

## Transition vers les véhicules électriques: enjeux et risques à la chaîne logistique

**Auteur :** Karknawi, Marwan

**Promoteur(s) :** Fortz, Bernard

**Faculté :** HEC-Ecole de gestion de l'Université de Liège

**Diplôme :** Master en ingénieur de gestion, à finalité spécialisée en Supply Chain Management and Business Analytics

**Année académique :** 2024-2025

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/22858>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

# TRANSITION VERS LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES : ENJEUX ET RISQUES LIÉS À LA CHAÎNE LOGISTIQUE

Jury:  
Promoteur:  
Bernard FORTZ  
Lecteur(s):  
Jérôme DE BOECK

Mémoire présenté par  
**Marwan KARKNAWI**  
En vue de l'obtention du diplôme de  
master en ingénieur de gestion  
à finalité spécialisée en Supply Chain  
Management & Business Analytics

Année académique 2024/2025





## Remerciements

Pour débuter, je souhaiterais remercier mon promoteur, Monsieur Bernard Fortz, d'avoir accepté mon projet de mémoire de recherche et de m'avoir prodigué des conseils judicieux tout au long de sa conception, m'aidant ainsi à atteindre les objectifs initialement énoncés.

Mes remerciements se dirigent ensuite vers mon lecteur, Monsieur Jérôme De Boeck, pour ses précieux conseils, ses remarques constructives et également pour sa disponibilité. Je le remercie pour l'intérêt qu'il porte à ce travail et lui souhaite une bonne lecture.

J'aimerais témoigner toute ma reconnaissance et mon amitié à Léo, Aurélien, Maxime, Sophie, Folan, France, et Yasmine, qui m'ont aidé et soutenu dans les bons comme dans les moins bons moments durant ces cinq belles années à HEC Liège, et avec qui nous nous sommes encouragés dans la rédaction de nos travaux de fin d'études respectifs.

Je ne peux pas écrire cette section sans remercier ma famille et les amis de la famille au sens large, qui ont toujours été à mes côtés et qui, depuis mon plus jeune âge, ont toujours cru en moi. Vers eux, je pouvais me tourner dans les moments de doute et d'incertitude, et ils étaient présents pour partager ma joie.

Enfin, je voudrais porter une attention particulière à mes amis de toujours : Can, Ninos, Robin, Tom, Anthony, Apolline, Élisa, Lara et Yunus, pour leur soutien inébranlable.

Je remercie également toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à l'élaboration de ce travail.

## Table des matières

### *Remerciements*

<i>Liste des figures</i> .....	4
--------------------------------	---

<i>Liste des tableaux</i> .....	5
---------------------------------	---

<i>Liste des abréviations</i> .....	6
-------------------------------------	---

<b>1. Introduction</b> .....	7
------------------------------	---

<b>2. Revue de littérature</b> .....	9
--------------------------------------	---

<b>2.1. Les voitures électriques : le projet</b> .....	9
--	---

2.1.1. Aspect environnemental .....	9
-------------------------------------	---

2.1.2. Aspect économique.....	10
-------------------------------	----

2.1.3. Aspect social .....	10
----------------------------	----

<b>2.2. Les batteries des voitures électriques</b> .....	11
--	----

2.2.1. Types, prix et utilisation .....	11
---	----

2.2.2. Composants clés.....	12
-----------------------------	----

2.2.3. Matières premières principales.....	12
--	----

2.2.3.1. Lithium .....	12
------------------------	----

2.2.3.2. Nickel .....	13
-----------------------	----

2.2.3.3. Cobalt.....	14
----------------------	----

<b>2.3. Acceptabilité sociale</b> .....	16
---	----

<b>2.4. Source d'électricité</b> .....	18
--	----

2.4.1. Comparaison internationale.....	18
--	----

<b>2.5. Bornes de recharge</b> .....	21
--------------------------------------	----

2.5.1. Situation internationale.....	21
--------------------------------------	----

<b>2.6. Gestion des batteries en fin de vie</b> .....	22
---	----

2.6.1. Aspect environnemental .....	22
-------------------------------------	----

2.6.2. Aspect social .....	23
----------------------------	----

2.6.3. Aspect économique.....	23
-------------------------------	----

<b>2.7. Méthodes de recyclage</b> .....	24
---	----

<b>2.8. Impact de la voiture électrique sur l'Afrique</b> .....	25
---	----

2.8.1. Barrières à l'adoption .....	26
-------------------------------------	----

<b>2.9. Afrique du Sud</b> .....	27
----------------------------------	----

2.9.1. Consommation d'électricité sud-africaine .....	27
---	----

2.9.2. Impacts environnementaux.....	27
--------------------------------------	----

2.9.2.1. Mix énergétique en Afrique du Sud .....	27
--	----

<b>3. Méthodologie</b> .....	29
------------------------------	----

<b>3.1. Introduction</b> .....	29
--------------------------------	----

<b>3.2. Outils utilisés</b> .....	29
-----------------------------------	----

<b>3.3. Public cible</b> .....	30
--------------------------------	----

3.3.1. Évaluation et ajustement du questionnaire .....	30
--	----

<b>3.4. Hypothèses</b> .....	31
------------------------------	----

3.4.1. Connaissance des impacts sociaux et environnementaux .....	31
---	----

3.4.2. Perception environnementale des véhicules électriques.....	31
---	----

3.4.3. Habitudes de recharge .....	31
------------------------------------	----

3.4.4. Impact économique des batteries.....	31
---	----

3.4.5. Absence de bruit .....	31
-------------------------------	----

3.4.6. Connaissance sur la fin du cycle de vie des véhicules électriques.....	31
3.4.7. Connaissance générale du sujet .....	31
3.4.8. Interview Engie.....	31
3.4.9. Interview Umicore.....	31
3.4.1. Interview PwC.....	32
<b>3.5. Biais.....</b>	<b>32</b>
3.5.1. Biais lié au public cible.....	32
3.5.2. Formulation des questions .....	32
3.5.3. Biais Engie.....	32
3.5.4. Biais Umicore.....	33
3.5.5. Biais PwC.....	33
<b>4. Résultats.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1. Analyse des données quantitatives .....</b>	<b>34</b>
4.1.1. Analyse descriptive.....	34
4.1.2. Test des hypothèses .....	35
4.1.3. Connaissance des impacts sociaux et environnementaux .....	35
4.1.3.1. Première association.....	35
4.1.3.2. Deuxième association .....	36
4.1.4. Perception environnementale des véhicules électriques.....	36
4.1.5. Habitudes de recharge .....	37
4.1.6. Impact économique des batteries.....	37
4.1.7. Absence de bruit .....	38
4.1.8. Connaissance sur la fin du cycle de vie des véhicules électriques.....	39
4.1.9. Connaissance générale du sujet .....	40
<b>4.2. Valeurs aberrantes et/ou résultats surprenants .....</b>	<b>41</b>
<b>4.3. Robustesse et limitations.....</b>	<b>41</b>
<b>4.4. Analyse des résultats des interviews qualitatives.....</b>	<b>41</b>
4.4.1. Entretien Engie .....	41
4.4.1.1. Contexte de l'entretien .....	41
4.4.1.2. Défis énergétiques en Belgique .....	42
4.4.1.3. Solutions pour la flexibilité .....	42
4.4.1.4. Gestion intelligente de la recharge .....	42
4.4.1.5. Solutions proposées.....	43
4.4.1.6. Risques et solutions face à la dépendance électrique .....	43
4.4.1.7. Opinion et solution concernant la transition énergétique.....	43
4.4.1.8. Défis futurs.....	43
4.4.1.9. Analyse de l'hypothèse sur la transition énergétique .....	44
4.4.2. Entretien Umicore .....	44
4.4.2.1. Contexte de l'entretien .....	44
4.4.2.2. Maturité du marché du recyclage en Europe .....	44
4.4.2.3. Processus de recyclage utilisé.....	45
4.4.2.4. Impacts positifs du recyclage .....	45
4.4.2.5. Concurrence déloyale et réduction des coûts .....	45
4.4.2.6. Durée de vie d'une batterie .....	46
4.4.2.7. Importance des batteries dans la transition énergétique.....	46
4.4.3. Entretien effectué avec un expert du secteur automobile néerlandais et européen .....	46
4.4.3.1. Défis principaux .....	46
<b>5. Discussion .....</b>	<b>50</b>
<b>5.1. Risques et enjeux.....</b>	<b>50</b>
5.1.1. Instant de la double transition .....	50
5.1.1.1. Solutions éventuelles.....	52
5.1.2. Conditions de production .....	53

5.1.2.1.    Solutions éventuelles.....	54
5.1.3.    Rôle des entreprises belges et de l'État belge.....	56
5.1.3.1.    Véhicules électriques .....	56
5.1.3.2.    Bornes électriques .....	57
5.1.3.3.    Solutions éventuelles.....	58
5.1.4.    Communication .....	60
5.1.5.    Situation des constructeurs automobiles.....	60
5.1.6.    Situation des acheteurs.....	61
5.1.6.1.    Prix des voitures électriques.....	61
5.1.6.2.    Prix des batteries .....	61
5.1.6.3.    Comparaison.....	62
5.1.7.    Seconde vie en Afrique.....	64
5.1.7.1.    Présence des outils essentiels.....	64
<b>6. Conclusion.....</b>	<b>67</b>
<b>7. Bibliographie .....</b>	<b>69</b>
<b>8. Annexes .....</b>	<b>76</b>
8.1.    Annexe 1 : tableaux et graphiques .....	76
8.2.    Annexe 2 : Guide d'entretien .....	78
8.2.1.    Quantitatif .....	78
8.2.1.1.    Questionnaire en français.....	78
8.2.1.2.    Questionnaire en anglais .....	83
8.2.1.3.    Questionnaire en néerlandais.....	87
8.2.2.    Qualitatif.....	91
8.2.2.1.    Interview Umicore .....	91
8.2.2.2.    Interview Engie .....	92
8.2.2.3.    Interview PWC .....	93

# Liste des figures

Figure 1 - Utilisation actuelle des batteries lithium-ion (Ding et al., 2019:3).....	12
Figure 2 - Répartition des réserves exploitables de nickel, basé sur les données de Kalungi et al (2024:5).....	14
Figure 3 - Impact de l'emplacement de la raffinerie sur le GWP (Das et al., 2024:13) .....	15
Figure 4 - UTAUT2 (Venkatesh et al., 2012 :5) .....	17
Figure 5 - Les émissions produites par les VE par pays en : gCO2e/km (Wilson, 2022:1) .....	19
Figure 6 - Les émissions de carbone produites par les VE par pays en : gCO2e/km (Wilson, 2022:1) .....	19
Figure 7 - Estimations de l'AFDC pour les États-Unis comparant les émissions des voitures électriques, hybrides rechargeables, hybrides et à essence (Wilson, 2022:1) .....	20
Figure 8 - 10 pays les plus avancés en matière d'énergie propre (data: BP Statistical Review of World Energy) (Lauer, 2023:1) .....	20
Figure 9 - La composition des sources d'énergie de l'Islande au fil du temps (Lauer, 2023:1) .....	21
Figure 10 - Cycle de vie de la batterie lithium-ion (Prates et al., 2023 :9) .....	25
Figure 11 - Répartition des exportateurs et des importateurs de véhicules d'occasion (based on UNEP 2020) (Prates et al., 2023:3) .....	26
Figure 12 - Répartition par langue .....	34
Figure 13 - Influence sur les décisions des répondants malgré la connaissance des effets .....	35
Figure 14 - Influence sur les décisions des répondants malgré la connaissance des effets (2).....	36
Figure 15 - La transition est-elle économiquement profitable pour les populations locales ? .....	38
Figure 16 - Impact de l'absence de bruit des véhicules électriques.....	39
Figure 17 - Production d'électricité belge par source (en térawattheures ) (Steel, 2025 :1) .....	51
Figure 18 - Combien y a-t-il de réacteurs nucléaires en Europe (Gaudiaut, 2024 : 1) .....	52
Figure 19 - Le coût d'une batterie de VE (Sergère, 2023 :1) .....	62
Figure 20 - Courbe de prix du Nickel (Nickel - Price - Chart - Historical Data - News, s. d.:1) .....	76
Figure 21 - Courbe de prix du Cobalt (Cobalt - Prix   2010-2025 Données   2026-2027 Prévisions, s. d. :1) .....	77
Figure 22 - Courbe de prix du Lithium (Lithium - Prix   2017-2025 Données   2026-2027 Prévisions, s. d. :1)....	77

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Comparaison entre la communication contrôlante et informative (Farnier, 2020:2).....	18
Tableau 2 - Comparaison des émissions de MtCO <sub>2</sub> par continent (Global Carbon Atlas, 2023) .....	25
Tableau 3 - Capacité de production et répartition de l'énergie en Afrique du Sud : 2010 & 2030 (Liu et al., 2012 :2) .....	27
Tableau 4 - Répartition des réponses "je ne sais pas" tout au long de l'enquête.....	40
Tableau 5 - Déductibilité des VE (Voitures de société électriques et stations de recharge, s. d. :1) .....	56
Tableau 6 - Déductibilité des VMT (Les voitures de société en 2025, s. d. :1) .....	56
Tableau 7 - Déductibilité des bornes de recharge(Bornes de recharge pour voitures électriques   SPF Finances, s. d. :2) .....	57
Tableau 8 - Comparaison de coût entre VMT et VE (Surcoût de l'électrique par rapport au thermique, s. d. :2) ..	63
Tableau 9 - Comparaison de la durée (en kilomètre) de conservation de plaquettes de frein (Monin, 2023:1) ..	63
Tableau 10 – Comparaison du coût de l'entretien des VE et des VMT (Monin, 2023:1) .....	63
Tableau 11 - Comparaison de la distance à effectuer avant entretien (Monin, 2023:1) .....	64
Tableau 12 - Facteur facilitateur ou menaçant l'autonomie (Farnier, 2020 :2) .....	76

