et al. A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nat Energy*. juin 2018;3(6):515-27.
14. Kikstra JS, Mastrucci A, Min J, Riahi K, Rao ND. Decent living gaps and energy needs around the world. *Environ Res Lett*. 1 sept 2021;16(9):095006.
15. Vélez-Henao JA, Pauliuk S. Correction to “Material Requirements of Decent Living Standards”. *Environ Sci Technol* [Internet]. 9 janv 2024 [cité 17 janv 2024]; Disponible sur: <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09400>
16. Impact Assessment Report. Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society. [Internet]. European Commission; 2024. Disponible sur: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:6c154426-c5a6-11ee-95d9-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_3&format=PDF
17. Avis d'experts. Le stockage dans la transition énergétique. [Internet]. ADEME; 2024. Disponible sur: https://librairie.ademe.fr/ged/8626/Avis_d_Experts_Stockage_vf.pdf
18. REGULATION (EU) 2023/1542 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC [Internet]. European Union; 2023. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>
19. Richardson K, Steffen W, Lucht W, Bendtsen J, Cornell SE, Donges JF, et al. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Sci Adv*. 13 sept 2023;9(37):eadh2458.
20. Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want [Internet]. IRP; 2019 [cité 20 oct 2022]. (Report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya). Disponible sur: <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789280737417>
21. Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences [Internet]. OECD; 2019 févr [cité 24 nov 2022]. Disponible sur: https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-material-resources-outlook-to-2060_9789264307452-en
22. Luckeneder S, Giljum S, Schaffartzik A, Maus V, Tost M. Surge in global metal mining threatens vulnerable

