

ETUDE SUR LES BESOINS D'ELECTRIFICATION DE LA MOBILITE EN BELGIQUE ET LES IMPACTS QUI Y SONT LIES

Rapport final

Cette étude a été réalisée par CLIMACT pour le compte du CFDD, entre février et novembre 2021.

Les opinions exprimées dans ce rapport sont celles de CLIMACT, et ne reflètent pas nécessairement celles des membres du CFDD.

Date de publication : Décembre 2021



Auteurs

CLIMACT : Quentin Schobbens, Julien Defauw, Pascal Vermeulen, Benoît Martin, Maïté Jonas.

TDI Sustainability : Graham Lee.

Content

1	Résumé exécutif	5
2	Introduction	15
3	Contexte et enjeux de l'électromobilité	16
4	Perspectives du développement de l'électromobilité en Belgique	20
5	Analyse des impacts clés	41
6	Recommandations de mesures politiques	55
7	Annexe 1 : synthèse des enjeux environnementaux, sociaux et économiques	64
8	Annexe 2 : détails méthodologiques des scénarios construits	70
9	Annexe 3 : détails des résultats principaux	74
10	Bibliographie	80

Note

Cette étude a été financée par le Conseil Fédéral du Développement Durable (CFDD/FRDO), un conseil de membres, institué par la Loi sur le Développement Durable du 5 mai 1997. Le Conseil fonctionne comme un forum de discussion sur le développement durable et a également pour objectifs (entre autres) de sensibiliser les organisations publiques et privées, de même que les citoyens eux-mêmes, mais aussi de proposer des études sur le développement durable. Pour plus d'informations : <http://www.frdo-cfdd.be/fr/le-conseil>.

Le Conseil a rédigé et publié un cahier des charges qui a mené à la réalisation de la présente étude par CLIMACT. Un Comité d'Accompagnement, composé de membres du CFDD, et d'experts de différentes administrations a suivi l'étude. Plusieurs réunions ont ainsi été organisées pour soutenir l'équipe de recherche, partager l'expertise des différents participants et cadrer l'étude.

Glossaire

BEV: Battery Electric Vehicle – Véhicule électrique à batterie.

EOL: End of Life – Fin de vie.

EV: Electric Vehicle – Véhicule électrique, incluant BEV et PHEV.

GES : Gaz à Effet de Serre.

IA : Intelligence Artificielle.

ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle – Véhicule à combustion interne, incluant les véhicules thermiques conventionnels au diesel ou à l'essence.

LCA: Life Cycle Assessment – Analyse de cycle de vie.

LDV : Light Duty Vehicle – véhicule léger.

MaaS: Mobility as a Service – Mobilité comme un service : le service consiste à offrir une alternative à la propriété individuelle de la voiture.

ODD: Objectif de Développement Durable.

PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle – Véhicule électrique hybride rechargeable.

PLV: Powered Light Vehicles – Véhicule motorisé léger¹.

TOD: Transit-Oriented Development – Développement axé sur le transit.

TTW : Tank-to-Wheel. Concerne la consommation énergétique du réservoir de la voiture aux roues, et les émissions qui y sont liées.

V2G: Vehicle-to-Grid – Véhicule connecté au réseau.

VOC : Volatile Organic Compounds – composés organiques volatiles.

WTW: Well-To-Wheel – Du puits à la roue. L'empreinte carbone WTW, dans le cas d'un BEV, comprend les émissions provenant de la production d'électricité, de sa distribution, de l'extraction et du raffinage des combustibles fossiles utilisés dans la production de cette électricité. Cette mesure est incluse dans l'empreinte carbone LCA, qui comprend toutes les émissions de GES liées à la voiture (production du véhicule incluse dans le cas du LCA, par exemple).

¹ Cela inclut les véhicules de classe L (véhicules motorisés de 2-4 roues dont la masse et la puissance n'excèdent pas 400 kg (sans batterie) et 15 kW.

1 Résumé exécutif

1.1 Contexte et objectifs de l'étude

Décarboner le secteur du transport fait partie des priorités de l'Union Européenne, notamment dans le cadre des engagements de l'Accord de Paris et plus récemment du pacte vert pour l'Europe et de la stratégie Fit for 55 de la Commission Européenne.

L'enjeu est double : d'une part, le secteur compte pour ~16% des émissions globales annuelles de GES² (et 22% des émissions territoriales belges³) et d'autre part, c'est le seul secteur dont les émissions ont augmenté en Belgique entre 1990 et 2019⁴. [23]

Les plans européens prévoient de remplacer les véhicules thermiques traditionnels par des véhicules électriques à batterie ; les objectifs proposés par la Commission se dirigent d'ailleurs vers l'interdiction des ventes des voitures et camionnettes à combustible fossile en 2035. [103]

Si ces développements permettent de diminuer significativement les émissions de GES du secteur, ils posent également une série de questions qui touchent à leurs impacts environnementaux, sociaux et économiques.

C'est dans ce contexte que le Conseil Fédéral du Développement Durable/Federale Raad voor Duurzame Ontwikkeling (CFDD/FRDO), à la demande de ses membres, a souhaité que soit menée une étude sur les besoins d'électrification de la mobilité en Belgique et les impacts environnementaux, économiques et sociaux qui y sont liés⁵.

Ce document synthétise l'ensemble des conclusions des recherches effectuées. Il tente de répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les scénarios possibles de demande en batteries pour une Belgique décarbonée en 2050?
- Quels sont les impacts (positifs et négatifs) économiques, environnementaux et sociaux liés à ces scénarios ?

² En 2016, basé sur les estimations de Climate Watch et The World Resource Institute, <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector> [43].

³ Voir <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/emissions-des-gaz-a-effet-de-serre/emissions-par-secteur>.

⁴ Si on considère le chauffage tertiaire et secondaire comme un seul secteur (voir lien de la note de bas de page 3).

⁵ Les prescriptions techniques sont décrites dans le Cahier Spécial des Charges CFDD2021/01 et ont été précisées lors de la séance d'informations du lundi 14 décembre 2020.

- Quelles mesures politiques sont clés pour décarboner rapidement sans compromettre les autres objectifs de développement durable ?

1.2 Les scénarios d'électromobilité pour une Belgique décarbonée

Les scénarios présentés dans cette étude sont le résultat de plusieurs mois de collaboration avec des experts industriels, des experts académiques, le service changements climatiques du SPF Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement (ci-dessous SPF Santé) et les membres du CFDD.

Les analyses et conclusions présentées dans cette section ont comme point de départ les scénarios exploratoires d'une Belgique neutre en carbone développés par le SPF Santé en collaboration avec CLIMACT. Ces scénarios sont issus d'un outil de modélisation appelé "2050 Pathways Explorer", développé par CLIMACT. Le transport de passagers et de fret ainsi que ses déclinaisons routières, maritimes, ferroviaires ou aériennes font partie du périmètre étudié.

Trois scénarios clés visant une décarbonation totale du secteur du transport en Belgique en 2050 sont utilisés :

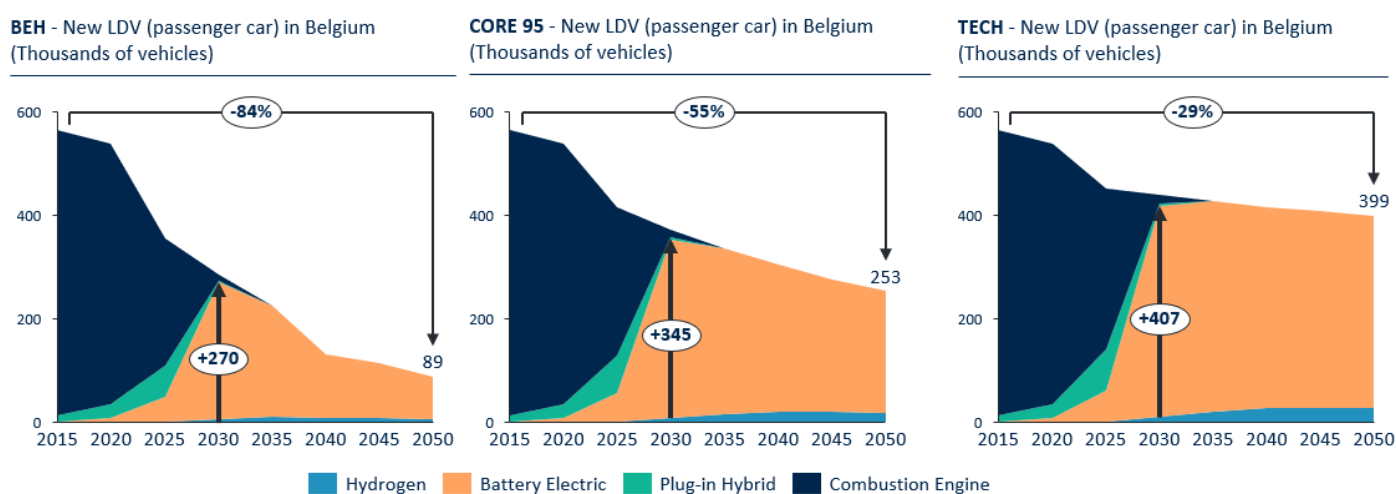
- Le scénario Technologique (TECH), qui promeut plutôt le recours à des changements technologiques (par exemple, de nouveaux moteurs) pour décarboner l'économie,
- Le scénario Behavior (BEH) qui met plutôt en avant des changements comportementaux (par exemple, le shift modal vers les transports en commun),
- Le scénario CORE 95, ambitieux mais plus équilibré quant aux deux dimensions précédemment citées.

Aucun scénario ne peut se passer de changements comportementaux ou technologiques, la combinaison des deux est nécessaire pour atteindre la neutralité carbone.

Parmi les hypothèses clés détaillées dans la table en annexe 2, on peut retenir que l'évolution entre 2015 et 2050 des kilomètres parcourus en voiture se stabilise dans le scénario TECH alors qu'elle décroît de respectivement 22% et 51% dans les scénarios CORE 95 et BEH. On note également une diminution de la part modale de la voiture dans le transport de passagers : de 62% en 2015 à 33% en 2050 pour le scénario BEH, à 45% pour le scénario CORE 95 et à 51% pour le scénario TECH. Les autres leviers de décarbonation (pénétration des véhicules électriques, taux d'utilisation, etc.) sont détaillés à l'annexe 2.

Il ressort de l'analyse que les scénarios de décarbonation modélisés impliquent tous une réduction des volumes annuels de voitures vendues, et, en parallèle, une augmentation de la part des véhicules électriques. Cet objectif correspond en proportion à ceux actuellement proposés par la Commission Européenne pour 2035 [103] : la fin de la vente des véhicules thermiques en 2035 pour l'ensemble de l'Union Européenne⁶. En chiffres absolus, les quantités sont contrastées d'un scénario à l'autre, comme le souligne la Figure 1.

Figure 1: ventes des voitures LDVs en Belgique selon 3 scénarios centraux de l'analyse



Au-delà des modifications de comportements pour diminuer la demande globale de véhicules, le choix des batteries comme technologie centrale des nouveaux véhicules légers se justifie de différentes manières :

- L'alternative des fuels synthétiques (comme, par exemple, le diesel de synthèse (« e-diesel ») ou l'hydrogène) est une piste utile mais peu efficace d'un point de vue énergétique. Plusieurs études recommandent de réserver l'utilisation des fuels synthétiques pour les véhicules lourds, le transport maritime et l'aviation [120], modes de transport pour lesquels les batteries ne sont pas considérées comme une alternative viable,
- Les biocarburants sont également considérés comme une solution de décarbonation envisageable. Plusieurs études rappellent que les quantités durables et à faibles émissions de ces énergies sont

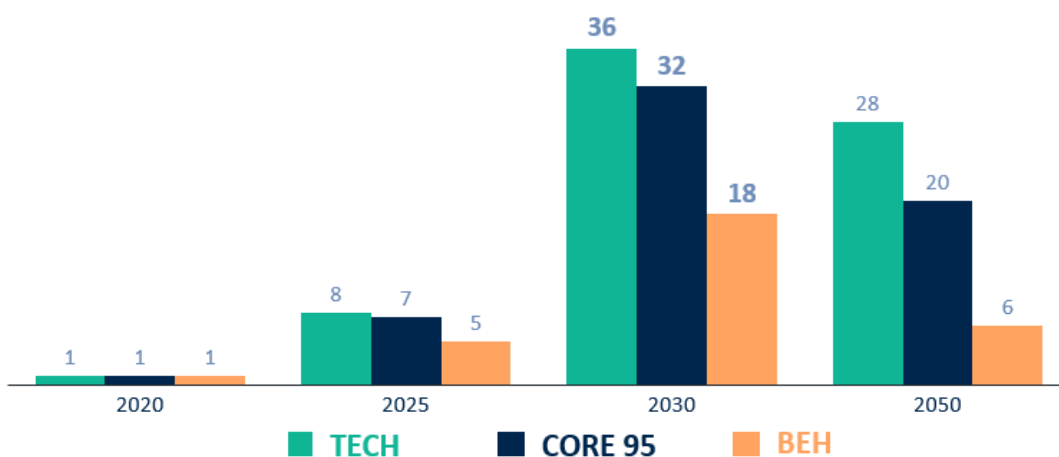
⁶ Une analyse étudiant une évolution linéaire de la croissance des ventes de véhicules électriques BEV a également été réalisée et discutée dans cette étude. Cette analyse de sensibilité diminue de facto la demande en batteries et en matériaux, mais elle ne correspond pas aux objectifs « zéro-émissions » suggérés par la Commission Européenne (et réduit fortement le potentiel de réduction d'émissions du secteur). Pour cette raison, elle n'est pas mentionnée dans le résumé de l'étude.

- limitées. Ceci renforce l'importance d'utiliser les alternatives possibles (comme les batteries) pour minimiser le recours à ces carburants tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. [120]
- Il est utile de rappeler que les objectifs européens décrits au paragraphe précédent ne concernent que la vente de nouveaux véhicules : sans mesures supplémentaires, la flotte sera encore composée de véhicules « traditionnels » tant qu'elle ne sera pas complètement renouvelée, ce qui augmente démesurément l'utilisation de fuels synthétiques ou de biocarburants s'ils sont rendus possibles pour les véhicules légers [85].

Les volumes de voitures électriques influencent directement la demande de batteries. Les estimations de croissance des volumes de batteries entre 2020 et 2030 confirment la nécessité de limiter le recours à la voiture pour que l'objectif visant la période 2030-2035 comme fin des ventes de voitures thermiques soit réaliste. Les scénarios TECH et CORE 95, qui diminuent pourtant les quantités de voitures vendues, semblent particulièrement ambitieux : ils multiplient respectivement par 36 et par 32 les quantités de batteries produites entre 2020 et 2030 pour l'électromobilité en Belgique. Ces multiples impliqueraient une répartition des nouvelles batteries en faveur de la Belgique plutôt que d'autres pays européens. Une croissance proche des niveaux de BEH semble plus réaliste, comme indiqué à la Figure ci-dessous (voir section 4.3.2 pour plus de détails).

Figure 2: Demande de batteries en Belgique (GWh) selon les 3 scénarios centraux de l'analyse

Battery yearly demand in Belgium – comparison between TECH, CORE 95 & BEH (GWh)



1.3 Les enjeux qui découlent des scénarios d'électromobilité

Réduire la demande en transport, produire une telle quantité de batteries, transformer l'industrie automobile, toutes ces transformations confirment que décarboner le secteur du transport aura des répercussions sociales, économiques et environnementales majeures.

Cette étude les analyse à travers quatre angles : d'abord, via une synthèse des externalités positives et négatives liées à cette transition (chapitre 3 et annexe 1) ; ensuite, par l'analyse qualitative plus détaillée de certaines conséquences majeures (chapitre 5) ; puis par la quantification de la pression sur les ressources de six métaux critiques (section 4.3.3) et enfin par une quantification de l'amélioration de la qualité de l'air (section 5.3).

1.3.1 Pression sur les ressources

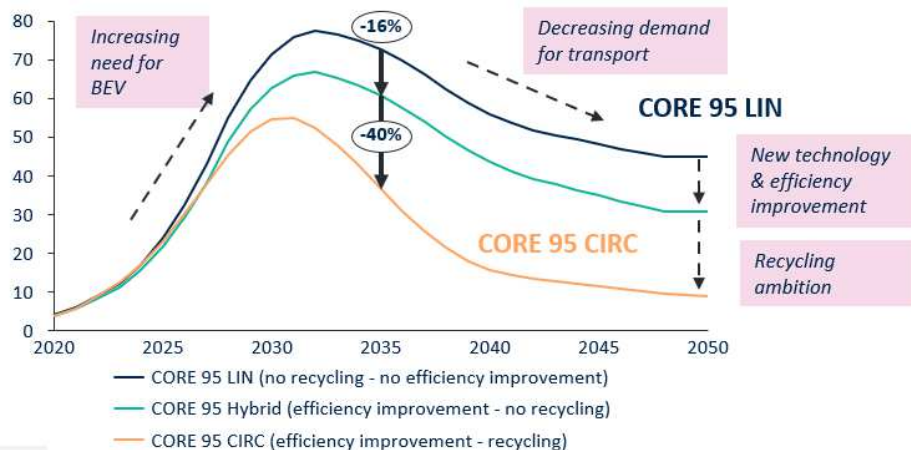
Dans tous les scénarios, il est indispensable et urgent de développer des normes, des infrastructures, des incitants et des innovations technologiques diminuant d'une part les besoins primaires en cobalt et lithium et permettant d'autre part de collecter et de recycler les volumes extraits, pour maintenir les quantités de matériaux primaires dans des ordres de grandeur compatibles avec les estimations de réserves et ressources minières. Ces conclusions valent pour tous les matériaux étudiés, et doivent être traitées en priorité pour le cobalt, compte tenu des quantités disponibles estimées. Il est clé d'assurer le développement industriel rapide des nouvelles technologies et notamment celles permettant de se séparer du cobalt.

Les scénarios mettant l'accent sur les modifications comportementales ont un impact important sur les besoins en matériaux primaires (ces modifications diminuent la « hauteur de la cloche » sur la Figure 3 ci-dessous). Il est d'autant plus important de réduire la demande à court terme que les technologies limitant la demande en cobalt sont marginales au moment d'écrire ce rapport. Cela dit, réduire la demande ne diminue pas l'importance du recours aux innovations technologiques et aux normes ou incitants qui maximisent leur potentiel (par exemple, un objectif de taux de recyclage).

Poursuivre l'exploration géologique paraît incontournable pour subvenir à la demande et assurer une décarbonation rapide du transport : des mesures d'accompagnement fortes sont nécessaires pour réduire au minimum les externalités sociales et environnementales de cette exploration.

Figure 3: demande annuelle belge en matériaux primaires selon plusieurs analyses de sensibilité autour de CORE 95 - sommes des volumes des matériaux analysés (milliers de tonnes)

Annual primary demand of key materials: reduction thanks to demand, efficiency & recycling improvements (thousands tons of materials) – Based on CORE 95 scenario

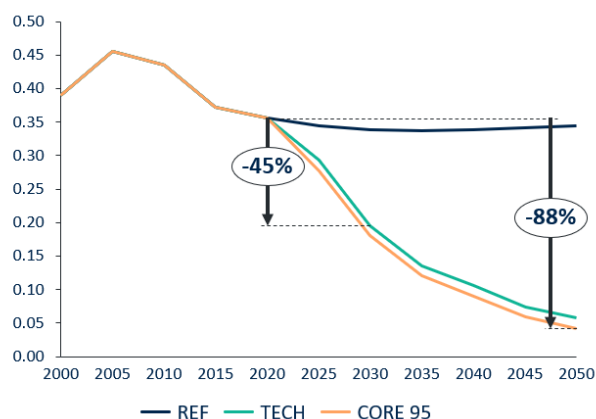


1.3.2 Amélioration de la qualité de l'air

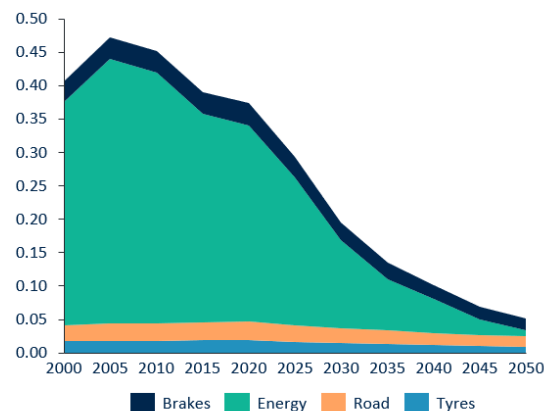
Les émissions et les concentrations de polluants atmosphériques étudiés (NH_3 , $\text{PM}_{2.5}$, VOC) diminuent dans tous les scénarios de décarbonation par l'électromobilité, car leur source principale est la combustion de combustibles fossiles. Le modèle prévoit des émissions résiduelles de $\text{PM}_{2.5}$ en 2050 liées à l'usure des pneus, des freins et de l'asphalte. Des innovations (naissantes mais non modélisées) seront nécessaires pour parvenir à éliminer complètement ces particules fines.

Figure 4: Concentration en $\text{PM}_{2.5}$ - comparaison des scénarios REF, CORE 95 et TECH

Concentration en $\text{PM}_{2.5}$ en Belgique: impact du Transport par scénario [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



Sources des concentrations en $\text{PM}_{2.5}$ selon le scénario CORE-95 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



1.3.3 Autres externalités environnementales

Emissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble de la chaîne de valeur (section 5.2). La majorité des études indique que les véhicules électriques émettent moins de gaz à effet de serre que les véhicules thermiques sur l'ensemble du cycle de vie. Notons toutefois qu'à l'heure actuelle, les technologies de production de batteries restent tributaires d'énergie électrique et fossile : dans un monde neutre en carbone, il est forcément indispensable de décarboner cette production et promouvoir les technologies les plus efficaces.

Décarbonation du réseau électrique (section 5.2.3). Décarboner la génération d'électricité parallèlement au développement de l'électromobilité est indispensable. Il est utile de rappeler ici aussi l'importance des réductions de demande en amont pour que la décarbonation puisse se faire rapidement puisque la transition de plusieurs secteurs se fera par l'électrification des technologies.

Biodiversité (section 3.2). De nombreuses études documentent les dégradations infligées aux écosystèmes naturels par les pratiques minières actuelles (pas uniquement liées à l'électromobilité). Les pratiques futures (notamment l'exploitation des fonds marins en eaux profondes (« deep-sea mining »)) font également l'objet de nombreuses critiques à ce sujet.

1.3.4 Externalités sociales

Atteintes aux droits fondamentaux dans les régions minières (section 5.4). Des problèmes majeurs sont régulièrement signalés dans les régions minières d'où sont extraits les matériaux clés à l'électromobilité. Il est inexact d'imputer l'ensemble de ces externalités négatives (impact sur la santé des mineurs et des populations jouxtant les sites, violences, accaparement des terres, conditions de travail et travail des enfants) uniquement aux batteries des voitures électriques : il s'agit toutefois de faits récurrents dans l'industrie minière, peu importe l'usage des matériaux en aval. Agir sur la chaîne de valeur des batteries est urgent mais n'est pas suffisant : si cela peut constituer un point d'entrée pour plus de normes, il est également indispensable d'améliorer les pratiques minières en général (voir recommandations politiques).

Emplois (section 5.5). Il est difficile de qualifier avec certitude l'impact net de l'avènement des véhicules électriques sur l'emploi en Europe et par extension en Belgique. Beaucoup d'incertitudes subsistent sur les paramètres utilisés et, à notre connaissance il n'existe pas d'étude précise sur le cas belge. Il y aura cependant une modification profonde des types de compétences nécessaires et une partie importante de la force de travail actuellement employée dans le secteur automobile devra être réorientée. De plus, de nouveaux services (en dehors de la chaîne de valeur de production de véhicules) verront le jour dans les scénarios de décarbonation (comme le développement de technologies de partage de voitures), qui pourront être la source de nouveaux emplois.

1.4 Recommandation de mesures politiques

1.4.1 La proposition de règlement de la Commission Européenne

Dans le cadre du Green Deal Européen, sous le nouveau « plan d'action pour une économie circulaire », la Commission Européenne a publié, en décembre 2020, une proposition de règlement importante qui couvre l'ensemble de la chaîne de valeur des batteries : le « règlement [...] relatif aux batteries et aux déchets de batteries ». La proposition a pour objectif d'introduire des critères environnementaux et sociaux minimums pour tout type de batteries mises sur le marché européen. Tout au long de la chaîne de valeur, elle promeut le devoir de diligence environnemental et social. En amont de l'usage, elle oblige le calcul de l'empreinte carbone de production et pousse pour la création d'un « passeport » facilitant la transparence quant aux informations clés pour le consommateur et pour les acteurs de la réparation, la réutilisation ou le recyclage de batteries. En aval, elle définit des objectifs de collecte et de recyclage des matériaux.

1.4.2 Recommandations autour de la proposition de règlement

La plupart des Etats Membres, des ONGs et des parties prenantes ont accueilli favorablement cette proposition, tout en insistant pour maintenir un niveau d'ambition suffisant dans le texte final et en suggérant d'apporter une série d'améliorations sur le texte final [77, 74, 99, 112]. Cette section s'appuie sur les prises de position de ces acteurs pour tenter d'identifier les manquements de la proposition de règlement actuelle et de suggérer des recommandations correctives ou des points indispensables devant apparaître dans le texte final (le texte doit encore être amendé et validé par le Parlement et le Conseil). Ces recommandations (listées ci-dessous et détaillées au chapitre 6) ne se veulent pas exhaustives, elles concernent plutôt les impacts majeurs identifiés précédemment.

- a) **Les recommandations 1 à 2 concernent les objectifs de collecte et recyclages** : le taux de collecte doit être le plus ambitieux et les taux de recyclage alignés (au minimum) sur les meilleures pratiques actuelles concernant les matériaux critiques. Le règlement doit pouvoir facilement couvrir d'autres ressources qui deviendront clés à mesure que les technologies évoluent.
- b) **Les recommandations 3 à 6 concernent les obligations de devoir de diligence sur la chaîne de valeur** : les critères doivent se baser sur les textes les plus larges en termes de risques et zones géographiques couvertes (ne pas se limiter uniquement aux zones de conflits armés) et couvrir plus de matériaux que ceux listés pour l'instant.
- c) **La recommandation 7 concerne l'exploitation des fonds marins en eaux profondes**. Le potentiel des fonds marins semble immense, mais les inconnues et risques pour la biodiversité sont encore importants. Il faut étendre le devoir de diligence obligatoire de la chaîne d'approvisionnement pour couvrir explicitement les fonds marins, et inclure tous les impacts environnementaux et sociaux potentiels de l'extraction en eau profonde.