## Liste des abréviations

A.S.M.: Artisanal and Small-Scale Mining (mines artisanales et à petite échelle)

A.V.A.S.: Acoustic Vehicle Alerting System (système d'alerte acoustique pour les véhicules)

B.Y.D.: Build Your Dreams (construisez vos rêves)

C.E.1.D.: Certificat d'Études du Premier Degré de l'enseignement secondaire

C.E.S.S.: Certificat d'Enseignement Secondaire Supérieur

C.h.: Cheval-Vapeur, unité de mesure concernant le secteur automobile

E.M.E.A.: Europe Middle East & Africa (Europe Moyen-Orient et Afrique)

gCO<sub>2</sub>/km: Grammes de CO<sub>2</sub> émis par kilomètre parcouru

G.W.P.: Global Warming Potential (Potentiel de réchauffement global)

k.W.: Kilowatt

L.I.B.: Lithium-Ion Battrey (Batterie Lithium-Ion)

L.S.M.: Large-Scale Mining (mines industrielles à grande échelle)

M.t : Mégatonne (un million de tonnes)

N.O.x: Oxyde d'azote

P.M.2.5.: Particulate Matter 2.5 (les particules fines en suspension dans l'air dont le diamètre est inférieur ou égal à 2,5 micromètres)

P.N.U.E.: Programme des Nations Unies pour l'Environnement

R.D.C.: République Démocratique du Congo

S.O<sub>2</sub> : Dioxyde de soufre

U.T.A.U.T.: Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (Théorie Unifiée de l'Acceptation et de l'Utilisation de la Technologie)

V.E.: Véhicule Électrique

V.M.T.: Véhicule à Moteur Thermique

# 1. Introduction

Dans un contexte où la nécessité d'évoluer vers des modes de transport plus respectueux de l'environnement se fait de plus en plus pressante, nous vivons aujourd'hui dans une véritable ère de transition. L'adoption progressive de la voiture électrique s'inscrit dans cet objectif global, notamment pour répondre aux directives de l'Union européenne. En effet, l'Union a inscrit dans sa législation l'ambition d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, avec pour objectif intermédiaire une réduction d'au moins 55 % des émissions nettes de gaz à effet de serre d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 1990. Cette réglementation concerne particulièrement le secteur du transport routier, qui, à travers les véhicules utilitaires légers et lourds, est responsable de plus de 70 % des émissions totales du secteur. Pour parvenir à la neutralité climatique, une réduction de 90 % des émissions du secteur des transports est indispensable d'ici 2050.

Dans le cadre de ce mémoire, j'ai souhaité analyser en profondeur les différentes étapes de conception d'une voiture électrique ainsi que le cycle de vie de cette dernière, afin d'évaluer si elle constitue véritablement une alternative plus respectueuse de l'environnement. Cette transition ne peut toutefois être considérée uniquement sous l'angle écologique ; il est selon moi essentiel d'y intégrer également les dimensions économique et sociale, car privilégier l'un de ces aspects au détriment des autres pourrait compromettre l'équilibre nécessaire à une transition durable (Purvis et al., 2019).

Par ailleurs, bien que cette dynamique soit initiée par une directive européenne, ses répercussions dépassent largement les frontières de l'Union. Il est donc crucial d'évaluer l'impact de cette transition sur d'autres régions du monde, en particulier sur les populations des pays en voie de développement. L'analyse de la chaîne logistique et du cycle de vie des véhicules électriques vise ainsi à s'assurer que la poursuite des objectifs européens ne passe pas par l'exploitation de populations vulnérables.

Enfin, au vu du contexte géopolitique actuel, il m'a semblé pertinent d'examiner la dépendance de l'Union européenne vis-à-vis des pays tiers pour la production de véhicules électriques. En effet, les dernières années ont particulièrement été marquées par la rivalité entre la Chine, l'Europe, le Canada et les États-Unis pour le contrôle des chaînes d'approvisionnement (Lan, 2024), ainsi que par la situation actuelle en Afrique, où la guerre en RDC complique l'accès aux minerais essentiels (De Luca et al., 2012). L'objectif est de déterminer dans quelle mesure l'Europe serait capable de poursuivre cette transition de manière autonome, notamment en cas de tensions internationales.

C'est dans cette optique que s'inscrit la question de recherche de ce mémoire : **« Quels sont les défis critiques pour l'environnement, l'économie et la société causés par la chaîne logistique lors de la transition des véhicules thermiques aux véhicules électriques ? »**. L'analyse proposée reposera principalement sur l'étude du cycle de vie des véhicules électriques.

Ce mémoire sera structuré autour des principes fondamentaux de l'analyse du cycle de vie. L'objectif est d'étudier l'ensemble des étapes clés de cette transition, en commençant par l'extraction des matières premières nécessaires à la fabrication des véhicules électriques. L'analyse se poursuivra par l'étude de l'apport en électricité et des infrastructures indispensables à leur utilisation, pour se terminer par l'examen de la seconde vie et de la fin de vie de ces véhicules.

Dans un second temps, ce mémoire se concentrera sur la revue de littérature, celle-ci étant structurée sur base de l'analyse du cycle de vie. Cette revue permettra de rassembler et d'analyser les informations issues de la littérature scientifique, au regard des enjeux environnementaux, économiques et sociaux liés à la transition vers les véhicules électriques.

Le chapitre trois présentera la méthodologie de recherche adoptée, qui combine à la fois des approches qualitatives et quantitatives. La réalisation de ce mémoire a nécessité une grande flexibilité, notamment dans l'adaptation des questions de recherche, en raison de la complexité technique du

sujet et de son impact direct sur l'ensemble de la population, puisque cette transition devra être acceptée collectivement.

Le quatrième chapitre sera divisé en deux parties : la première présentera les résultats des enquêtes menées auprès de la population, tandis que la seconde exposera les retours d'experts du secteur et d'entreprises jouant un rôle clé dans cette transition.

Le cinquième chapitre sera consacré à la discussion. Il visera à établir des liens entre la revue de littérature et les résultats obtenus, afin de tirer de nouvelles conclusions, d'enrichir les connaissances existantes et de proposer des analyses comparatives.

Enfin, le dernier chapitre sera dédié à la conclusion. Celle-ci reprendra les idées principales développées tout au long du mémoire, en s'appuyant sur les enseignements tirés de la littérature et des enquêtes réalisées.

## 2. Revue de littérature

### 2.1. Les voitures électriques : le projet

Un rapport de l'Union européenne faisait déjà la constatation en 2011 que « *Le secteur des transports est responsable de près de 28 % des émissions totales de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), tandis que le transport routier représente plus de 70 % des émissions du secteur des transports.* » (Sanguesa et al., 2021:1). Pour réduire cette empreinte carbone, plusieurs pays encouragent désormais l'adoption de la voiture électrique comme solution efficace pour limiter les émissions liées aux transports (Sanguesa et al., 2021).

Les véhicules électriques ne sont pas une innovation récente : ils sont au cœur de projets et de recherches depuis de nombreuses années. Cependant, ces projets doivent faire face à des défis tels que le coût de ces voitures et leur autonomie, qui est réduite par rapport à celle des voitures thermiques (Berlier, 2015).

Le principe même d'une voiture électrique est que celle-ci utilise l'électricité qu'elle a emmagasinée comme carburant pour effectuer un trajet entre deux points fixes (Berlier, 2015). Cette électricité provient du réseau électrique et est présente dans les batteries, qui alimentent ensuite le moteur. Ce dernier transmet alors l'énergie aux roues pour les faire tourner (Campanari et al., 2009).

Lorsque l'on examine le cycle de vie d'un produit, il est essentiel de prendre en considération la production de ce dernier, qui constitue la première étape du processus. Les matières premières constituent l'élément clé de cette première phase. Ensuite, il est crucial d'analyser la logistique et le transport, incluant les modes routiers, ferroviaires, et maritimes. Vient alors la phase d'utilisation, qui se concentre sur la consommation d'énergie, l'entretien, et la maintenance. En quatrième lieu, nous abordons les infrastructures d'approvisionnement, telles que les bornes de recharge dans le cas de nos voitures électriques. Enfin, lors de la fin de vie du véhicule, le recyclage constitue l'étape finale (Berlier, 2015).

Pour être présentes sur le marché des voitures électriques, les principales puissances mondiales ont déboursé des sommes très importantes. En 2009, les États-Unis ont d'abord investi 2,4 milliards de dollars pour soutenir la recherche. En 2017, l'Union européenne, quant à elle, a investi 43 milliards ; et celle-ci espère que cette somme va augmenter pour atteindre 225 milliards d'euros. Pour ce qui est de la Chine, 15 milliards de dollars américains ont été investis dans ce marché. Depuis 2015, c'est la Chine qui est numéro 1 sur le marché mondial des voitures électriques, bien aidée par les infrastructures mises en place par le gouvernement chinois qui avait comme objectif pour l'année 2020 d'avoir 120.000 bornes électriques présentes dans tout le pays (Ding et al., 2019).

#### 2.1.1. Aspect environnemental

Si nous prenons en compte le processus de production des voitures électriques, les véhicules électriques peuvent polluer jusqu'à 50 % en plus que les véhicules thermiques. Afin d'illustrer ce propos, les émissions de CO<sub>2</sub> pour la production d'une voiture électrique sont de 10,5 tonnes alors que celles d'une voiture thermique s'élèvent à 7 tonnes (Berlier, 2015).

En raison du niveau élevé d'émissions durant sa production, un véhicule électrique devient d'autant plus avantageux qu'il parcourt un grand nombre de kilomètres. En effet, plus le véhicule électrique est utilisé sur de longues distances (lorsqu'il atteint un kilométrage global élevé sur toute sa durée de vie), plus l'impact environnemental initial de sa production est compensé par l'absence d'émissions directes lors de son utilisation, ce qui réduit son empreinte carbone globale sur la durée (Berlier, 2015). En

Europe, la neutralité carbone des véhicules électriques est généralement atteinte après environ 18.000 kilomètres de conduite. Toutefois, cela varie en fonction de la composition énergétique du pays où le véhicule électrique (VE) est utilisé (Evans, 2023).

### 2.1.2. Aspect économique

D'un point de vue économique, bien que son prix d'achat soit particulièrement élevé, la voiture électrique pourrait devenir moins rentable à long terme pour les constructeurs automobiles. En effet, les moteurs électriques sont dits sans nécessité d'entretien, ce qui, à terme, entraîne une diminution du chiffre d'affaires et du bénéfice des constructeurs (Berlier, 2015). De plus, cette transition entraînera une perte d'emplois au sein des constructeurs automobiles. Selon l'Union de l'industrie automobile allemande (VDA), cette perte est estimée à 190.000 emplois en Europe d'ici 2035, bien que des emplois soient créés de manière simultanée dans le domaine de l'ingénierie automobile. Le bilan restera néanmoins négatif (Bellanger, 2024).

Une autre étude, menée par PwC Strategy qui a été mandaté par l'Association européenne des fournisseurs automobiles (CLEPA), a démontré que le secteur de la fabrication automobile représentait actuellement plus de 5 % de l'emploi industriel dans 13 États membres de l'Union européenne. Selon cette étude, 501.000 emplois seront supprimés en raison de cette transition vers le véhicule électrique, et 70 % de ces pertes se concentreront entre 2030 et 2035, engendrant des conséquences économiques désastreuses. Bien que, parallèlement, 226.000 nouveaux emplois pourraient être créés, notamment dans les chaînes de production de batteries, cela aboutirait à une perte nette de 275.000 postes (CLEPA, 2021).

Bien que les deux études susmentionnées arrivent à des conclusions différentes en termes d'emplois menacés, ces dernières se rejoignent sur un aspect fondamental : des emplois vont disparaître, qui ne seront pas entièrement compensés par ceux créés via les nouvelles chaînes de production des VE.

### 2.1.3. Aspect social

D'un point de vue social, la transition vers les voitures électriques aura des conséquences importantes. En 2017, 54 % des Français considéraient le bruit des transports comme la principale source de nuisances. Il est important de souligner que si ce type de bruit n'affecte pas le système auditif des personnes, il peut néanmoins accroître le stress ou l'anxiété. Cela constitue donc un avantage de la voiture électrique actuelle, celle-ci est moins bruyante que la voiture thermique traditionnelle (Domergue & Taszka, 2017).

Cependant, cette réduction des bruits est également perçue comme un désavantage, car les voitures électriques, associées à l'augmentation des revêtements routiers réduisant le bruit, pourraient constituer un danger pour les usagers vulnérables qui dépendent de leurs sens visuels et auditifs pour se déplacer en sécurité en milieu urbain. En effet, en l'absence de signaux auditifs liés au passage de ces véhicules à faible vitesse, le risque d'accident augmente, notamment pour les piétons et, plus particulièrement, pour les personnes malvoyantes ou celles se déplaçant dans des zones peu éclairées (Pardo-Ferreira et al., 2020).

Par conséquent, tous les véhicules électriques et hybrides vendus dans l'Union européenne et aux États-Unis après le 1er juillet 2019 doivent être équipés d'un système d'alerte acoustique, appelé Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS). Ce dispositif émet un son lorsque le véhicule roule à une vitesse comprise entre 0 et 30 km/h afin d'alerter les piétons de sa présence (Laib & Schmidt, 2019).