- ecosystems. *Glob Environ Change*. 1 juill 2021;69:102303.
23. Sonter LJ, Dade MC, Watson JEM, Valenta RK. Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nat Commun*. déc 2020;11(1):4174.
 24. Maus V, Giljum S, da Silva DM, Gutschlhofer J, da Rosa RP, Luckeneder S, et al. An update on global mining land use. *Sci Data*. 22 juill 2022;9(1):433.
 25. Macklin MG, Thomas CJ, Mudbhakal A, Brewer PA, Hudson-Edwards KA, Lewin J, et al. Impacts of metal mining on river systems: a global assessment. *Science*. 22 sept 2023;381(6664):1345-50.
 26. Activités minières et ODD : État des lieux de la situation en 2020 [Internet]. Columbia Center on Sustainable Investment et RMF; 2020 [cité 7 oct 2024]. Disponible sur: https://www.responsibleminingfoundation.org/app/uploads/RMF_CCSI_Mining_and_SDGs_FR_Sept2020.pdf
 27. Owen JR, Kemp D, Lechner AM, Harris J, Zhang R, Lèbre É. Energy transition minerals and their intersection with land-connected peoples. *Nat Sustain*. 1 déc 2022;6(2):203-11.
 28. Recharging Community Consent: Mining companies, battery minerals, and the battle to break from the past [Internet]. 2023 [cité 8 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.oxfamamerica.org/press/press-releases/recharging-community-consent-mining-companies-battery-minerals-and-the-battle-to-break-from-the-past/>
 29. Desing H, Braun G, Hischier R. Ecological resource availability: a method to estimate resource budgets for a sustainable economy. *Glob Sustain*. janv 2020;3:e31.
 30. Schlesier H, Schäfer M, Desing H. Measuring the Doughnut: A good life for all is possible within planetary boundaries. *J Clean Prod*. 2 mars 2024;141447.
 31. Van der Voet E, Van Oers L, Verboon M, Kuipers K. Environmental Implications of Future Demand Scenarios for Metals: Methodology and Application to the Case of Seven Major Metals. *J Ind Ecol*. 2019;23(1):141-55.
 32. REGULATION (EU) 2023/851 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2019/631 as regards strengthening the CO2 emission performance standards for new passenger cars and new light commercial vehicles in line with the Union's increased climate ambition [Internet]. European Union; 2023. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0851>
 33. négaWatt Association. CLEVER - Climate neutrality, Energy security and Sustainability: A pathway to bridge the gap through Sufficiency, Efficiency and Renewables. 2023 [cité 3 avr 2024]. CLEVER - Climate neutrality, Energy security and Sustainability: A pathway to bridge the gap through Sufficiency, Efficiency and Renewables. Disponible sur: <https://clever-energy-scenario.eu/>
 34. Global Resources Outlook 2024 [Internet]. International Resource Panel, PNUE; 2024 mars [cité 18 mars 2024]. Disponible sur: <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook-2024>
 35. Alina Racu. Clean and lean: Battery metals demand from electrifying passenger transport [Internet]. Transport & Environment; 2023 juill [cité 21 juill 2023]. Disponible sur: <https://www.transportenvironment.org/discover/clean-and-lean-battery-metals-demand-from-electrifying-cars-vans-and-buses/>
 36. Special report 15/2023: The EU's industrial policy on batteries. ECA; 2023. (The EU's industrial policy on batteries New strategic impetus needed).
 37. Konietzko DrJ. www.cognizant.com. 2022 [cité 22 nov 2024]. Moving beyond carbon tunnel vision with a sustainability data strategy. Disponible sur: <https://www.cognizant.com/us/en/insights/insights-blog/moving-beyond-carbon-tunnel-vision-with-a-sustainability-data-strategy-codex7121>
 38. Lithium - Sustainability Information. BGR; 2020 juill.
 39. Gao T, Fan N, Dai T. Lithium extraction from hard rock lithium ores: technology, resources, environment and cost. *China Geol*. 1 janv 2022;6.
 40. Goetz E. Vulcan Energy revoit à la hausse ses objectifs de production de lithium. *Les Echos* [Internet]. 14 févr 2023 [cité 9 juill 2024]; Disponible sur: <https://www.lesechos.fr/finance-marches/marches-financiers/vulcan-energy-revoit-a-la-hausse-ses-objets-de-production-de-lithium-1906612>
 41. Bonnefous B. En Alsace, les grandes espérances du lithium géothermal. *Le Monde.fr* [Internet]. 6 déc 2023 [cité 9 juill 2024]; Disponible sur: https://www.lemonde.fr/economie/article/2023/12/06/en-alsace-les-grandes-esperances-du-lithium-geothermal_6204248_3234.html
 42. Kelly JC, Wang M, Dai Q, Winjobi O. Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium ion battery cathodes and lithium ion batteries. *Resour Conserv Recycl*. 1 nov 2021;174:105762.
 43. Vignes JL. Lithium [Internet]. Société chimique de France; [cité 1 juill 2024]. (Elementarium). Disponible sur: <https://lelementarium.fr/element-fiche/lithium/>
 44. RMIS - Raw materials' profiles lithium [Internet]. European Commission; [cité 5 juin 2024]. Disponible