1.4.3 Autres recommandations liées aux enjeux identifiés

La proposition de règlement évoquée ci-dessus ne couvre pas l'ensemble des enjeux majeurs étudiés. Les objectifs de décarbonation ambitieux à 2030, la diminution de l'utilisation de voitures, le soutien à l'innovation, aux emplois, etc. sont plusieurs exemples d'éléments qui sortent du cadre de cette proposition. Les recommandations ci-dessous concernent donc soit d'autres politiques européennes, soit des mesures qui pourraient être prises au niveau fédéral (ou régional).

De plus, ces recommandations font écho à d'autres études pour rappeler l'importance et l'urgence de l'enjeu climatique. La décarbonation du transport est un présupposé clé dans les analyses réalisées, considérée comme indispensable à l'avènement d'une société réellement durable. Il est d'ailleurs utile de rappeler que les conséquences négatives du développement des batteries présentées dans cette étude ne justifient en aucun cas la réduction des ambitions de décarbonation nécessaire. Identifier ces conséquences négatives permet d'ajouter des balises, elles aussi indispensables, à un développement durable de la mobilité électrique.

- a) **Les recommandations 8 et 9 concernent les objectifs de décarbonation de l'ensemble des nouvelles ventes de voitures (LDV) et camionnettes** : il faut augmenter les objectifs (en vigueur ou proposés) pour 2025 et 2030 afin d'assurer une décarbonation effective en 2035. La Belgique devrait viser des objectifs plus ambitieux.
- b) **Les recommandations 10 et 11 concernent la nécessité de diminuer le poids et la puissance des voitures**. Au niveau européen, il est nécessaire de retirer le paramètre de poids de la formule de calcul des objectifs CO₂. Au niveau belge, il faut inciter à l'achat de véhicules plus légers et augmenter les taxes sur les véhicules plus lourds. La sensibilisation de la population à la problématique a aussi un rôle à jouer. Une adaptation supplémentaire de la réforme du cadre légal des voitures de société pour accélérer ce changement est recommandée.
- c) **La recommandation 12 propose de créer une agence internationale de coopération** qui aurait pour mandat de superviser et de favoriser le partage et l'amélioration des critères de devoir de diligence du respect des droits humains et environnementaux.
- d) **Les recommandations 13 et 14 concernent l'accélération des investissements et des incitants réduisant la demande de transport et favorisant la mobilité active et partagée**.
- e) **Les recommandations 15 à 17 concernent la nécessité de soutenir l'emploi, l'innovation et le déploiement industriel des technologies indispensables à la transition** : il faut préparer des programmes de réorientation vers les filières d'avenir, soutenir les innovations et les déploiements des technologies de recyclage des matériaux clés.

2 Introduction

Le Conseil Fédéral du Développement Durable/Federale Raad voor Duurzame Ontwikkeling (CFDD/FRDO), à la demande de ses membres, a commandité auprès de CLIMACT une étude sur les évolutions d'électrification de la mobilité en Belgique et les impacts environnementaux, économiques et sociaux qui y sont liés⁷. Cette étude s'appuie sur les travaux menés par le SPF Santé sur l'élaboration des scénarios qui visent la neutralité climatique en Belgique d'ici 2050.

En accord avec le CFDD et le SPF Santé, des liens ont été établis avec l'étude portée par le SPF Santé en vue de déterminer les impacts environnementaux liés aux développements des batteries à l'horizon 2050 et permettent de s'assurer que les études se complètent et se renforcent.

L'étude, dans le contexte des ressources prévues, identifie, au sein d'une littérature abondante, les principaux enjeux pertinents pour la Belgique du développement de l'électromobilité. Elle s'appuie sur l'analyse de scénarios contrastés, en lien avec les travaux du SPF Santé. L'étude s'appuie également sur les autres travaux du CFDD et a pu bénéficier des discussions tenues avec les membres du CFDD. L'étude alimente utilement le débat sur l'électrification de la mobilité en Belgique et pourrait être complétée par des analyses spécifiques, concernant notamment le rôle d'autres vecteurs énergétiques comme le gaz renouvelable ou l'hydrogène.

Ce rapport détaille les travaux qui ont eu lieu entre février et novembre 2021 :

- Le chapitre 3 illustre, sur la base de la revue de littérature, les principaux enjeux environnementaux, économiques et sociaux,
- Le chapitre 4 explore, à l'aide du modèle développé pour l'élaboration des scénarios belges et d'analyses de sensibilité, les implications en nombre de véhicules, de batteries et des ressources minières du développement de l'électromobilité en Belgique,
- Le chapitre 5 analyse les impacts clés des scénarios ambitieux d'électromobilité sur la réduction des GES, la qualité de l'air, la santé, les droits fondamentaux et l'emploi,
- Le chapitre 6 développe quelques recommandations de mesures politiques pour encadrer le développement de l'électromobilité en Belgique,
- Les annexes reprennent la bibliographie et détaillent les analyses.

⁷ Les prescriptions techniques sont décrites dans le Cahier Spécial des Charges CFDD2021/017 et ont été précisées lors de la séance d'informations du lundi 14 décembre 2020.

3 Contexte et enjeux de l'électromobilité

3.1 L'électromobilité se développe rapidement

Décarboner le transport est clé dans la réduction des émissions de GES. En effet, l'urgence est double : d'une part le secteur compte pour ~16% des émissions globales annuelles de GES⁸ (et 22% des émissions territoriales belges⁹), d'autre part c'est le seul secteur qui a vu ses émissions augmenter en Belgique entre 1990 et 2019¹⁰. [23]

Décarboner le transport est complexe : le parc de véhicules et les infrastructures à développer sont importants, les enjeux économiques, sociaux et les aspects technologiques liés à l'industrie automobile sont significatifs.

Décarboner le transport fait partie des priorités des Etats membres de l'Union Européenne, notamment, dans le cadre des engagements de l'Accord de Paris et plus récemment du pacte vert pour l'Europe de la Commission Européenne. Ces engagements se traduisent par une série d'objectifs et de mesures pour tous les secteurs d'activité économique, dont le transport.

La transition vers l'électromobilité et les véhicules électriques à batteries sont au cœur de ces mesures et concernent à ce stade principalement les véhicules dits légers (c'est-à-dire les voitures de passagers et les camionnettes).

L'année 2020, malgré la pandémie, marque un tournant dans l'évolution des ventes de véhicules électriques : ils représentent environ 10 % des ventes annuelles de véhicules neufs en Europe, qui a dépassé la Chine en termes de ventes absolues¹¹. À l'échelle mondiale, les ventes de véhicules électriques ont augmenté de 30 % par an en moyenne depuis 2016. La pénétration, au niveau de la flotte totale de véhicules est encore faible et représente ~2% en Belgique en 2020. [16,17,24]

⁸ En 2016, basé sur les estimations de Climate Watch et the World Resource Institute, résumées sur <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>.

⁹ Voir <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/emissions-des-gaz-a-effet-de-serre/emissions-par-secteur>.

¹⁰ Si on considère le chauffage tertiaire et secondaire comme un seul secteur (voir lien de la note de bas de page 9).

¹¹ PHEV comprises.

Les scénarios prospectifs de plusieurs organisations internationales [9, 116, 117] confirment la tendance à la hausse des ventes de véhicules électriques d'ici à 2030. Ils tablent sur une multiplication de la demande en batteries allant de 8 à 30 fois la demande actuelle entre 2020 et 2030.

Ces développements s'accompagnent de défis économiques, environnementaux et sociaux. L'augmentation de la production de batteries à un niveau élevé en peu de temps exerce une pression importante à tous les niveaux de la chaîne d'approvisionnement des batteries.

L'annexe 1 illustre les principaux enjeux environnementaux, économiques et sociaux, extraits d'une importante revue de la littérature et catégorisés en risques et en opportunités. La section suivante synthétise ces enjeux.

3.2 Enjeux liés au développement de l'électromobilité et objectifs de développement durable

Le tableau ci-dessous regroupe les enjeux identifiés dans la synthèse (en annexe 1) et indique le lien avec les ODD. Une description générale de l'enjeu en lien avec le secteur du transport et les ODD correspondant est donnée. Une description complète des risques et opportunités pour chacun des ODD est également disponible dans l'annexe 1.

Tableau 1: synthèse des enjeux et lien avec les ODD

Enjeu	ODD	Description
Enjeux environnementaux		
Emissions de GES	13	Le secteur du transport émet une portion significative des émissions de GES au niveau global, et plus encore au niveau belge. L'alignement avec les ODD et l'accord de Paris implique une forte diminution de ces émissions.
Consommation et efficacité énergétique	11,12	Le transport fait partie intégrante de l'aspect énergivore de la société actuelle. Cela découle de la grande demande de mobilité et de véhicules et du rendement faible des moteurs thermiques. Les moteurs électriques sont plus efficaces que les moteurs thermiques.
Qualité de l'air	3,11	La pollution de l'air issue du transport est associée à des dangers pour la santé humaine et pour la biodiversité. Cette pollution est liée à la demande en véhicules, au type de combustible et au mode de conduite.
Destruction de la biodiversité	12,14,15	La protection de la biodiversité est essentielle à une société durable. Or, les procédés d'extraction des métaux ou de combustible fossile peuvent causer la destruction d'écosystèmes.
Pénurie des ressources	12	La fabrication de batteries nécessite de grandes quantités de métaux. Certaines de ces ressources montrent un potentiel important de pénurie dans les années

		à venir. L'électromobilité permet par contre de diminuer les risques liés à une pénurie de pétrole.
Production de déchets / consommation responsable	11,12	La consommation responsable/durable dans le transport trouve sa signification dans la circularité des biens utilisés. Tout constituant de voiture non recyclé résulte en quantités de déchets finissant à la décharge. En particulier, la dangerosité des déchets provenant de batteries peut être élevée.
Développement des énergies renouvelables	7,13	D'une part, l'électromobilité, demandeuse en électricité, doit s'accompagner de l'utilisation d'énergie propre, où des progrès doivent encore être faits en Europe et en Belgique. D'autre part, les batteries peuvent être réutilisées pour servir d'unités de stockage pour le réseau.
Enjeux économiques		
Développement économique	8	Le secteur automobile est actuellement une force économique de l'UE. L'électromobilité, accompagnée d'une diminution de la demande pourrait mener à la régression économique du secteur ; elle apporte aussi des opportunités de nouveaux marchés (voitures partagée, recyclage, gestion de la mobilité partagée, etc.).
Dépendance économique	8,9	L'UE est actuellement dépendante économiquement de pays étrangers pour son approvisionnement en matériaux et en combustibles fossiles, ainsi que pour la production des batteries.
Infrastructure de recharge	8,9	Il est nécessaire d'investir massivement dans un réseau de bornes de recharge efficace et de capacité adéquate. Ce réseau est très peu développé à l'heure actuelle.
Industrialisation durable	9	L'extraction des matériaux et la production de batteries sont principalement situées hors de l'UE, dans un cadre réglementaire moins strict.
Enjeux humains et sociaux		
Emploi	8	Au niveau européen, l'électromobilité pourrait, à moyen-terme, réduire l'offre d'emplois dans le secteur automobile. Toutefois, certains marchés (recyclage/réutilisation, gestion et maintenance de la mobilité partagée) pourraient créer de nouveaux emplois.
Inégalités sociales	10	Permettre à tous d'avoir accès aux transports est un objectif de durabilité sociale. L'électromobilité est aujourd'hui vue de manière élitiste avec un accès privilégié aux personnes aisées. Le développement de la mobilité partagée (électrique ou fossile) pourrait faciliter l'accès aux transports aux personnes de faible revenu.
Commodité urbaine	3,11	Le transport orienté sur les véhicules privés cause de nombreux désagréments comme la congestion du trafic, la pollution sonore, l'insécurité routière ou la difficulté de parking.
Atteintes aux droits fondamentaux	3,16	Cet enjeu vise à prendre en considération les impacts humains globaux liés au secteur minier. L'exploitation minière est actuellement liée à des conditions violant parfois le respect des droits de l'Homme (impact sur la santé des

		mineurs et des populations jouxtant les sites, violences, accaparement des terres, conditions de travail et travail des enfants).
Travail décent et qualifié	8	L'industrie automobile européenne est majoritairement associée à une main d'œuvre qualifiée et à des conditions de travail décentes.

4 Perspectives du développement de l'électromobilité en Belgique

4.1 Introduction

Le développement de l'électromobilité en Europe et en Belgique va augmenter significativement le besoin en batteries et les matériaux nécessaires à leur production.

Ce chapitre étudie les évolutions possibles de la demande en batteries en Belgique et les besoins liés en ressources minières critiques. L'analyse permet d'étudier l'ampleur des enjeux concernant la pression sur les ressources et d'établir les conditions et mesures politiques qui permettront le développement serein et durable de l'électromobilité.

L'hypothèse centrale pour déterminer la demande en batteries est la décarbonation complète du secteur du transport en 2050, modélisée au travers des travaux menés par le SPF Santé et CLIMACT.

La présente étude se base sur les scénarios issus de ces travaux¹². Trois scénarios contrastés sont utilisés et des analyses de sensibilité sont réalisées sur plusieurs paramètres clés¹³. Les trois scénarios sont les suivants :

- Le scénario TECH, visant la décarbonation en 2050 en accentuant les améliorations et déploiements technologiques plus que les changements comportementaux, impliquant une croissance plus importante des véhicules électriques,
- Le scénario BEH, mettant plutôt l'accent sur les changements comportementaux (même si les améliorations technologiques restent importantes),
- Le scénario CORE 95, équilibré sur les dimensions comportementales et technologiques,
- Ces scénarios sont comparés au scénario REF, basé sur des évolutions à tendances inchangées.

La pression autour de six matériaux est ensuite analysée. Il s'agit du cobalt, du lithium, du graphite, du nickel, du manganèse et de l'aluminium. Le modèle permet d'inclure l'amélioration des technologies des batteries, en réduisant la demande de certains de ces matériaux, soit à travers de nouvelles technologies de batteries, soit en améliorant l'efficacité de technologies existantes et du recyclage.

¹² <https://climat.be/2050-fr/analyse-de-scenarios>.

¹³ Voir section 4.2.3.

4.2 Méthodologie

Les scénarios présentés dans cette étude sont le résultat des plusieurs mois de collaboration avec des experts industriels, des experts académiques, le SPF Santé, les membres du CFDD, différentes associations non-gouvernementales et bureaux de conseils (notamment TDI-Sustainability¹⁴).

Les éléments suivants sont discutés dans ce chapitre : la description synthétique du périmètre, les hypothèses sous-jacentes et le fonctionnement du modèle utilisé.

4.2.1 Périmètre

L'étude se concentre sur la quantification des besoins en batteries liés aux évolutions de l'électromobilité du transport routier (passager et fret) en Belgique. Dans les sections suivantes, une attention particulière est donnée au transport routier de passagers : c'est la catégorie de transport qui génère la plus forte demande en batteries d'ici à 2030-2035 [9, 116, 117]. Ceci est dû au fait qu'à l'heure actuelle, les technologies présentes et futures semblent moins adaptées aux besoins des véhicules plus lourds, comme les camions, les bus, les bateaux ou les avions. Bien qu'ils ne soient pas illustrés dans cette section, rappelons toutefois que dans les scénarios et outils utilisés, ces modes de transport (et leurs technologies spécifiques de décarbonation) sont étudiés également et la demande en batteries qu'ils génèrent fait partie des quantités chiffrées.

Une fois ces besoins en batteries déterminés, les quantités sont transformées en besoins en matériaux, ce qui permet d'évaluer la pression sur les réserves et les ressources disponibles. Nous nous concentrons sur les six matériaux les plus critiques au niveau de leur approvisionnement en quantités suffisantes : le cobalt, le lithium, le graphite, le nickel, le manganèse et l'aluminium.

4.2.2 Le Pathways Explorer

Le [Pathways Explorer](#) est un modèle de simulation de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre qui permet d'analyser les implications de la mise en œuvre de scénarios ambitieux de transition vers une économie décarbonée. L'outil, développé par CLIMACT, s'inspire des outils EUCalc, GlobalCalc et d'autres modèles de calculateurs existants. Ces outils permettent d'étudier l'ensemble des solutions visant à réduire les émissions de GES, en testant un large éventail de mesures potentielles, en ce compris les tendances émergentes en termes de mobilité, de logement ou de régime alimentaire, ainsi que

¹⁴ <https://tdi-sustainability.com/>.

la palette complète des options technologiques sous-jacentes. Une description plus complète du modèle est donnée en annexe 2.

4.2.3 Hypothèses clés

Plusieurs catégories de paramètres sont modélisées dans le projet BE2050 développé par CLIMACT pour le SPF Santé pour évaluer la demande en batteries et la pression sur les matériaux critiques. Ces catégories sont :

- Les évolutions au sein du secteur du Transport (demande, shift modal, taux d'utilisation des véhicules, etc.),
- L'amélioration technologique des batteries,
- Le degré de recyclage des batteries et de leurs composants,
- La disponibilité des matériaux et des ressources.

Ces catégories sont brièvement décrites ci-dessous, ainsi que les choix des hypothèses clés pour chacune d'entre-elles.

- **Les évolutions du secteur du Transport en Belgique dans les différents scénarios**

Plusieurs scénarios possibles pour atteindre la neutralité carbone en Belgique en 2050 sont explorés dans l'étude du SPF Santé¹⁵. Parmi les hypothèses clés des trois scénarios utilisés (TECH, BEH et CORE) détaillées dans la table en annexe 2, on peut retenir que l'évolution entre 2015 et 2050 des kilomètres parcourus en voiture se stabilise dans le scénario TECH, et décroît dans les scénarios CORE 95 et BEH de 22% et 51% respectivement. On note également une diminution de la part modale de la voiture dans le transport de passagers : de 62% en 2015 à 33% en 2050 pour le scénario BEH, à 45% pour le scénario CORE 95 et à 51% pour le scénario TECH. Les autres leviers de décarbonation (pénétration des véhicules électriques, taux d'utilisation, etc.) se trouvent à l'annexe 2.

Lors de la construction des scénarios pour cette étude, la forme de la courbe d'évolution entre 2020 et 2050 a été amplement discutée. Une analyse de sensibilité a été réalisée pour évaluer l'impact qu'aurait une évolution linéaire de ces courbes, plutôt que les formes en S utilisées dans les scénarios BEH, TECH, CORE 95 initiaux. Il en découle des scénarios de **décarbonation rapide (« FAST »)** dans le cas des formes en S (une forme en S permet d'atteindre la grande partie des ambitions d'électrification plus rapidement) et d'une **décarbonation plus lente (« SLOW »)** dans le cas des projections linéaires. Cette analyse de sensibilité est discutée dans les sections suivantes.

¹⁵ <https://climat.be/doc/climate-neutral-belgium-by-2050-report.pdf>.

La priorité a été donnée aux batteries pour la vente de nouveaux véhicules légers, comme expliqué à la section 1.2 et dans une étude de Transport & Environment [120].

- **Les évolutions de la demande en matériaux pour la construction des batteries : nouvelles technologies et recyclage**

Deux séries d'hypothèses contrastées ont été utilisées au sein du modèle de consommation des ressources développé pour ce projet. Elles permettent d'évaluer de manière contrastée l'impact de la circularité dans la chaîne de valeur des batteries, au travers de deux variantes : la variante LINEAIRE (LIN) et la variante CIRCULAIRE (CIRC). Ces hypothèses sont détaillées en annexe 2.

Deux types de leviers sont utilisés :

- Les leviers de circularité, qui permettent de déterminer la proportion de recyclage des différents matériaux. Ils comprennent le taux de recyclage des batteries (pourcentage des batteries en fin de vie qui sont recyclées) et le rendement de recyclage de chaque matériau (la proportion de ce matériau qui est effectivement récupérée lors du recyclage). Les scénarios LINEAIRE (LIN) poussent très peu ces leviers alors que les scénarios CIRCULAIRE (CIRC) correspondent à un niveau élevé de ces leviers, pour refléter une plus grande circularité.
Dans un scénario CIRC, on considère que proche de 100% des batteries sont recyclées à l'horizon 2050, avec un rendement de recyclage proche de 100% pour tous les matériaux, excepté le lithium et le graphite pour lesquels on atteint seulement un rendement de recyclage de l'ordre de 20%.
Dans un scénario LIN, on considère que 10% des batteries sont recyclées à l'horizon 2050, et que le rendement de recyclage des matériaux est proche de 100% sauf pour le lithium et le graphite pour lesquels on n'atteint qu'un rendement de recyclage de l'ordre de 10%.
- Les leviers d'efficacité matérielle, qui permettent de déterminer, pour chaque matériau étudié, l'intensité matérielle par unité de stockage d'énergie (kg/kWh). Ils représentent d'une part les évolutions d'optimisation des batteries actuelles et d'autre part les nouvelles technologies de batterie ayant un mix de matériaux différent (voir ci-dessous). Les scénarios LIN sont peu ambitieux en termes d'efficacité matérielle, les scénarios CIRC correspondent à la pénétration progressive de nouvelles technologies plus sobres en ressources. On peut ainsi noter, dans un scénario CIRC, la disparition complète du cobalt et du nickel des composants des batteries à l'horizon 2050, et une forte réduction (-60%) des besoins en lithium.

La combinaison des hypothèses de circularité (LIN et CIRC) et des scénarios REF, CORE 95 et TECH, résulte en six scénarios différents (un CIRC et un LIN pour chacun des 3 scénarios de bases).

Les hypothèses d'améliorations technologiques (citées ci-dessus et détaillée en annexe 2) ont été établies au travers d'interactions avec des experts en batteries de la VUB (MOBI).

Trois évolutions clés sont à retenir dans ce cadre. Premièrement, plusieurs améliorations technologiques (à la fois au niveau des systèmes de gestion de la batterie mais également des matériaux employés) vont diminuer les besoins en ressources critiques à court et moyen terme en optimisant les technologies Lithium-Ion déjà utilisées aujourd'hui. Deuxièmement, des nouvelles technologies Lithium-Ion sont actuellement au stade de recherche et développement. On devrait voir apparaître de nouvelles cathodes remplaçant le cobalt (par exemple via la technologie HVS (« high voltage spinel »)) puis ensuite les batteries solides (en anglais « solid state battery » pour « batterie à l'électrolyte solide ») qui vont également diminuer les besoins en matériaux par kWh. Troisièmement, et à plus long-terme (post-2030), de nouvelles technologies sans Lithium-Ion pourraient se développer. Les experts tablent ainsi sur des technologies de cathodes utilisant l'oxygène plutôt que des ressources primaires (comme le cobalt actuellement ou les matériaux présents dans le HVS d'ici quelques années).

- **Le décalage entre la demande en batteries et les ressources disponibles**

Deux approches peuvent servir à comparer la demande en batteries et les ressources disponibles.

La première approche compare l'allocation des ressources à la Belgique en fonction de la répartition des nouvelles voitures : pour évaluer la faisabilité à court terme des besoins belges par rapport aux ressources et réserves disponibles, la part belge a été calculée sur la base du % des nouvelles voitures vendues en Belgique par rapport aux nouvelles voitures vendues dans le monde. Cette approche est satisfaisante pour étudier la faisabilité à court terme.

La deuxième approche alloue les ressources à la Belgique en fonction de la population. Pour comparer les besoins belges aux ressources et réserves disponibles, la part "équitable" de la Belgique a été calculée sur la base de la taille relative de la population belge par rapport à la population mondiale. Cette approche est plus adaptée pour étudier la faisabilité à long terme car elle illustre une répartition plus juste.

Les estimations de réserves et ressources proviennent de l'U.S. Geological Survey [113] et leur définition explicitée dans l'annexe 2. Les estimations de voitures produites proviennent de l'OICA [114].

4.3 Principaux résultats

4.3.1 Les évolutions du transport routier

Les scénarios de décarbonation modélisés impliquent tous une réduction des volumes annuels de voitures vendues, et une augmentation des voitures et véhicules électriques (Figure 5).

La demande annuelle en batteries pour l'électromobilité dépend de la demande en nouveaux moyens de transport électriques. Les nouveaux véhicules dépendent de l'évolution de nombreux facteurs au sein du secteur (la demande initiale en transport, le taux d'utilisation de ces véhicules, le taux de partage, le pourcentage de cette demande par mode de transport, les évolutions technologiques, etc.).

Les scénarios de décarbonation TECH, BEH et CORE 95 testent les implications des différents scénarios, en mettant l'accent sur certains facteurs plutôt que sur d'autres : celles-ci sont détaillées dans la section précédente et plus d'information est disponible sur le site du SPF Santé¹⁶. Cette section détaille la demande totale en transport, la répartition de cette demande par mode et le besoin annuel en voitures électriques nécessaires pour répondre à cette demande.

¹⁶ <https://climat.be/2050-fr/analyse-de-scenarios>.

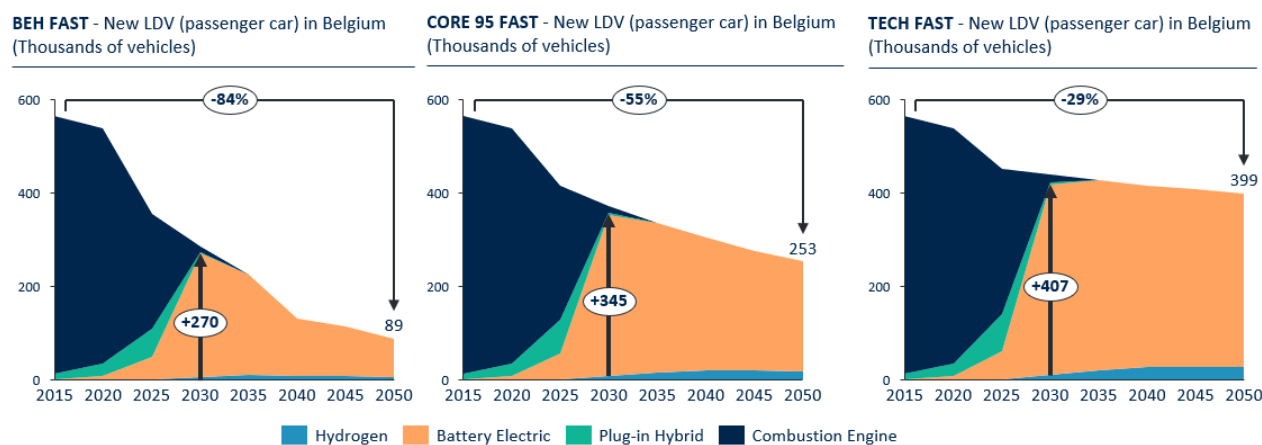
Principales observations liées à la demande de transport

- En plus des évolutions de la demande telles que décrites à la section précédente, c'est principalement l'évolution des parts modales qui impacte la demande en voitures et en batteries. Dans tous les scénarios, la proportion de la voiture diminue par rapport aux autres modes de transport. En absolu, elle diminue dans BEH et CORE 95 et se stabilise dans TECH.
- D'autres hypothèses sont évidemment importantes, comme le taux d'utilisation ou de partage des véhicules qui a tendance à augmenter et par conséquent à diminuer le besoin en quantité de voitures (voir l'annexe 2 pour plus de détails).