Malheureusement, l'impact négatif de ces alertes sonores, notamment lorsque plusieurs véhicules AVAS circulent simultanément, n'a pas été pleinement pris en compte. Cela peut entraîner une pollution sonore accrue et une altération de l'environnement acoustique urbain (Laib & Schmidt, 2019).

Les véhicules électriques, en générant moins de bruit en circulation urbaine que les moteurs thermiques, offrent une opportunité de réduire la pollution sonore, qui constitue un facteur de risque pour la santé humaine. Toutefois, l'AVAS, bien que conçu pour améliorer la sécurité des usagers, pourrait paradoxalement entraîner une nuisance sonore supplémentaire et altérer la qualité de vie en ville (Laib & Schmidt, 2019).

Bien que l'impact sonore constitue un point essentiel, l'un des principaux défis liés à la transition vers les véhicules électriques concerne la batterie de celle-ci, tant en termes de technologie que de coûts (Waseem et al., 2025). Ce point est abordé dans le sous-chapitre suivant.

## 2.2. Les batteries des voitures électriques

### 2.2.1. Types, prix et utilisation

Le type de batterie présent dans les voitures électriques a évolué au fil des tentatives. Initialement, des batteries nickel-cadmium (Ni-Cd) avaient été adoptées. Toutefois, suite à une réforme européenne du règlement en 2002, le cadmium, une substance hautement toxique, est devenu strictement contrôlé (Berlier, 2015). De ce fait, actuellement, ce sont les batteries lithium-ion (LIB) qui représentent les systèmes de stockage d'énergie les plus appropriés pour les véhicules électriques grâce à plusieurs caractéristiques avantageuses, telles que leur efficacité énergétique élevée, l'absence de phénomène de mémoire, une durée de vie prolongée et une grande densité de puissance. Cependant, les LIB ne sont pas parfaites : les problèmes de durée de vie, leur vitesse de chargement, ainsi que leurs coûts élevés et leur fiabilité, doivent tous être pris en compte et améliorés. Néanmoins, le coût des LIB a été en diminution constante de 20 % entre 2010 et 2016 (Ding et al., 2019), ce qui répond déjà partiellement à la thématique du prix excessivement élevé.

Pour remplacer les véhicules à moteur thermique par des véhicules électriques, il est essentiel de les rendre compétitifs en termes de prix. Pour cela, le prix des batteries devrait descendre sous les 125 dollars par kilowattheure. C'est notamment dans cette optique que Tesla a construit sa GigaFactory dans le Nevada, misant sur les économies d'échelle pour réduire le coût de production de leurs batteries de 30 % (Ding et al., 2019).

En 2022, la Chine était le plus grand producteur de LIB dans le monde, représentant 76 % de la capacité de production mondiale, suivie de l'Europe et des États-Unis avec respectivement 8 % et 7 % (Gutiérrez & Ruiz-León, 2024).

Il est essentiel de souligner que les LIB ne se limitent pas au secteur automobile : elles sont également largement utilisées dans le domaine de l'énergie et dans les appareils électroniques destinés au grand public (Ding et al., 2019).

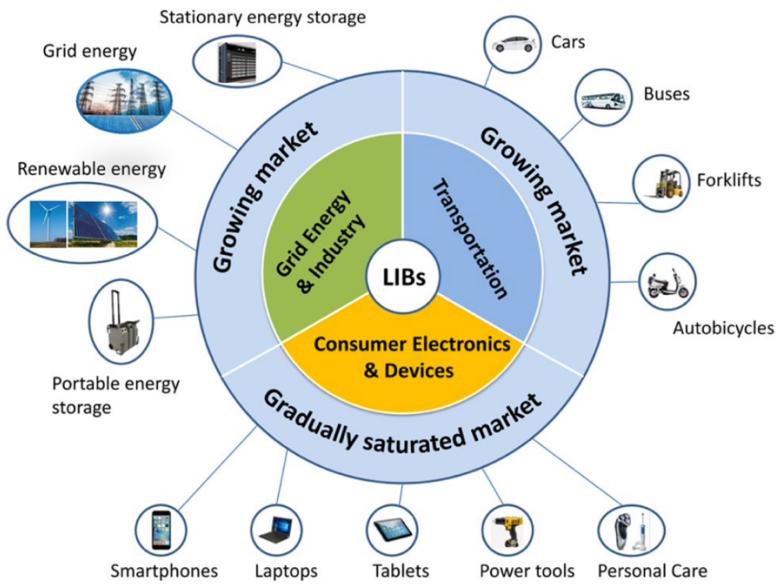


Figure 1 - Utilisation actuelle des batteries lithium-ion (Ding et al., 2019:3).

## 2.2.2. Composants clés

« Une batterie Li-Ion (LIB) est composée de quatre composants de base : une cathode, une anode, un électrolyte sans séparateur, et un boîtier externe » (Kalungi et al., 2024:2). Il existe différents types de cathode sur le marché, et l'objectif est de réduire la teneur en cobalt dans la cathode. C'est pourquoi, on constate une réduction de la consommation de cobalt dans les batteries lithium-ion commerciales, passant de 20 % à environ 5 %, tandis que la consommation de nickel augmente de 54 % à 75 % et la consommation de lithium restant inchangée (Kalungi et al., 2024).

Pour ce qui est des matières premières présentes dans les LIB, l'analyse se portera sur les trois éléments clés de ce type de batterie : le lithium, le cobalt et le nickel (Kalungi et al., 2024). Il faut désormais examiner plus en détail ces éléments sous les aspects économique, environnemental et social.

## 2.2.3. Matières premières principales

### 2.2.3.1. Lithium

Le lithium est un élément clé dans la production de batteries, il est extrait sous deux formes principales : des minerais solides et des solutions salines présentes dans certains lacs asséchés. Parmi les principaux pays producteurs, le Chili se distingue particulièrement avec d'importantes réserves estimées à 9,3 millions de tonnes, et situées notamment au Salar de Atacama (Berlier, 2015) (Canada, 2022).

D'autres pays possèdent également des ressources substantielles en lithium, comme la Bolivie avec 9 millions de tonnes, la Chine avec 5,4 millions de tonnes et l'Argentine avec 2,6 millions de tonnes (Ding et al., 2019). Il convient également de mentionner l'Australie, qui occupe la première place sur le marché mondial du lithium, avec une production atteignant 61.000 tonnes en 2022, soit 47,2 % de la production mondiale. Ses réserves sont estimées à 6,2 millions de tonnes (Canada, 2022).

#### 2.2.3.1.1. Aspect environnemental

Plus d'un tiers du lithium mondial produit grâce à l'extraction de saumure provient du Triangle du Lithium (Chili, Argentine, Bolivie) (Berlier, 2015). Cette technique se base sur l'extraction de saumure<sup>1</sup> de lithium souterraine, ensuite il faut attendre une évaporation de 95 % de l'eau présente dans cette extraction. Des avancées technologiques permettent de réduire cette quantité nécessaire pour l'évaporation; cependant, la pollution et l'augmentation de la demande constituent un frein.

Ce processus d'extraction du lithium utilise 65 % des réserves d'eau présentes dans ces terres chaque année (Igwe, 2022). C'est une information d'une importance capitale lorsque nous savons que le Chili fait partie des zones les plus sèches de notre planète. Bien que cette eau ne soit pas potable, cela épuise tout de même les ressources disponibles pour les habitants et la faune (Igwe, 2022).

#### 2.2.3.1.2. Aspect économique

La demande en lithium a doublé entre 2020 et 2022, une évolution de la demande passant de 300.000 tonnes métriques à plus de 600.000 tonnes métriques (Igwe, 2022). Cette augmentation est essentiellement causée par le rôle central du lithium dans les batteries des véhicules électriques, et celle-ci ne devrait pas arrêter de croître et arriver à une demande comprise entre deux et quatre millions de tonnes métriques d'ici 2030.

Les ressources en lithium sont présentes dans le monde, et selon le United States Geological Survey (USGS) ces ressources ne cesseraient d'augmenter, et les découvertes de ces ressources exploitables seraient de 105 millions de tonnes de lithium (Gutiérrez & Ruiz-León, 2024).

#### 2.2.3.1.3. Aspect social

Le lithium est un élément très important dans la technologie d'aujourd'hui, car il nous permet de stocker de l'énergie. Cependant, les pays qui n'en possèdent pas se retrouvent dans une position difficile, car en étant dépendants des importations, ils sont contraints de classer le lithium comme un élément critique. C'est le cas des États-Unis et du Royaume-Uni, ce qui explique que la chaîne d'approvisionnement des minerais les oblige à devenir dépendants des régimes autoritaires, en particulier de la Chine (Gutiérrez & Ruiz-León, 2024).

La majorité des émissions de CO<sub>2</sub> liées au lithium proviennent de la production et de l'extraction des matériaux. Bien que les batteries au lithium offrent des avantages notables, elles génèrent des niveaux de pollution très importants. Il est essentiel de réduire cette empreinte écologique, surtout avec une demande en constante augmentation (Berlier, 2015).

### 2.2.3.2. Nickel

En 2023, la consommation mondiale de nickel est estimée à environ 3,4 millions de tonnes, dont 20 % sont consacrées à la production de cathodes pour les batteries lithium-ion. En 2025, l'utilisation annuelle de nickel pour ces batteries pourrait atteindre entre 0,6 et 0,8 million de tonnes. À l'horizon 2030, la demande totale en nickel devrait avoisiner les 5 millions de tonnes, dont 28 % seront destinés aux cathodes de batteries lithium-ion (Kalungi et al., 2024).

#### 2.2.3.2.1. Aspect environnemental

En ce qui concerne l'extraction du nickel, il est important de savoir que le potentiel de réchauffement climatique (GWP) pour le nickel de classe 1 est de 7,64 kg CO<sub>2</sub>-eq par kg, et qu'une proportion estimée entre 57 et 70 % de ce potentiel de réchauffement climatique est causée par les étapes d'extraction et de raffinage, avec des émissions issues principalement de la combustion de combustibles fossiles (Mistry et al., 2016).

---

<sup>1</sup> Saumure : Solution aqueuse naturellement « riches en sels de lithium, sodium et potassium localisés sous le lit de lacs salés » (Lucas & Gajan, 2021 :1) (Larousse, s. d.).

#### 2.2.3.2.2. Aspect économique

Le nickel est le vingt-quatrième métal le plus présent dans la croûte terrestre, avec des réserves estimées à plus de 350 millions de tonnes, mais les gisements économiquement exploitables (contenant plus de 1 % de nickel) sont aujourd'hui limités à environ 130 millions de tonnes. Cependant, « près de 74 % de ces réserves terrestres exploitables sont localisées en Indonésie (55 millions de tonnes), en Australie (24 millions de tonnes), au Brésil (16 millions de tonnes), en Russie (8,3 millions de tonnes) et en Nouvelle-Calédonie (7,1 millions de tonnes) » (Kalungi et al., 2024:5). L'Indonésie détenait 50 % de part de marché en 2023 (Michel, 2024). Il est également important de souligner que neuf entreprises mondiales détiennent à elles seules 52 % de la production mondiale de nickel (Mistry et al., 2016).

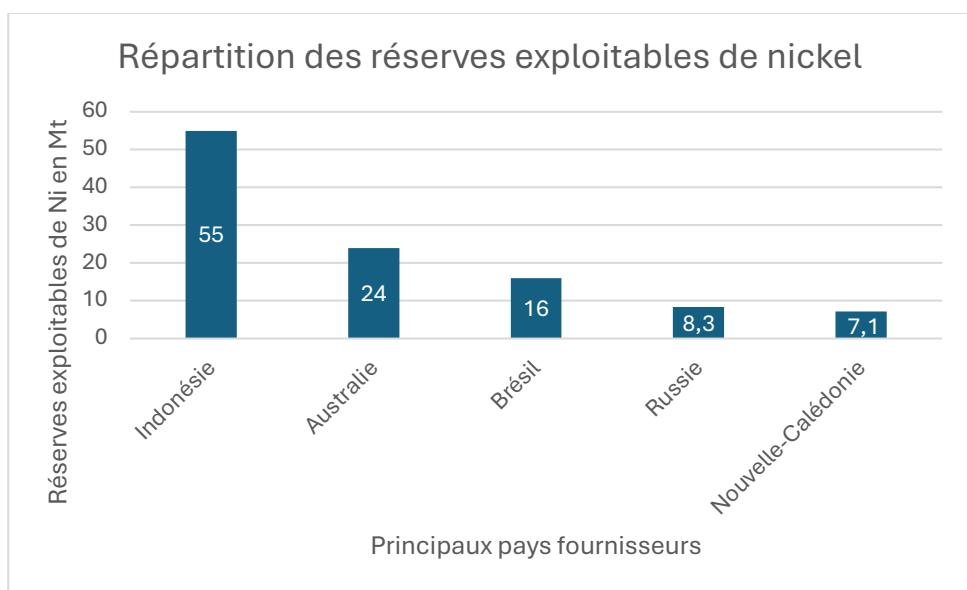


Figure 2 - Répartition des réserves exploitables de nickel, basé sur les données de Kalungi et al (2024:5)

#### 2.2.3.2.3. Aspect social

L'extraction de nickel entraîne des impacts environnementaux qui ont, à leur tour, de lourdes répercussions sociales. Malheureusement, cette situation est bien trop courante. Certaines entreprises spécialisées dans ce domaine ne prennent pas le soin de trier leurs déchets. Pire encore, certaines se permettent de s'en débarrasser au fond de la mer. Ces actes ont non seulement un impact environnemental, mais aussi social. En effet, l'accumulation de déchets empêche la lumière du soleil de pénétrer dans l'eau, ce qui entraîne la disparition de la végétation et de la faune marine. Par conséquent, les pêcheurs se retrouvent dans l'impossibilité de pêcher, ce qui pourrait avoir des conséquences dramatiques (Michel, 2024). De plus, d'autres problèmes sociaux se posent. L'absence de sécurité n'est pas le seul enjeu pour les Indonésiens face à ces mines. Parmi les effets néfastes de la production de nickel figurent également « l'expropriation de certaines populations locales et la présence de tribus indigènes sur les sites miniers » (Michel, 2024 :1).