sur: <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/rmp/Lithium>

45. Schmidt M. Rohstoffrisikobewertung – Lithium [Internet]. 2022 [cité 9 juill 2024]. Disponible sur: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-54.pdf;jsessionid=BF3097242E83106E8D39C445EB5F5994.internet981?__blob=publicationFile&v=4
46. Pigneur J. Mise au point d'une méthode intégrée d'analyse des impacts des filières de matières premières minérales ; [Internet]. CentraleSupélec; 2019. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-03123793>
47. Mabroum S, Moukannaa S, El Machi A, Taha Y, Benzaazoua M, Hakkou R. Mine wastes based geopolymers: A critical review. *Clean Eng Technol*. 1 déc 2020;1:100014.
48. Rico M, Benito G, Salgueiro R, Díez-Herrero A, Pereira H. Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. *J Hazard Mater*. 1 mai 2008;152:846-52.
49. Valenta RK, Lèbre É, Antonio C, Franks DM, Jokovic V, Micklethwaite S, et al. Decarbonisation to drive dramatic increase in mining waste—Options for reduction. *Resour Conserv Recycl*. 1 mars 2023;190:106859.
50. Hannan A, Li C, Lim H, Sun H. Australia's Spodumene: Advances in Lithium Extraction Technologies, Decarbonization, and Circular Economy. *Ind Eng Chem Res*. 25 janv 2024;63.
51. Gao JQ, Yu Y, Wang DH, Wang W, Wang CH, Dai HZ, et al. Effects of lithium resource exploitation on surface water at Jiajika mine, China. *Environ Monit Assess*. 23 janv 2021;193(2):81.
52. Graham JD, Rupp JA, Brungard E. Lithium in the Green Energy Transition: The Quest for Both Sustainability and Security. *Sustainability*. janv 2021;13(20):11274.
53. Lepidolite extraction solid by-product: Mitigation of thallium leaching and utilization of radiogenic strontium isotopes as a tracer. *Environ Adv*. 1 avr 2021;3:100035.
54. Pokhrel LR, Dubey B. Global Scenarios of Metal Mining, Environmental Repercussions, Public Policies, and Sustainability: A Review. *Crit Rev Environ Sci Technol*. 1 janv 2013;43(21):2352-88.
55. Owen JR, Kemp D, Lechner AM, Ang Li Ern M, Lèbre É, Mudd GM, et al. Increasing mine waste will induce land cover change that results in ecological degradation and human displacement. *J Environ Manage*. 1 févr 2024;351:119691.
56. Kaunda RB. Potential environmental impacts of lithium mining. *J Energy Nat Resour Law*. 2 juill 2020;38(3):237-44.
57. Kramer, M., Kind-Rieper, T., Munayer, R., Giljum, S., Masselink, R., van Ackern, P., et al. *Extracted forests. Unearthing the role of mining-related deforestation as a driver of global deforestation*. Berlin: WWF Germany; 2023.
58. Haddad AZ, Hackl L, Akuzum B, Pohlman G, Magnan JF, Kostecki R. How to make lithium extraction cleaner, faster and cheaper — in six steps. *Nature*. avr 2023;616(7956):245-8.
59. Vera ML, Torres WR, Galli CI, Chagnes A, Flexer V. Environmental impact of direct lithium extraction from brines. *Nat Rev Earth Environ*. 23 févr 2023;1-17.
60. Jiang S, Zhang L, Li F, Hua H, Liu X, Yuan Z, et al. Environmental impacts of lithium production showing the importance of primary data of upstream process in life-cycle assessment. *J Environ Manage*. 15 mai 2020;262:110253.
61. Marazuela MA, Vázquez-Suñé E, Ayora C, García-Gil A, Palma T. The effect of brine pumping on the natural hydrodynamics of the Salar de Atacama: The damping capacity of salt flats. *Sci Total Environ*. 1 mars 2019;654:1118-31.
62. Mouchot J, Genter A, Cuenot N, Seibel O, Scheiber J, Bosia C, et al. First Year of Operation from EGS Geothermal Plants in Alsace, France: Scaling Issues.
63. Dalmais E, Ravier G, Maurer V, Fries D, Genter A, Pandélis B. Environmental and Socio-Economic Impact of Deep Geothermal Energy, an Upper Rhine Graben Perspective. In: *Geothermal Energy - Impacts and Improvements [Working Title]* [Internet]. IntechOpen; 2022 [cité 12 janv 2023]. Disponible sur: <https://www.intechopen.com/online-first/83865>
64. Yang X, Wen H, Liu Y, Huang Y, Zhang Q, Wang W, et al. Lithium Pollution and Its Associated Health Risks in the Largest Lithium Extraction Industrial Area in China. *Environ Sci Technol*. 2 juill 2024;58(26):11637-48.
65. Liu S, Patton D. In China's lithium hub, mining boom comes at a cost. *Reuters* [Internet]. 15 juin 2023 [cité 30 juill 2024]; Disponible sur: <https://www.reuters.com/markets/commodities/chinas-lithium-hub-mining-boom-comes-cost-2023-06-15/>
66. China starts supervising, investigating mining chaos in « lithium capital » Yichun. *Global Times* [Internet]. 26 févr 2023 [cité 30 juill 2024]; Disponible sur: <https://www.globaltimes.cn/page/202302/1286257.shtml>
67. Liu J, Yuan W, Lin K, Wang J, Sonne C, Rinklebe J. Thallium Pollution from the Lithium Industry Calls for Urgent International Action on Regulations. *Environ Sci Technol*. 22 nov 2023;57.
68. Bolan N, Hoang SA, Tanveer M, Wang L, Bolan S, Sooriyakumar P, et al. *From mine to mind and mobiles – Lithium contamination and its risk management*. *Environ Pollut*. 1 déc 2021;290:118067.
69. Pell R, Lindsay JJ, Whattoff P, Tijsseling L. Comparative life cycle assessment study of solid state and