Principales observations liées à l'impact sur la demande annuelle en véhicules

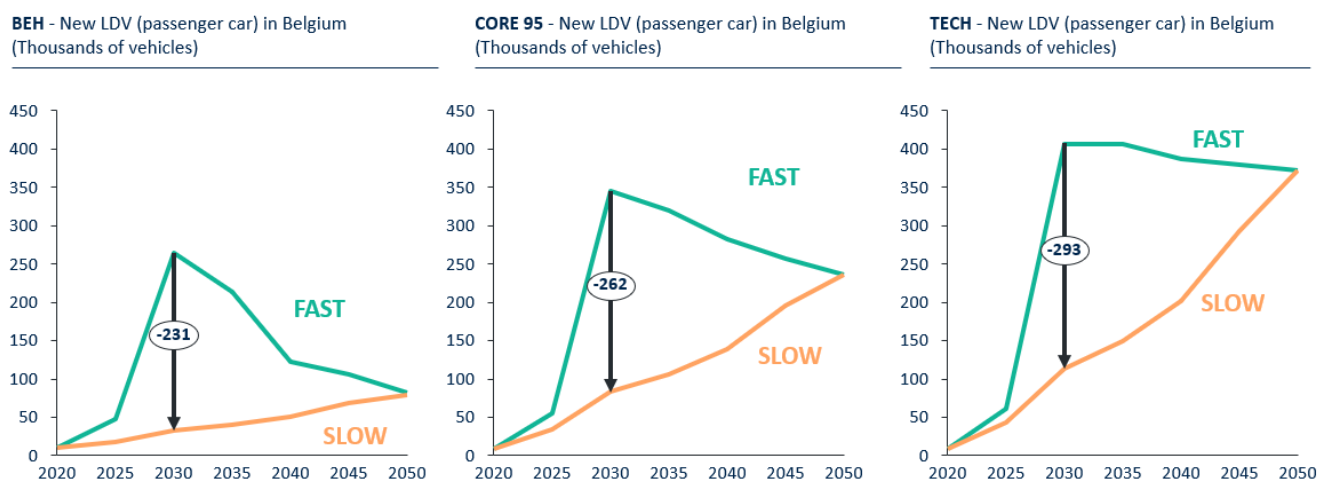
- La combinaison des hypothèses décrites ci-dessus résulte en une diminution de la demande annuelle en voitures dans les différents scénarios, cette diminution étant moins marquée pour le scénario TECH (-29% entre 2015 et 2050) que pour les scénarios BEH (-84%) ou CORE 95 (-55%).
Les ambitions pour une transition rapide vers les véhicules électriques se matérialisent dans la Figure 5, TECH, CORE 95 et BEH recourent à des technologies bas-carbone, avec principalement les voitures électriques à batterie (BEV/EV), la transition vers des voitures hybrides (PHEV) et vers des véhicules à hydrogène (FCEV). On observe l'évolution de ~8 000 voitures électriques en 2020 à ~270 000 pour le scénario BEH (x34), ~407 000 pour le scénario TECH (x50) et ~345 000 pour le scénario CORE 95 (x43) en 2030. Ces volumes auront un impact direct sur les besoins en batteries.

Figure 5: ventes des voitures LDVs en Belgique selon 3 scénarios centraux de l'analyse et une décarbonation rapide (« FAST »)



- b) Dans le cas d'une décarbonation plus lente (Figure 6), les volumes des nouvelles voitures électriques nécessaires sont moins élevés que dans le cas précédent en 2030 : ~20 000 pour le scénario BEH (x2,5 par rapport à 2020), 80 000 pour CORE 95 (x10 par rapport à 2020) et 110 000 pour TECH (x14 par rapport à 2020). Ceci aura, bien évidemment, des répercussions en termes de besoins en batteries, nous le verrons à la section suivante. Notons que cette différence est compensée par des ventes pour les véhicules thermiques prolongées au-delà de 2035, ce qui implique (i) de facto une quantité d'émissions plus élevée que les scénarios de décarbonation rapide, (ii) de s'écarter des propositions de la Commission Européenne visant -100% d'émissions des nouvelles ventes de voitures et camionnettes à moteur thermique pour 2035.
- c) Les évolutions pour les bus, les camions et autres moyens de transport sont similaires mais décalées dans le temps pour les véhicules plus lourds.

Figure 6: ventes des voitures électriques LDVs en Belgique selon 3 scénarios centraux de l'analyse comparaison entre une décarbonation lente ("SLOW") et une rapide (« FAST »)



4.3.2 Les évolutions de la demande en batteries

Décarboner rapidement les émissions des voitures et camionnettes (fin de la vente des nouveaux véhicules thermiques entre 2030 et 2035) implique des changements de comportements significatifs (réduction de la demande, transfert modal, taux d'utilisation des véhicules) afin de réduire la demande de nouvelles voitures électriques. Sans cela, l'augmentation des volumes de batteries (x36 entre 2020 et 2030 pour le scénario TECH) est possible (vu les annonces de capacité de production en Europe d'ici à 2030) mais impliquerait que les volumes produits en Europe soient répartis en faveur de la Belgique par rapport aux autres pays du continent. Le défi industriel, si ces scénarios sont imités partout en Europe, reste significatif pour CORE 95 (x32) et BEH (x18).

Principales observations liées à la demande en batteries

- a) Une croissance importante de la demande annuelle en batteries est attendue d'ici à 2030-2035 dans les trois scénarios ; elle est proportionnelle à la croissance des besoins en voitures électriques permettant de décarboner le secteur du transport d'ici 2050 (voir Figure 7).
- b) Les demandes en véhicules électriques et en batteries sont liées. Dans les cas de décarbonation rapide, on constate une multiplication entre 2020 et 2030 de la demande de batteries allant d'un facteur 18 pour le scénario BEH à un facteur 36 pour le scénario TECH (et un facteur 32 pour le scénario CORE 95). C'est un défi non négligeable d'un point de vue industriel mais correspondant aux estimations des différents scénarios d'organisations internationales (allant de 8 à 30) [9, 116, 117] et pas trop éloigné des niveaux de croissance liés aux récentes annonces de capacité de production en Europe (les « gigafactories »). En effet, ces évolutions sont à mettre en perspective avec les annonces de capacités de production futures en batteries pour véhicules électriques. Les estimations diffèrent d'un institut à l'autre, mais le total de production annuelle devrait se situer entre 500 et 730 GWh en Europe en 2030 (contre 25 GWh de production en 2020, soit une multiplication de 20 à 30 en 10 ans). [124, 125]
- c) Au-delà du défi industriel sans précédent, ces facteurs démultiplient les risques sur la chaîne de valeurs des batteries (listés dans la section 3.2). Ils valident l'importance des mesures de réduction de demande de transport en amont et de critères de devoir de diligence stricts (voir chapitre 6).
- d) Dans le cas d'une décarbonation plus lente, les croissances sont moins importantes (x10 entre 2020 et 2030 pour le scénario TECH, x8 pour CORE 95 et x6 pour BEH). S'ils semblent plus facilement atteignables d'un point de vue industriel, c'est aux dépens des émissions des gaz à effet de serre, puisque le différentiel devra être comblé par la vente de véhicules thermiques. Si ceux-ci pourraient permettre la neutralité carbone d'ici à 2050, il ne semble pas judicieux de les utiliser pour plusieurs raisons :

- Ils ne permettent pas une décarbonation par un renouvellement naturel de la flotte : il faudra (entre 2035 et 2050) interdire de circulation des véhicules thermiques encore en bon état de marche,
- Ils impliquent des objectifs de ventes bien en deçà des propositions actuelles de la Commission Européenne (-100% des émissions des nouvelles ventes en 2035) [103] et des recommandations d'ONGs spécialisées sur la question [105, 106],
- Ils ne préservent pas aussi bien le budget carbone, puisque les ventes thermiques continuent à alimenter la flotte de véhicules après 2035.¹⁷

¹⁷ Un contre-argument serait l'utilisation de fuels synthétiques créés à base d'électricité renouvelable. Plusieurs études estiment qu'il est mal avisé d'utiliser ces futures innovations pour le transport routier léger (voitures et camionnettes) vu leur faible efficacité énergétique. [85]

Figure 7: demande annuelle en batteries en Belgique - comparaison des scénarios dans le cas d'une décarbonation rapide

Battery yearly demand in Belgium – comparison between TECH, CORE 95 & BEH (GWh)

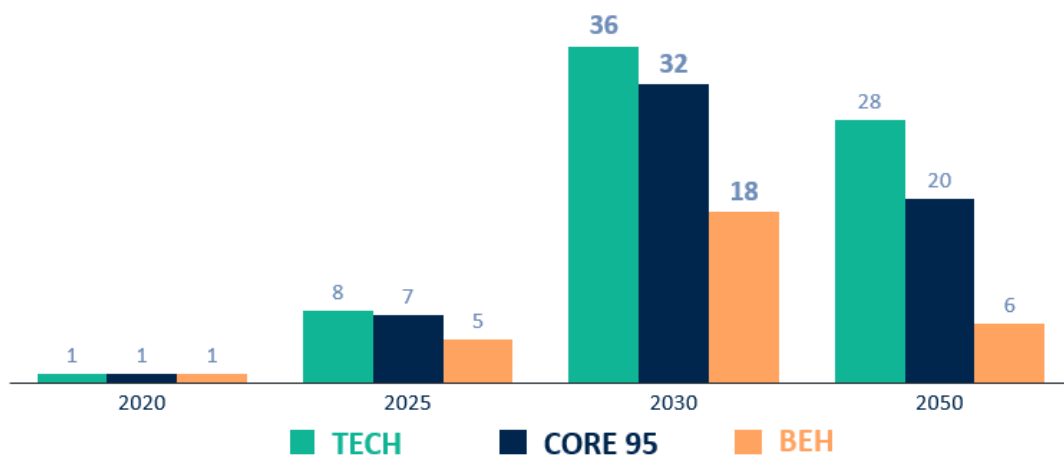
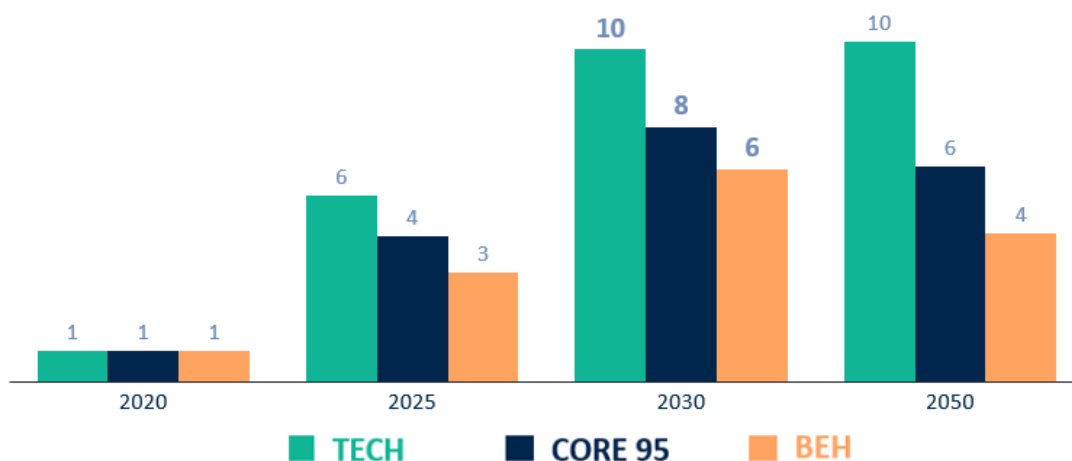


Figure 8: demande annuelle en batteries en Belgique - comparaison des scénarios dans le cas d'une décarbonation lente

Battery yearly demand in Belgium – comparison between TECH, CORE 95 & BEH (slow decarbonation) (GWh)



4.3.3 La pression sur les ressources

Dans tous les scénarios étudiés, il est indispensable et urgent de développer des infrastructures, des normes, des incitants et des technologies (i) diminuant les besoins primaires en cobalt et lithium (ii) permettant de collecter et de recycler les volumes extraits, pour maintenir les quantités de matériaux primaires dans des ordres de grandeur compatibles avec les estimations de réserves et ressources minières. Ces conclusions valent pour les tous les matériaux étudiés, mais sont plus urgentes pour le cobalt, compte tenu des quantités disponibles estimées.

Les scénarios mettant l'accent sur les modifications comportementales ont un impact non négligeable sur les besoins en matériaux primaires (ces modifications diminuent la « hauteur de la cloche » sur la Figure 3). Il est d'autant plus important de réduire la demande à court terme que les technologies limitant la demande en cobalt ne sont pas encore matures au moment d'écrire ce rapport. Cela dit, réduire la demande ne diminue pas l'importance du recours aux normes et innovations technologiques et aux normes ou incitants qui maximisent leur potentiel (par exemple, un objectif de taux de recyclage – voir chapitre sur les recommandations politiques).

Continuer l'exploration géologique paraît incontournable pour subvenir à la demande et assurer une décarbonation rapide de la flotte –des mesures d'accompagnement fortes sont nécessaires pour réduire au minimum leurs externalités sociales et environnementales telles que listées au chapitre 3.

Pour rappel, la réduction de la demande en matériaux, pour une même demande en batteries, peut se réaliser à travers :

- L'augmentation de l'efficacité matérielle des technologies existantes (par exemple, en ayant moins de kg de cobalt par kWh de batterie, pour une même technologie),
- Le shift technologique et le passage vers des technologies de batterie n'utilisant plus certains matériaux critiques (ce qui correspond à une amélioration de l'efficacité matérielle de 100%),
- L'augmentation du recyclage et de la recyclabilité des matériaux.

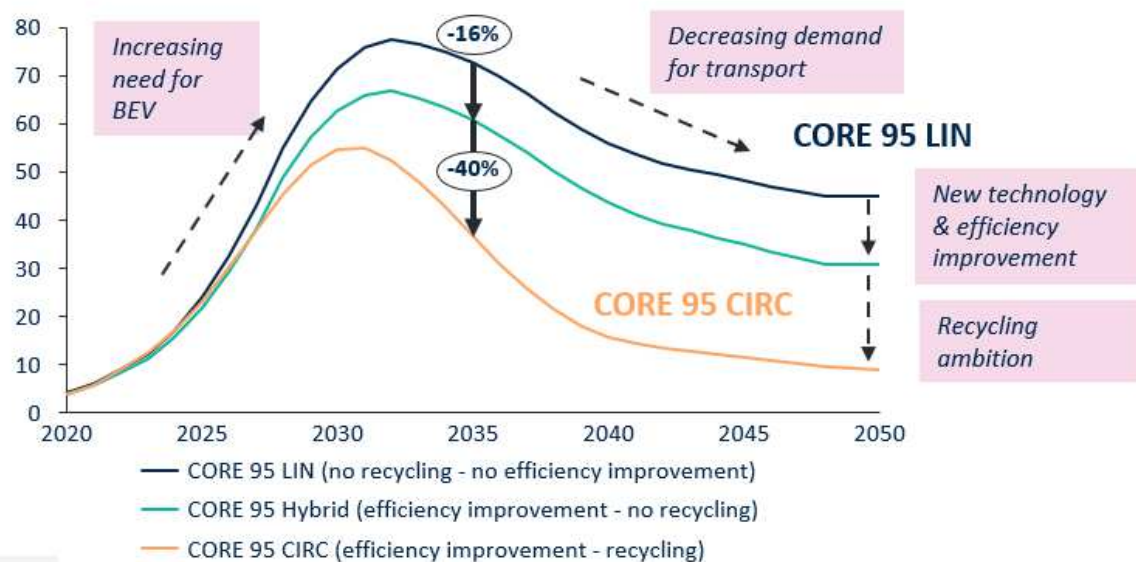
Principales observations liées à la pression sur les ressources

- a) En comparant d'une part les besoins en matériaux et d'autre part les réserves et les ressources actuelles, il apparaît que, même dans les scénarios de réduction de demande, les améliorations technologiques sont indispensables à un développement pérenne de l'électromobilité. Cette observation est valable pour les technologies de batteries et pour les techniques de recyclage.

Basée sur les hypothèses présentées en section 4.2.3, la Figure 9 illustre l'impact des nouvelles technologies (New technology & efficiency improvement) et du recyclage (« Recycling ambition »). Dans le scénario CORE 95, en 2035, elles permettent de réduire de plus de 55% la demande en ressources primaires pour les batteries. L'efficacité du recyclage est particulièrement importante puisqu'elle représente plus des trois-quarts de cette réduction. Les leviers de modifications de comportements apparaissent également dans la Figure 9 : la réduction de la demande en véhicules réduit la demande en matériaux primaires. Ils permettent également de « réduire la hauteur de la cloche ».

Figure 9: demande annuelle en matériaux primaires selon plusieurs analyses de sensibilité autour de CORE 95 - sommes des volumes des matériaux analysés (milliers de tonnes)

Annual primary demand of key materials: reduction thanks to demand, efficiency & recycling improvements
(thousands tons of materials) – Based on CORE 95 scenario



- b) Malgré ces améliorations, le modèle confirme une pression forte spécialement sur le cobalt et dans une moindre mesure le lithium (voir sections suivantes). Cela renforce la nécessité de jouer sur les leviers comportementaux et technologiques précédemment cités pour :
- Assurer la sécurité d’approvisionnement de ces matériaux critiques (tant en quantité qu’en prix) sans compromettre la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre rapidement,
 - Permettre un développement aussi ambitieux dans les autres régions du monde.

4.3.4 Le cobalt

Note méthodologique : l’annexe 2 définit réserves et ressources, ainsi que les limites des estimations actuelles. La section 4.2.3 explique la méthodologie permettant de comparer demande belge et réserves/ressources mondiales.¹⁸ Les Figures ci-dessous ne montrent que les éléments clés qui permettent de soutenir les conclusions et principales observations décrites ci-dessous. Pour une revue exhaustive des différents indicateurs étudiés, se référer à l’Annexe 3.

Principales observations :

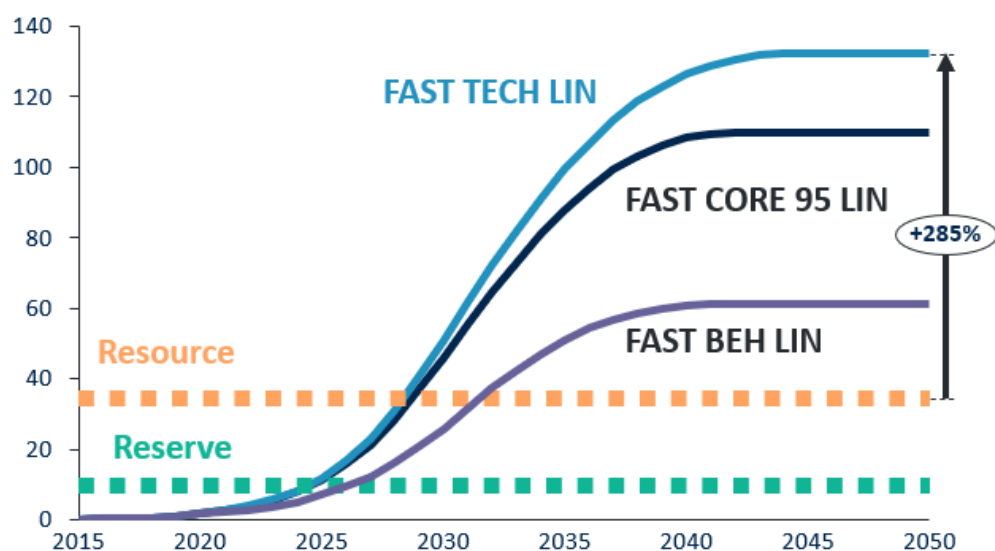
Pour décarboner le transport rapidement (fin des ventes de véhicules thermiques entre 2030 et 2035) :

- a) Les améliorations techniques de recyclage et les nouvelles technologies de batteries « cobalt-free » sont indispensables. En effet, les scénarios « LIN » (et principalement les TECH et CORE 95) sans améliorations technologiques (des batteries et des techniques de recyclage) s’écartent significativement non seulement des niveaux de ressources considérés comme disponibles pour la Belgique à long-terme, mais également des niveaux de réserves disponibles à court-terme (Figure 10). Seul le scénario comportemental se rapproche des réserves à court-terme.

¹⁸ Allouer à la Belgique les réserves et ressources globales estimées selon la distribution des ventes de nouvelles voitures dans le monde et en Belgique rend compte de la disponibilité court-terme d’une matière première pour la Belgique. Nous utiliserons cet indicateur et ce ratio pour évaluer la pression court-terme. En parallèle, utiliser la distribution de la population comme facteur d’allocation rend plutôt compte de la disponibilité long-terme d’une matière première pour la Belgique. Dans ce cas-ci, les ressources associées à la distribution de la population sont utilisées pour évaluer la pression long-terme et compléter l’indicateur précédent.

Figure 10: besoins primaires en cobalt par rapport aux estimations de réserves et ressources (disponibilité relative à la population en Belgique et dans le monde (explication dans la section méthodologique))¹⁹

Cobalt: cumulated primary needs vs Reserves & Resources (relative to **population distribution**)
(in thousands tons)



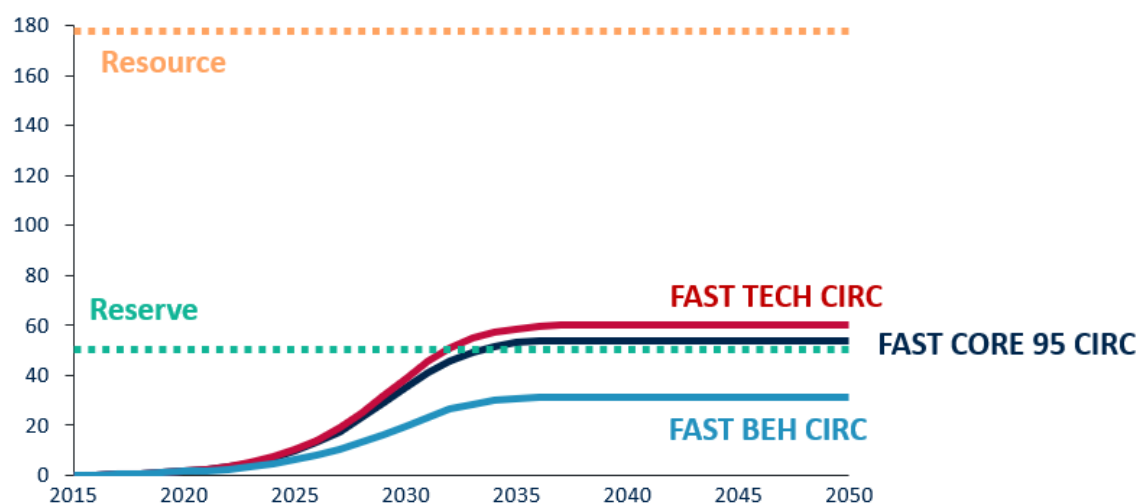
- b) Dans un scénario « CIRC » (avec améliorations technologiques), TECH et CORE 95 indiquent une pression rapide et significative, assez proche cependant des niveaux de réserves disponibles à court-terme (voir Figure 11). Le fait que ces réserves soient néanmoins entièrement exploitées entre 2030 et 2035 laisse peu de marge pour les déploiements et l'exploration minière si les améliorations technologiques tardent à se déployer.
- c) Le scénario BEH CIRC (combinant changements de comportements et innovations des technologies de batteries et de recyclage), diminue fortement les risques de problèmes d'approvisionnement en limitant le besoin d'électrification. Il diminue les volumes de matériaux critiques à extraire et laisse le temps aux nouvelles technologies sans cobalt, par exemple, d'apparaître. Et cela, en réduisant les émissions de gaz à effet de serre en parallèle, ce qui n'est pas le cas des scénarios plus lents de décarbonation. C'est le seul scénario qui reste sous les courbes de réserves et ressources.

¹⁹ Le graphique complet (LIN et CIRC disponibles pour chacune des comparaisons) est disponible à l'annexe 3.

- d) Au cas où ces nouvelles technologies de batteries ne voient pas le jour à temps, il est indispensable de continuer l'exploration minière pour augmenter la taille des réserves, ainsi que d'investir dans les technologies de recyclages performantes.

Figure 11: besoins primaires en cobalt par rapport aux estimations de réserves et ressources (disponibilité relative à la répartition des voitures neuves en Belgique et dans le monde (explication dans la section méthodologique))²⁰

Cobalt: cumulated primary needs vs Reserves & Resources (relative to cars distribution)
(in thousands tons)



4.3.5 Le lithium

Principales observations :

Si on décarbone le transport rapidement (fin des ventes de véhicules thermiques entre 2030 et 2035), les conclusions sont semblables à celles du cobalt. Toutefois, les estimations de ressources et réserves évoluent positivement et tendent à diminuer l'urgence en comparaison avec ce dernier.²¹

- a) Les améliorations techniques recyclant le lithium et les technologies alternatives plus efficaces sont indispensables. En effet, les scénarios TECH et CORE 95 « LIN » sans améliorations technologiques (des batteries et des techniques de recyclage) s'écartent significativement et rapidement (dès 2035) des

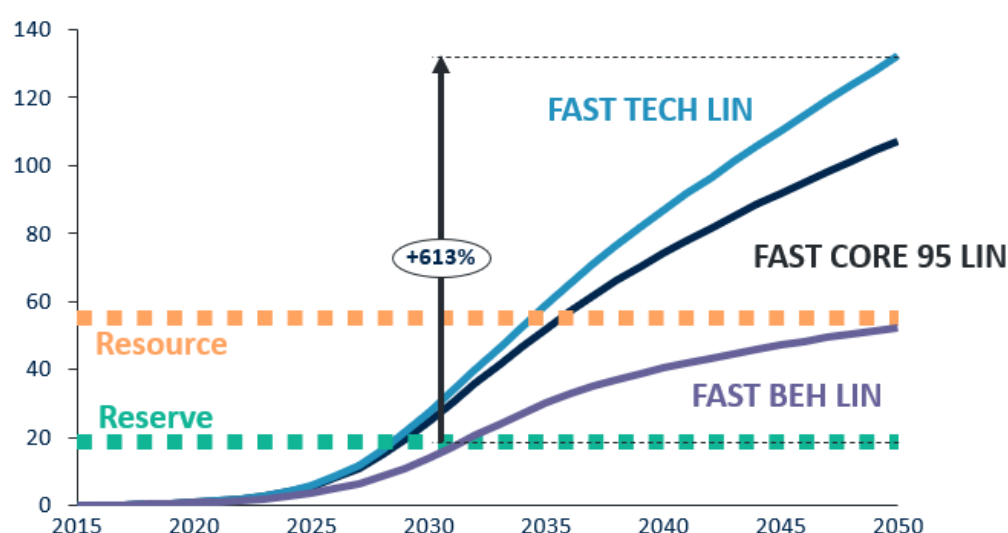
²⁰ Le graphique complet (LIN et CIRC disponibles pour chacune des comparaisons) est disponible à l'annexe 3.