#### 2.2.3.3. Cobalt

En plus du lithium, le cobalt est un élément crucial dans les matériaux de cathode (Kalungi et al., 2024). Les avantages du cobalt sont nombreux, tels que la capacité à améliorer la densité énergétique et la stabilité structurelle. Toutefois, il existe également des inconvénients, notamment sa toxicité, son coût élevé et sa production limitée. En ce qui concerne sa répartition géographique, 50 % des réserves et de la production de cobalt se trouvent principalement en République Démocratique du Congo et en Zambie (Ding et al., 2019). Plus de 70 % du cobalt sur le marché provient de la République

Démocratique du Congo (Wu & Wong., 2024). L'industrie de la batterie est responsable de 50 % de la consommation globale de cobalt dans le monde (Ding et al., 2019).

#### 2.2.3.3.1. Aspect environnemental

Précédemment, la possibilité de raffiner le cobalt en Chine avait déjà été énoncée, cependant, deux autres pays doivent également être pris en compte : la Finlande, ainsi que le Canada. Ce dernier, qui, bien qu'étant une localisation moins utilisée actuellement, deviendra un lieu essentiel lié au raffinage du cobalt dans le futur.

Pour effectuer un choix entre ces trois localisations, l'analyse « Notre Potentiel de réchauffement global » (GWP) est utilisée : en raffinant le cobalt au Canada ou en Finlande, il y a une diminution de respectivement 11,7 % et de 12,4 % du GWP. L'illustration de cette réduction peut se faire en kilogrammes de dioxyde de carbone équivalent (8.568 kg CO<sub>2</sub>eq pour la Chine, 7.568 pour le Canada et 7.507 kg CO<sub>2</sub>eq pour la Finlande). La principale différence entre ces trois lieux est due à la source de production d'électricité (Das et al., 2024).

Au Canada, l'électricité est produite majoritairement à partir de sources à faible émission de carbone, avec 75 % de la production régionale provenant de l'hydroélectricité et du nucléaire, alors que seuls 18 % proviennent de sources à forte empreinte carbone (Das et al., 2024).

En Finlande, 29 % de l'électricité du pays provient de sources à forte empreinte carbone et le reste est produit de manière moins agressive pour l'environnement, notamment à l'aide du nucléaire, des éoliennes et de l'hydroélectricité (Das et al., 2024).

Plus de 75 % de l'électricité chinoise est produite à partir de charbon, ce qui crée directement un risque pour la planète. Un avantage comparatif que possèdent les Chinois est le coût environnemental plus faible lié au transport entre le lieu d'extraction et le lieu de raffinage. En effet, ce coût est 4 % plus élevé pour le Canada et de 3 % pour la Finlande. Toutefois, cet aspect de transport est très peu pris en considération pour le GWP total (cela correspond environ à 5 % de celui-ci) (Das et al., 2024).

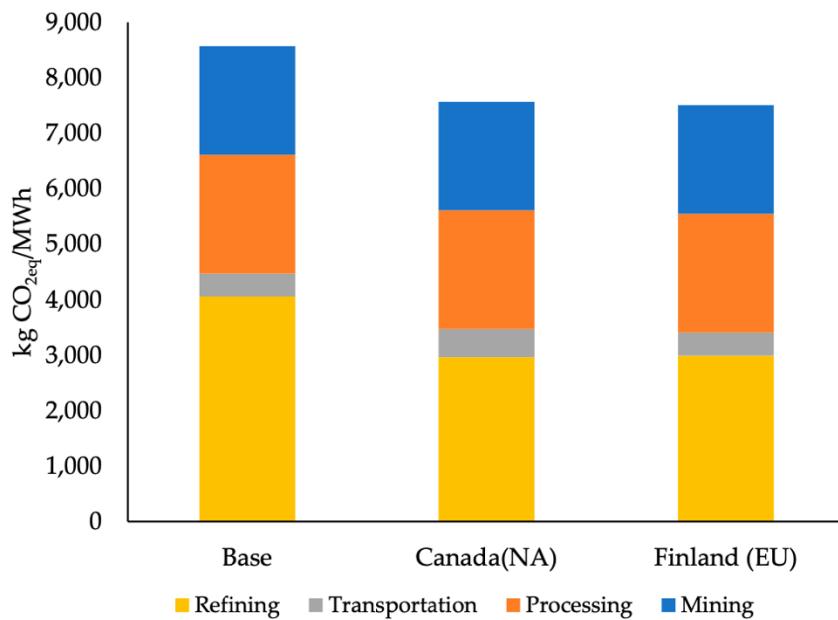


Figure 3 - Impact de l'emplacement de la raffinerie sur le GWP (Das et al., 2024:13)

#### 2.2.3.3.1. Aspect économique

La demande de cobalt est en constante augmentation, avec une croissance comprise entre 15 % et 30 % chaque année. Ainsi, il est crucial d'optimiser les technologies d'extraction dans les mines de cobalt pour accroître les réserves exploitables. Cela est une obligation afin de garantir que l'approvisionnement en cobalt puisse répondre de manière efficace aux fluctuations de la demande. Cependant, comme pour le lithium, des avancées technologiques en recyclage permettraient de diminuer le futur écart éventuel entre ressource et demande (Ding et al., 2019).

Concernant le raffinage de ce matériau, 67 % du cobalt mondial est raffiné en Chine. Le cobalt congolais n'échappe pas à cette tendance : près de 70 % de celui-ci est raffiné dans l'empire du Milieu. En ce qui concerne la Finlande, près de 10 % du raffinage mondial est réalisé sur son sol. Ces larges parts de marché restreintes à deux seuls pays sont assorties d'enjeux économiques et sociaux (Das et al., 2024).

#### 2.2.3.3.2. Aspect social

Le problème essentiel de la production du cobalt est qu'elle se déroule au Congo, où des violations graves des droits humains et du travail infantile ont été identifiées dans le secteur minier (Prates et al., 2023) (Wu & Wong, 2024). À titre d'exemple, au cours de l'année 2016, Amnesty International a publié un rapport « This Is What We Die For » qui mettait en lumière la manière avec laquelle le cobalt artisanal était extrait de zones non autorisées en République Démocratique du Congo. Le rapport faisait aussi référence au cobalt provenant du travail des enfants. Pour mieux comprendre ce problème, il faut savoir qu'il existe deux types de mines en RDC : « *mines industrielles à grande échelle (LSM) et mines artisanales et à petite échelle (ASM)* » (Wu & Wong, 2024 :2).

87 % des ASMs sont situées sur des sites dédiés aux LSMS. De plus, 30 % du cobalt congolais vient des mines ASMs où des hommes, des femmes et des enfants travaillent avec des outils de base, sans machine adéquate. Cette absence de norme crée une augmentation des risques pour les droits humains. 200.000 Congolais travaillent dans ces mines, et 20 % d'entre eux sont des enfants (Wu & Wong, 2024).

Afin de solutionner tout ou partie des problèmes sociaux évoqués ci-devant, les entreprises peuvent adopter les actions suivantes :

- L'évitement de l'utilisation du cobalt.
- L'approvisionnement direct auprès des mines industrielles.
- L'interdiction du cobalt artisanal.
- La couverture de questions liées aux droits humains.
- Les prises d'initiatives multipartites, qui permettront de favoriser une responsabilité partagée (Wu & Wong, 2024).

Les principales matières premières sont exploitées et doivent être prises en compte si les véhicules électriques sont utilisés à l'avenir. Cependant, la question de l'acceptabilité sociale demeure : cette transition sera-t-elle acceptée par les individus et quels sont les facteurs déterminants inhérents à cette adoption ?

### 2.3. Acceptabilité sociale

L'acceptation de nouvelles technologies sur le marché comme les voitures électriques se base sur l'Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT 2) (Poupon, 2017). Celle-ci est basée sur le modèle initial UTAUT ; qui est lui-même basé sur quatre principaux facteurs de performance : la performance attendue (performance expectancy), l'effort attendu (effort expectancy), l'influence sociale (social influence) et les conditions facilitatrices (facilitating conditions) (Venkatesh et al., 2012).

La performance attendue concerne le bénéfice obtenu grâce à l'utilisation de cette nouvelle technologie. L'effort attendu prend en compte la facilité avec laquelle le nouvel outil technologique pourra être utilisé. L'influence sociale quantifie à quel point l'utilisation ou non de cette nouvelle technologie aura un impact sur l'opinion d'autrui. Les conditions facilitatrices font référence à la présence des ressources et des infrastructures externes qui vont permettre la facilitation d'utilisation de cette nouvelle technologie (Venkatesh et al., 2012) (Poupon, 2017).

À ces 4 facteurs, nous devons en ajouter 3 autres afin d'obtenir l'UTAUT 2 : l'expérience et l'habitude (Experience and habit), la motivation hédonique (hedonic motivation) et la valeur monétaire (price value) (Venkatesh et al., 2012).

La motivation hédonique est définie « comme le plaisir ou la satisfaction tirée de l'utilisation d'une technologie, et il a été démontré qu'elle joue un rôle important dans l'acceptation de la technologie » (Venkatesh et al., 2012:6). La valeur monétaire correspond à l'impact financier que l'achat de cette nouvelle technologie aura sur l'utilisateur. Il y a deux situations à prendre en compte pour les voitures électriques et l'impact n'est pas le même si l'acheteur est un particulier ou si la voiture a été achetée par un employeur. L'expérience et l'habitude sont un et même facteur ; ils ont cependant deux significations différentes : l'habitude fait référence à un automatisme, et l'expérience signifie depuis combien de temps l'utilisateur utilise ce produit (Poupon, 2017) (Venkatesh et al., 2012).

Ces 7 facteurs présents dans l'UTAUT 2 sont influencés par trois modérateurs : l'âge, le genre et l'expérience. Ces modérateurs peuvent influencer chacun des sept facteurs, et ce sont ces éléments qui, au final, viendront modifier le comportement d'un individu (Venkatesh et al., 2012).

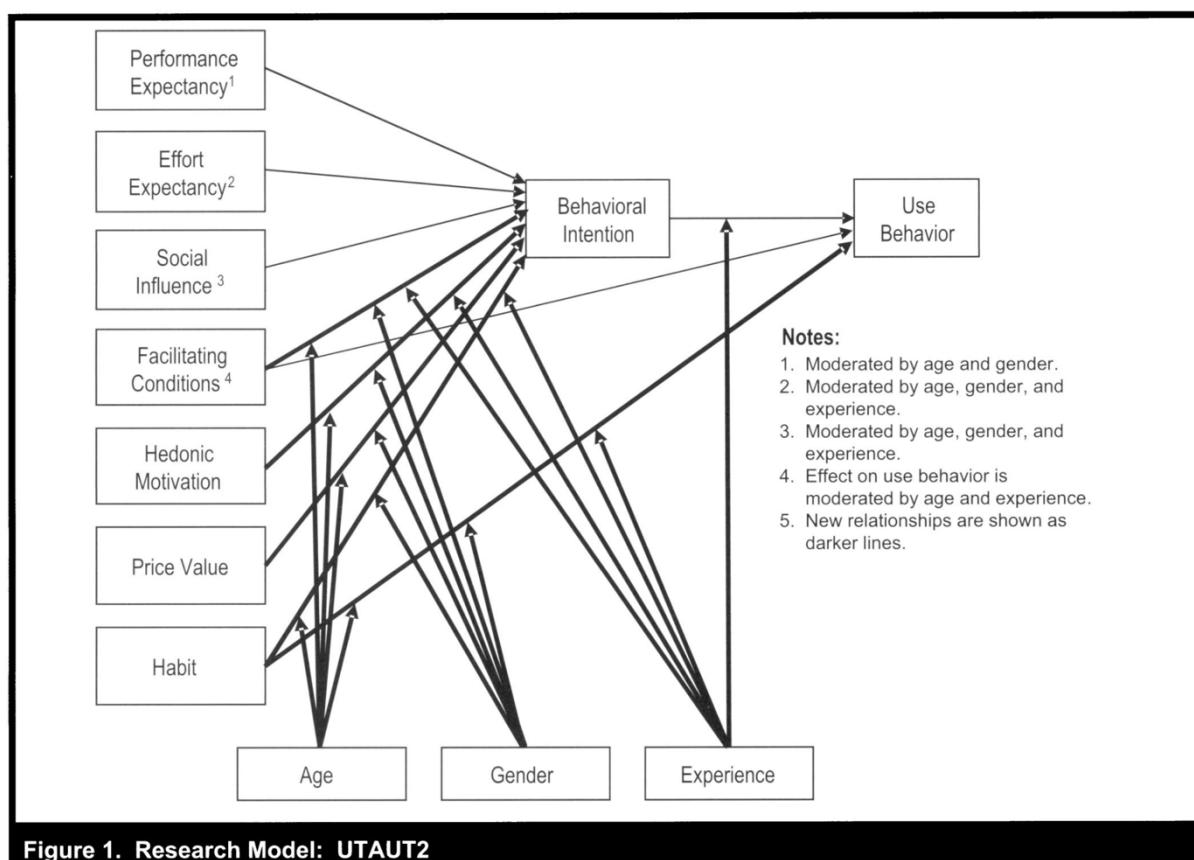


Figure 1. Research Model: UTAUT2

Figure 4 - UTAUT2 (Venkatesh et al., 2012 :5)

### La théorie de l'autodétermination (TAD) et de la réactance psychologique.

D'autres théories peuvent également influencer le choix du consommateur, telles que la théorie de l'autodétermination (TAD) et celle de la réactance psychologique.