- lithium-ion batteries for electric vehicle application in Europe. Minviro, prepared for T&E; 2022 janv.
70. Thoin-Bousquié J. [L'industrie c'est fou] Ce camion géant est le plus gros engin minier roulant à l'hydrogène. Usine Nouv [Internet]. 11 mai 2022 [cité 2 août 2024]; Disponible sur: <https://www.usinenouvelle.com/article/l-industrie-c-est-fou-ce-camion-geant-est-le-plus-gros-engin-minier-roulant-a-l-hydrogene.N2003332>
 71. Roelofsen O, Somers K, Speelman E, Witteveen M. Plugging in: What electrification can do for industry. Mc Kinsey Co. 28 mai 2020;
 72. Pinegar H, Smith YR. Recycling of End-of-Life Lithium Ion Batteries, Part I: Commercial Processes. *J Sustain Metall.* 1 sept 2019;5(3):402-16.
 73. Les batteries entrent dans leur âge d'or, portées par l'avènement du « tout-électrique ». 15 janv 2023 [cité 3 oct 2024]; Disponible sur: https://www.lemonde.fr/economie/article/2023/01/15/les-batteries-entrent-dans-leur-age-d-or-portees-par-l-avenement-du-tout-electrique_6157960_3234.html
 74. Neumann J, Petranikova M, Meeus M, Gamarra JD, Younesi R, Winter M, et al. Recycling of Lithium-Ion Batteries—Current State of the Art, Circular Economy, and Next Generation Recycling. *Adv Energy Mater.* 2022;12(17):2102917.
 75. Milicevic Neumann K, Ans M, Friedrich B. Early-stage recovery of lithium from spent batteries via CO₂-assisted leaching optimized by response surface methodology. *Sci Rep.* 29 juill 2024;14(1):17369.
 76. Yu L, Bai Y, Belharouak I. Recycling of Lithium-Ion Batteries via Electrochemical Recovery: A Mini-Review. *Batteries.* oct 2024;10(10):337.
 77. Arif Kasri M, Halizan MZM, Harun I, Irwan Bahrudin F, Daud N, Faiz Aizamddin M, et al. Addressing preliminary challenges in upscaling the recovery of lithium from spent lithium ion batteries by the electrochemical method: a review. *RSC Adv.* 2024;14(22):15515-41.
 78. Harper G, Sommerville R, Kendrick E, Driscoll L, Slater P, Stolkin R, et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature.* nov 2019;575(7781):75-86.
 79. Argonne National Laboratory [Internet]. [cité 4 juill 2024]. BatPaC Model Software. Disponible sur: <https://www.anl.gov/cse/batpac-model-software>
 80. Bringezu S. Possible Target Corridor for Sustainable Use of Global Material Resources. *Resources.* mars 2015;4(1):25-54.
 81. Dittrich M, Giljum S, Lutter FS, Polzin C. Green economies around the world? Implications of resource use for development and the environment. 2012.
 82. O'Neill DW, Fanning AL, Lamb WF, Steinberger JK. A good life for all within planetary boundaries. *Nat Sustain.* févr 2018;1(2):88-95.
 83. Watari T, Nansai K, Giurco D, Nakajima K, McLellan B, Helbig C. Global Metal Use Targets in Line with Climate Goals. *Environ Sci Technol.* 6 oct 2020;54(19):12476-83.
 84. Pineda, A., Faria, P., Cummis, C., & Huusko, H. Sectorial Decarbonization Approach (SDA): A Method for setting Corporate Emission Reduction Targets in Line With Climate Science. WWF; World Resources Institute; CDP; 2015.