²¹ On remarque que les estimations de ressources de lithium sont passées de 53 millions de tonnes en 2018 à 86 millions en 2021 (et la production de lithium a quasi doublé entre 2017 et 2020). Pour le cobalt, ces mêmes estimations restent stables entre 2018 et 2021. [122, 123]

niveaux de ressources considérés comme disponibles pour la Belgique à long-terme. C'est moins le cas pour BEH LIN, même si les niveaux de réserves disponibles pour la Belgique sont dépassés rapidement. Ce qui impliquerait : (i) que le reste du monde ne peut pas suivre ce rythme (ii) et qu'il est nécessaire d'extraire, d'ici à 2050, la majorité des ressources en lithium estimées. Ces deux arguments viennent s'ajouter à ceux liés au cobalt pour valider l'importance de continuer à développer de nouvelles technologies de batteries et de recyclage.

Figure 12: besoins primaires en Lithium par rapport aux estimations de réserves et ressources (disponibilité relative à la population en Belgique et dans le monde (explication dans la section méthodologique))²²

Lithium: cumulated primary needs vs Reserves & Resources (relative to **population distribution**)
(in thousands tons)

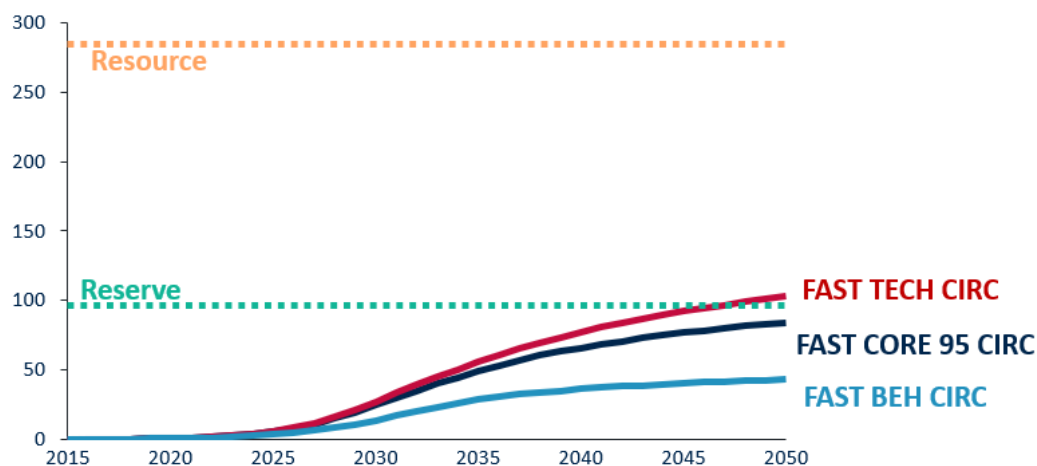


²² Le graphique complet (LIN et CIRC disponibles pour chacune des comparaisons) est disponible à l'annexe 3.

- b) Ce dernier point est validé par l'analyse des scénarios CIRC qui tendent à ne pas dépasser les niveaux de réserves disponibles à court-terme pour la Belgique (Figure 13) - ce qui contraste avec les courbes du cobalt qui voient TECH et CORE 95 atteindre ces mêmes niveaux dès 2030-2035. Ceci implique toutefois que les niveaux de ressources à long-terme soient dépassés par TECH et CORE 95 (voir Figure 14) – ce qui tend à favoriser le scénario BEH CIRC, combinant la modification significative des comportements et des innovations technologiques massives, et à soutenir l'exploration minière encadrée par un cadre juridique limitant strictement les externalités.

Figure 13: besoins primaires en Lithium par rapport aux estimations de réserves et ressources (disponibilité relative à la répartition des voitures neuves en Belgique et dans le monde (explication dans la section méthodologique)) ²³

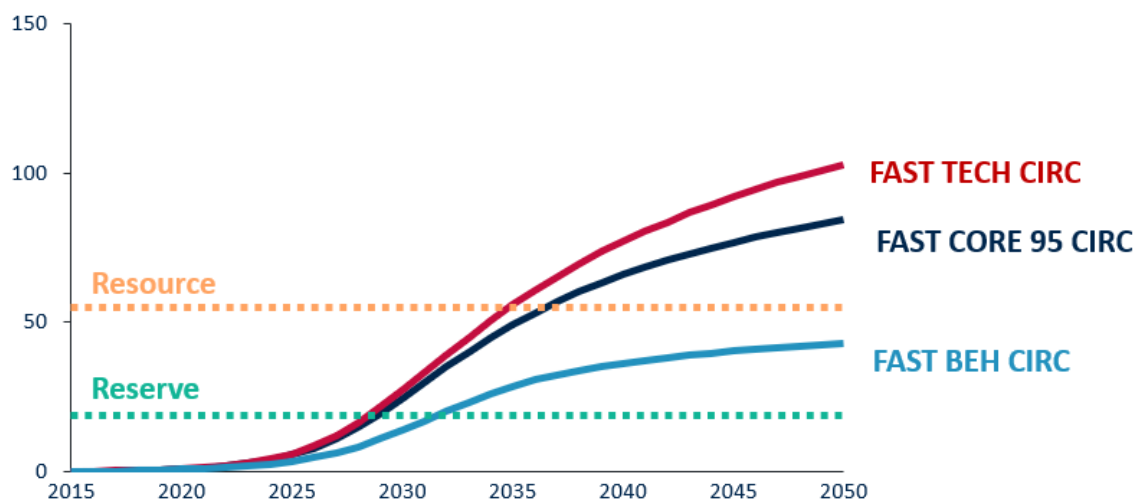
Lithium: cumulated primary needs vs Reserves & Resources (relative to cars distribution)
(in thousands tons)



²³ Le graphique complet (LIN et CIRC disponibles pour chacune des comparaisons) est disponible à l'annexe 3.

Figure 14: besoins primaires en Lithium par rapport aux estimations de réserves et ressources (disponibilité relative à la population en Belgique et dans le monde (explication dans la section méthodologique)) ²⁴

Lithium: cumulated primary needs vs Reserves & Resources (relative to **population**)
(in thousands tons)

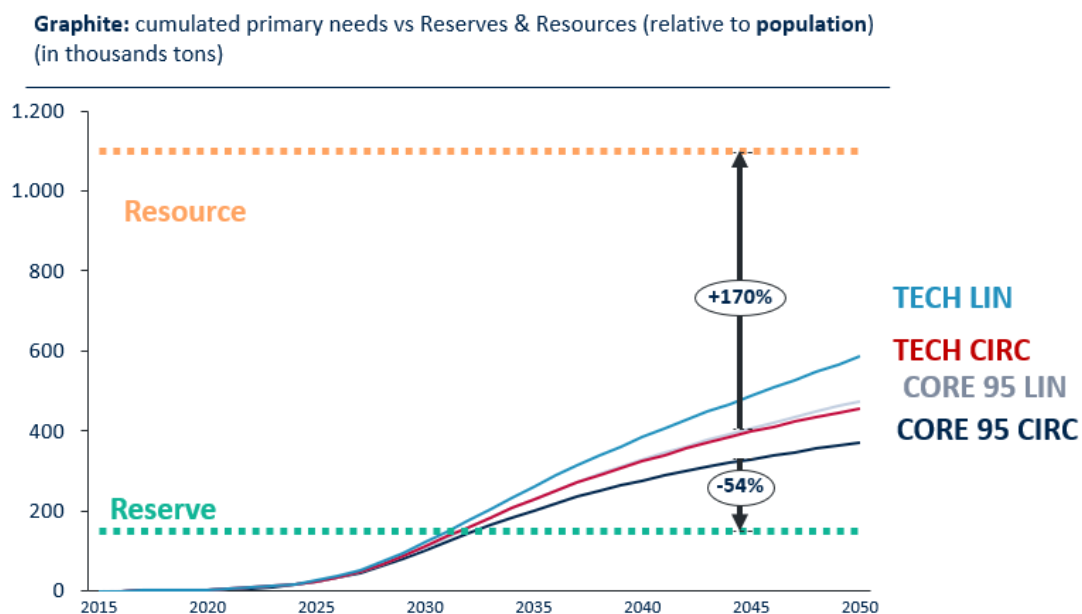


²⁴ Le graphique complet (LIN et CIRC disponibles pour chacune des comparaisons) est disponible à l'annexe 3.

4.3.6 Autres matériaux analysés

- a) Pour le graphite, dans les scénarios TECH et CORE 95, l'électromobilité en tant que telle ne pose pas un problème majeur à long-terme si les ressources estimées deviennent économiquement rentables. Les nouvelles technologies de batteries et de recyclage ont un impact mais la question de la disponibilité des matériaux n'est pas problématique, au contraire des questions environnementales et sociales déjà soulevées. Pour que l'entièreté de la flotte puisse être électrifiée, il faudra impérativement rendre les ressources exploitables (ou identifier de nouvelles réserves, voir Figure 15). L'électromobilité n'est pas le seul secteur nécessitant ces ressources : il est nécessaire de mettre ces conclusions en perspective en ajoutant les autres secteurs. La situation est moins critique que le cobalt ou le lithium pour lesquels seule la demande en batterie est déjà problématique au regard des estimations de réserves disponibles à court-terme.
- b) Pour le nickel, les conclusions sont similaires. Néanmoins, les nouvelles technologies de batteries et de recyclage permettent d'éviter de recourir à l'exploration minière sur le long-terme.
- c) En ce qui concerne l'aluminium et le manganèse, tant les efforts de réductions de la demande que les améliorations technologiques de batteries ne changent rien au fait qu'a priori les ressources actuelles sont suffisantes pour subvenir aux besoins belges et mondiaux. L'électromobilité n'est pas le seul secteur nécessitant ces ressources : il est nécessaire de mettre ces conclusions en perspective en ajoutant les autres secteurs.
- d) Une des limites majeures de l'étude est bien sûr de n'évaluer que l'impact de l'électromobilité sur ces matériaux. Or, leur demande est évidemment dépendante d'autres évolutions. Ces évolutions devraient également être considérées pour mesurer plus précisément le décalage potentiel entre besoins et disponibilités des ressources.

Figure 15: besoins primaires en Graphite par rapport aux estimations de réserves et ressources (disponibilité relative à la population en Belgique et dans le monde (explication dans la section méthodologique))²⁵



²⁵ Les évolutions et comparaisons des autres matériaux peuvent se retrouver à l'annexe 3.

5 Analyse des impacts clés

5.1 Introduction

Ce chapitre détaille les principaux risques et les opportunités liés au développement massif de l'électromobilité. Le chapitre précédent a décrit plusieurs scénarios construits autour de la nécessité de décarboner l'ensemble du secteur du transport en Belgique d'ici à 2050. L'analyse montre qu'il est indispensable de combiner à la fois les leviers comportementaux et les leviers technologiques. Au niveau technologique, la décarbonation implique le passage des moteurs thermiques aux moteurs électriques²⁶ – ce qui est reflété dans les différentes politiques européennes). Cette transition relève d'une transformation sans précédent. Le fait de choisir la filière des batteries pour le transport s'accompagne d'une série d'opportunités et de risques aux conséquences environnementales, sociales et économiques significatives – identifiés dans le chapitre 3. Le tableau ci-dessous, basé sur la synthèse du chapitre 3, classe les coûts et bénéfices potentiels principaux des scénarios discutés précédemment.

Bénéfices attendus	<ul style="list-style-type: none"> • Forte réduction des émissions de GES (ODD 13) • Amélioration de la qualité de l'air (ODD 3 et 11) • Circularité des matériaux (ODD 11 et 12) et plus grande indépendance économique à terme (ODD 8 et 9) • Contribue au développement de ville durable (ODD 3 et 11) notamment via l'amélioration de la qualité de l'air et le transfert modal actif et partagé (ODD 3 et 11)
Risques/coûts potentiels	<ul style="list-style-type: none"> • Impact sur la biodiversité (ODD 12, 14, 15) • Pénurie des ressources minérales (ODD 12) • Frein à la puissance économique du secteur (ODD 8) • Potentielle réduction d'emploi (ODD 8) • Atteinte aux droits humains fondamentaux (ODD 3, 8, 9, 16)

²⁶ Pour rappel, cette étude se concentre sur l'impact du développement des batteries permettant cette électrification – d'autres technologies sont également envisageables (l'électrification indirecte via l'hydrogène par exemple) : bien qu'utilisées dans la construction des scénarios précédemment cités (dans une moindre mesure et pas pour les voitures et camionnettes), leurs impacts ne sont pas abordés ici.

Dans cette section, seules quatre de ces conséquences potentielles sont analysées :

- **La réduction des émissions de GES et l'analyse cycle de vie** : le chapitre précédent traite des émissions et consommations d'énergie directes (TTW). Qu'en est-il des émissions sur l'ensemble du cycle de vie en comparaison avec les véhicules traditionnels ? Quel est le besoin en énergie nécessaire pour recycler les batteries ? Que dire des changements concernant la production d'électricité en amont ?
- **La qualité de l'air** : que permet le passage à l'électrique en termes d'amélioration de la qualité de l'air en Belgique ?
- **L'atteinte aux droits fondamentaux** : les principaux défis sociaux et sanitaires répertoriés dans les régions minières sont étudiés : santé, violences, conditions de travail, accaparement des terres.
- **Les emplois** : quelle est la balance des risques et opportunités en termes d'emplois nets ? Combien de nouveaux postes et quelles compétences sont recherchés ? Comment faciliter la transition des compétences thermiques vers les compétences électriques ?

5.2 La réduction des émissions de GES

5.2.1 Emissions de gaz à effet de serre

De nombreuses analyses sur l'ensemble du cycle de vie valident que les véhicules électriques émettent moins de gaz à effet de serre que les véhicules thermiques (voir Figure 16).

Plusieurs revues de littérature [44][45] ont répertorié et synthétisé les résultats des études d'analyse de cycle de vie (par exemple [1][72][73]). Elles concluent que, sur la base du mix électrique européen (EU28) l'impact de la voiture électrique est 55% moins élevé que celui de la voiture à moteur thermique à essence sans plomb²⁷. Les conclusions varient d'un pays à l'autre (ou d'un état à l'autre aux Etats-Unis [73]), mais, en Europe, seul un véhicule électrique roulant à l'électricité estonienne performe moins bien que les voitures traditionnelles²⁸. Même en Pologne, souvent citée en contre-exemple, les véhicules électriques performant mieux que les véhicules thermiques (15% de CO₂e/km en moins) [46].

Les travaux du professeur Auke Hoekstra [69] notamment concluent que les études d'analyses de cycles de vie des véhicules tendent à surestimer les émissions des véhicules électriques pour plusieurs raisons dont la surestimation des émissions liées à la production de la batterie, la sous-estimation de la durée de vie des batteries, la non prise en compte des évolutions positives du système électrique et la sous-estimation des émissions des véhicules traditionnels.

5.2.2 Consommation énergétique et recyclage

La quantité de batteries arrivées en fin de vie est actuellement relativement faible ; si des données concernant les consommations liées au recyclage existent, elles sont amenées à évoluer à mesure que les effets d'échelles et les améliorations technologiques se développent avec la croissance des volumes à recycler.

Les données de consommation énergétiques du recyclage des batteries répertoriées dans plusieurs études identifiées [66][67][68] confirment ce qui pouvait être conclu des analyses de cycle de vie : lorsqu'on applique ces consommations spécifiques aux résultats des scénarios de transition du chapitre précédent, on constate que les besoins énergétiques en recyclage ne devraient pas dépasser 3% des besoins totaux des scénarios CORE 95, TECH ou BEH – alors que ces besoins pour le transport sont déjà plus faibles dans les

²⁷ L'impact du moteur à diesel est 15% moins élevé que celui du moteur à essence.

²⁸ L'Estonie utilise du charbon pour 70% de la production de son électricité [46].

scénarios de transition (~70% de réduction au total en 2050 lorsqu'on compare REF et CORE 95), comme illustré à la Figure 17.

Figure 16: Comparaison du pouvoir de réchauffement global sur le cycle de vie des voitures [44] [45]

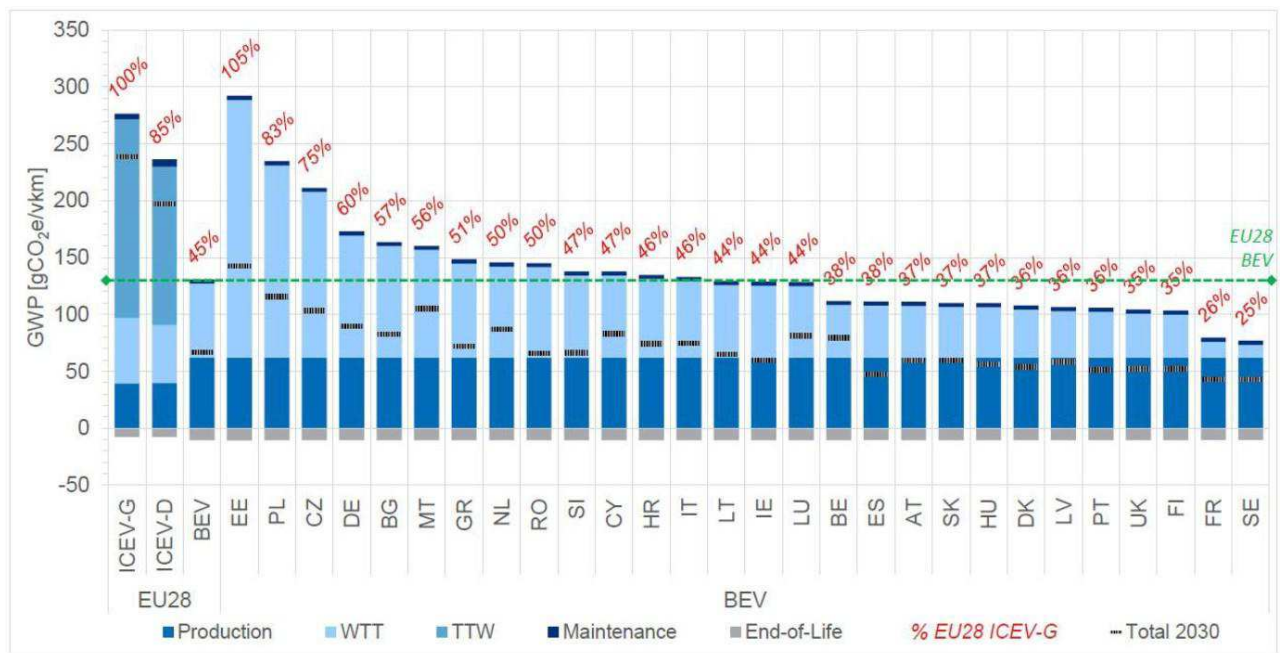
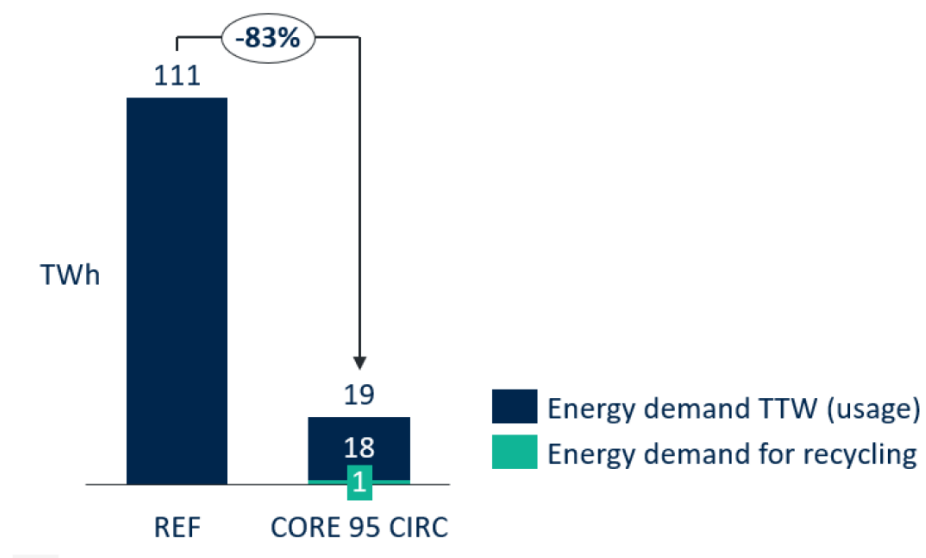


Figure 17: consommation d'énergie primaire en 2050 pour le transport – sélection de postes spécifiques



5.2.3 Consommation énergétique et système électrique

Décarboner la génération d'électricité parallèlement au développement de l'électromobilité est indispensable. Si les solutions pour décarboner la génération d'électricité existent déjà, la complexité de la transition réside dans les volumes nécessaires, qui auront tendance à augmenter puisque la décarbonation de nombreux secteurs (comme le Bâtiment ou l'Industrie, par exemple) repose (en partie du moins) sur leur électrification. L'ampleur du défi dans des scénarios de décarbonation ambitieux est détaillée dans différentes études [70, 71] qui :

- Encouragent l'amélioration de nos déplacements, par exemple : basculer vers des modes plus actifs, augmenter le partage des voitures, revoir la politique urbanistique pour diminuer la quantité et la longueur des trajets nécessaires, encourager la réduction de la distance domicile-travail,
- Encouragent l'accélération du déploiement de sources d'électricité décarbonées,
- Découragent l'utilisation de fuel synthétique (comme, si on considère une définition large du concept, le diesel de synthèse, l'ammoniac de synthèse ou l'hydrogène) pour le transport de passagers car bien moins efficient énergétiquement que les batteries, puisqu'ils nécessitent eux-mêmes de l'électricité propre pour être produits.

Décarboner la génération d'électricité améliore également la qualité de l'air des zones proches des centrales et réduit l'exposition aux polluants dans les mines de charbon (ce qui est moins pertinent en Belgique) [110, 111].

5.3 Les impacts sur la qualité de l'air

5.3.1 Méthodologie

La qualité de l'air liée à l'utilisation des véhicules est évaluée dans ce chapitre. On y dénombre les sources de pollutions suivantes : usure des freins (labelisé « brake » dans les figures ci-dessous), usure des pneus (« tyres »), usure du revêtement routier (« road ») et combustion (« energy »).

Le modèle « Pathways Explorer » [53] présenté précédemment permet de quantifier les émissions de polluants atmosphériques et de les lier aux impacts directs sur la santé humaine. L'analyse qui suivra est réalisée par CLIMACT, sur la base des hypothèses et sources utilisées au sein du projet EuCalc [54], principalement basées sur les analyses du bureau d'études IIASA. [55] Les polluants étudiés sont les suivants : NH₃, SO₂, PM_{2.5}, VOC²⁹. Le PM_{2.5} est le polluant le plus problématique pour la santé en Belgique et Europe (respectivement 7 400 et 379 000 décès en 2018) [118], et le transport en est une source d'émission significative (~20% de l'ensemble des émissions de PM_{2.5} en 2017) [119].

Les résultats des scénarios REF, CORE-95 et TECH³⁰ sont utilisés pour montrer l'évolution des émissions de ces polluants.

L'information est disponible pour l'ensemble des modes de transport suivants : bus, voitures, camions lourds, camions légers (<3.5t), deux-roues, avions, trains, trafic marin côtier et fluvial.

Il est utile de noter que les comportements de conduite sont considérés comme similaires entre la voiture thermique et électrique, de même que la gomme de pneu. De nouvelles technologies qui captent les émissions liées aux freins [115] voient le jour actuellement et ne sont pas prises en compte non plus.

5.3.2 Résultats

Les émissions et les concentrations de polluants atmosphériques diminuent dans les scénarios de décarbonation par électromobilité.

La raison est simple : ces émissions et concentrations sont principalement liées à la combustion de carburants fossiles et au nombre de kilomètres véhicules parcourus ; deux indicateurs significativement modifiés dans TECH et CORE 95.

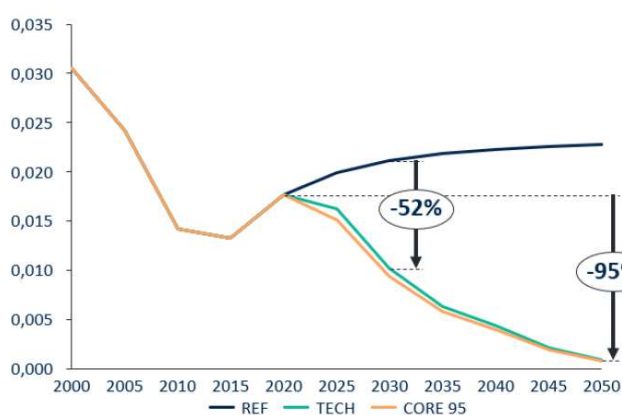
²⁹ Les NO_x ne sont pas pris en compte car le modèle considère une dilution des émissions sur tout le territoire belge (source : IIASA [55] - ceci se traduit par un facteur de dispersion = 0).

³⁰ Voir section 4.2 pour la définition de ces scénarios.

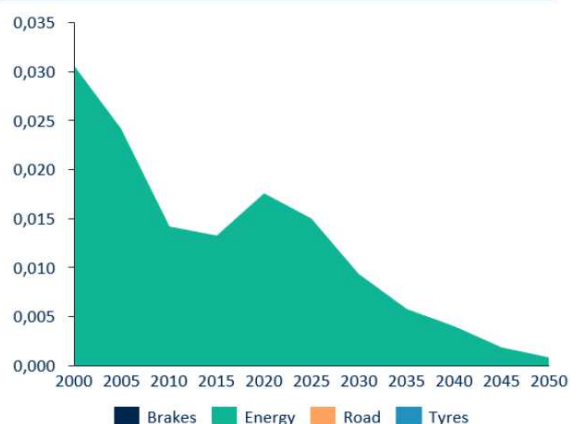
Au niveau des NH_3 et VOC, comme ceux-ci sont entièrement liés à la combustion, leur réduction est rendue possible à la fois par le shift technologique et par la réduction graduelle des véhicules kilomètres (également possible dans TECH vu la croissance des technologies de partage des véhicules). Ceci est illustré par la Figure 18 pour le NH_3 .