La TAD fait référence au fait qu'un individu doit satisfaire trois besoins dans le but d'avoir de la motivation et d'accroître son bien être ; le besoin d'autonomie, le besoin de lien social et enfin le besoin de compétence. Dans le cas de cette transition vers le VE, c'est le premier des trois besoins qui va être analysé, à savoir le besoin d'autonomie. Ce dernier représente le besoin que ressent un individu de se sentir libre, libre notamment de prendre ses propres décisions, de ne dépendre de personne pour acter les choix qui le concernent. Dans le cas contraire, l'absence de libre arbitre entraîne une absence de motivation autonome, car la décision échappe à l'individu, celle-ci étant sous contrôle d'une autre personne ou d'un autre organisme. L'individu possède un pouvoir de décision faible, voire inexistant. La communication joue un rôle prépondérant dans la poursuite de ce besoin et, par conséquent, de cette motivation. Selon Farnier (2020), il existe deux types distincts de communication :

Communication contrôlante	Communication informative
Pression sur autrui	Informer autrui
Menace l'autonomie	Soutient l'autonomie
Externalisation de la motivation	Internalisation de la motivation
Diminue le bien-être et l'implication	Facilite le bien-être et l'implication

Tableau 1 - Comparaison entre la communication contrôlante et informative (Farnier, 2020:2)

La fonction contrôlante aura, comme son nom l'indique, pour objectif de créer un contrôle sur l'individu. A l'inverse, la fonction informative cherchera, quant à elle, à informer et à donner plus d'autonomie (Farnier, 2020).

La théorie de la réactance repose sur un autre principe également lié à la liberté d'effectuer et d'adopter le comportement que l'on souhaite. Cependant, si cette liberté est éliminée ou réduite, un état motivationnel de réactance psychologique apparaît, qui a pour objectif de restaurer cette liberté. La réactance peut se manifester de diverses manières : l'individu peut tenter de retrouver sa liberté d'action ; celui-ci peut également effectuer tout l'opposé de ce qui lui a été demandé initialement, avoir également un comportement agressif envers l'organisme ou la personne qui le prive de sa liberté (Miron & Brehm, 2024).

Bien que ces voitures électriques soient acceptées dans le futur, celles-ci, comme leur nom l'indique, fonctionnent grâce à l'électricité. Mais cette électricité sera-t-elle suffisante et comment est-elle produite ?

## 2.4. Source d'électricité

L'utilisation des voitures électriques est-elle réellement meilleure pour l'environnement ? C'est une question qui mérite d'être posée. Toutefois, la réponse à cette question réside dans la source d'électricité présente dans le pays : si celle-ci est respectueuse de l'environnement, la réponse tend à être favorable. En revanche, si l'électricité est produite à partir de charbon ou de pétrole, la réponse sera différente (Wilson, 2022).

### 2.4.1. Comparaison internationale

Il faut souligner que dans plusieurs pays, la voiture électrique n'est pas une meilleure alternative que les véhicules à moteur thermique (VMT) ; ce cas de figure est courant dans les pays dont le mix énergétique est dominé par le charbon, comme dans de grandes puissances telles que l'Inde, la Chine,

l'Australie et l'Afrique du Sud. À l'inverse, d'autres pays tels que le Royaume-Uni, l'Allemagne, le Japon ou encore l'Italie atteignent un niveau d'efficacité nettement supérieur à celui des VMT (Wilson, 2022).

Voici une représentation graphique portant sur les gCO<sub>2</sub>/km des voitures électriques dans les 40 pays qui ont été analysés. L'Europe semble être le continent le plus adapté à cette transition (Wilson, 2022).

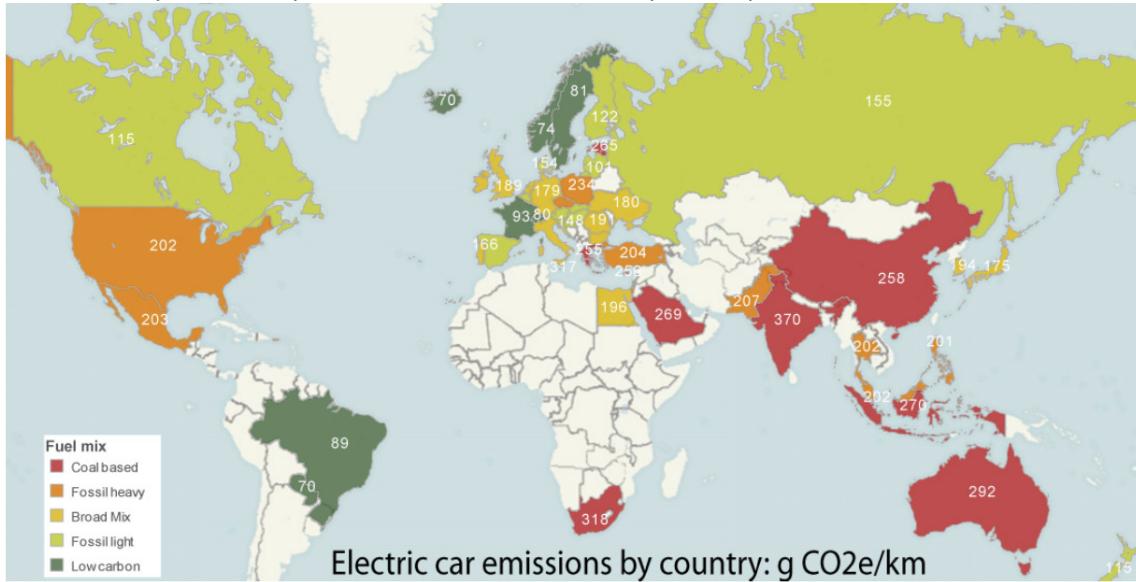


Figure 5 - Les émissions produites par les VE par pays en : gCO<sub>2</sub>e/km (Wilson, 2022:1)

Ce graphique illustre également les émissions de CO<sub>2</sub> des VE, remise sur une base kilométrique, à travers tout un panel de pays. Les différences d'émission entre les pays analysés s'expliquent par les sources d'approvisionnement en électricité qui sont divergentes d'un pays à l'autre.

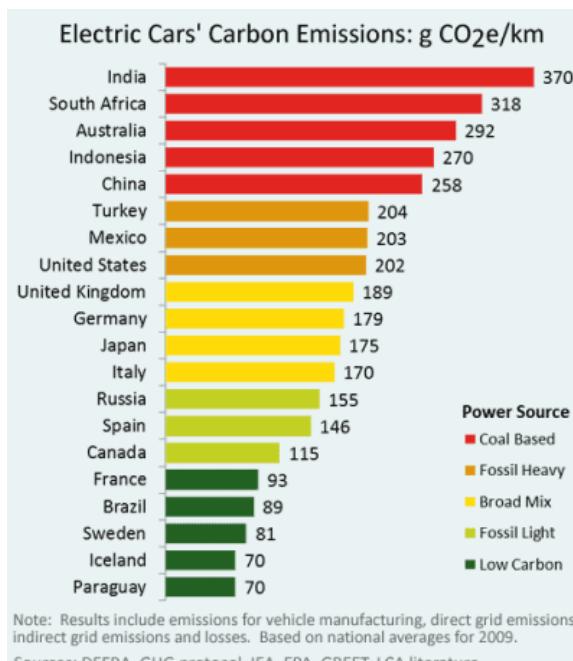


Figure 6 - Les émissions de carbone produites par les VE par pays en : gCO<sub>2</sub>e/km (Wilson, 2022:1)

Dans une autre enquête réalisée par le « Alternate Fuels Data Center » (Wilson, 2022 :1), qui est une partie du département de l'Énergie du gouvernement américain, les analystes ont déterminé que émissions moyennes d'une voiture électrique s'élevaient à 3.932 livres de CO<sub>2</sub> par an, soit approximativement 1.783 kilogrammes de CO<sub>2</sub> par an. Comparativement, les émissions de carbone

sont en moyenne 2,9 fois moins élevées pour les VE que pour les VMT. Selon cette étude, ces dernières émettraient 11.435 livres de CO<sub>2</sub> par an, donc approximativement 5.186 kilogrammes de CO<sub>2</sub> par an. Cette analyse a pris en compte les différentes sources de production électrique des états américains (Wilson, 2022).

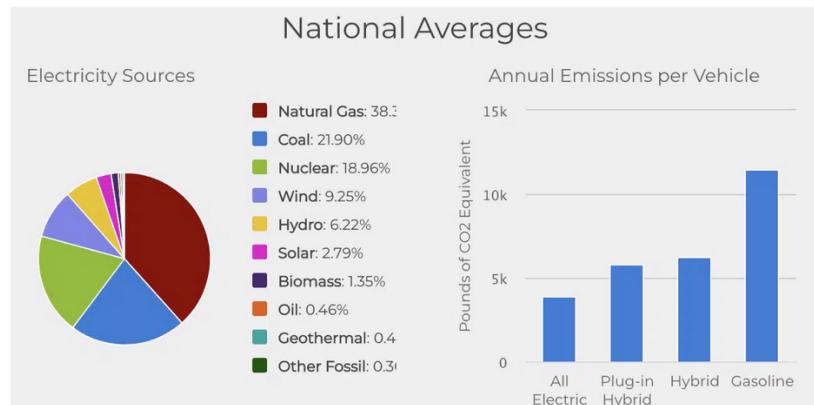


Figure 7 - Estimations de l'AFDC pour les États-Unis comparant les émissions des voitures électriques, hybrides rechargeables, hybrides et à essence (Wilson, 2022:1)

Si l'on considère les dix pays produisant l'électricité la plus verte au monde, on observe que le trio de tête est composé de l'Islande, de la Norvège et de la Suède, trois pays nordiques (Lauer, 2023). Par conséquent, l'impact environnemental de leurs véhicules électriques est réduit.

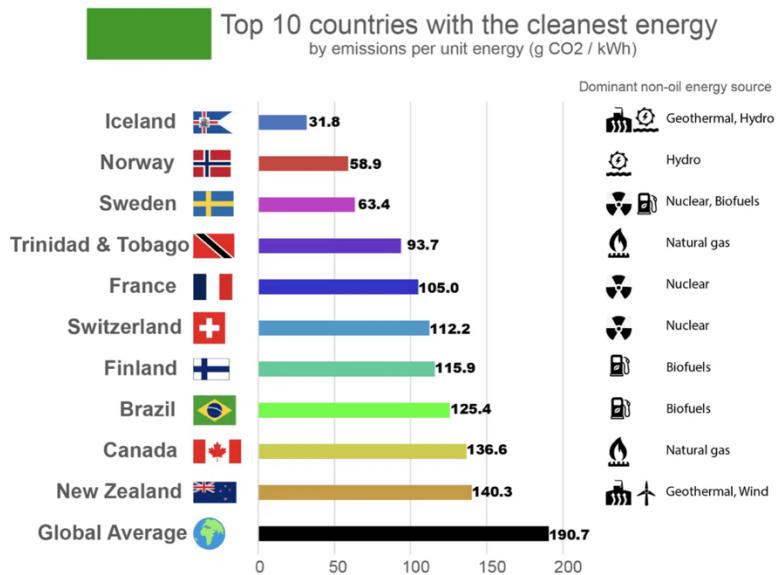


Figure 8 - 10 pays les plus avancés en matière d'énergie propre (data: BP Statistical Review of World Energy) (Lauer, 2023:1)

Le faible quantité d'émissions par unité d'énergie (gCO<sub>2</sub>/kWh) en Islande s'explique par la composition de son mix énergétique (Lauer, 2023).

“La composition des sources d'énergie de l'Islande : au fil du temps, les énergies renouvelables ont dominé, ce qui explique sa faible intensité carbone (source: [IEA Iceland report](#))”

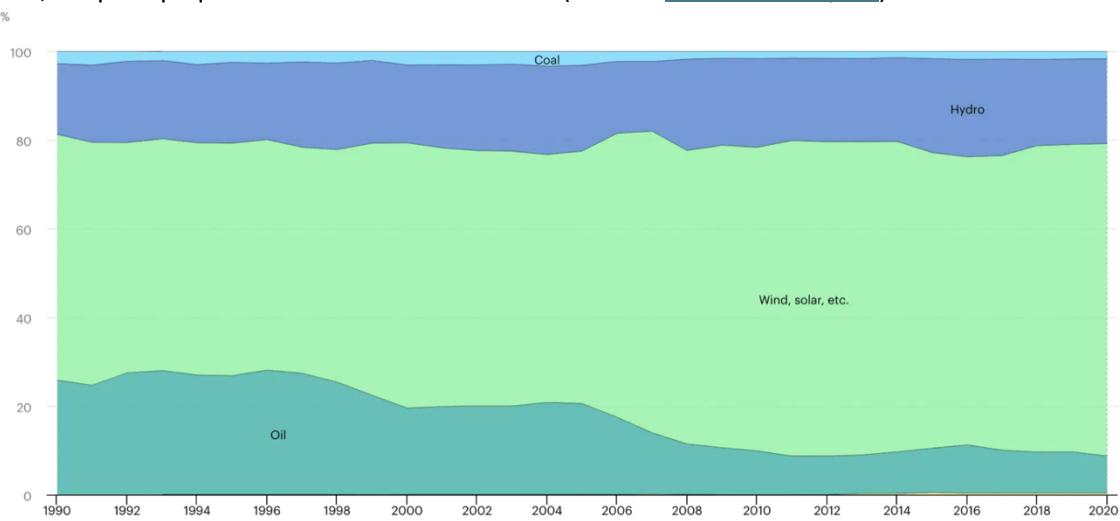


Figure 9 - La composition des sources d'énergie de l'Islande au fil du temps (Lauer, 2023:1)

La faible proportion de charbon dans le mix énergétique joue un rôle significatif. En effet, en 2023, seulement 1 % de l'énergie produite en Islande provenait du charbon (Iceland - Countries & Regions, s. d.).