Annexe 1 : Méthodologie pour le budget écologique des métaux : hypothèses et améliorations possibles

Travaux existants sur le sujet de la limitation de la consommation des ressources pour des raisons écologiques

Le besoin de diminuer le niveau global de consommation des ressources fait consensus dans la recherche environnementale. Cependant, peu de recherches académiques ont été publiées sur le sujet des limites écologiques à la production de métaux à l'échelle mondiale afin de rester dans les limites planétaires. Une méta-étude (80) de 2015, citée plus de 180 fois aborde la question des limites à poser à la consommation de ressources, incluant les ressources biotiques (halieutiques, forestières et agricoles) et abiotiques (combustibles fossiles, métaux, minéraux industriels, minéraux de construction). L'objectif de réduction de la consommation des ressources qui en découle est de 50 Gt/an pour l'utilisation des ressources (biotiques et abiotiques) à l'échelle mondiale (*Raw Material consumption*, RMC). Si cet objectif global semble nécessaire, cette publication et plusieurs autres (81,82) étudient la question à une échelle très agrégée et surtout ne proposent pas de baser le calcul du budget sur les limites planétaires, mais plutôt sur un principe de précaution, ou l'idée que les processus anthropiques ne devraient pas dépasser les processus naturels, ou encore sur une approche pragmatique basée sur les bonnes pratiques (voir ci-dessous).



Il s'agissait donc de mener des recherches complémentaires pour définir un budget écologique par métal, qui soit plus spécifique à chaque filière et basé sur des critères environnementaux issus de la littérature. A la connaissance des auteurs de ce rapport, seuls deux articles envisagent une limite à placer à la production de métaux sur des indicateurs liés aux limites planétaires (29,83). De plus, la disponibilité des données sur l'impact du secteur de la mine et de la métallurgie sur les limites planétaires étant limité, cela rendait d'autant plus ardu l'exercice de définition de ce budget écologique. C'est finalement grâce à l'article de Desing et de ses collaborateurs (29) que ce concept de budget a été opérationnalisé pour le présent rapport.

Hypothèses

- L'offre future de métaux d'ici à 2050 ne sera pas limitée par la disponibilité physique (fin des ressources), ou plutôt la limite fixée par le plafond écologique sera atteinte bien avant la fin de la disponibilité physique des ressources ;
- Dans le papier de Desing et de ses collaborateurs, la limite planétaire la plus contraignante pour la production des métaux en 2016 est le changement climatique et en particulier l'indicateur des émissions de CO₂. L'hypothèse est faite que d'ici à 2050, cette limite planétaire reste la plus contraignante. Le modèle est donc simplifié pour ne calculer le budget qu'en fonction de cette limite. Si l'hypothèse est juste, le budget quantifié permet alors de respecter également les autres limites planétaires.