Figure 18: Emissions de NH_3 en Belgique selon REF, CORE 95 et TECH

Concentration en NH_3 en Belgique: impact du Transport par scénario [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



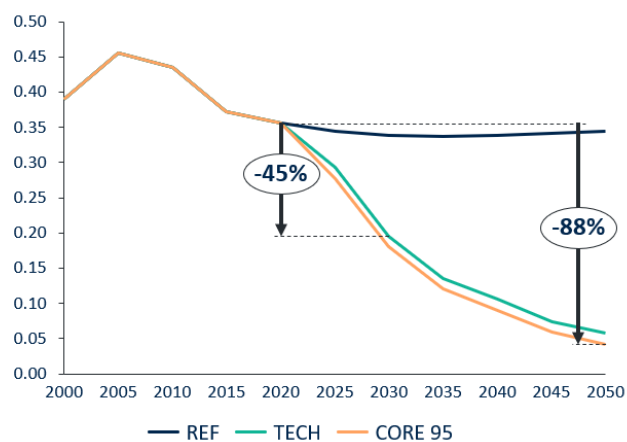
Sources des concentrations en NH_3 selon le scénario CORE-95 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



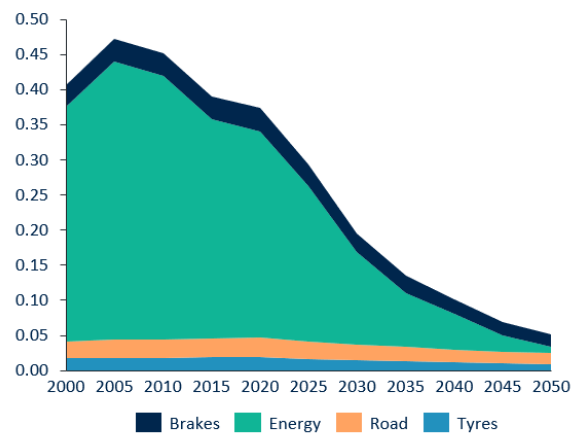
La conclusion est identique pour les PM_{2.5}, à l'exception des émissions liées aux freins, pneus et routes qui diminuent moins fortement. Des technologies de capture seront nécessaires pour éliminer celles-ci (elles sont actuellement en développement [115]).³¹

Figure 19: Emissions de PM_{2.5} en Belgique selon REF, CORE 95 et TECH

Concentration en PM_{2.5} en Belgique: impact du Transport par scénario [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



Sources des concentrations en PM_{2.5} selon le scénario CORE-95 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



Concernant les émissions de SO₂, les normes des années précédentes ont été bénéfiques puisque, depuis 2010 déjà, aucune émission n'est mesurée.

³¹ Certaines améliorations technologiques des combustibles fossiles n'ont pas été prises en compte (par exemple l'introduction des carburants Euro 7). La diminution qu'ils permettraient dans REF n'est pas quantifiée dans cette étude.

5.4 Atteintes aux droits fondamentaux

Des problèmes majeurs sont régulièrement signalés dans les régions minières d'où sont extraits les matériaux nécessaires à l'électromobilité. Imputer l'ensemble de ces externalités négatives aux nouvelles batteries automobiles n'est pas correct: ces faits récurrents concernent un certain nombre de pratiques minières (depuis des décennies), peu importe l'usage des matériaux en aval. Agir sur la chaîne de valeur des batteries est urgent mais pas suffisant : si cela peut constituer un point d'entrée pour plus de normes, il est également indispensable et urgent d'améliorer les pratiques minières en général.

Les externalités décrites dans cette section concernent l'extraction des matériaux nécessaires à la fabrication des batteries selon les technologies en vigueur. Il est utile de rappeler qu'actuellement, ces matériaux sont également utilisés pour d'autres applications que l'électromobilité. Vu l'ampleur des perspectives de croissance des batteries, celles-ci pourraient devenir le marché principal de ces matériaux, d'où l'importance d'identifier les impacts négatifs actuels pour définir des mesures correctives à temps.

Il est utile de se référer aux travaux d'organisations comme Amnesty International, Business Human Rights, Human Rights Watch pour plus de détails (la liste n'est pas exhaustive). Les paragraphes suivants se concentrent principalement sur les problèmes en République Démocratique du Congo (RDC), mais il peut être rapidement vérifié que des faits similaires se déroulent un peu partout dans le monde, même si la majorité est répertoriée d'abord en Amérique du Sud, en Afrique, en Asie puis en Amérique Centrale [100] [107] [108].

5.4.1 Santé

Plusieurs études montrent des concentrations importantes de métaux toxiques dans les urines des populations vivant près des mines de cobalt du Katanga [63]. On note ainsi "previous research has shown that people living close to DRC's mines had forty three times the level of cobalt, five times the level of lead, and four times the level of cadmium and uranium in their urine than is considered normal. Visitors to the area witness ore concentrates falling off open dump trucks, creating dangerous dust in the streets."

Si l'impact de certains métaux comme le plomb sur la santé humaine est un fait établi, il semblerait qu'une seule étude, issue d'une collaboration entre des universités belges et congolaises, ait tenté de montrer le lien entre la concentration de cobalt et des impacts potentiels sur la santé humaine, en l'occurrence les malformations congénitales. Publiée dans The Lancet, elle constate également que "women in southern Congo had metal concentrations that are among the highest ever reported for pregnant women." Si elle ne peut pas établir un lien statistique entre ces taux de concentration et les malformations congénitales, l'étude montre une association claire entre le fait que le père travaille à la mine et la probabilité de malformation congénitale. [61] [64]

Les causes des concentrations toxiques sont multiples, elles peuvent provenir tant de l'exposition directe dans les mines que des impacts sur la qualité de l'air liés au transport des métaux ou à leurs transformations. Au Katanga, un rapport explique: "Thousands of trucks travel to and from the mines and related operations all day and through the night, exposing resident in the cities of Lubumbashi and Likasi to heightened air pollution and leaving them rightfully afraid of contracting lung diseases. Chronic exposure to such dust can lead to potentially fatal hard-metal lung disease. It can also lead to a variety of other pulmonary problems, including asthma, decreased lung function, and pneumonia." [60]

Le Katanga n'est pas la seule région exposée et le cobalt n'est pas le seul minerai concerné. Des problèmes similaires sont signalés dans d'autres régions du monde [107]. Citons en exemple l'Indonésie où ont été observées des fumées toxiques s'échappant d'usines transformant des minerais extraits à proximité: "Dwi Sawung from the non-profit Indonesian Forum for the Environment (Walhi) said that most of the smelters built by China in Indonesia used old, highly polluting technology, and most Chinese-funded projects lacked environmental safeguards. [...] Yose said to prevent environmental problems in the future, the Indonesian government should strictly enforce its environmental protection regulations". [65]

5.4.2 Travail des enfants et conditions de travail en général

Une enquête datant de 2016 d'Amnesty International [56] montre que certaines mines de cobalt, en RDC, emploient des enfants dans des conditions qualifiées de « pires formes de travail des enfants ». Ce même rapport décrit les conditions de travail de certaines mines où des mineurs sont exposés à des risques d'accidents mortels importants (effondrements de tunnels, incendies, etc.). Bien que ce travail serait, selon plusieurs observateurs [57], uniquement lié à l'exploitation artisanale (qui correspondrait à 10-20% de la production de cobalt en RDC [57]), l'UNICEF estimait en 2014 le nombre d'enfants travaillant dans les mines à 40'000 dans le Katanga [58].

Parmi les causes ou facteurs aggravant ces situations, Amnesty International liste des lacunes dans les lois et normes ou, quand celle-ci existent, dans la capacité des agences gouvernementales à les contrôler et à les faire appliquer. Amnesty International pointe également un manque de diligence de la part des entreprises tel que recommandé par le Guide de l'OCDE sur le devoir de diligence pour des chaînes d'approvisionnement responsables en minerais provenant de zones de conflit ou à haut risque. [59]

5.4.3 Violences

Amnesty International et le centre d'étude SOMO [60] rapportent également différents cas de violence observés en 2016. Des policiers ou militaires ont été vus tirant vers des mineurs illégaux s'introduisant sans permission dans des mines de cuivres ou cobalt.

5.4.4 Accaparement des terres et compensations déséquilibrées

Plusieurs cas de figures rentrant dans cette catégorie ont été décrits dans l'étude précitée [60] : (i) relocalisation des communautés vers des terres au sol pauvre, (ii) accaparement de terres sans proposer de terres alternatives et sans compensation adéquate, (iii) relocalisation des communautés vers des terres sans accès à de l'eau potable ni d'infrastructures minimum, et (iv) déforestations de forêts servant de moyens de subsistance aux communautés environnantes sans solutions alternatives. Ces agissements sont d'autant plus problématiques qu'ils touchent des populations déjà en situation précaire, les fragilisant d'autant plus.

Encore une fois, la RDC et le cobalt ne sont pas des exemples isolés. L'aluminium, par exemple, (fabriqué au départ du bauxite) souffre également de problèmes similaires dans les Iles Salomon [100, 101].

5.5 Les impacts sur l'emploi en Europe

Il est difficile de qualifier avec certitude l'impact net de l'avènement des véhicules électriques sur l'emploi en Europe et par extension en Belgique. Trop d'incertitudes subsistent sur les paramètres utilisés et, à notre connaissance il n'existe pas d'étude précise sur le cas belge. Ce qui est certain, c'est qu'il y aura une modification profonde des types de compétences nécessaires, et le besoin de réorienter une partie importante de la force de travail actuellement employée dans le secteur automobile.

Plusieurs études prospectives mesurant l'impact économique du développement de la voiture électrique (en termes d'emploi et de PIB) ont été réalisées depuis 2010 par différents bureaux. Les études identifiées se concentrent majoritairement sur le marché du travail allemand, bien que certaines élargissent leurs conclusions au niveau européen. Leur méthodologie et leurs hypothèses diffèrent, de même que leurs conclusions : certaines sont positives, d'autres négatives. Les paragraphes suivants résument, nuancent et croisent les conclusions des travaux qui nous ont semblés les plus pertinents.

Dans une étude récente [47], réalisée par l'agence fédérale allemande de l'emploi, qui se concentre sur l'Allemagne entre 2020 et 2035, le scénario central suggère une hausse de l'emploi et du PIB à court-terme (2025), liées à la quantité significative d'investissements et une baisse nette des deux indicateurs à moyen-terme (2035). Ils projettent une perte nette de 114 000 emplois d'ici à 2035, soit une croissance de 10% du chômage actuel en Allemagne.

Cette étude conclut en nuancant ces résultats. D'une part, le scénario d'évolution de la pénétration des véhicules électriques dans les ventes annuelles est centré sur une ambition de 23% en 2030. Une pénétration plus élevée des véhicules électriques – de plus en plus réaliste vu les évolutions récentes – pousserait favorablement la balance des emplois d'ici à 2035. D'autre part, relocaliser un maximum d'activités de la chaîne de valeur permettrait également d'améliorer les projections suggérées.

Une autre étude co-écrite par Transport & Environment et commanditée par l'AIE (« The European Association of Electrical Contractors ») en 2018 conclut, au contraire, qu'au niveau européen en 2030 le nombre d'emplois créés par la transition vers l'électrique sera deux fois plus important que le nombre d'emplois perdus [48]. Dans sa communication autour de l'étude, Transport & Environment nuance également les conclusions de l'étude du Fraunhofer Institute for Industrial Engineering, commanditée par Volkswagen [51], dont les résultats sont aussi plutôt négatifs quant aux emplois allemands (voir ci-dessous): selon Transport & Environment, le Fraunhofer Institute impute 83% des pertes aux améliorations de productivité et non pas à la croissance de l'électromobilité.

La nécessité de relocaliser l'emploi et d'intégrer la chaîne de valeur est un message qui semble avoir été suivi par certains constructeurs allemands³². En effet, la nécessité de couvrir plus largement leur chaîne de valeur apparaît comme centrale dans leur plan de croissance au vu des partenariats listés : production de batteries et construction de « gigafactory », usine et objectifs de recyclage, création de bornes de recharge, etc.

C'est d'ailleurs dans une publication de Novembre 2020 réalisée en partenariat avec le Fraunhofer Institute for Industrial Engineering qu'il est mentionné : « the study relativises the occasionally alarming findings of previous publications and refutes common scenarios describing exclusively negative employment effects. Using the example of Volkswagen, the study shows there is no uniform employment trend in the "transformation corridor" over the coming decade ». [51]

Les auteurs du récent rapport pour la "Platform for electromobility" [52] semblent du même avis, ajoutant que: « In total, the number of jobs across the eight investigated industries will remain nearly constant until 2030. However, there will be significant shifts. [...] In consequence, strong temporal, industry and job-related as well as regional transitions will occur in the labor market. » Ils insistent ainsi sur la nécessité d'anticiper des formations facilitant les reconversions professionnelles.

Notons que ces études se concentrent en général sur les véhicules légers, certes majoritaires, manquant toutefois de quantifier les opportunités et risques additionnels que pourraient représenter les autres modes de transport.

En conclusion, il est difficile de qualifier avec certitude et précision l'impact de l'avènement des véhicules électriques sur l'emploi. Des risques existent, des opportunités également et les projections varient significativement d'une étude à l'autre. La marge d'erreur sur les quantifications d'emplois est non-négligeable vu le caractère à la fois incertain des hypothèses et la quantité de paramètres en jeu. Ainsi, des paramètres comme le taux de développement des filières de recyclage ou de relocalisation de la production des composants à haute valeur ajoutée apparaissent comme capitaux pour maintenir un taux d'emploi stable – ou en tout cas diminuer les risques de pertes d'emploi.

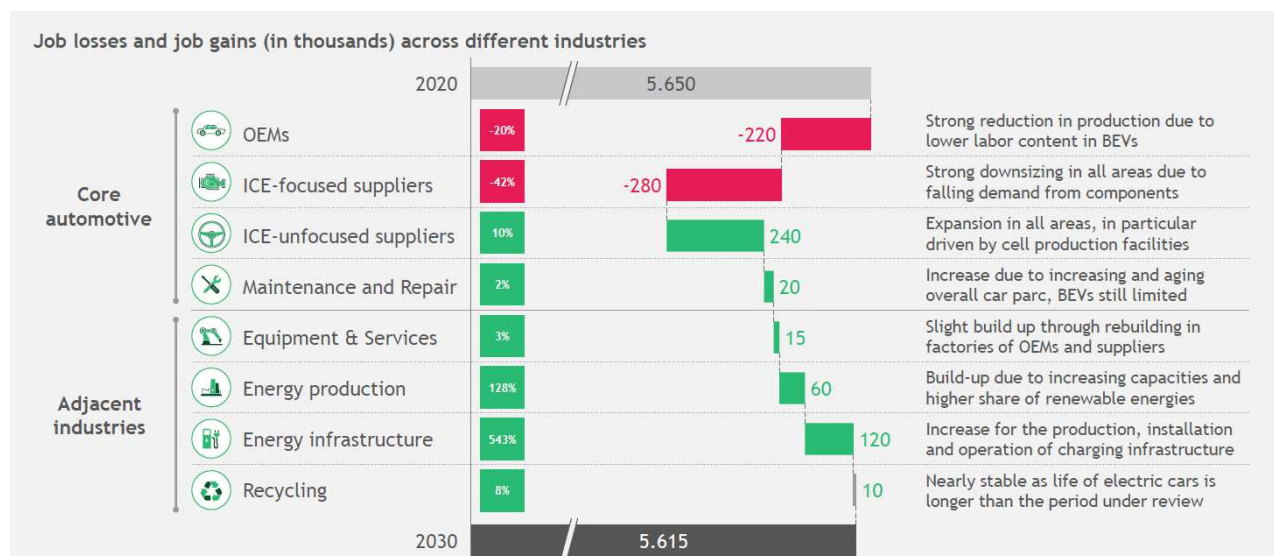
Malgré l'ampleur des incertitudes et vu la nécessité d'opérer cette transition, deux conclusions apparaissent de la revue de littérature réalisée :

³² VW, par exemple, dans leur communication récente [49] autour de leur refonte stratégique vers le « tout électrique » - qui contraste avec le positionnement historiquement plutôt conservateur du lobby automobile allemand VDA [50].

- Le développement des véhicules électriques et la fin des moteurs thermiques doivent s'accompagner d'un développement local des filières annexes sur la chaîne de valeur pour être qualifiés de « durables » en termes d'emplois. En effet, comme souligné par chacune de ces études, il y aura un shift des compétences utiles,
- Il est indispensable de se doter de programmes solides (tant au niveau des politiques que des industriels) en termes d'accompagnement et formations à mettre en place pour réorienter les personnes actives dans ces industries.

Finalement, en lien avec le point précédent, ces notions de diversification et de développement des filières annexes sont d'autant plus capitales qu'aucune des études ne semble suggérer la réduction de la demande et la décroissance du marché automobile, à l'inverse de ce qui est décrit dans les scénarios CORE-95 et BEHAVIOR. Si de telles voies sont choisies, la balance nette des emplois des constructeurs automobiles risque de plutôt tendre vers le négatif. Dans ce cas, les programmes de réorientation devront favoriser le transfert vers d'autres industries en manque d'effectifs, le cas échéant dans d'autres secteurs, comme la rénovation énergétique des bâtiments ou de l'industrie ou le développement des énergies renouvelables. En parallèle, de nouveaux services (en dehors de la chaîne de valeur de production de véhicules) verront le jour dans ces scénarios de décarbonation (comme le développement de technologies de partage de voitures), qui pourront également être la source de nouveaux emplois.

Figure 20: étude BCG [52] - balance des emplois liés à l'industrie automobile en Europe



6 Recommandations de mesures politiques

6.1 Introduction

Ce chapitre propose une série de mesures au regard des analyses qualitatives et quantitatives réalisées. Ces mesures vont soit favoriser l'avènement des scénarios de décarbonation étudiés au chapitre 4, soit empêcher (ou mitiger) les externalités négatives listées ci-dessus et analysées aux chapitres 3 et 5. Ce chapitre fait écho à différents textes de lois, interviews d'experts, articles, études et « position papers » de plusieurs organisations environnementales (pour plus de détails, se référer à [74, 76, 77, 78, 82, 85, 99, 102]).

6.2 Un texte central : la proposition de règlement sur les batteries publiée par la Commission Européenne [76]

Dans le cadre du Green Deal Européen, sous le nouveau « plan d'action pour une économie circulaire », la Commission Européenne a publié, en décembre 2020, une suggestion de règlement importante qui couvre l'ensemble de la chaîne de valeur des batteries : le « règlement [...] relatif aux batteries et aux déchets de batteries ». Elle a pour but de remplacer une précédente directive (« relative aux piles et accumulateurs ainsi qu'aux déchets de piles et d'accumulateurs »), non seulement en passe de devenir obsolète vu les développements à venir mais aussi problématique à plusieurs niveaux (par exemple : absence de conditions cadres incitant à l'investissement, fonctionnement non optimal des marchés du recyclage et la gestion des matières en circuits insuffisamment fermés, risques sociaux et environnementaux).

La proposition de règlement a pour objectif d'introduire des critères environnementaux et sociaux minimums pour tout type de batterie mise sur le marché européen. Elle promeut le devoir de diligence environnementale et sociale tout au long de la chaîne de valeur. En amont de l'usage, elle oblige le calcul de l'empreinte carbone de production et pousse à la création d'un « passeport » facilitant la transparence quant aux informations clés pour le consommateur et pour les acteurs de réparation, réutilisation ou recyclage de batteries. En aval, elle définit des objectifs de collecte et de recyclage des matériaux.

Au moment de la publication de cette étude, le texte est revu par plusieurs comités du Parlement ainsi que par le Conseil de l'Europe, représenté par les ministres de l'Environnement de chaque Etat membre, et devrait être voté aux alentours de février 2022 [77].

6.3 Recommandations d'améliorations de la proposition actuelle

La plupart des Etats membres, des ONGs et des parties prenantes ont accueilli favorablement cette proposition, tout en suggérant d'apporter une série d'améliorations au texte final [77, 74, 99, 112]. Cette section s'appuie sur les prises de position de ces acteurs pour identifier les manquements de la proposition de règlement actuelle et suggérer des recommandations correctives. De plus, le texte étant en révision, certaines de ces recommandations insistent pour que des ambitions spécifiques restent élevées dans le texte final. Les points soulevés ne se veulent pas exhaustifs, ils s'adressent aux problèmes majeurs énoncés au travers des chapitres 4 et 5.

6.3.1 Assurer des objectifs de collecte et de recyclage ambitieux

Les chapitres 4 et 5 de cette étude insistent sur la nécessité de recourir au recyclage des matériaux. Il est indispensable de se doter d'objectifs forts sur la collecte initiale des batteries hors d'usage et sur le taux de recyclage des composants même de ces batteries. Il s'agit des articles 47, 48, 55, 57 de la proposition de règlement de la Commission Européenne. Ces recommandations s'alignent sur celles d'un consortium d'ONGs [74].

Recommandation 1 : interdire l'élimination et la destruction des batteries via enfouissement, décharge ou incinérateurs. Ceci vaut pour les batteries automobiles et pour les batteries industrielles.

Recommandation 2 : les objectifs de recyclage des matériaux critiques doivent être alignés sur les meilleures pratiques actuelles. Le tableau ci-dessous résume les recommandations minimales (liées par ailleurs aux scénarios du chapitre 4). L'ouverture à d'autres matériaux en cas de développement de nouvelles technologies doit être rendue possible.

Matériaux critiques	Objectifs recommandés pour 2030
Cobalt	98%
Lithium	90%
Copper	98%
Nickel	98%

6.3.2 Devoir de diligence obligatoire sur la chaîne de valeur en amont de la production

Cette section s'inspire principalement de [74] et [99], en sélectionnant et adaptant certaines de leurs recommandations. Il est conseillé aux lecteurs de se référer à ces documents pour une liste plus complète et détaillée des éléments choisis et synthétisés ci-dessous.

L'objectif de cette section est de couvrir les thèmes liés aux risques sociaux (au sens large ici des droits fondamentaux) et environnementaux couverts dans le chapitre 5. Dans la proposition de règlement, il s'agit de l'article 39.

Recommandation 3 : inclure toutes les catégories de batteries dans les obligations de devoir de diligence, pas uniquement les batteries industrielles et celles des véhicules électriques.

Recommandation 4 : utiliser les critères de textes incluant l'ensemble des risques humains et environnementaux, sans se limiter aux « OECD Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains of Minerals from Conflict-Affected and High-Risk Areas » qui sont trop restrictifs géographiquement et thématiquement. Il est recommandé de se référer plutôt aux textes suivants : « UN Guiding Principles » et les « OECD Guidelines for Multinational Enterprises » [83, 84]).

Recommandation 5 : élargir le spectre des matériaux couverts au minimum au cuivre, à la bauxite et au fer (non couvert dans cette étude mais recommandé par Amnesty International). A terme, l'obligation devra devenir « material agnostic » afin que toute activité minière soit sujette aux mêmes obligations. [112]

Recommandation 6 : mettre au point des critères d'obligation de devoir de diligence environnementale ambitieux en faisant référence aux principes clés des lois environnementales européennes, aux accords internationaux et à une liste non-exhaustive d'impacts environnementaux négatifs. Ceci est nécessaire car il n'existe pas de standards internationaux qui listent ces critères comme c'est le cas pour le respect des droits de l'Homme, par exemple. Il est important d'inclure une liste non-exhaustive de conséquences environnementales négatives (du même acabit que le règlement sur la taxonomie européenne ou la « Corporate Sustainability Reporting Directive »)³³ pour rendre concret cette obligation.

³³ La liste des impacts environnementaux devrait inclure, mais sans s'y limiter, les impacts directs et indirects liés au changement climatique (y compris les émissions de gaz à effet de serre), la pollution de l'air, du sol, de l'eau et du bruit (y compris par l'élimination de produits chimiques), les substances dangereuses et la production de déchets, perte et dommages aux forêts et aux écosystèmes naturels, perte de biodiversité et perte d'habitats et d'espèces.

6.3.3 Inclure des dispositions pour l'extraction minière potentielle dans les fonds marins

Les fonds marins recèlent des gisements miniers d'importance mondiale, notamment de cuivre, de cobalt, de lithium, de nickel [86], de manganèse, d'argent, de zinc et de nombreux métaux et éléments de terres rares [87]. Le potentiel des fonds marins pour les chaînes d'approvisionnement des batteries est largement reconnu. Une société extractive, par exemple, décrit les nodules polymétalliques des fonds marins, qui contiennent du cobalt, du nickel, du cuivre et du manganèse, comme "une batterie dans une roche" [88].

L'Autorité internationale des fonds marins (« International Seabed Authority », ISA) élabore actuellement des règlements pour autoriser et régir l'extraction minière dans la zone internationale des fonds marins, qui pourraient être finalisés d'ici deux ans [89]. Certains pays, dont les îles Cook [90], le Japon [91] [92] et la Norvège [93], prévoient l'extraction dans leurs juridictions nationales.

L'extraction minière potentielle en eaux profondes est controversée. Des groupes de scientifiques et de conservationnistes marins [94] [95] [96], ainsi que le Parlement européen [97], demandent un moratoire sur l'extraction en eaux profondes jusqu'à ce que l'on connaisse mieux les effets environnementaux, sociaux et économiques potentiels et que les techniques de gestion de l'impact se révèlent efficaces. Certains fabricants majeurs se sont joints à cet appel [98], bien que la communauté des fabricants au sens large s'inquiète de la manière dont la demande future en ressources pour batteries sera satisfaite, et considère les ressources des fonds marins comme une partie de la solution. En raison de la controverse entourant l'extraction potentielle en eaux profondes, des exigences solides en matière d'approvisionnement responsable doivent être établies et suivies.

La Belgique a un intérêt significatif dans la gestion, l'exploration et l'exploitation des ressources des fonds marins. GSR, une filiale de l'entreprise belge de dragage DEME, est l'une des principales sociétés d'exploration minière en eau profonde. Le gouvernement belge parraine le contrat d'exploration de GSR avec l'Autorité internationale des fonds marins et GSR a également un contrat avec les îles Cook. La Belgique a également une mission permanente auprès de l'ISA en Jamaïque.

Recommandation 7 : étendre le devoir de diligence obligatoire de la chaîne d'approvisionnement pour couvrir explicitement les fonds marins, et inclure tous les impacts environnementaux et sociaux potentiels de l'extraction en eaux profondes. Jusqu'à ce qu'un cadre de devoir de diligence crédible soit mis en place, les entreprises européennes de la chaîne d'approvisionnement des batteries (au-delà d'une certaine taille) devraient collaborer à son élaboration. Cela peut se faire en participant à des forums appropriés tels que le World Economic Forum Deep-Sea Minerals Dialogue.

6.4 Autres recommandations au niveau européen et belge

La proposition de règlement de la Commission se préoccupe uniquement de la gestion des batteries. Elle ne couvre pas plusieurs éléments mentionnés aux chapitres précédents et notamment :

- Les mesures propres au secteur du Transport qui définissent des objectifs de réductions d'émissions à la hauteur des enjeux climatiques,
- Les mesures au niveau du secteur du Transport destinées à limiter la pression sur les ressources naturelles et la demande en énergie primaire,
- Les mesures permettant une transition industrielle plus réaliste (vu la croissance des volumes requis) sans compromettre les ambitions climatiques,
- Les mesures qui supportent le développement massif des infrastructures de recharges, des capacités de production de batteries durables (et ce compris l'innovation vers des batteries moins intensives en matériaux) et de recyclage,
- Les mesures qui accompagnent et facilitent les reconversions professionnelles.

La liste est non-exhaustive, mais ces points sont cruciaux et nécessiteront l'appui du législateur.

Les recommandations suivantes tentent à la fois d'identifier des manquements d'autres textes publiés par la Commission Européenne dans le cadre du Green Deal [103] et de suggérer d'autres mesures qui n'y sont pas directement liées. De plus, chaque recommandation spécifie également si leur champ peut s'appliquer ou non au cadre national belge.