Après avoir analysé les sources d'électricité, il est désormais temps de s'intéresser aux bornes de recharge, cet outil essentiel pour alimenter les véhicules électriques en électricité.

## 2.5. Bornes de recharge

Selon diverses études, la majorité des recharges de véhicules électriques s'effectue dans des contextes domestiques ou professionnels. Toutefois, la présence d'infrastructures de recharge publique est indispensable pour encourager l'adoption des VE, surtout dans les phases initiales de leur introduction (Ayotor, 2022).

En ce qui concerne le temps de chargement, ces bornes de recharge peuvent être soit des bornes rapides, soit des bornes lentes. Une borne rapide charge une voiture à 80 % de sa capacité en 30 minutes et l'amène à 50 % de sa capacité en 20 minutes, tandis qu'un chargement complet en borne lente prend entre 4 et 8 heures en fonction de l'efficacité de la borne (Sanguesa et al., 2021).

Concernant l'utilisation des bornes, la recharge des véhicules électriques s'effectue majoritairement au domicile des utilisateurs, bien que d'autres alternatives, telles que la recharge sur le lieu de travail ou dans des espaces publics, leur soient également proposées (LaMonaca & Ryan, 2022).

### 2.5.1. Situation internationale

En 2020, le monde comptait 1,3 million de points de recharge, dont 922.216 étaient des points de recharge lents, ce qui signifie que la capacité de la recharge était inférieure à 22 kW. À l'inverse, il y avait 385.678 points de recharge rapide. Une fois de plus, ces bornes étaient mal réparties à travers le monde, environ 810.000 se trouvaient en Chine, 288.000 en Europe et 99.000 aux États-Unis. Malheureusement, en 2022, l'Afrique était toujours largement en retard dans le nombre de bornes de chargement de voitures électriques présentes sur son territoire. Elles étaient au nombre de 500 sur le

continent, et 85 % de ces 500 bornes étaient réparties entre l'Afrique du Sud et le Ghana, respectivement 61 % et 24 % (Ayetor, 2022).

Concernant l'Afrique du Sud, dont nous allons aborder la situation plus en détail plus tard, il n'existe en 2022 que 142 stations de recharge publique lentes et 163 stations de recharge publique rapides (Ayetor, 2022).

Une autre approche consisterait à prendre en considération le nombre de bornes de recharge par rapport au stock de voitures électriques présentes dans le pays. Pour ce classement, c'est la Corée du Sud qui domine, suivie du Chili et de l'Indonésie, le premier pays européen est 4<sup>ème</sup>, et ce sont les Pays Bas (Ayetor, 2022).

Après l'utilisation des batteries dans les véhicules électriques, il est essentiel de s'intéresser à leur fin de vie, à leur éventuelle seconde vie, ainsi qu'aux possibilités de recyclage.

## 2.6. Gestion des batteries en fin de vie

Un enjeu lié aux véhicules électriques est la gestion des batteries arrivées en fin de vie, un stock encore modeste, mais en constante augmentation. On estime que d'ici 2030, plus de 5 millions de tonnes de batteries au lithium-ion atteindront cette phase critique. Il sera donc indispensable de développer des infrastructures de recyclage à grande échelle pour récupérer les matériaux précieux, bien que parfois toxiques, contenus dans ces batteries, afin de ne pas laisser ce défi aux générations futures (Beaudet et al., 2020). De plus, pour le moment « une LIB est généralement remplacée dans un véhicule électrique lorsqu'elle a perdu au moins 20 % de sa capacité initiale. Par conséquent, les batteries réutilisées commencent généralement leur seconde vie avec 80 % ou moins de leur capacité d'origine.» (Prates et al., 2023:8)

Actuellement, le recyclage des batteries lithium-ion de véhicules électriques est encore à un stade précoce (surtout en dehors de la Chine), offrant à la fois des défis et des opportunités pour ceux qui souhaitent aborder la thématique de la production durable de batteries (Beaudet et al., 2020).

La problématique du coût et de la valeur de revente est également présente, en plus des émissions indirectes de ce type de véhicule. En effet, ces émissions, associées à celles générées lors de la production, constituent un enjeu majeur souvent négligé (Berlier, 2015).

Le recyclage de ces batteries pourrait amener à une progression sur les trois aspects clés : l'aspect environnemental, l'aspect social et l'aspect économique.

### 2.6.1. Aspect environnemental

Le but premier est de minimiser l'impact carbone des véhicules électriques. Actuellement, on considère qu'entre 30 et 50 % des émissions de gaz à effet de serre des véhicules électriques sont associées à ce processus de conception. La production de batteries, généralement en Chine où l'impact carbone est important, génère une empreinte écologique supérieure à celle des véhicules fonctionnant au moteur thermique. Le recyclage peut minimiser cet impact, en diminuant la nécessité d'extraire et de raffiner des matériaux non exploités (Beaudet et al., 2020).

En cas de mauvaise gestion, les batteries en fin de vie (LIB) libèrent leurs composants dans le sol, ce qui permet au lixiviat<sup>2</sup> d'atteindre des strates plus profondes, polluant les eaux souterraines et pouvant provoquer un ruissellement vers la surface des cours d'eau (Prates et al., 2023).

### 2.6.2. Aspect social

Les batteries au lithium-ion renferment des substances qui peuvent être toxiques et/ou inflammables. Leur intégration dans la gestion des déchets solides urbains engendre des dangers de sécurité significatifs, en particulier des menaces d'incendie ou d'explosion (Beaudet et al., 2020).

Le recyclage permet de contourner les fournisseurs étrangers de matériaux LIB, souvent situés dans des pays ayant des normes de travail et environnementales faibles (exemple : cobalt de la RDC, Chine) (Beaudet et al., 2020).

La cathode et les électrolytes présents dans les batteries peuvent avoir des effets néfastes sur la santé des individus tels des irritations de la peau et des yeux, et même une toxicité pour les organes (Prates et al., 2023).

### 2.6.3. Aspect économique

Les matières premières constituent jusqu'à 50 % du coût d'une LIB, tandis que le recyclage des matériaux pourrait diminuer ce coût de 30 %. De plus, on éviterait également les coûts liés à la gestion des déchets en dirigeant les batteries usées vers le recyclage plutôt qu'en décharge (Beaudet et al., 2020).

Une autre externalité créée par le recyclage de LIB est que le recyclage pourrait devenir une industrie majeure, créant des revenus, des emplois et des recettes fiscales. Le coût de transport de batteries est si élevé qu'ouvrir une usine de recyclage dans sa région est une solution économiquement plus intéressante (Beaudet et al., 2020).

Malgré tous ces aspects positifs engendrés par le recyclage de ces batteries, un problème persiste avec le prix des batteries lithium-ion sur le marché qui ne fait que diminuer, alors que leurs performances continuent à s'améliorer avec le temps. La valeur économique des batteries usagées baissera également, ce qui réduit l'incitation à investir dans des applications de seconde vie. Par ailleurs, comme tout nouveau produit, les doutes concernant la qualité, la sécurité et la durée de vie restante des batteries envoyées pour reconditionnement pourraient freiner le développement à grande échelle de la réutilisation des batteries en seconde vie (Beaudet et al., 2020).

Néanmoins, les procédés de recyclage créent également des externalités négatives. Ils nécessitent généralement une grande quantité d'électricité et de chaleur, et peuvent également produire des émissions toxiques, des contaminants aquatiques et d'autres déchets gazeux et solides indésirables. La collecte et le transport d'anciennes batteries peuvent également générer une quantité significative d'énergie, ce qui pourrait avoir un impact considérable sur l'environnement. L'empreinte écologique et totale du recyclage ne devrait pas excéder celle nécessaire pour la mine. Dans la négative, cela perdrait tout son intérêt (Beaudet et al., 2020).

Un défi persiste : il est essentiel de mieux comprendre la détérioration des batteries au cours du temps. Cela facilitera notamment la planification et l'optimisation des projets de réutilisation et de recyclage (Beaudet et al., 2020).

---

<sup>2</sup> Lixiviat : « Tout liquide filtrant par percolation des déchets mis en décharge et s'écoulant d'une décharge ou contenu dans celle-ci » (Directive 1999/31/CE du Conseil du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets, 1999 :3)

## 2.7. Méthodes de recyclage

Il y a actuellement 3 pistes plausibles pour effectuer le recyclage des LIB :

**La pyrométaux** est une méthode de traitement des batteries usagées qui repose sur des températures très élevées, autour de 1.500 °C. Ce procédé énergivore permet de faire fondre les batteries et d'éliminer les composés à base de carbone. Les métaux les plus précieux, comme le cobalt, le nickel et le manganèse, se concentrent alors dans un alliage qui peut ensuite être raffiné à l'aide de l'hydrométaux pour récupérer chaque métal séparément. L'un des avantages de cette méthode est qu'elle simplifie le processus en évitant certaines étapes comme le broyage ou d'autres prétraitements. En revanche, elle présente plusieurs limites. Des composants importants des batteries, tels que le lithium, l'électrolyte, le graphite, l'aluminium ou encore l'acier, sont perdus durant le processus, notamment sous forme de gaz ou de résidus solides (scories). Par ailleurs, le traitement des fumées issues de cette méthode nécessite des installations coûteuses pour éviter la diffusion de substances toxiques dans l'atmosphère. Enfin, cette technique est peu rentable pour recycler des batteries lithium-ion peu concentrées en métaux précieux, puisque la majorité des éléments ne sont pas récupérés (Beaudet et al., 2020).

Ensuite, l'**hydrométaux** repose sur la capacité de certains métaux, comme le lithium et les métaux de transition, à bien se dissoudre dans des solutions acides. Cette méthode commence généralement par le broyage des batteries, suivi d'un tri mécanique permettant de séparer différents composants, notamment l'acier, le cuivre et l'aluminium, qui représentent une part importante de la valeur économique des batteries usagées. Un des grands avantages de l'hydrométaux par rapport à la pyrométaux est la possibilité de récupérer efficacement le lithium, souvent sous forme de carbonate de lithium ( $Li_2CO_3$ ), après purification des solutions obtenues lors de la lixiviation. Grâce à cette capacité de valorisation plus complète, les procédés hydrométauxiques sont aujourd'hui largement considérés comme les plus prometteurs pour le recyclage des batteries lithium-ion. Cette tendance se confirme dans les publications scientifiques : selon Melin (2019), plus de 75 % des études sur le sujet s'intéressent principalement à cette méthode. À l'échelle industrielle, plusieurs entreprises canadiennes, telles que Retriev, Lithion Recycling, Neometals ou encore Li-Cycle, développent déjà des infrastructures spécialisées dans ce type de recyclage (Beaudet et al., 2020).

Enfin, la dernière piste est celle du **recyclage direct** : celle-ci cherche à préserver et restaurer les propriétés d'origine des matériaux actifs utilisés dans les cathodes des batteries lithium-ion, sans passer par leur décomposition chimique. L'objectif est de pouvoir réemployer ces matériaux tels quels dans la fabrication de nouvelles batteries. Cette approche utilise différentes techniques, mécaniques, thermiques, chimiques ou électrochimiques avec pour but final de les réutiliser directement. Bien que les avancées récentes soient encourageantes et montrent une amélioration de l'efficacité des procédés, la capacité à rétablir complètement les performances initiales des cathodes n'a pas encore totalement prouvée. Sur le plan économique, cette méthode peut offrir des matériaux de haute valeur ajoutée, mais elle implique des étapes de tri et de prétraitement particulièrement complexes. Un autre défi important concerne l'évolution rapide des technologies : les matériaux récupérés risquent de devenir obsolètes d'ici leur réutilisation, pouvant intervenir jusqu'à quinze ans après leur fabrication initiale (Beaudet et al., 2020).