- La part de la limite planétaire attribuée au secteur mines et métaux dans son ensemble (le segment) ne change pas d'ici à 2050 (*grandfathering*). Cette hypothèse est plutôt favorable au secteur, si l'on considère que dans des scénarios "idéaux" de consommation respectant au niveau mondiale les limites planétaires et des niveaux de vie décentes pour tous (Decent Living Standards), la part attribuée aux métaux est bien plus faible que la part actuelle (comme le montre le papier de Schlesier et ses collaborateurs paru en 2024 (30).
- Le calcul des parts de production (PP ou Share of Production) appliquées au budget écologique total du secteur des métaux, pour obtenir un budget spécifique pour chaque métal a été fait sur la base des besoins cumulés calculés dans le scénario négaMat entre 2022 et 2050, légèrement modifiée en prenant en compte notamment la différence d'échelle géographique étudiée (le présent rapport étudiant l'échelle européenne) et le scénario négaMat étant à l'échelle française.
- L'article de Desing et ses collaborateurs utilisent dans leurs calculs une probabilité pour le secteur des métaux de dépasser la part des limites planétaires qui lui est attribuée de 1% (Probabilité Pv). Cette probabilité (Pv) est fixée à 50% dans notre modèle. A titre de comparaison les rapports du GIEC calculent les probabilités de rester en dessous de 1,5°C ou 2°C à 17%, 33%, 50%, 67% et 83%³⁵. 50% semble donc un niveau de confiance moyen. A titre d'information, avec les mêmes hypothèses prises par l'Association négaWatt décrites dans les points précédents, mais en prenant une probabilité de 1% de dépasser les limites planétaires (comme dans l'article de Desing et ses collaborateurs) au lieu de 50%, on obtient un budget écologique pour les métaux 1,87 fois plus petit.

Ce qui n'est pas pris en compte

- Le recyclage n'est pas dans le périmètre d'étude. Ce qui signifie que dans le présent rapport l'activité de recyclage n'a pas de limite écologique, elle est simplement limitée par le stock disponible (et les taux de collecte et le rendement du recyclage).
- Le cumul de la production pour arriver jusqu'au point de passage à 2050. En réalité, il faudrait que la forme de la courbe pour arriver à 2050 soit prise en compte, c'est-à-dire comment le cumul de la production entre 2022 et 2050 permet le respect des limites planétaires et non le respect des limites planétaires uniquement sur cette année 2050.

Ce qui pourrait être amélioré

- L'allocation pour l'Europe du budget écologique par métal pourrait prendre en compte les stocks déjà présents sur le territoire, ce qui serait plus équitable. Dans le cas du lithium dont les stocks ne sont pas encore très importants, la différence serait probablement mineure.
- Les parts de production (PP ou *Share of Production*) appliquées au budget écologique total du secteur des métaux est potentiellement amenée à être revue et corrigée pour mieux prendre en compte les besoins spécifiques de chaque filière et des différentes zones géographiques.
- Dans les impacts unitaires pris en compte pour chaque métal : la baisse de la teneur des métaux, les améliorations de l'efficacité énergétique dans le circuit de production primaire et la décarbonation des systèmes électriques qui réduit les émissions indirectes est prise en compte de manière assez approximative (en supposant que le CO₂ suit la même évolution que l'ensemble des GES) et uniquement pour 7 métaux sur la base des travaux de Van der Voet et de ses collaborateurs (31).
- Rendre le modèle dynamique pour avoir des trajectoires année par année et pouvoir évaluer le respect des limites planétaires sur le cumul de la production et non sur un point de passage à 2050. Pour cela, il faut faire des scénarios sur les impacts environnementaux futurs, à l'image de ce qui est proposé pour le climat pour les science-based targets (84).

³⁵ Cf. table SPM.2 de https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf

- Le modèle pourrait être changé pour attribuer un segment des limites planétaires à chaque métal et ne pas passer par une enveloppe globale attribuée au secteur des métaux. Cette méthode obtiendrait plus facilement des résultats différents pour chaque filière et favoriserait sans doute une meilleure prise en compte des différentes limites planétaires. Cependant, cela augmente le risque de double comptage et de ne pas avoir une méthode cohérente à l'échelle de l'économie globale.
- De manière plus aisée, les autres limites planétaires pourraient être ajoutées en utilisant cette méthode de calcul sur la base du modèle de Desing et ses collaborateurs. Cependant, le résultat resterait sans doute identique.
- Le même calcul pourrait intervenir sur le recyclage des métaux. La présente étude se limite à calculer le budget écologique de l'extraction, mais la même chose peut être faite pour les activités de recyclage.
- Le même calcul pourrait intervenir pour les matières premières non métalliques.