6.4.1 Décarbonation de l'ensemble des nouvelles ventes de voitures (LDV) et camionnettes

Dans cette étude, la décarbonation du transport est considérée comme indispensable à l'avènement d'une société réellement durable. Les analyses se concentrent essentiellement sur les conséquences de l'électromobilité et de la production induite de batteries, selon plusieurs scénarios de décarbonation. L'hypothèse de base pour mesurer cet impact consiste en une interdiction de la vente de nouveaux véhicules thermiques légers entre 2030 et 2035 (comme le suggère, a minima, différentes études [85, 120] pour parvenir aux réductions nécessaires en 2050). Ceci est aligné avec l'objectif que la Commission a récemment proposé dans le package Fit for 55 (fin des ventes de véhicules LDV (c'est-à-dire des voitures) et des camionnettes à moteurs thermiques pour 2035 et une diminution des émissions moyennes des véhicules vendus en 2030 de -55% (vs 2021)) [103].

Selon plusieurs études, si c'est un progrès par rapport à l'objectif actuel (-37% en 2030), ce n'est pas assez ambitieux au regard des enjeux climatiques [85] ni économiques [104]. Ces mêmes études suggèrent une révision des objectifs à 2025 et 2030 pour permettre une décarbonation en 2035. Il est également utile de questionner les efforts nationaux et notamment la nécessité pour les pays développés, comme la Belgique, de se fixer des objectifs plus ambitieux que 2035 afin de laisser plus de temps aux régions plus pauvres [104].

Vu l'importance et l'urgence de l'enjeu climatique, il est utile de rappeler que les conséquences négatives du développement des batteries présentées dans cette étude ne justifient en aucun cas une réduction des ambitions de décarbonation nécessaire. Elles permettent d'ajouter des balises indispensables à un développement durable de la filière électrique. Les recommandations ci-dessous font écho aux études précitées pour rappeler l'importance de l'enjeu tout en rappelant que (i) les autres recommandations (de modification des comportements et de développement technologiques) de cette section sont indispensables afin d'assurer un développement durable et (ii) qu'un approfondissement des recommandations 8 et 9 est nécessaire afin de valider les objectifs mentionnés et adapter les soutiens aux industries.



Recommandation 8 : viser 2030 comme objectif de fin des ventes de nouveaux véhicules LDVs et camionnettes thermiques en Belgique.

Recommandation 9 : soutenir la proposition d'interdiction pour 2035 et suivre les recommandations de [105] qui estiment nécessaire d'augmenter les objectifs européens actuels pour 2025 et 2030.

6.4.2 Définition de normes et d'objectifs plus stricts quant au poids et à la puissance des voitures

Il est indispensable d'inverser les évolutions des dernières années quant au poids moyen des véhicules ; en Europe, celui-ci a cru de près de 10% entre 2001 et 2016 [80] alors que les SUV sont passés de 10% des ventes en 2010 à près de 42% en 2020 [104]. Quatre éléments viennent supporter cette affirmation [102]:

- Il est nécessaire de diminuer la consommation énergétique à l'usage et à la fabrication - les émissions directes et indirectes - des nouveaux véhicules,
- Il est nécessaire de diminuer la taille des batteries moyennes de véhicules électriques futurs, pour limiter l'extraction et ses conséquences négatives potentielles,
- Il est nécessaire de diminuer les émissions de particules fines, plus importantes pour les véhicules lourds,
- Il est nécessaire d'améliorer la sécurité sur les routes en diminuant les dangers des véhicules lourds pour les usagers faibles³⁴.

La diminution des besoins en matériaux, démontrée comme indispensable au chapitre 4, est un des nombreux avantages d'une diminution de poids et de puissance. Pour ce faire, des normes additionnelles au niveau européen (et au niveau belge) sont nécessaires. Les recommandations politiques qui émanent de l'initiative « Lisacar³⁵», de l'ONG Transport & Environment ([104] et [106]), de la revue scientifique Nature [102] et du directeur de l'agence internationale de l'énergie (AIE) [109] vont dans ce sens.



Recommandation 10 : modifier la formule suggérée quant aux objectifs de CO₂e/km d'ici à 2025 et 2030 en retirant la masse du véhicule de l'équation (voir [106] pour plus de détails).

Recommandation 11 : définir des normes et des objectifs de poids et de puissance des voitures en vue de les diminuer. En parallèle, promouvoir les achats de véhicules plus légers, décourager l'achat de véhicules lourds (type SUV) et sensibiliser la population sur le sujet. En Belgique, à défaut d'une réglementation plus large, des dispositions en ce sens devraient être ajoutées à la réforme des voitures de société récemment promulguée.

³⁴ Plusieurs études aux conclusions contradictoires existent sur le sujet. La dangerosité a été gardée comme un argument contre les véhicules de type SUV car (i) masse et vitesse sont directement liés à l'énergie cinétique d'un véhicule et (ii) le profil carré de certains de ces véhicules a des conséquences plus graves qu'un profil classique pour les usagers faibles en cas de collision.

³⁵ Voir l'ensemble des suggestions sur : <https://www.lisacar.eu/>.

6.4.3 Création d'une agence internationale de coopération liée à l'extraction de matériaux critiques

Cette proposition fait écho à la tribune de Marc-Antoine Eyl-Mazzega dans Le Monde [75]. Elle faciliterait à la fois la mise en commun de certaines pratiques et la coordination des audits de la chaîne d'approvisionnement.



Recommandation 12 : créer une agence internationale de coopération qui aurait pour mandat de superviser et de favoriser le partage et l'amélioration des critères de devoir de diligence du respect des droits humains et environnementaux développés dans la section précédente.

6.4.4 Réduire le recours à la voiture

Il est indispensable que des programmes d'investissements forts soient pérennisés au niveau européen pour permettre une réduction de la demande initiale et favoriser le transfert modal. Sans rentrer dans les détails, les recommandations développées dans [85] synthétisent les éléments à mettre en place au niveau européen ou national.



Recommandation 13 : investir dans la mobilité active et partagée – accélérer les investissements dans des infrastructures favorisant la marche, le vélo et les transports en commun, ainsi que dans le matériel roulant associé. Associer les organisations soutenant les personnes à mobilité réduite dans ces transformations pour rendre ces nouvelles pratiques accessibles à toutes et tous. Investir dans les technologies de modifications des comportements du type « Mobility as a Service ».

Recommandation 14 : réformer le régime fiscal pour accélérer le transfert modal.

6.4.5 Emplois, innovation et industries de la transition

Une stratégie économique et industrielle européenne - plus complète que les quelques recommandations suivantes - est bien évidemment nécessaire pour mener la transition énergétique rapidement et sereinement. Cette section a pour ambition de lui fournir quelques éléments qui apparaissent importants au vu des conclusions précédentes.

La section 5.4 a montré les risques pour les emplois liés directement ou indirectement à l'industrie automobile européenne traditionnelle ; il faut soutenir les travailleurs concernés, faciliter les reconversions professionnelles et accélérer le développement des filières d'avenir.



Recommandation 15 : encadrer et soutenir les programmes d'aides et de réorientations des travailleurs touchés par la transition.

Recommandation 16 : soutenir les investissements dans les industries de la chaîne de valeurs des batteries pour contrôler le taux d'emploi à long-terme (voir le recyclage et des nouvelles technologies ci-dessous, et également viser les infrastructures de recharges) et éviter de dépendre d'industries étrangères aux standards sociaux et environnementaux moins élevés.

Le chapitre 4 a quant à lui montré à quel point les principes d'économie circulaire prennent tout leur sens vu le décalage entre les estimations de ressources et la croissance des besoins futurs. Il faut impérativement accélérer le développement des industries de recyclage des composants des batteries – tant en innovation qu'en développement industriel. Ce chapitre a illustré l'importance d'accélérer le développement des technologies de batteries moins intensives en ressources.



Recommandation 17 : soutenir les innovations des techniques de recyclage et des nouvelles technologies de batteries, ainsi que le développement industriel de celles-ci. Favoriser également le partage des connaissances des techniques de pointe pour assurer une adéquation entre les capacités de recyclage et les volumes annuels futurs.

7 Annexe 1 : synthèse des enjeux environnementaux, sociaux et économiques

7.1 Les principaux enjeux environnementaux

Activités de la chaîne de valeur	Risques	Opportunités
Extraction des matériaux	<ul style="list-style-type: none"> • L'essor de la demande d'EV pourrait entraîner des pénuries de ressources à court terme. Il s'agit principalement du cobalt, du nickel, du lithium. [10, 13] • L'extraction de matériaux génère des impacts environnementaux, dont la toxicité, l'écotoxicité, la destruction des biotopes et l'eutrophisation des eaux douces. En ce qui concerne l'utilisation des terres et la consommation d'eau, les BEV sont moins performants que les ICEV. [1, 26] 	<ul style="list-style-type: none"> • Le développement de l'électromobilité ralentit l'épuisement des combustibles fossiles. Avec l'électrification des transports, il y a une réduction de l'épuisement des combustibles fossiles et des risques environnementaux associés à leur extraction.
Fabrication des véhicules et des batteries	<ul style="list-style-type: none"> • L'empreinte carbone de la production de batteries est significative. L'empreinte carbone de la production des batteries représente environ la moitié de l'empreinte totale de la production d'un EV [3, 19]. La fabrication d'un EV est plus intensive en carbone que la fabrication d'un ICEV – bien qu'une LCA complète soit nécessaire pour comparer correctement l'empreinte des technologies. • La localisation de l'industrie fait partie de l'impact. L'industrie actuelle des batteries est principalement située en Chine, où le secteur de l'électricité est très intensif en carbone. [25] 	<ul style="list-style-type: none"> • La technologie des batteries est nouvelle et des avancées technologiques pourraient potentiellement réduire leur empreinte environnementale. Il s'agit notamment des batteries à état solide (solid-state batteries), attendues après 2030 ; de l'amélioration de l'interface électronique ; de l'utilisation de l'IA. [3, 18, 19]

Utilisation et émissions indirectes	<ul style="list-style-type: none"> • La production d'électricité peut être à forte intensité de carbone et de polluants atmosphériques. Les émissions liées à la conduite d'un BEV sont principalement associées à la production d'électricité, qui dépend du mix régional. Quel que soit le mix, même en cas d'abandon progressif du nucléaire en Belgique ou de forte production d'électricité à partir du charbon en Pologne, les émissions de GES associées sont inférieures à celles d'un véhicule à moteur à combustion interne [19]. • L'impact sur la qualité de l'air est toujours (potentiellement) important. La conduite sur route émet des polluants locaux (particules atmosphériques), provenant de la route, des freins et des pneus. Il s'agit d'une considération nouvellement étudiée qui concerne tout type de véhicule et s'accompagne d'incertitudes. [1, 2, 26] 	<ul style="list-style-type: none"> • Les émissions WTW sont réduites par l'augmentation des énergies renouvelables dans le mix énergétique européen. • Le BEV <ul style="list-style-type: none"> ○ est plus efficace : les rendements énergétiques (kWh/km), les BEV sont deux à quatre fois meilleurs que les ICEV, d'où un WTW inférieur même avec de l'électricité grise. [17] ○ permet un kilométrage plus élevé, ce qui ouvre une opportunité pour le MaaS [19] ○ améliore la qualité de l'air, grâce à l'absence d'émissions d'échappement (SOx, NOx, PM). • L'utilisation de combustibles fossiles diminue. Avec les véhicules électriques et l'augmentation des énergies renouvelables, il y a une réduction des risques environnementaux et sanitaires associés à l'extraction et la combustion de combustibles fossiles. [36]
Gestion de la fin de vie	<ul style="list-style-type: none"> • La capacité de recyclage est incertaine : une incertitude existe sur. La batterie étant une technologie en évolution, il n'est pas certain que nous disposerons de la technologie et de la capacité industrielle nécessaires pour un recyclage efficace. • Les déchets dangereux des batteries s'accumuleront, représentant un volume important. Un volume énorme de déchets dangereux peut être attendu aux environs de 2030 si le secteur du recyclage ne se développe pas assez vite. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le recyclage efficace signifie moins d'extraction permet d'extraire moins de matières. Une La gestion améliorée et à plus grande échelle du traitement des batteries en fin de vie entraînera une réduction de l'extraction des matières premières et des risques environnementaux associés. • L'électromobilité peut permettre faciliter le passage à une mobilité « fonctionnelle ». Cela comprend une demande réduite d'utilisation de véhicules et de parc de véhicules (MaaS), et une quantité réduite de matériel par voiture^{ab} [14, 22, 27, 28].
Empreinte carbone en analyse de cycle de vie	<ul style="list-style-type: none"> • Des déclarations contradictoires subsistent, compte tenu du développement récent de l'électromobilité. Étant donné que les véhicules électriques sont une technologie émergente, il existe encore des déclarations contradictoires, bien que de plus en plus d'études semblent confirmer le fait que les véhicules électriques ont une empreinte carbone significativement plus faible que les véhicules thermiques. [3, 19] 	<ul style="list-style-type: none"> • L'empreinte carbone complète (LCA) d'un BEV est trois fois inférieure à celui d'un ICEV. [3, 19, 45]^c • L'empreinte carbone du futur BEV sera quatre fois inférieure à celle du ICEV, principalement grâce à la décarbonation de l'électricité dans l'UE.^d [19]

Activités de la chaîne de valeur	Risques	Opportunités
Extraction des matériaux	<ul style="list-style-type: none"> • L'Europe dépend d'autres pays pour l'approvisionnement en matériaux. Les matériaux sont principalement produits en dehors de l'Europe. Une demande croissante de batteries pourrait affaiblir l'économie européenne si l'UE reste dépendante de l'approvisionnement en matériaux. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le recyclage limite la dépendance de l'UE vis-à-vis de l'approvisionnement étranger. Cela assurerait l'indépendance économique et la sécurité d'approvisionnement. Le recyclage a le potentiel de développer un marché européen de récupération de matériaux. [18, 21] • L'électromobilité est un marché émergent et donne des opportunités de relocalisation de l'industrie des matériaux. Le marché étant émergent, l'Europe peut relocaliser cette production sur son territoire et développer notamment l'industrie métallurgique domestique. • Les PLV sont une opportunité pour réduire la demande en matériaux. Les PLV sont des véhicules légers (moins de 400 kg) et peuvent réduire le besoin en matériaux et la dépendance vis-à-vis d'autres pays. C'est une opportunité pour développer un nouveau marché dans le secteur automobile européen. [13, 27] • Le développement de l'électromobilité permet de réduire la dépendance de l'Europe vis-à-vis des importations de carburant.
Fabrication des véhicules et des batteries	<ul style="list-style-type: none"> • Les BEV utilisent des processus de fabrication simplifiés. Il est probable qu'à long terme, le secteur manufacturier décline (voir impact sur l'emploi dans la partie « Social »). [12] • L'Europe est actuellement fortement dépendante de la production étrangère, notamment asiatique. [35] 	<ul style="list-style-type: none"> • Le recyclage permet d'augmenter la fabrication domestique de batteries. Relocaliser la production de batteries en Europe est une opportunité pour plus d'indépendance (surtout à long terme lorsqu'elle est couplée au recyclage des matières premières), plus de valeur ajoutée et plus d'emplois (voir section suivante). [35]
Utilisation : adoption du consommateur	<ul style="list-style-type: none"> • L'autonomie du véhicule, les infrastructures de recharge, le prix pourraient ne pas répondre aux attentes des consommateurs. Les consommateurs s'attendent à une meilleure autonomie des BEV (environ 350 km actuellement), c'est une raison pour les empêcher d'acheter un BEV [16, 17, 26]. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les BEV offriront bientôt une grande facilité à leurs utilisateurs. À mesure que la technologie évolue, l'autonomie devrait augmenter. Ce confort peut encore augmenter avec l'émergence de la charge rapide et l'infrastructure croissante des modules de charge. [3, 26] • Le coût total de possession est similaire pour les BEV et ICEV. À mesure que la technologie arrivera à maturité, la balance penchera pour les BEV. [5, 18, 20]

<p>Utilisation : Mobilité comme un service (MaaS)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Les volumes de voitures et les emplois associés seraient plus faibles. Les technologies MaaS constituent un risque industriel car elles réduisent le volume de nouvelles voitures à produire, vendre et entretenir. 	<ul style="list-style-type: none"> • La MaaS peut fournir de nouveaux emplois. La MaaS couvre un large éventail de technologies pouvant déboucher sur de nouvelles opportunités d'affaires et d'emplois (en maintenance par exemple). • La MaaS permet de réduire la congestion urbaine. La MaaS est à considérer dans le cadre d'un déplacement multimodal, avec une part croissante des transports actifs et publics et l'opportunité de repenser la mobilité des villes. Cela réduirait la congestion et la demande de stationnement [7, 26]. • La MaaS est liée à une baisse de la demande de production et à une utilisation accrue des véhicules (voitures partagées). Cela diminue les émissions directes et indirectes de GES et les autres polluants atmosphériques (SOx, NOx, etc.). • La MaaS est essentielle. Transformer toute la demande de transport existante en technologies électriques n'est pas durable. Les politiques visant à réduire la possession et l'utilisation des véhicules sont essentielles pour l'atténuation des émissions et de la congestion. [34]
<p>Utilisation : Infrastructure</p>	<ul style="list-style-type: none"> • L'adoption des EV pourrait entraîner une surcharge du réseau. L'adoption prévue des EV en Belgique pourrait entraîner une surcharge des réseaux électriques, principalement pendant les heures de pointe le soir ou les jours fériés. [11] 	<ul style="list-style-type: none"> • La recharge intelligente, plus encore avec les EV autonomes partagés, permet d'optimiser la demande d'énergie et d'aider à la gestion du réseau. [3] • Le V2G (Vehicle-to-Grid) contribuera sans aucun doute à la gestion du réseau, mais la technologie ne devrait pas être commercialement disponible à court terme°. [16]

7.3 Les principaux enjeux sociaux

Activités de la chaîne de valeur	Risques	Opportunités
Extraction des matériaux	<ul style="list-style-type: none"> • Les conditions de travail dans les mines sont mauvaises. L'extraction de minerai demandée par la production de batteries est associée à des conséquences humaines désastreuses^f, par exemple, l'extraction de cobalt en République Démocratique du Congo (RDC) est liée à des violations des droits de l'homme, au travail d'enfants ou à des conditions de travail dangereuses^g. Les inégalités pourraient se creuser au Sud, ce qui est contraire à l'idée de justice climatique. [31] 	<ul style="list-style-type: none"> • Les réglementations et les actions politiques seront essentielles pour renforcer les droits humains. Elles peuvent prendre plusieurs formes, par exemple, une obligation de transparence européenne sur l'extraction minière ou une norme obligatoire comme ISO45001 sur la santé et la sécurité au travail, pour garantir que tous les matériaux ou produits sur les marchés européens respectent les droits de l'homme là où ces matériaux sont produits. [31]
Fabrication des véhicules et des batteries	<ul style="list-style-type: none"> • Les emplois dans le secteur manufacturier devraient décliner à long terme. L'industrie automobile est susceptible de décliner à la suite d'une réduction de la demande européenne due au MaaS et à une simplification des processus de fabrication. A court terme, le bilan net devrait être neutre, compte tenu des investissements. [12] • Une stratégie d'emploi est nécessaire. L'UE a besoin d'une stratégie pour l'emploi qui guide l'industrie, assure le dialogue social et la participation des travailleurs dans la transition. [25] 	<ul style="list-style-type: none"> • Les secteurs du recyclage et de l'énergie renouvelable vont croître. Un plus grand nombre de travailleurs sera nécessaire dans les secteurs du recyclage et de l'énergie, ce qui pourrait atténuer le déclin des emplois dans le secteur manufacturier. Toutefois, une solide stratégie d'emplois pour aider les travailleurs à faire la transition d'une industrie à une autre est essentielle.
Consommateur	<ul style="list-style-type: none"> • Des changements culturels de la part des consommateurs seront demandés. La MaaS demandera un changement du point de vue du consommateur : d'un bien, la mobilité devient un service. Le consommateur pourrait ne pas s'inscrire dans cette évolution. • Certaines iniquités et partialités pourraient prendre place. L'adoption de l'électromobilité peut éroder les aspects de justice distributive : seuls les riches peuvent s'offrir des véhicules électriques. [4] 	<ul style="list-style-type: none"> • La MaaS apporte des emplois. Les véhicules partagés (MaaS) sont un service et nécessitent plus de gestion de maintenance que les véhicules en propriété, cela peut créer des emplois qualifiés dans ce domaine. La MaaS doit évoluer aux côtés des transports publics et des déplacements actifs, ce qui développera le secteur de la logistique et l'emploi lié. [26] • Les ménages à faible revenu peuvent bénéficier de la MaaS. De manière générale, la mobilité partagée est davantage perçue comme l'apanage de publics aisés et éduqués, mais elle représente également une opportunité d'offrir un accès à la mobilité aux ménages les plus modestes [7]. • Diminution du bruit.

- La main d'œuvre qualifiée n'apparaît pas systématiquement avec le changement. Il peut en résulter un besoin de formation et d'accompagnement en cas de perte d'emploi.

- Le secteur émergent de la réutilisation et du recyclage fournira de nouveaux emplois qualifiés.

^a Les PLV réduisent fortement la consommation d'énergie pendant la fabrication et l'utilisation, cela résulte en une empreinte carbone (LCA) 50% plus petite [14, 27]. Ces véhicules légers existent déjà dans certaines marques, comme la Renault Twizy [37].

^b Cette stratégie a un grand potentiel de réduction des émissions et de matière, jusqu'à 50 à 90 % pour des scénarios ambitieux [14, 22, 27, 28].

^c Ces LCA n'incluent pas les émissions de particules fines et polluants locaux influençant la qualité de l'air (liées aux frottements de la route, des freins et des pneus), il s'agit uniquement de CO₂.

^d Avec un scénario ambitieux en termes d'énergies renouvelables, le LCA d'un BEV est abaissée de 50%, seulement par ce levier. [3]

^e L'IEA s'attend à ce que la V2G arrive à plus long terme, en effet, ils ne prévoient que 5 % des véhicules équipés de la technologie V2G d'ici 2030 [16]. La technologie est prête, mais elle a besoin d'une impulsion politique pour être acceptée et mise en œuvre [39].

^f L'approvisionnement responsable est évalué par TDI Sustainability sur la base des critères suivants : liberté de conflit ; loi et lutte contre la corruption ; respect des droits de l'homme et du travail ; performance environnementale [41]. La RDC, le Gabon, la Guinée, le Mozambique et la Turquie font partie des pays qui présentent le plus grand risque de problèmes de durabilité de la chaîne d'approvisionnement notamment en raison des aspects de gouvernance.

^g Tesla et Apple parmi les entreprises accusées de profiter de travail d'enfants au Congo [42]

8 Annexe 2 : détails méthodologiques des scénarios construits

8.1 Description qualitative des scénarios de transport étudiés

REF	CORE95	TECH
Continuation of current social and technical trends	Balanced decarbonization pathway	Technology-oriented decarbonization pathway
Implementation of existing and planned policies, not more	Deep technical (efficiency, fuel switch,...) and behavioral (housing surface, diet, transport demand) changes	Mostly technical changes – less emphasis on behavioral changes
Continuing growth of passenger and freight transport	Curbed demand for passenger and freight transport	Increasing demand
Moderate shift from road transport	Significant modal shift from road transport	Relative modal shift but absolute stagnation for passenger cars
Increasing car and truck fleet, moderate electrification	Drastic decreasing car and truck fleet, significant electrification	Decreasing car fleet, significant electrification

8.2 Indicateurs clés des scénarios de transport étudiés

Paramètres	2015		2050		
Scénario		REF	CORE 95	TECH	BEH
Transport de passagers par voiture (Milliard pkm)	109	141	85	110	53
Part modale de la voiture dans le transport de passagers (%)	62%	62%	45%	51%	33%
Flotte totale de voitures (nombre de véhicules en millions)	5.7	7.8	1.6	2.5	0.5
Part technologique des voitures électriques (%BEV + %PHEV)	0.4%	6.6%	88%	89.7%	91.8%
Transport de fret par la route (Milliard tkm)	48	71	39	49	34
Part modale du fret routier dans la demande totale de fret (%)	2.4%	2.7%	2%	2.4%	1.8%

Flotte totale de camions (nombre de véhicules en milliers)	184	274	77	81	79
Part technologique des camions électriques (%BEV + %PHEV)	0%	28.6%	43.9%	43.4%	44.2%
Part technologique des camions à combustion (%ICE)	100%	71.4%	4.6%	4.7%	4.6%

Les % restants des parts technologiques vont aux véhicules à hydrogène

8.3 Hypothèses de circularité et d'efficacité matérielle dans les scénarios LIN et CIRC

Circularité				
Année		2015	2050	
Scénario			LIN	CIRC
Rendement de recyclage (%)	Aluminium	100%	100%	100%
	Cobalt	100%	100%	100%
	Graphite	10%	10%	20%
	Lithium	10%	10%	20%
	Manganèse	100%	100%	100%
	Nickel	100%	100%	100%
Taux de recyclage (%)	Batteries	5%	10%	100%

Efficacité matérielle				
Année		2015	2050	
Scénario			NON-EFF	EFF
Diminution de l'intensité matérielle par matériau (vs 2015)	Aluminium	100%	10%	10%
	Cobalt	100%	60%	100%
	Graphite	10%	10%	30%
	Lithium	10%	10%	60%
	Manganèse	100%	10%	10%
	Nickel	100%	20%	100%

8.4 Note méthodologique sur les estimations de réserves et ressources

Il est important de rappeler que les estimations de réserves et de ressources sont à considérer avec précaution. En effet, comme le souligne l'institut TDI : "[...] bon nombre des gisements qui seront exploités dans le monde en 2050 pourraient ne pas encore avoir été découverts. Cela montre que si les données sur les réserves peuvent fournir une bonne indication des chiffres de production dans un avenir proche, elles peuvent ne pas être fortement corrélées aux chiffres de production dans 20 ou 30 ans [...] Une tendance probable est que l'extraction minière dans les décennies à venir augmentera dans les régions où les données géologiques sont actuellement rares, à mesure que de nouveaux gisements seront découverts et exploités." [source : étude à paraître pour le SPF Santé]

8.5 Comparer ressources globales et besoins belges

Comparaison 1 : l'allocation des ressources à la Belgique se fait en fonction de la répartition des nouvelles voitures : Pour évaluer la faisabilité à court terme des besoins belges par rapport aux ressources/réserves disponibles, la part belge a été calculée sur la base du % des nouvelles voitures vendues en Belgique par rapport aux nouvelles voitures vendue dans le monde. Cette approche est satisfaisante pour étudier la faisabilité à court terme.