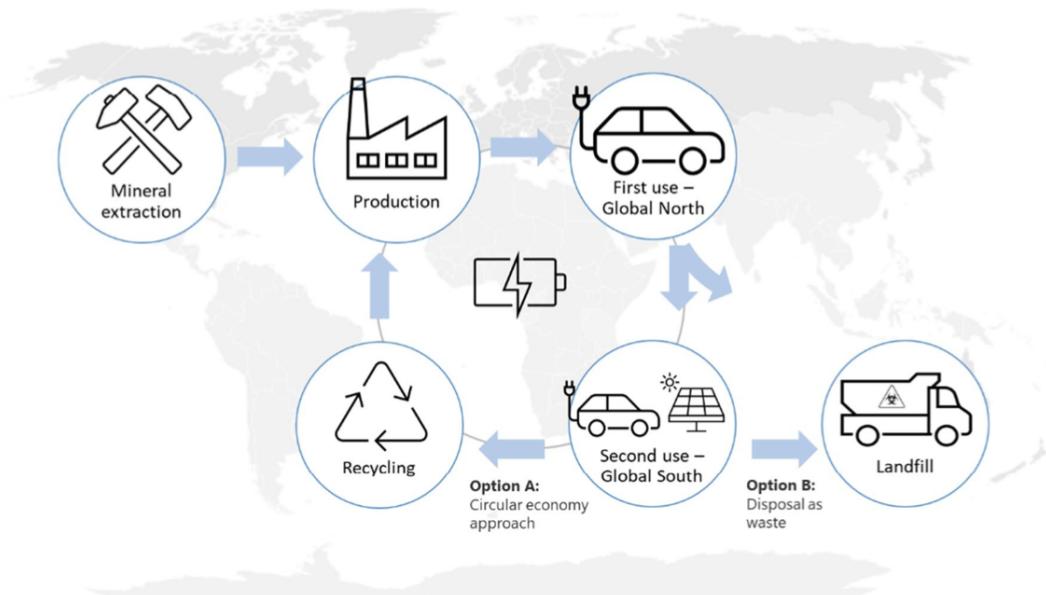


Figure 10 - Cycle de vie de la batterie lithium-ion (Prates et al., 2023 :9)

Lorsque le sujet du recyclage et de l'impact environnemental est abordé, il est important de parler du continent africain. En effet, de toutes les situations environnementales désastreuses qui pourraient arriver avec un réchauffement climatique dépassant les 1,5 °C, l'Afrique est le continent le plus exposé à ces changements climatiques (Ayetor, 2022). Le continent africain est exposé à ces menaces, bien qu'il soit le moins responsable du changement climatique, au regard émissions de CO<sub>2</sub> produites par habitant (Global Carbon Atlas, 2023).

Région	Émission de MtCO <sub>2</sub>	Émission de tCO <sub>2</sub> par habitant
Asie	19.747	4,2
Amérique du Nord	5.944	12
Europe	4.993	6,7
Moyen-Orient	2.861	7,8
Afrique	1.419	1
Amérique du Sud	1.109	2,5
Océanie	422	12
Amérique centrale	180	1,9

Tableau 2 - Comparaison des émissions de MtCO<sub>2</sub> par continent (Global Carbon Atlas, 2023)

Au niveau mondial, l'Afrique subsaharienne présente les plus hautes concentrations d'exposition aux PM2.5, ce qui a conduit cette région à atteindre en 2020 la mortalité néonatale la plus importante due à la contamination de l'air (Ayetor, 2022).

## 2.8. Impact de la voiture électrique sur l'Afrique

L'étude menée par le programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) sur 146 pays a révélé que, de 2015 à 2018, 14 millions d'automobiles légères d'occasion ont été expédiées à travers le monde. Parmi ces véhicules, environ 80 % se trouvaient dans les pays à revenus faibles et modérés. Pendant cette période, l'UE constituait le plus important exportateur de véhicules d'occasion, soit 54 % du total exporté, suivie du Japon (27 %) et des États-Unis (18 %). Il faut souligner que le rapport du PNUE ne comprend pas d'information concernant les exportations de véhicules d'occasion provenant de la Chine. Les principales destinations des véhicules d'occasion venant de l'Union européenne sont l'Afrique de l'Ouest et du Nord (Prates et al., 2023).

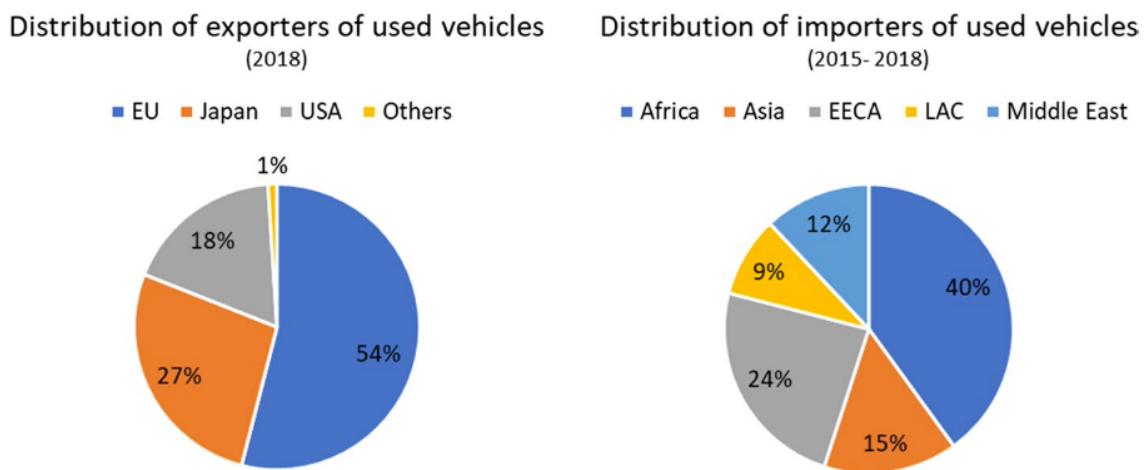


Figure 11 - Répartition des exportateurs et des importateurs de véhicules d'occasion (based on UNEP 2020) (Prates et al., 2023:3)

Dans ce même continent africain, il faut souligner que plus de 60 % des véhicules entrant sur le continent chaque année sont des modèles d'occasion et que l'âge moyen de ces modèles est compris entre 12 et 16 ans (Prates et al., 2023). Par exemple, plus de 50 % des véhicules présents en Égypte en 2015 avaient plus de 22 ans (Ayetor, 2022). Parmi les cinquante-quatre pays du continent, quarante ont été évalués comme ayant un cadre réglementaire faible ou très faible en ce qui concerne le commerce des véhicules usagés (Prates et al., 2023). « Les émissions de dioxyde de carbone des véhicules en Afrique augmentent à un taux moyen de 7 % par an » (Ayetor, 2022:1). De plus, en examinant les contributeurs aux émissions automobiles, on constate que l'Égypte, l'Afrique du Sud, le Nigéria, la Libye, le Maroc, le Kenya et le Ghana constituent ensemble au moins 70 % de ces dernières (Ayetor, 2022).

### 2.8.1. Barrières à l'adoption

Un obstacle important à la transition vers les véhicules électriques est que le continent africain possède le plus faible accès à l'électricité dans le monde. « L'accès à l'électricité en Afrique subsaharienne était de 48 % en 2019, contre une moyenne mondiale de 90 %. L'accès à l'électricité en Afrique centrale, de l'Est, de l'Ouest, du Nord et en Afrique du Sud est respectivement de 24 %, 47 %, 56 %, 99 % et 94 %. Les pays d'Afrique du Nord et l'Afrique du Sud sont bien placés pour l'électrification des véhicules, contrairement à l'Afrique centrale, de l'Ouest et de l'Est. » (Ayetor, 2022:3)

En plus de l'apport en électricité qui est plus faible que dans d'autres continents, la majorité des nations africaines ne disposent pas de standards et de connaissances pour les véhicules électriques. À travers le continent, les véhicules électriques sont considérés comme des véhicules classiques dans les centres de contrôle technique. Les techniciens n'ont pas reçu une formation spécifique pour reconnaître les véhicules électriques. Il est crucial que les mécaniciens soient formés et certifiés pour la réparation des véhicules électriques, afin de prévenir tout danger. Par ailleurs, il est essentiel que les premiers intervenants soient formés pour contrôler les risques associés aux véhicules endommagés et aux incendies issus des installations de recharge (Ayetor, 2022).

Parmi tous ces pays, c'est l'Afrique du Sud qui compte actuellement le plus grand nombre de véhicules en circulation sur le continent et qui était donc attendu comme le leader dans la transition vers les véhicules électriques. Malheureusement, en 2019, le total des véhicules électriques en Afrique du Sud s'élevait à 4.998 unités, ce qui ne constituait que 0,04 % de l'ensemble de sa flotte de véhicules.

Toutefois, en termes de ratio « bornes de recharge par rapport à la flotte de véhicules électriques », l'Afrique du Sud se classe tout de même au cinquième rang mondial (Ayetor, 2022).

## 2.9. Afrique du Sud

### 2.9.1. Consommation d'électricité sud-africaine

Selon certains chercheurs, l'impact environnemental des véhicules électriques est étroitement lié à la source d'énergie utilisée dans le réseau électrique. Dans des pays comme les États-Unis et la Chine, où les centrales au charbon restent prédominantes dans la production d'électricité, les véhicules électriques peuvent présenter un impact environnemental similaire, voire supérieur, à celui des véhicules à moteur thermique (Liu et al., 2012).

L'arrivée des véhicules électriques pourrait entraîner le besoin de nouvelles capacités de production d'électricité. Ainsi, il serait pertinent d'évaluer les impacts énergétiques et environnementaux des véhicules électriques en tenant compte du mix de production. Cette approche est justifiée aux États-Unis, où la consommation d'électricité est stable depuis dix ans, et où toute nouvelle capacité viserait principalement ces véhicules. En revanche, cette situation diffère en Afrique du Sud et dans d'autres pays en développement, où les véhicules électriques ne seront qu'un des nombreux facteurs d'augmentation de la demande d'électricité. En Afrique du Sud, par exemple, la consommation d'électricité a progressé en moyenne de 3 % par an sur les deux dernières décennies. Le Conseil pour la Recherche Scientifique et Industrielle prévoit que la demande d'électricité sud-africaine en 2030 sera entre 40 % et 60 % supérieure à celle de 2009, et les prévisions de la division « Systèmes et Planification d'Eskom<sup>3</sup> » indiquent une demande encore plus importante. Aucun de ces modèles n'intègre la consommation liée aux véhicules électriques (Liu et al., 2012).

### 2.9.2. Impacts environnementaux

#### 2.9.2.1. Mix énergétique en Afrique du Sud

TABLE 1: Generation capacity and energy share in South Africa in 2010 and in 2030<sup>a</sup>.

Fuel type	Fuel subtype	Generation capacity (GW)		Energy share (%)	
		2010	2030	2010	2030
Coal	-	35.5	41.1	90.0	65.5
	Current (includes return to service)	35.5	26.1	90.0	41.6 <sup>b</sup>
	New PF	-	11.0	-	17.5 <sup>b</sup>
	New FBC	-	1.75	-	2.8 <sup>b</sup>
	New PF + FGD	-	2.25	-	3.6 <sup>b</sup>
Nuclear	-	1.8	11.4	5.0	20.0
Pump storage	-	1.6	2.9	-	-
Gas-CCGT	-	0.0	2.4	0.0	0.8
Peak-OCGT	-	2.4	7.3	< 0.1	0.2
Hydropower	-	2.1	4.8	5.0	6.0
Renewables	-	0.0	18.8	0.0	7.5
Others	-	0.5	0.9	< 0.1	< 0.1
<b>TOTAL</b>	-	<b>43.9</b>	<b>89.5</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>

PF, pulverised fuel; FBC, fluidised bed combustion; FGD, flue gas desulphurisation; OCGT, open-cycle gas turbine; CCGT, closed-cycle gas turbine.

<sup>a</sup>, Based on the policy-adjusted integrated resource plan (IRP) from IRP 2010 Revision 2.<sup>11</sup>

<sup>b</sup>, Estimated under the assumption that all coal-fired power plants contribute the same online time.

Tableau 3 - Capacité de production et répartition de l'énergie en Afrique du Sud : 2010 & 2030 (Liu et al., 2012 :2)

Comme inscrit dans le tableau précédent, la majorité de l'électricité produite en Afrique du Sud provient du charbon. C'est pourquoi « le rapport annuel d'Eskom de 2010 indique que pour chaque kWh produit, les émissions de CO<sub>2</sub> sont de 0,98 kg, les émissions de particules de 0,39 g, les émissions de SO<sub>2</sub> de 8,10 g et les émissions de NOx (sous forme de NO<sub>2</sub>) de 4,17 g. » (Liu et al., 2012:3). Si une

<sup>3</sup> Eskom: Eskom Holdings SOC Ltd est une compagnie de production et distribution d'électricité numéro une en Afrique du Sud.

comparaison devait être effectuée avec les émissions des pays européens, ou des pays plus développés que l'Australie et les États-Unis, la conclusion serait que ces chiffres sont très élevés (Liu et al., 2012).

Quand les véhicules électriques actuels sont chargés en Afrique du Sud, on observe que les émissions de NOx (oxydes d'azote) sont 2 à 6 fois plus élevées que celles des VMT. C'est le même constat pour les émissions d'oxydes de soufre, sauf que dans ce cas, ces émissions sont 35 à 50 fois plus importantes pour la voiture électrique que pour les VMT. Par conséquent, ceci augmente les émissions de gaz à effet de serre de 65 à 115 %. En cas d'amélioration de la production d'électricité du pays, nous pourrions considérer les voitures électriques comme étant une solution plus saine pour l'environnement (Liu et al., 2012)

Certaines questions restent en suspens, telles que l'opinion des futurs utilisateurs à l'égard de la voiture électrique, le poids des dimensions environnementales, sociales et économiques dans leur prise de décision, ainsi que la manière avec laquelle les experts du secteur évaluent les avancées déjà réalisées à ce stade de la transition vers les véhicules électriques. Ce mémoire tentera d'apporter des éléments de réponse à ces interrogations.

### 3. Méthodologie

#### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons le sujet de la méthodologie utilisée dans cette recherche. Pour comprendre ce choix, celle-ci a été choisie en se basant sur le cours de monsieur Cédric Dufays « GEST7004 – Master Thesis Methodology » qui est donné aux étudiants de Master 2 de HEC Liège, la faculté d'économie et de management de l'Université de Liège.