Annexe 2 : Détails du calcul pour la production de déchets miniers aux différentes étapes de traitement du spodumène

Le calcul ne tient pas compte de la potentielle valorisation de coproduits.

	Unités	Source	
Teneur du concentré	%	Vignes, J.-L. Lithium (Elementarium). Société chimique de France.	6%
Teneur du minerai	%		1,43%
Production de lithium	tonnes	Schmidt, M. (2023). Rohstoffrisikobewertung – Lithium. DERA.	41 800
Facteur de concentration entre minerai et concentré	-	Calcul	4
Production de concentré en Australie	tonnes	Schmidt, M. (2023). Rohstoffrisikobewertung – Lithium. DERA.	1 600 000
Production correspondante de minerai en Australie (en négligeant les pertes)	tonnes	Calcul	6 713 287
Roche nécessaire à la production d'une tonne de minerai (hypothèse haute)	tonnes	Schmidt, M. (2023). Rohstoffrisikobewertung – Lithium. DERA.	10
Roche nécessaire à la production d'une tonne de minerai (hypothèse basse)	tonnes		3
Roche nécessaire à la production d'une tonne de minerai (moyenne)	tonnes		6,5
Roche extraite au total (hypothèse haute)	tonnes	Calcul	67 132 867
Roche extraite au total (hypothèse basse)	tonnes	Calcul	20 139 860
Roche extraite au total (moyenne)	tonnes	Calcul	43 636 364
Ratio Roche/métal (hypothèse haute)	tonnes déchets/tonne Li	Calcul	1 606
Ratio Roche/métal (hypothèse basse)	tonnes déchets/tonne Li	Calcul	482
Ratio Roche/métal (moyenne)	tonnes déchets/tonne Li	Calcul	1 044
Tableau de la Figure 15 : déchets (incluant les coproduits potentiels) pour les différentes étapes (hypothèse moyenne)			
Stériles pour accéder au minerai	tonnes par tonne de lithium	Calcul = (Roche extraite au total moyenne- Production de minerai en Australie)/Production de lithium	883
Résidus liés à la concentration (en Australie majoritairement)	tonnes par tonne de lithium	Calcul = (Production de minerai en Australie – Production de concentré)/Production de lithium	122
Résidus liés au traitement chimique (en Chine)	tonnes par tonne de lithium	Calcul = (Production de concentré- Production de lithium)/Production de lithium	37
Déchets totaux correspondant à la Figure 15	tonnes par tonne de lithium	Calcul	1 043