Comparaison 2 : l'allocation des ressources à la Belgique se fait en fonction de la population. Pour comparer les besoins belges aux ressources/réserves disponibles, la part "équitable" de la Belgique a été calculée sur la base de la taille relative de la population belge par rapport à la population mondiale. Cette approche est plus adaptée pour étudier la faisabilité à long terme et est plus équitable.

8.6 Description de l'outil Pathways Explorer

Les principales caractéristiques du Pathways Explorer sont les suivantes :

- C'est un modèle complet du système énergétique belge. Il couvre tous les secteurs de consommation énergétique et d'émissions de GES, et rend compte de la dynamique du système énergétique ;
- Il permet l'élaboration de scénarios de transition énergétique fondés sur des hypothèses réalistes et transparentes ;
- Il s'appuie sur plus de 10 ans de développement de modèles, d'interactions avec les parties prenantes et de consultations d'experts ;
- Il s'agit d'un modèle facilement accessible en temps réel via une interface web

En revanche, le Pathways Explorer ne couvre pas les aspects suivants :

- Les scénarios ne sont en aucun cas des prévisions, aucune probabilité spécifique ne leur est attachée car ils dépendent des ambitions sociétale et politique ;
- Il n'y a pas d'optimisation des coûts dans le modèle. Si l'optimisation des coûts peut être utile dans certains cas, l'éviter présente l'avantage de garantir que toutes les options peuvent être explorées, tant celles qui sont rentables que celles qui ne le sont pas encore mais qui sont prêtes à être déployées sur le marché, et qui ne seraient pas prises en compte par les modèles d'optimisation des coûts.
- L'analyse macroéconomique et les co-bénéfices ne sont pas inclus dans ce modèle, mais les résultats des scénarios peuvent être exploités par d'autres modèles qui sont développés pour ce type d'analyse complémentaire

La caractéristique la plus marquante de cette famille de modèles est ce que l'on appelle les leviers de décarbonation. Ces leviers fixent les trajectoires 2020-2050 au niveau national pour les technologies, les modes de vie et les pratiques sectorielles spécifiques (par exemple, les pratiques agricoles). Le terme "ambition" fait référence au fait qu'une trajectoire représente la poursuite des tendances actuelles (niveau 1), une ambition moyenne à élevée (niveaux 2 et 3), ou une transformation profonde (niveau 4), tant en termes de changement sociétal que de déploiement technologique. Dans tous les secteurs, un large ensemble de leviers et de trajectoires sont modélisés (plus de 100, par exemple la demande de transport par personne, le niveau d'isolation des maisons rénovées, la durée de vie de certains produits comme les voitures, l'efficacité et la technologie de l'acier, l'installation de capacité de production d'électricité renouvelable). Ceux-ci déterminent l'évolution de l'offre et de la demande d'énergie. Ces niveaux ont été définis au cours de nombreux projets sur la base d'une vaste analyse documentaire et d'une série d'ateliers avec des experts du secteur.

Dans l'outil, un scénario est créé en choisissant une combinaison de niveaux d'ambition pour l'ensemble des leviers disponibles pour l'utilisateur. Ceux-ci sont regroupés par catégorie (par exemple, le mode de vie et la technologie) et de secteurs (par exemple, les bâtiments et le transport). Ces leviers peuvent être décrits comme des "trajectoires" sur lesquelles les gouvernements ont peu ou pas d'influence (par exemple, les tendances démographiques, l'évolution des prix de l'énergie), ou comme des "leviers" sur lesquels il est possible d'agir directement. Ces deux types de leviers peuvent être définis par l'utilisateur pour projeter l'évolution de tous les résultats du modèle, y compris la consommation d'énergie, la production et les implications en termes de coûts. Une ambition plus élevée est toujours définie comme ayant un impact plus élevé en termes de réduction des émissions de GES.

9 Annexe 3 : détails des résultats principaux

9.1 Pressions sur le cobalt

Les Figure 21 et Figure 22 ci-dessous complètent celle présentées à la section 4.3.4 dans l'analyse de pression sur les ressources. Les commentaires de la même section peuvent également être utiles pour mieux appréhender ces graphiques. Les explications méthodologiques des différents indicateurs se trouvent dans la section 4.2 ainsi que dans l'Annexe 2.

Figure 21: besoins primaires en Cobalt par rapport aux estimations de réserves et ressources (disponibilité relative à la population en Belgique et dans le monde (explication dans la section méthodologique))

Cobalt: Besoins primaires cumulés vs Réserves & Ressources (distribuées par taille de population)
(en milliers de tonnes)

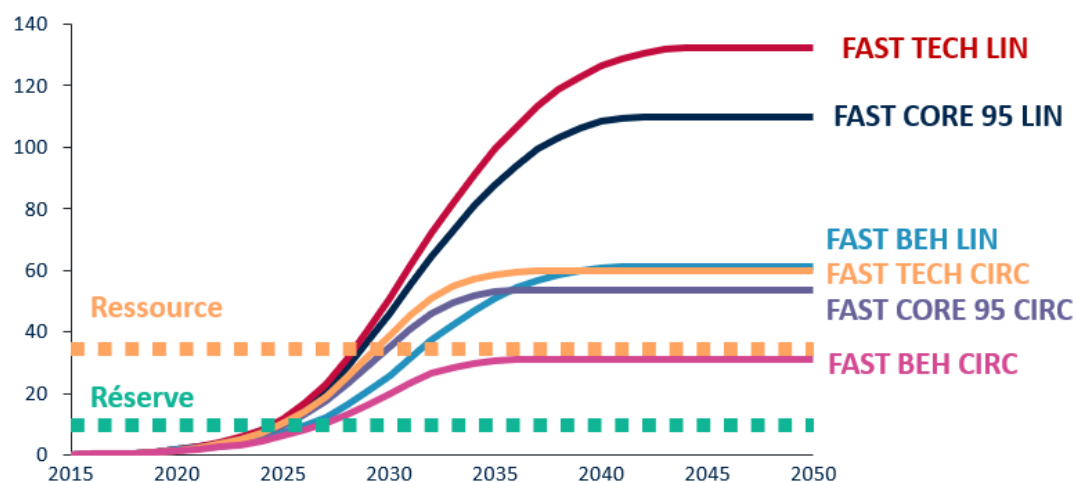
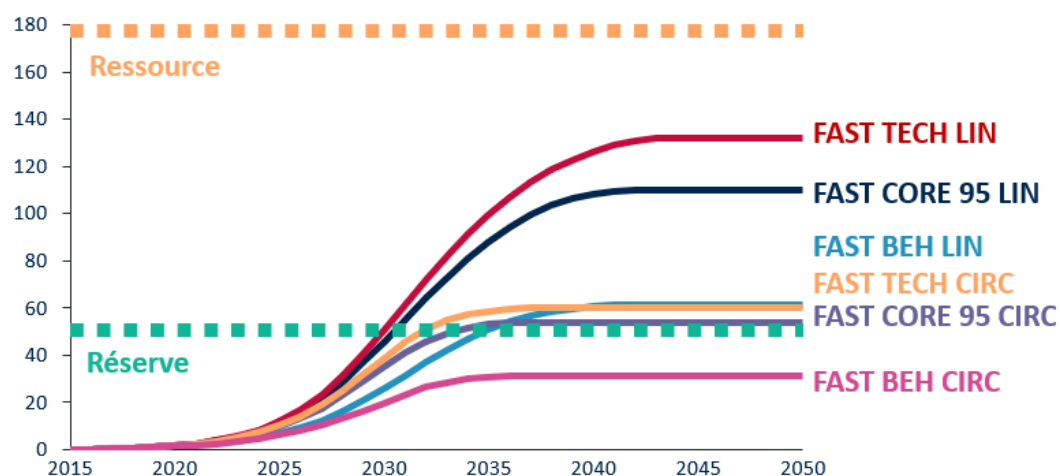


Figure 22: besoins primaires en Cobalt par rapport aux estimations de réserves et ressources (disponibilité relative à la distribution de nouvelles voitures en Belgique et dans le monde (explication dans la section méthodologique))

Cobalt: Besoins primaires cumulés vs Réserves & Ressources (distribuées par quantité de **nouvelles voitures**)
(en milliers de tonnes)



9.2 Pressions sur le lithium

Figure 23: besoins primaires en Lithium par rapport aux estimations de réserves et ressources (disponibilité relative à la population en Belgique et dans le monde (explication dans la section méthodologique))

Lithium: Besoins primaires cumulés vs Réserves & Ressources (distribuées par taille de **population**)
(en milliers de tonnes)

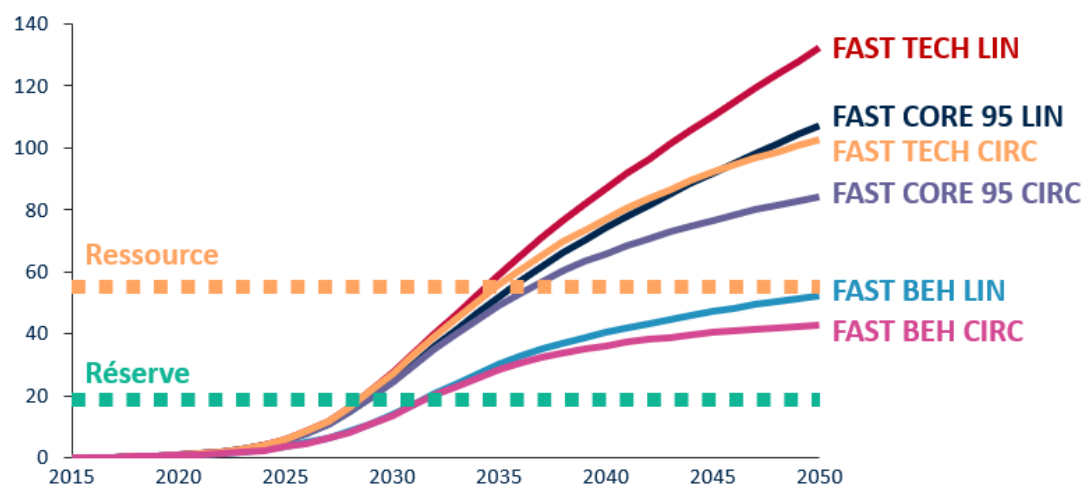
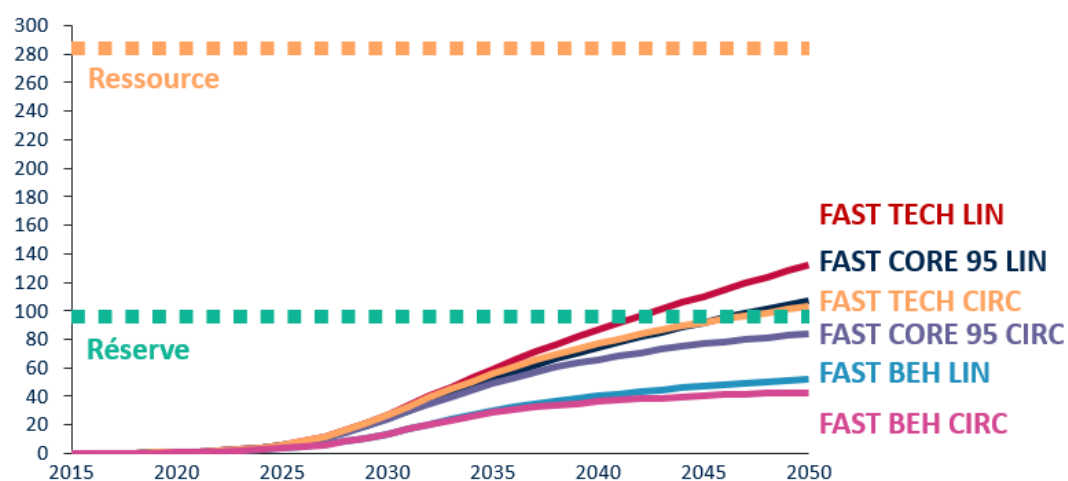


Figure 24: besoins primaires en Lithium par rapport aux estimations de réserves et ressources (disponibilité relative à la distribution de nouvelles voitures en Belgique et dans le monde (explication dans la section méthodologique))

Lithium: Besoins primaires cumulés vs Réserves & Ressources (distribuées par quantité de **nouvelles voitures**)
(en milliers de tonnes)



9.3 Pressions sur les autres ressources

9.3.1 Graphite

Figure 25: besoins primaires en Graphite par rapport aux estimations de réserves et ressources (disponibilité relative à la population en Belgique et dans le monde (explication dans la section méthodologique))

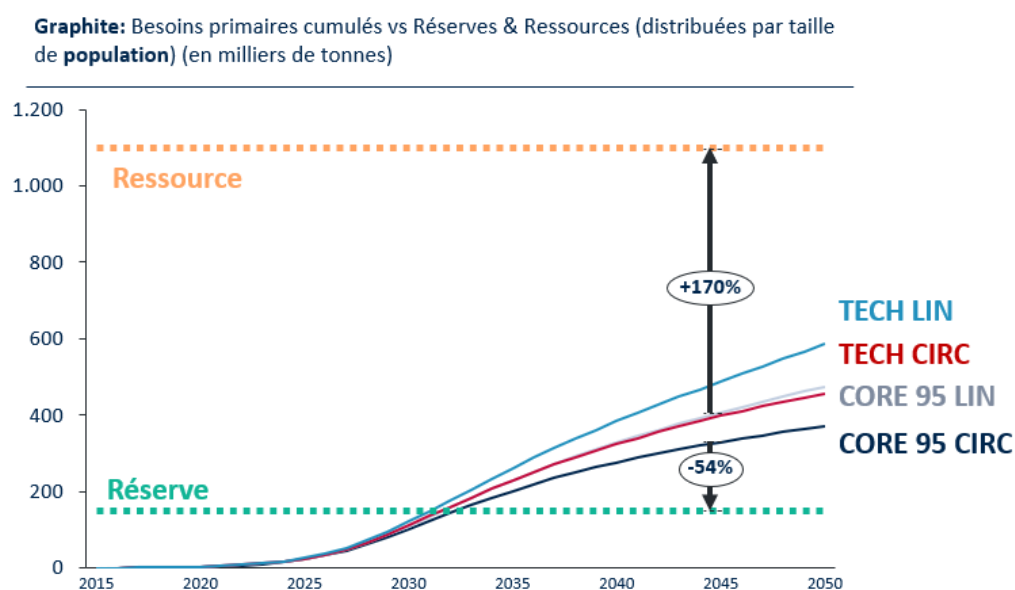
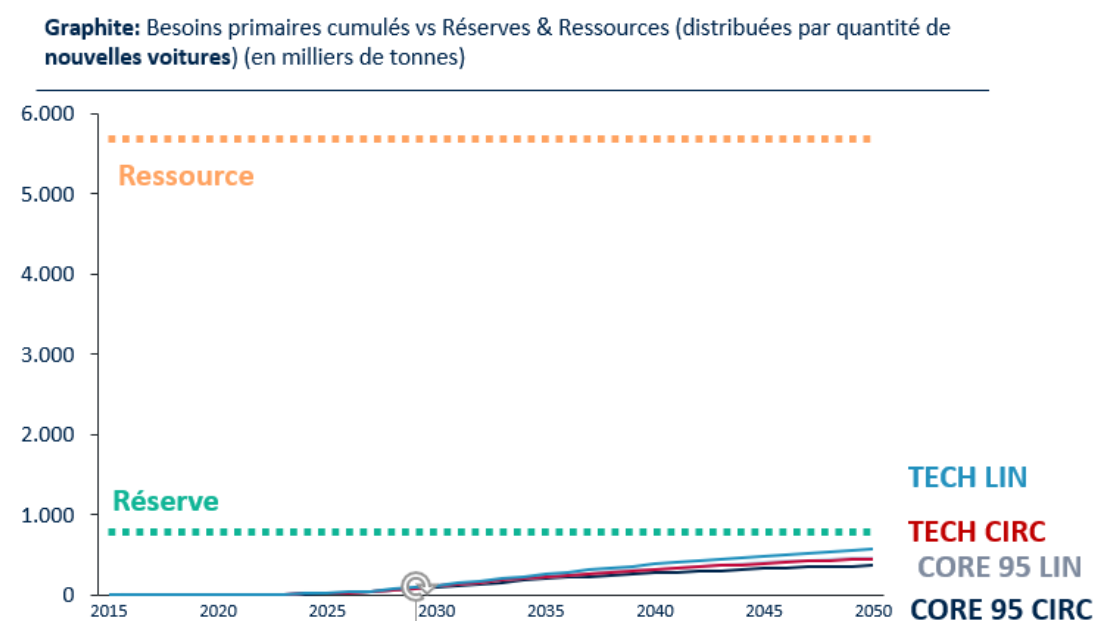


Figure 26: besoins primaires en Graphite par rapport aux estimations de réserves et ressources (disponibilité relative à la distribution de nouvelles voitures en Belgique et dans le monde (explication dans la section méthodologique))



9.3.2 Nickel

Figure 27: besoins primaires en Nickel par rapport aux estimations de réserves et ressources (disponibilité relative à la population en Belgique et dans le monde (explication dans la section méthodologique))

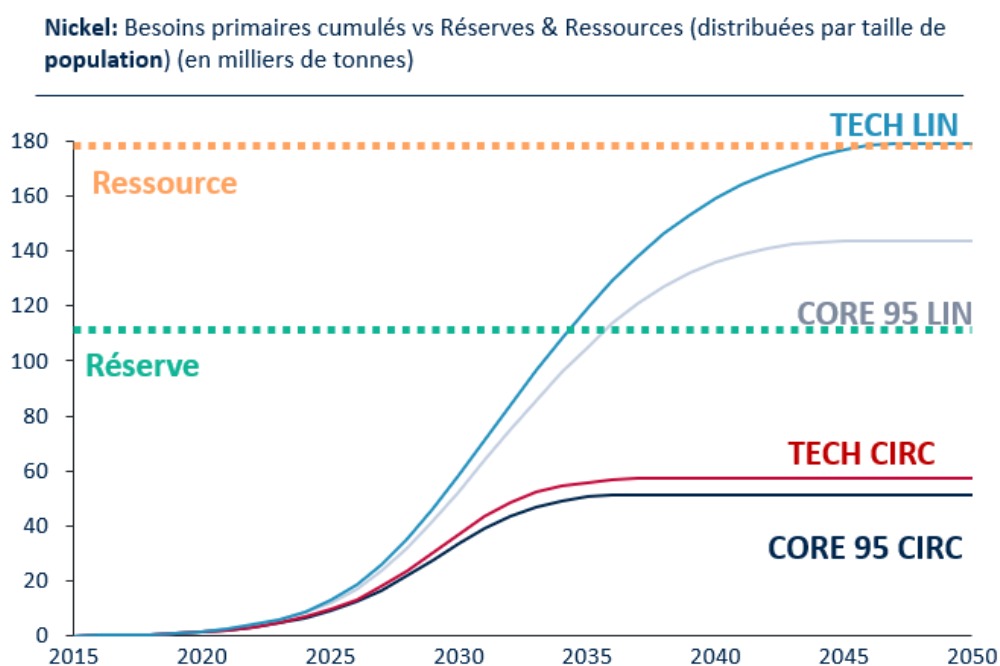
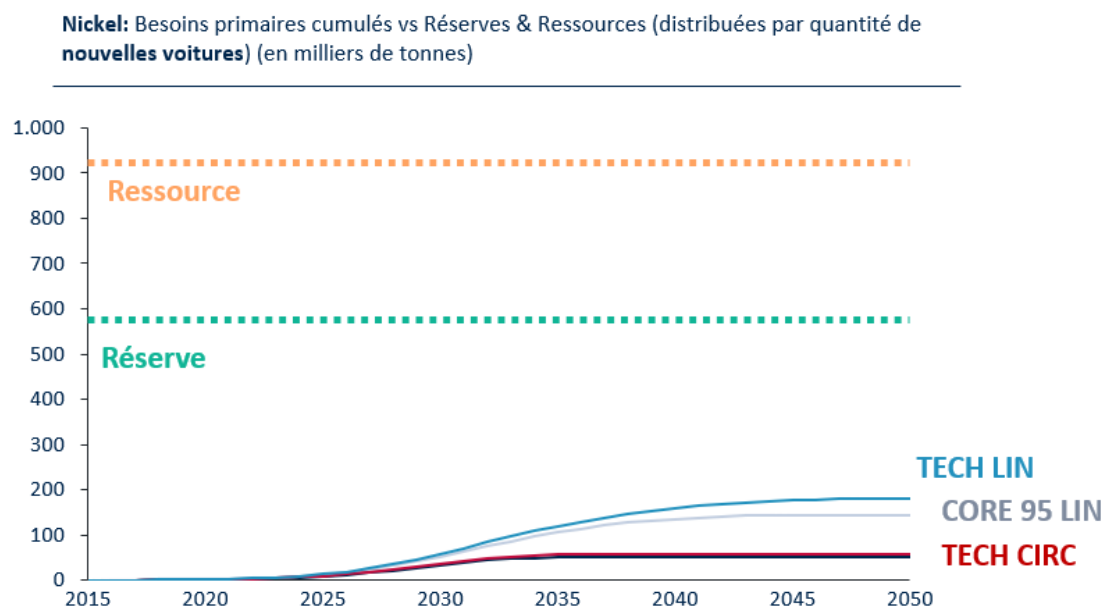


Figure 28: besoins primaires en Nickel par rapport aux estimations de réserves et ressources (disponibilité relative à la distribution de nouvelles voitures en Belgique et dans le monde (explication dans la section méthodologique))

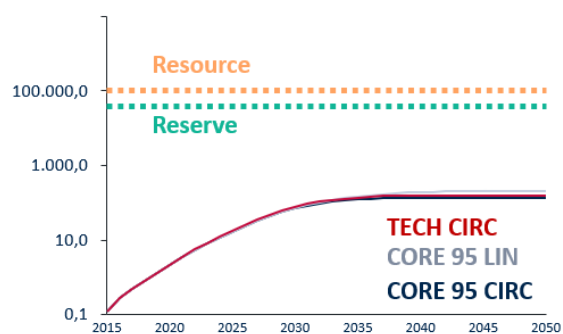


9.3.3 Aluminium et Manganèse

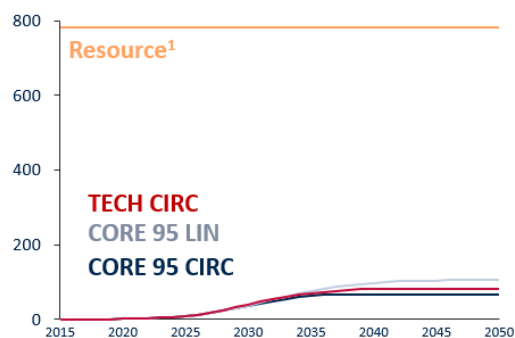
Figure 29: besoins primaires en Aluminium et Manganèse par rapport aux estimations de réserves et ressources (disponibilité relative à la population en Belgique et dans le monde (explication dans la section méthodologique))

Besoins primaires cumulés vs Réserves & Ressources (distribuées par taille de population)
(en milliers de tonnes)

Aluminum (log)



Manganese



Note: 1. No information on Manganese Reserves

10 Bibliographie

- [1] M. S. Koroma, M. Messagie, G. Cardellini, N. Brown, Novembre 2020 : Prospective Environmental Impacts of Passenger Cars under Different Energy and Steel Production Scenarios. *Energies*, 13(23), 6236. DOI: 10.3390/en13236236
- [2] N. Hooftman, M. Messagie, J. Van Mierlo, T. Coosemans, 2020 : The Paris Agreement and Zero-Emission Vehicles in Europe : Scenarios for the Road Towards a Decarbonised Passenger Car Fleet. In: B. Müller, G. Meyer (eds) *Towards User-Centric Transport in Europe 2. Lecture Notes in Mobility*. Springer, Cham. DOI : 10.1007/978-3-030-38028-1_11
- [3] J. Van Mierlo, M. Bericibar, M. El Baghdadi, C. De Cauwer, M. Messagie, T. Coosemans, V.A. Jacobs, O. Hegazy, 2021: Beyond the State of the Art of Electric Vehicles: A Fact-Based Paper of the Current and Prospective Electric Vehicle Technologies. *World Electr. Veh. J.*, 12(1), 20. DOI: 10.3390/wevj12010020
- [4] B. K. Sovacool, J. Kester, L. Noel, G.Z. de Rubens, 2019: Energy Injustice and Nordic Electric Mobility: Inequality, Elitism, and Externalities in the Electrification of Vehicle-to-Grid (V2G) Transport. *Ecological Economics*, 157, 205–217. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.11.013
- [5] R. Faria, P. Moura, J. Delgado, A.T. de Almeida, 2012: A sustainability assessment of electric vehicles as a personal mobility system. *Energy Conversion and Management*, 61, 19–30. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.02.023.
- [6] L. Noel, G. Zarazua de Rubens, B.K. Sovacool, 2018: Optimizing innovation, carbon and health in transport: Assessing socially optimal electric mobility and vehicle-to-grid pathways in Denmark. *Energy*, 153, 628–637. DOI: 10.1016/j.energy.2018.04.076
- [7] T. Yoon, C.R. Cherry, M.S. Ryerson, J.E. Bell, 2019: Carsharing demand estimation and fleet simulation with EV adoption. *Journal of Cleaner Production*, 206, 1051–1058. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.124
- [8] T. Held, L. Gerrits, 2019: On the road to electrification – A qualitative comparative analysis of urban e-mobility policies in 15 European cities. *Transport Policy*, 81, 12–23. DOI: 10.1016/j.tranpol.2019.05.014
- [9] Global Battery Alliance, 2019: A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030: Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation. In Geneva, Switzerland: World Economic Forum.
- [10] N. Campagnol, J. Eddy, T. Hagenbruch, D. Klip, C. Mulligan, J. van de Staaij, 2018: Metal mining constraints on the electric mobility horizon. *McKinsey Energy Insights*, 1-12.
- [11] M. Depraetere, O. Rix, 2019: Future impact of EVs on the Belgian electricity network, Baringa Partners LLP 2019. [en ligne]. <http://www.synerggrid.be/index.cfm?PageID=20914> [consulté le 22 juillet 2021]
- [12] M. Krzywdzinski, G. Béla, 2019: Towards a Just Transition. Coal, Cars and the World of Work. [en ligne] <http://hdl.handle.net/11159/4871> [consulté le 22 juillet 2021]
- [13] J. Patterson, 2020: Life cycle CO2e emissions from electric vehicle production and wider sustainability impacts. Ricardo Strategic Consulting. Low Carbon Vehicle Partnership. [en ligne] [consulté le 22 juillet 2021]
- [14] Low Carbon Vehicle Partnership, 2019: Powered Light Vehicles: Opportunities for Low Carbon ‘L-Category’ Vehicles in the UK. [en ligne] <https://www.zemo.org.uk/work-with-us/cars/info/powered-light-vehicles.htm> [consulté le 22 juillet 2021]
- [15] VITO, Octobre 2020: Energyville Introduces Additional Energy System Scenarios for Electricity Provision in Belgium in 2030 and 2050. [en ligne] <https://vito.be/en/news/energyville-introduces-additional-energy-system-scenarios-electricity-provision-belgium-2030> [consulté le 22 juillet 2021]
- [16] IEA, 2020: Global EV Outlook: Entering the decade of electric drive. International Energy Agency.
- [17] IEA, 2021: Global EV Outlook: Accelerating ambitions despite the pandemic. International Energy Agency.