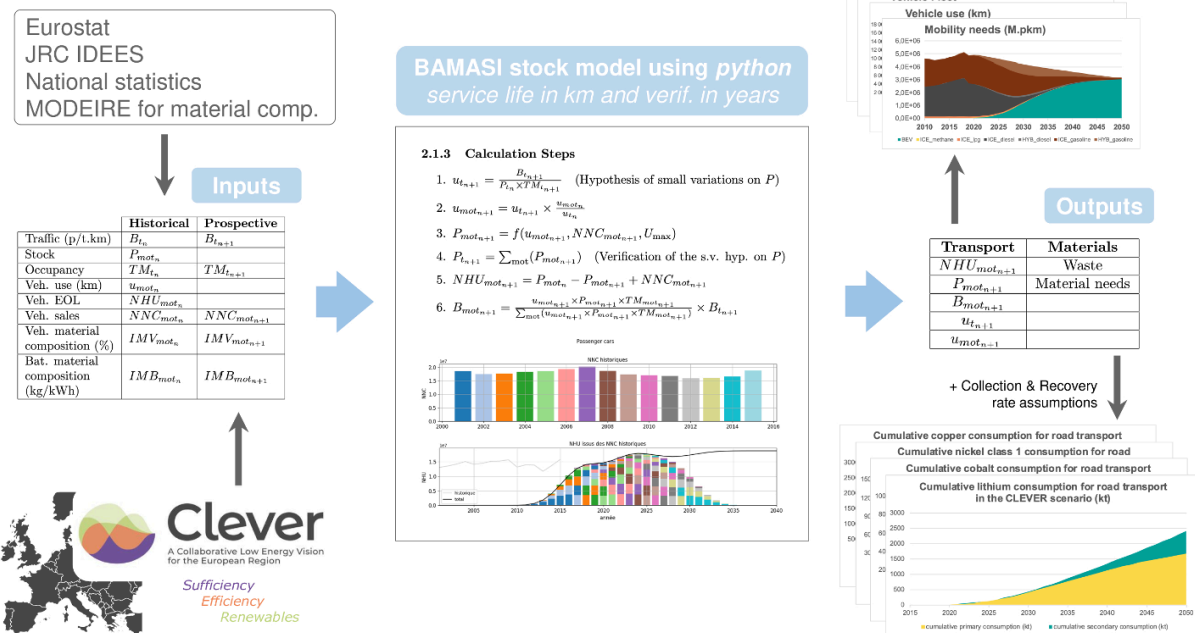
Annexe 3 : Modèle BAMASI

L'Association négaWatt a développé un modèle permettant de quantifier les besoins en matières premières minérales nécessaires pour un scénario de transition énergétique à l'horizon 2050 dans le secteur du transport routier.

Le modèle BAMASI est un modèle de parc dans lequel les durées de vie des véhicules sont définies en kilomètres (par exemple 195 000 km pour une voiture particulière) plutôt qu'en années. Ceci a pour objectif de refléter au mieux les hypothèses de sobriété dans les secteurs de la mobilité et du fret routier, qui conduisent à une réduction de la distance annuelle parcourue par les véhicules.

Le fonctionnement du modèle est présenté dans le schéma ci-dessous :

For each type of road vehicle : sedan, microcar, lcv, bus, truck



Dans le cadre de ce modèle, la durée de vie historique en kilomètres est déterminée pour assurer un alignement rigoureux avec les données historiques sur le parc de véhicules, les nouvelles immatriculations et les véhicules hors d'usage fournies par différentes bases de données comme Eurostat, l'étude "New Mobility Patterns" (NMP) pour la Commission Européenne ou JRC IDEES.

Données d'entrée :

	Historique	Prospective
Traffic (pkm ou tkm)³⁶ [B]	Le trafic est ici défini en besoin de mobilité ou de fret par à l'année n	Le trafic est ici défini en besoin de mobilité ou de fret par à l'année n+1

³⁶ PKM (Passengers-Kilometers) et TKM (Tons-Kilometers).

	Historique	Prospective
Parc [P]	Parc de véhicules par motorisation	
Taux d'occupation ou de remplissage [TM]	Taux d'occupation défini en personnes par véhicule ou taux de remplissage défini en tonnes par véhicule à l'année n	Taux d'occupation défini en personnes par véhicule ou taux de remplissage défini en tonnes par véhicule à l'année n+1
Usage (km) [u]	Usage des véhicules par motorisation à l'année n correspondant à la distance parcourue par véhicule par an	
Véhicules hors usage [NHU]	Véhicules hors d'usage par motorisation à l'année n	
Nouvelles immatriculations [NNC]	Ventes de nouveaux véhicules par motorisation à l'année n	Ventes de nouveaux véhicules par motorisation à l'année n+1
Composition matière des véhicules hors batterie (%)	Composition matière des véhicules par motorisation hors batteries à l'année n	Composition matière des véhicules par motorisation hors batteries à l'année n+1
Composition matière des batteries au lithium (kg/kWh)	Composition matière des batteries à l'année n	Composition matière des batteries à l'année n+1

Données de sortie du modèle :

Données sur le transport	Données sur les matériaux
Véhicules hors d'usage par motorisation à l'année n+1	Gisement annuel de véhicules et de batteries en fin de vie
Parc de véhicules par motorisation à l'année n+1	Besoin annuel en matières premières
Trafic par motorisation à l'année n+1	
Usage des véhicules total et par motorisation à l'année n+1	