- [18] N. Hill, D. Clarke, L. Blair, H. Menadue, 2019: Circular economy perspectives for the management of batteries used in electric vehicles. Final Project Report by Ricardo Energy & Environment for the JRC, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- [19] P. Dornier, Avril 2020: How clean are electric cars? T&E's analysis of electric car lifecycle CO₂ emissions. Transport & Environment.
- [20] L. Franckx, 2019: Total cost of ownership of electric cars compared to diesel and gasoline cars in Belgium. Federal Planning Bureau.
- [21] T. Wyns, 2020: Metals in a CarbonNeutral Europe: A Blueprint for 2050. In : Les métaux et la transition. Quelles pistes pour répondre à la demande ? Séminaire du CFDD/FRDO du 12 octobre 2020. [en ligne] https://www.frdo-cfdd.be/sites/default/files/content/download/files/01_tomas_wyns_metals_2050_report.pdf [consulté le 12 juillet 2021]
- [22] O. Beys, 2020 : Metals and transition. In : Les métaux et la transition. Quelles pistes pour répondre à la demande ? Séminaire du CFDD/FRDO du 12 octobre 2020. [en ligne] https://www.frdo-cfdd.be/sites/default/files/content/download/files/05_olivier_beys.pdf [consulté le 12 juillet 2021]
- [23] Régions belges, 2019: Plan national intégré Energie Climat Belge 2021-2030.
- [24] S. Wappelhorst, mars 2021: On the electrification path: Europe's progress towards clean transportation. European Alternative Fuels Observatory.
- [25] IndustriAll European Trade Union, 2020 : Pour une relance de l'industrie automobile européenne et ses travailleurs. Déclaration. [en ligne] https://news.industrial-europe.eu/content/documents/upload/2020/7/637299713627347292_Automotive%20Statement%20200710_FR.pdf [consulté le 12 juillet 2021]
- [26] K. Hampshire, R. German, A. Pridmore, J. Fons, 2018: Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives. Version, 2, 25. European Environment Agency.
- [27] S. Bailey, 2015: Low Energy Vehicles for Sustainable Future Transport, Loughborough University.
- [28] M. Christis, A. Vercalsteren, 2019: Impact of Circular Economy on achieving the climate targets: case mobility. CE Center publication N° 6.
- [29] European Economic and Social Committee, 2021: Sustainability requirements for batteries in the EU. Policy reference: CCMI/178-EESC-2021
- [30] N. Meilhan, 2019 : Comment faire enfin baisser les émissions de CO₂ des voitures. France stratégie. La Note d'analyse, 78.
- [31] Justice & Paix, 2020 : Les minerais de la transition énergétique, vers une société sobre en carbone pour toutes et tous. [en ligne] <https://www.justicepaix.be/mineraistransitionenergetique> [consulté le 12 juillet 2021]
- [32] L. Canals Casals, B. Amante Garcia, L.V. Cremades, 2017: Electric vehicle battery reuse: Preparing for a second life. Journal of Industrial Engineering and Management, [S.l.], v. 10, n. 2, p. 266-285. DOI: 10.3926/jiem.2009
- [33] H.E. Melin, 2019: State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries—A research review. Circular Energy Storage, 1, 1-57.
- [34] A. Milovanoff, I.D. Posen, H.L. MacLean. 2020: Electrification of light-duty vehicle fleet alone will not meet mitigation targets. Nat. Clim. Chang. 10, 1102–1107. DOI: 10.1038/s41558-020-00921-7
- [35] RECHARGE The Advanced Rechargeable & lithium Batteries Association, 2019: Industrial investment for battery cell manufacturing in Europe. [en ligne] <https://rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2020/01/RECHARGE-Position-Paper-Industrial-Investment-December-2019.pdf> [consulté le 12 juillet 2021]

- [36] J. Lelieveld, K. Klingmüller, A. Pozzer, R. T. Burnett, A. Haines, V. Ramanathan, 2019: Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. National Academy of Sciences, 116 (15), 7192-7197. DOI: 10.1073/pnas.1819989116
- [37] Groupe Renault, 28 décembre 2020: All There is to Know about Renault Twizy. [en ligne] <https://easyelectriclife.groupe.renault.com/en/outlook/markets/all-there-is-to-know-about-renault-twizy/> [consulté le 22 juillet 2021]
- [38] A. Krajinska, novembre 2020: A new Dieselgate in the making. Transport & Environment. [en ligne] https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_11_Plugin_hybrids_report_final.pdf?fbclid=IwAR1FU5DTevwH7Rgx5CHXow8HTNALkzLWvGtyHauwRvLV_snVsxE_hzGYmA [consulté le 22 juillet 2021]
- [39] M. Salisbury, septembre 2020: The future of vehicle to grid (V2G) EV charging. FleetPoint. [en ligne] <https://www.fleetpoint.org/electric-vehicles-2/vehicle-to-grid/the-future-of-vehicle-to-grid-v2g-ev-charging/> [consulté le 22 juillet 2021]
- [40] FRDO CFDD, février 2021: Webinaire EU Battery Regulation. [en ligne] <https://www.frdo-cfdd.be/fr/interne/2402-webinaire-eu-battery-regulation> [consulté le 22 juillet 2021]
- [41] TDI Sustainability, 2020: TDI Sustainability's Alert Index for Responsible Sourcing. [en ligne] https://tools.tdi-sustainability.com/airs_map [consulté le 22 juillet 2021]
- [42] M. Lavietes, décembre 2019: Tesla, Apple among firms accused of aiding child labor in Congo. Reuters. [en ligne] <https://www.reuters.com/article/us-usa-mining-children-trfn/tesla-apple-among-firms-accused-of-aiding-child-labor-in-africa-idUSKBN1YK24F> [consulté le 22 juillet 2021]
- [43] H. Ritchie, M. Roser, 2020: CO₂ and Greenhouse Gas Emissions, Emissions by sector. Our World in Data. [en ligne] <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector> [consulté le 2 avril 2021]
- [44] C. Aichberger, G. Jungmeier, 2020: Environmental Life Cycle Impacts of Automotive Batteries Based on a Literature Review. Energies, 13(23), 6345. DOI: 10.3390/en13236345
- [45] N. Hill, S. Amaral, S. Morgan-Price, T. Nokes, J. Bates, H. Helms, H. Fehrenbach, K. Biemann, N. Abdalla, J. Jöhrens, E. Cotton, L. German, A. Harris, S. Ziem-Milojevic, S. Haye, C. Sim, A. Bauen, 2020: Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA. Final Report for the European Commission. Ricardo Energy & Environment.
- [46] IEA, 2020: Electricity generation by source, Estonia 1990-2019. In: Electricity Information 2020. [en ligne] <https://www.iea.org/countries/estonia> [consulté le 22 juillet 2021]
- [47] A. Mönnig, C. Schneemann, E. Weber, G. Zika, R. Helmrich, 2019: Electromobility 2035 Economic and labour market effects through the electrification of powertrains in passenger cars. [en ligne] <http://hdl.handle.net/10419/204855> [consulté le 22 juillet 2021]
- [48] E. Bannon, décembre 2018: Dramatic job creation finding in e-vehicles study. Transport & Environment. [en ligne] <https://www.transportenvironment.org/news/dramatic-job-creation-finding-e-vehicles-study> [consulté le 22 juillet 2021]
- [49] Volkswagen Group, 15 mars 2021: Power Day: Volkswagen presents technology roadmap for batteries and charging up to 2030. Press release. [en ligne] <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/power-day-volkswagen-presents-technology-roadmap-for-batteries-and-charging-up-to-2030-6891> [consulté le 2 avril 2021]
- [50] Volkswagen Group, 19 mars 2021: Volkswagen threatens to leave Germany's car lobby VDA in spat over e-cars. [en ligne] <https://www.cleanenergywire.org/news/volkswagen-threatens-leave-germanys-car-lobby-vda-spat-over-e-cars> [consulté le 2 avril 2021]
- [51] F. Herrmann, W. Beinhauer, D. Borrmann, M. Hertwig, J. Mack, T. Potinecke, C.P. Praeg, P. Rally, novembre 2020: Employment 2030 Effects of Electric Mobility and Digitalisation on the Quality and Quantity of Employment at Volkswagen. Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO. [en ligne] [consulté le 22 juillet 2021]

- [52] Boston Consulting Group, July 2021: E-mobility: A green boost for European automotive jobs? Platform for electromobility. [en ligne] https://www.platformelectromobility.eu/wp-content/uploads/2021/07/20210702-E-mobility_EU-Report_SUMMARY_vfinal.pdf [consulté le 22 juillet 2021]
- [53] CLIMACT, 2021: 2050 Pathways Explorer - Belgium. [en ligne] <https://becalc.netzero2050.be/> [consulté le 22 juillet 2021]
- [54] CLIMACT, 2021: EUALC – Transition Pathways Explorer. [en ligne] <http://tool.european-calculator.eu/intro> [consulté le 22 juillet 2021]
- [55] IIASA, 2021: The GAINS Model. International Institute for Applied Systems Analysis. [en ligne] <https://iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/air/GAINS.html> [consulté le 22 juillet 2021]
- [56] Amnesty International, 2016: République Démocratique du Congo. « Voilà Pourquoi On Meurt » Les Atteintes aux Droits Humains en République Démocratique du Congo Alimentent le Commerce Mondial du cobalt. N° d'index: AFR 62/3183/2016. [en ligne] <https://www.amnesty.org/download/Documents/AFR6231832016FRENCH.pdf> [consulté le 22 juillet 2021]
- [57] J. Piguet (réalisateur), 2020: À Contre sens. [en ligne] <https://vimeo.com/ondemand/acontresensap> [consulté le 22 juillet 2021]
- [58] UNICEF, décembre 2014.: Factsheet: enfants dans les mines. [en ligne]
- [59] OCDE, 2013: Guide OCDE sur le devoir de diligence pour des chaînes d'approvisionnement responsables en minerais provenant de zones de conflit ou à haut risque. Éditions OCDE. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264111158-fr> [en ligne] <https://www.oecd.org/fr/investissement/mne/GuideEdition2.pdf> [consulté le 2 avril 2021]
- [60] F. Scheele, E. de Haan, V. Kiezebrink, 2016: cobalt blues Environmental pollution and human rights violations in Katanga's copper and cobalt mines. SOMO. [en ligne] <https://goodelectronics.org/wp-content/uploads/sites/3/2016/04/cobalt-blues.pdf> [consulté le 22 juillet 2021]
- [61] N. Niarchos, mai 2021: The Dark Side of Congo's cobalt Rush. The New Yorker. [en ligne] <https://www.newyorker.com/magazine/2021/05/31/the-dark-side-of-congos-cobalt-rush> [consulté le 2 avril 2021]
- [62] B. Jerez, I. Garcés, R. Torres, 2021: lithium extractivism and water injustices in the Salar de Atacama, Chile: The colonial shadow of green electromobility. Political Geography, 87, 102382, ISSN 0962-6298, DOI: 10.1016/j.polgeo.2021.102382
- [63] C. Banza Lubaba Nkulu, L. Casas, V. Hauroid, T. De Putter, N.D. Saenen, et. al., 2018: Sustainability of artisanal mining of cobalt in DR Congo. Nature sustainability, 1(9), 495-504. DOI: 10.1038/s41893-018-0139-4
- [64] D. Van Brusselen, T. Kayembe-Kitenge, S. Mbuyi-Musanzayi, T. Lubala Kasole, L. Kabamba Ngombe, P. Musa Obadia, et al., 2020: Metal mining and birth defects: a case-control study in Lubumbashi, Democratic Republic of the Congo. Lancet Planet Health, 4(4), e158-167. DOI: 10.1016/S2542-5196(20)30059-0
- [65] H.N. Jong, décembre 2019: Nickel mining resisted in Indonesia. [en ligne] <https://chinadialogue.net/en/business/11727-nickel-mining-resisted-in-indonesia-2/> [consulté le 2 avril 2021]
- [66] Wewer, A., Bilge, P., Dietrich, F. (2021). Advances of 2nd Life Applications for lithium Ion Batteries from Electric Vehicles Based on Energy Demand.
- [67] Hao, H., Qiao, Q., Liu, Z., & Zhao, F. (2017). Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production: The China 2025 case.
- [68] Qiao, Q., Zhao, F., Liu, Z., & Hao, H. (2019). Electric vehicle recycling in China: Economic and environmental benefits. Resources, Conservation and Recycling.
- [69] Hoekstra, A. (2019). The Underestimated Potential of Battery Electric Vehicles to Reduce Emissions. Joule, Volume 3, Issue 6, Pages 1412-1414. ISSN 2542-4351. DOI: 10.1016/j.joule.2019.06.002.

- [70] Martin, B. Pestiaux J., Schobbens Q., Emmrich, J., Hagemann M., (2020). A radical transformation of mobility in Europe: Exploring the decarbonisation of the transport sector by 2040 [en ligne] <https://CLIMACT.com/en/case/decarbonisation-of-transport-by-2040/> [consulté le 11 août 2021]
- [71] Milovanoff, A., Posen, I.D. & MacLean, H.L. Electrification of light-duty vehicle fleet alone will not meet mitigation targets. (2020) Nat. Clim. Chang. 10, 1102–1107. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00921-7>
- [72] European Environment Agency (2020) Range of life-cycle CO2 emissions for different vehicle and fuel types (infographic) [en ligne] https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/545dee1b655e4033bcbf92ff4b58a9a2 [consulté le 13 août 2021]
- [73] Tugce Yuksel et al (2016) Effect of regional grid mix, driving patterns and climate on the comparative carbon footprint of gasoline and plug-in electric vehicles in the United States. Environ. Res. Lett. 11 044007 [en ligne] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/4/044007>
- [74] ECOS, European Environmental Bureau, Deutsche Umwelthilfe, Transport & Environment, (2021). Enhancing the sustainability of batteries: a joint NGOS' position paper on the EU battery regulation proposal. [en ligne] https://mk0eeborgicuytuf7e.kinstacdn.com/wp-content/uploads/2021/03/Enhancing-the-sustainability-of-batteries_w.pdf [consulté le 13 août 2021]
- [75] Eyl-Mazzega, M-A., Pour une production responsable de minerais et métaux à l'échelle internationale (2021). Le Monde [en ligne] https://www.lemonde.fr/idees/article/2021/09/05/pour-une-production-responsable-de-minerais-et-metaux-a-l-echelle-internationale_6093493_3232.html [consulté le 6 septembre 2021]
- [76] Commission Européenne, Proposition de RÈGLEMENT DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL relatif aux batteries et aux déchets de batteries, abrogeant la directive 2006/66/CE et modifiant le règlement (UE) 2019/1020, (2020). [en ligne] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX:52020PC0798> [consulté le 3 avril 2021]
- [77] Secrétariat général du Conseil de l'Union Européenne, Proposition de RÈGLEMENT DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL relatif aux batteries et aux déchets de batteries, abrogeant la directive 2006/66/CE et modifiant le règlement (UE) 2019/1020 - Progress report - Conseil "Environnement", (2021). [en ligne] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=consil%3AST_9052_2021_REV_1 [consulté le 1 septembre 2021]
- [78] Parlement Européen, Towards a mandatory EU system of due diligence for supply chains, (2020). [en ligne] [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/659299/EPRS_BRI\(2020\)659299_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/659299/EPRS_BRI(2020)659299_EN.pdf) [consulté le 7 septembre 2021]
- [79] International Labour Organization, C169 - Indigenous and Tribal Peoples Convention, 1989 (No. 169) [en ligne] https://www.ilo.org/dyn/normlex/en/f?p=NORMLEXPUB:12100:0::NO::P12100_ILO_CODE:C169 [consulté le 7 septembre 2021]
- [80] Lisacar website, section « à propos » [en ligne] <https://www.lisacar.eu/a-propos/> [consulté le 7 septembre 2021]
- [81] Eurostat (2021). Passenger cars in the EU. [en ligne] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger_cars_in_the_EU#Overview [consulté le 08 octobre 2021]
- [82] Global witness (5 déc. 2018). The LME Responsible Sourcing position paper: A Joint NGO statement. [en ligne] <https://www.globalwitness.org/en/press-releases/lme-responsible-sourcing-position-paper-joint-ngo-statement/> [consulté le 11 oct. 2021]
- [83] United Nations (2011). Guiding Principles on Business and Human Rights. Implementing the United Nations "Protect, Respect and Remedy" Framework. [en ligne] https://www.ohchr.org/documents/publications/guidingprinciplesbusinessshr_en.pdf [consulté le 11 oct. 2021]
- [84] OECD (2011), OECD Guidelines for Multinational Enterprises, OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264115415-en>

- [85] CLIMACT, NewClimate Institute (2020). A radical transformation of mobility in Europe: Exploring the decarbonisation of the transport sector by 2040. Explorative scenario and related policy packages. Commissioned by Greenpeace.
- [86] High Level Panel for a Sustainable Ocean Economy (2020) What Role for Ocean-Based Renewable Energy and Deep-Seabed Minerals in a Sustainable Future? [en ligne] <https://oceanpanel.org/sites/default/files/2020-10/Ocean%20Energy%20and%20Deep-Sea%20Minerals%20Full%20Paper.pdf>
- [87] James R. Hein, Kira Mizell, Andrea Koschinsky, Tracey A. Conrad (2013), Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources, Ore Geology Reviews, Volume 51, Pages 1-14, ISSN 0169-1368, [en ligne] <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.12.001>
- [88] The metals company (2021) Company website [en ligne] <https://metals.co/nodules/> [consulté le 1 octobre 2021]
- [89] ISA (2021), Draft Exploitation Regulations [en ligne] <https://www.isa.org.jm/mining-code/ongoing-development-regulations-exploitation-mineral-resources-area> [consulté le 1 octobre 2021]
- [90] SBMA (2020) Licensing process for seabed exploration [en ligne] <https://www.sbma.gov.ck/news-3/article42> [consulté le 1 octobre 2021]
- [91] The Japan Times (2017), Japan successfully undertakes large-scale deep-sea mineral extraction [en ligne] <https://www.japantimes.co.jp/news/2017/09/26/national/japan-successfully-undertakes-large-scale-deep-sea-mineral-extraction/#.XuiYffkzY2w> [consulté le 1 octobre 2021]
- [92] JOGMEC (2020), JOGMEC Conducts World's First Successful Excavation of Cobalt-Rich Seabed in the Deep Ocean, Excavation Test Seeks to Identify Best Practices to Access Essential Green Technology Ingredients While Minimizing Environmental Impact [en ligne] http://www.jogmec.go.jp/english/news/release/news_01_000033.html [consulté le 1 octobre 2021]
- [93] Reuters (2021), Norway eyes sea change in deep dive for metals instead of oil [en ligne] <https://www.reuters.com/article/us-norway-deepseamining-insight-idUSKBN29H1YT> [consulté le 1 octobre 2021]
- [94] DSCC (2019), DSCC Position Statement on Deep Seabed Mining [en ligne] http://www.savethehighseas.org/wp-content/uploads/2019/08/DSCC-Position-Statement-on-Deep-Seabed-Mining_July2019.pdf [consulté le 1 octobre 2021]
- [95] IUCN (2021), Protection of deep-ocean ecosystems and biodiversity through a moratorium on seabed mining [en ligne] <https://www.iucncongress2020.org/motion/069> [consulté le 1 octobre]
- [96] Deep-sea mining statement (2020), Marine Expert Statement Calling for a Pause to Deep-Sea Mining [en ligne] <https://www.seabedminingsciencstatement.org/> [consulté le 1 octobre 2021]
- [97] Reuters (2021), EU should promote moratorium on deep-sea mining, lawmakers say [en ligne] <https://www.reuters.com/business/environment/eu-should-promote-moratorium-deep-sea-mining-lawmakers-say-2021-06-09/> [consulté le 1 octobre 2021]
- [98] No deep seabed mining call for a moratorium, Official website [en ligne] <https://www.noseabedmining.org/> [consulté le 1 octobre 2021]
- [99] Amnesty International, Transport & Environment (2021), THE EU BATTERY REGULATION DUE DILIGENCE RULES ENSURING THAT HUMAN RIGHTS AND THE ENVIRONMENT ARE NOT CASUALTIES OF THE ENERGY TRANSITION [en ligne] <https://www.amnesty.eu/news/the-eu-battery-regulation-due-diligence-rules-ensuring-that-human-rights-and-the-environment-are-not-casualties-of-the-energy-transition/> [consulté le 6 octobre 2021]
- [100] Amnesty International (10 déc. 2019). Iles Salomon, inquiétudes liées au projet de mine. [en ligne] <https://www.amnesty.be/infos/actualites/article/iles-salomon-inquietudes-liees-projet> [consulté le 11 oct. 2021]

- [101] Human Rights Watch (22 juillet 2021). L'aluminium, angle mort du secteur automobile. [en ligne] <https://www.hrw.org/fr/report/2021/07/22/laluminium-angle-mort-du-secteur-automobile/pourquoi-les-construc-teurs> [consulté le 11 oct. 2021]
- [102] <https://www.nature.com/articles/d41586-021-02760-8>
- [103] Commission Européenne (2021), Proposition de RÈGLEMENT DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL modifiant le règlement (UE) 2019/631 en ce qui concerne le renforcement des normes de performance en matière d'émissions de CO2 pour les voitures particulières neuves et les véhicules utilitaires légers neufs conformément à l'ambition accrue de l'Union en matière de climat [en ligne] https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:870b365e-eecc-11eb-a71c-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF [consulté le 13 octobre 2021]
- [104] Transport & Environment (2021), Worrying trend towards heavily polluting SUVs undermines carmakers' sustainability claims [en ligne] <https://www.transportenvironment.org/discover/worrying-trend-towards-heavily-polluting-suvs-undermines-carmakers-sustainability-claims/> [consulté le 1 octobre 2021]
- [105] Transport & Environment (2021), Car CO2 standards 100% zero-emissions future, but lacking short-term ambition [en ligne] <https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/08/TE-cars-CO2-reaction-2-pager-2.pdf> [consulté le 1 octobre 2021]
- [106] Transport & Environment (2021), Cars climate brief #2: Why the EU should stop giving weaker CO2 targets to heavier cars, [en ligne] <https://www.transportenvironment.org/discover/cars-climate-brief-2-why-the-eu-should-stop-giving-weaker-co2-targets-to-heavier-cars/> [consulté le 1 octobre]
- [107] Human Rights Watch (2018), "What do we get out of it" The human rights impact of bauxite mining in Guinea, [en ligne] www.hrw.org/report/2018/10/04/what-do-we-get-out-it/human-rights-impact-bauxite-mining-guinea [consulté le 1 octobre 2021]
- [108] Business & Human Rights Resource Centre (2021), Transition Minerals Tracker [en ligne] <https://trackers.business-humanrights.org/transition-minerals/> [consulté le 1 septembre 2021]
- [109] Le Monde 13 octobre 2021, « Il faut dire que la transition énergétique ne se fera pas sans difficultés, ce sera une route cahoteuse », rappelle le patron de l'AIE [en ligne] https://www.lemonde.fr/energies/article/2021/10/13/cop26-le-patron-de-l-aie-espere-un-message-sans-ambiguite-des-etats-en-faveur-des-energies-decarbonees_6098120_1653054.html#xtor=AL-32280270-%5Btwitter%5D-%5Bios%5D [consulté le 14 octobre 2021]
- [110] Hendryx, M., Islam, M. S., Dong, G. H., & Paul, G. (2020). Air Pollution Emissions 2008-2018 from Australian Coal Mining: Implications for Public and Occupational Health. *International journal of environmental research and public health*, 17(5), 1570. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051570>
- [111] Lin, CK., Lin, RT., Chen, T. *et al.* (2019) A global perspective on coal-fired power plants and burden of lung cancer. *Environ Health* 18, 9. <https://doi.org/10.1186/s12940-019-0448-8>
- [112] Cobalt Institute (2021), How can the batteries regulation stand the test of time? [en ligne] https://www.cobaltinstitute.org/wp-content/uploads/2021/10/Batteries_Regulations_Cobalt_Institute.pdf [consulté le 1 septembre 2021]
- [113] U.S. Geological Survey [2019] National Minerals Information Center: Commodity Statistics and Information [en ligne] <https://www.usgs.gov/centers/nmic/commodity-statistics-and-information> [consulté le 3 avril 2021]
- [114] OICA [2021] 2019 Production statistics [en ligne] <https://www.oica.net/category/production-statistics/2019-statistics/> [consulté le 10 juin 2021]
- [115] Tallano, company website [en ligne] <https://www.tallano.eu/> [consulté le 1 octobre 2021]
- [116] BloombergNEF (2021), Electric Vehicle Outlook 2021 [en ligne] <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/> [consulté le 1 juin 2021]
- [117] International Energy Agency (2021), Global EV Outlook 2021 [en ligne] <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021> [consulté le 1 mai 2021]

- [118] European Environment Agency (2020), Air quality in Europe – 2020 report [en ligne] <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report> [consulté le 1 novembre 2021]
- [119] European Environment Agency (2019), Emissions of air pollutants from transport [en ligne] <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-air-pollutants-8/transport-emissions-of-air-pollutants-8> [consulté le 1 novembre 2021]
- [120] Transport & Environment (2018), Roadmap to decarbonising European cars [en ligne] https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2050_strategy_cars_FINAL.pdf [consulté le 1 novembre 2021]
- [121] De Standaard (2021), Demi met ‘realistisch ambitieus’ plan naar klimaatop in Glasgow [en ligne] https://www.standaard.be/cnt/dmf20211104_98094743 [consulté le 9 novembre 2021]
- [122] U.S. Geological Survey (2019) National Minerals Information Center: Commodity Statistics and Information [en ligne] <https://www.usgs.gov/centers/nmic/commodity-statistics-and-information> [consulté le 1 novembre 2021]
- [123] U.S. Geological Survey (2021) National Minerals Information Center: Commodity Statistics and Information [en ligne] <https://www.usgs.gov/centers/nmic/commodity-statistics-and-information> [consulté le 1 novembre 2021]
- [124] The Oxford Institute for Energy Studies (2021), The Global Battery Arms Race: Lithium-Ion Battery Gigafactories and their Supply Chain [en ligne] <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2021/02/THE-GLOBAL-BATTERY-ARMS-RACE-LITHIUM-ION-BATTERY-GIGAFACTORIES-AND-THEIR-SUPPLY-CHAIN.pdf> [consulté le 1 novembre 2021]
- [125] Transport & Environment (2021), Batteries [en ligne] <https://www.transportenvironment.org/challenges/cars/batteries/> [consulté le 1 novembre 2021]



CLIMACT

www.CLIMACT.com

info@CLIMACT.com

+32 (0) 10 750 740