Un ouvrage additionnel de Sheppard (2020) a également été utilisé pour définir que notre recherche était une recherche descriptive. Il n'y a pas d'introduction de nouvelles théories ou de nouveaux concepts, mais bien une description d'un phénomène déjà bien connu.

Pour appuyer ma prise de décision, j'ai choisi de ne pas m'appuyer uniquement sur un cours suivi à mon université, mais également sur l'ouvrage scientifique de Borgstede & Scholz (2021). Cet ouvrage m'a également conduit à adopter une démarche qualitative, qui s'inscrit dans une approche *bottom-up*. Cette méthode s'appuie sur les expériences réelles et les opinions des individus afin d'en tirer des conclusions, ce qui supporte mon choix. Ainsi, cette démarche permet de partir des perceptions de terrain pour construire une analyse plus ancrée dans la réalité. Dans ce sens, trois interviews ont été réalisées. La première a été menée avec un expert sur le flux d'électricité, une variable essentielle pour les voitures électriques. La seconde a été réalisée avec un expert du recyclage des batteries électriques, qui constitue la dernière étape du cycle de vie de ces véhicules. Enfin, une troisième interview a eu lieu avec le responsable du secteur automobile aux Pays-Bas pour l'entreprise de conseil, d'audit et de fiscalité PwC (PricewaterhouseCoopers). Il fait également partie de l'équipe responsable du secteur automobile pour la région EMEA.

Ensuite, ce sujet est un sujet d'actualité et celui-ci aura un impact sur chacun d'entre nous dans le futur ; il revient donc aux consommateurs finaux de forger leur propre opinion sur la faisabilité de ce projet. C'est pourquoi j'ai également souhaité réaliser un questionnaire quantitatif en utilisant une échelle de Likert<sup>4</sup>, pour cette recherche le choix d'une échelle de Likert à 5 points a été effectué car elle est « plus simple et plus rapide » (Moore, 2025:1). Celle-ci permet aux répondants d'exprimer leur opinion graduellement et de quantifier leurs perceptions sur des questions inhérentes aux VE.

J'ai également intégré des questions fermées avec des réponses binaires de type « oui/non », afin d'obtenir des données claires et mesurables, ainsi que des questions ouvertes, de nature qualitative, qui permettent aux répondants d'exprimer librement leur point de vue par l'intermédiaire des outils utilisés.

#### 3.2. Outils utilisés

Pour répondre aux objectifs principaux de ce mémoire portant sur l'impact de la chaîne logistique causé par la transition entre les véhicules thermiques et électriques, une approche quantitative a été privilégiée par le biais d'un questionnaire. Ce dernier a été réalisé à l'aide de Google Forms, un outil permettant de concevoir les questions, de collecter les réponses et de faciliter leur traitement ultérieur. Le choix de cet outil repose sur plusieurs raisons : mon usage fréquent depuis deux ans, ainsi que la possibilité d'exporter directement les données vers Excel, ce qui simplifie l'analyse. De plus, Google Forms permet de proposer le questionnaire en plusieurs langues et de regrouper les réponses.

---

<sup>4</sup> L'échelle de Likert (ou échelle d'attitude) est un système de notation sémantique, généralement composé de 5 ou 7 items, qui est utilisé dans les sondages pour mesurer et évaluer les perceptions, attitudes et opinions (Qualtrics, s. d.).

Ce questionnaire a été publié en français, en néerlandais, les deux principales langues officielles de la Belgique, auxquelles nous avons ajouté l'anglais, qui est considéré « comme la langue la plus parlée à travers le monde » (UCL, 2022 :1).

Le questionnaire comporte environ 30 questions, regroupées en sous-catégories selon les thèmes principaux : *Environnement, Économie, Aspect Social, ainsi que Gestion des Déchets et Recyclage*. La majorité des questions sont formulées sous forme de questions à choix multiple, afin de faciliter le remplissage du formulaire par le public cible.

### 3.3. Public cible

Cette enquête ne fixe aucune restriction sur le public cible. En effet, elle a été adressée tant à des citoyens titulaires d'un permis de conduire que des citoyens n'en étant pas détenteurs. La logique inhérente à ce choix est que chacun joue un rôle important dans le marché émergent des véhicules électriques, en tant que consommateur potentiel. De plus, toutes les tranches d'âge sont concernées, car les voitures électriques représentent une technologie d'avenir et l'avis des jeunes générations est également pertinent. L'objectif est avant tout de déterminer si l'opinion varie en fonction des individus, notamment selon qu'ils possèdent ou non un véhicule électrique. Bien que les autorités belges encouragent l'acquisition de véhicules électriques, la décision d'achat reste individuelle. Ce sont les choix des consommateurs qui auront un impact à long terme : si la demande pour ces véhicules diminue, les effets négatifs de leur chaîne logistique pourraient également se réduire.

Pour approfondir cette recherche, une série d'interviews sera également réalisée dans le but de recueillir des données qualitatives. La première visera à mieux comprendre la composition future du mix énergétique belge, et de quelle manière l'électricité sera produite. Cette analyse permettra d'évaluer si, avec l'évolution du secteur énergétique belge, les véhicules électriques peuvent réellement constituer une alternative plus respectueuse de l'environnement (Engie). La seconde interview portera sur les avancées dans le recyclage des batteries lithium-ion, afin de recueillir des informations sur les pratiques de fin de vie de ces batteries avec l'entreprise Umicore. Celle-ci est la seule en Belgique à actuellement détenir le savoir et les compétences nécessaires pour réaliser ce type d'activité. La dernière interview aura pour objectif d'obtenir un avis plus neutre que les deux précédentes. Elle consistera à recueillir l'opinion de Monsieur Berings (notre intervenant de l'entreprise PWC) sur la transition, en mettant en lumière sa perception personnelle. Contrairement aux deux premiers entretiens réalisés auprès d'acteurs directement impliqués dans la transition, celui-ci sera mené auprès d'un organisme perçu comme plus indépendant et objectif.

#### 3.3.1. Évaluation et ajustement du questionnaire

De plus, avant la publication de mon questionnaire, j'ai pris la décision de le tester sur un échantillon restreint de personnes : une personne de 22 ans dont le plus haut diplôme obtenu est un bachelier, une personne de 46 ans avec un diplôme de master, une personne de 35 ans dont le plus haut diplôme est un CESS et une personne de 52 ans possédant uniquement l'équivalent du CE1D.

L'objectif de ce test, dont les réponses ne seront pas prises en considération, était d'analyser mes questions une par une, de vérifier leur clarté et de m'assurer qu'elles n'étaient pas formulées de manière à influencer les réponses des participants. Chaque test a été effectué séparément, afin d'évaluer les réactions individuelles et d'obtenir un retour personnalisé sur les questions posées. Cet échantillon n'a cependant pas été choisi au hasard. Il me fallait un groupe diversifié, dans le but d'être le plus représentatif de la population belge, incluant des individus de différents âges et avec des niveaux d'éducation variés.

Enfin, ce questionnaire aura pour objectif de vérifier, ou non, les hypothèses initialement formulées.

## 3.4. Hypothèses

Voici les hypothèses qui seront testées au cours des différentes interviews et du questionnaire.

### 3.4.1. Connaissance des impacts sociaux et environnementaux

Je pars du principe que mon public cible est conscient des effets sociaux et environnementaux négatifs causés par la transition des véhicules thermiques vers les véhicules électriques. Toutefois, ces impacts sont souvent négligés lors de l'achat, au cours duquel l'aspect économique reste le principal critère décisionnel.

### 3.4.2. Perception environnementale des véhicules électriques

Une hypothèse clé est que la majorité des répondants considèrent que les véhicules électriques ont un impact environnemental moins néfaste que les véhicules thermiques à l'échelle mondiale.

### 3.4.3. Habitudes de recharge

Concernant les bornes de recharge, j'émets l'hypothèse que les utilisateurs rechargent majoritairement leur véhicule électrique à domicile plutôt que sur leur lieu de travail, en m'appuyant sur l'étude de LaMonaca & Ryan (2022). Toutefois, la présence déjà significative de bornes de recharge dans les environnements professionnels pourrait nuancer cette hypothèse.

### 3.4.4. Impact économique des batteries

Il est probable que les répondants estiment que la fabrication des batteries électriques engendre un impact économique négatif sur les pays producteurs de matériaux critiques nécessaires à leur fabrication.

### 3.4.5. Absence de bruit

L'absence de bruit des véhicules électriques pourrait être perçue de manière partagée par les répondants : certains y verront un avantage, d'autres un risque potentiel pour l'avenir.

### 3.4.6. Connaissance sur la fin du cycle de vie des véhicules électriques

L'hypothèse est que la majorité des répondants ne savent pas où finissent les véhicules électriques après leur utilisation, ou ne s'en préoccupent pas. Pour eux, les impacts sociaux et environnementaux associés au recyclage et à la gestion des déchets sont perçus comme mineurs. Par ailleurs, ils estiment probablement que les infrastructures et technologies pour gérer ces aspects sont déjà moyennement développées et ne nécessitent pas d'investissements urgents.

### 3.4.7. Connaissance générale du sujet

Ce questionnaire inclut une option « je ne sais pas » pour les répondants qui ne savent pas comment répondre à une question. Cette approche vise à limiter les réponses aléatoires, mais elle repose sur l'hypothèse qu'une part significative des participants manque d'informations suffisantes sur le sujet.

### 3.4.8. Interview Engie

Lors de mon entretien avec un représentant de Engie, je m'attends à ce qu'il affirme que la montée en puissance des véhicules électriques peut coexister avec la vie quotidienne des habitants. Cela pourrait être un projet viable, notamment dans un contexte où l'abandon progressif de l'électricité nucléaire coïncide avec l'expansion des véhicules électriques.

### 3.4.9. Interview Umicore

Pour cette interview, je pars de l'hypothèse que le membre de l'entreprise m'expliquera que la situation actuelle du recyclage de ces batteries en est encore à ses débuts (early stages). Bien que le

recyclage des batteries électriques soit coûteux, il s'agit d'une solution prometteuse pour l'avenir, offrant des perspectives positives sur le plan environnemental. L'hypothèse concernant cette interview est que selon lui, cette approche serait respectueuse de l'environnement et essentielle pour accompagner la transition énergétique de manière durable.

### 3.4.1. Interview PWC

L'hypothèse sous-jacente à cet entretien est que Monsieur Berings adhère à la transition vers les véhicules électriques, tout en adoptant une posture mesurée. Il est probable qu'il insiste sur la nécessité de laisser du temps aux différents acteurs pour s'adapter et qu'il adopte une attitude attentiste, préconisant l'observation des évolutions plutôt que l'alarmisme. En raison de sa position professionnelle, son point de vue pourrait s'aligner avec celui des pays de la région EMEA ainsi qu'avec les orientations stratégiques soutenues par le gouvernement néerlandais. Par ailleurs, en tant que praticien de la fiscalité et des lois, il est vraisemblable qu'il considère que l'acceptation des nouvelles réglementations ne pose pas de difficulté majeure, dans la mesure où la législation en vigueur doit être appliquée et respectée en tant que tel.

Ces hypothèses seront testées par l'intermédiaire de questionnaires ou d'interviews ; cependant, les données qui en ressortent peuvent être faussées en raison de certains biais.

## 3.5. Biais

Lors de ma réflexion concernant les biais éventuels qui pourraient exister au sein des réponses de mon questionnaire, j'ai décidé de baser la majorité de mon analyse sur deux articles (Sarniak, 2015) et (Kowalska, 2024).

### 3.5.1. Biais lié au public cible

Je pars du principe qu'une proportion significative des répondants à mon questionnaire sera composée des personnes de mon entourage. En leur expliquant le contexte de mon mémoire et mon opinion sur la transition entre les véhicules thermiques et électriques, j'ai probablement influencé leurs réponses avant même qu'ils ne remplissent le formulaire. Ce biais est très étroitement lié à l'un des biais mentionnés par Sarniak (2015), à savoir le biais d'acquiescement. Ce biais a toutefois été partiellement atténué en élargissant l'échantillon à des répondants extérieurs au cercle personnel, notamment en sollicitant des relais dans des entreprises (BDO, KPMG et autres), ainsi qu'à l'université de Liège, afin qu'ils diffusent le questionnaire à leur propre réseau.

### 3.5.2. Formulation des questions

La manière avec laquelle les questions sont posées, notamment en évoquant l'importance ou non des effets sociaux et environnementaux, peut orienter les réponses des participants. En sous-entendant que ces effets sont significatifs, je risque de biaiser leurs réponses et de limiter leur objectivité. De plus, l'ordre des questions peut influencer un individu, cela fait référence à deux biais évoqués par Sarniak (2015), à savoir le biais des questions suggestives et de la formulation ainsi que le biais de l'ordre des questions.

### 3.5.3. Biais Engie

Concernant l'entretien avec un membre d'Engie, je pense qu'il y a un biais inhérent. Une personne travaillant pour l'entreprise sera peu enclue à critiquer un projet porté par celle-ci, et les réponses obtenues pourraient donc manquer de neutralité. Cela nous ramène au biais de conformité évoqué par Kowalska (2024) dans lequel certaines personnes pourraient répondre « ce qu'il faut répondre » par peur de répercussions, et surtout dans le cas de figure où le questionnaire n'est pas anonyme. De plus, notre interlocuteur au sein de cette entreprise a demandé que la retranscription de notre entrevue soit validée par sa hiérarchie avant de me l'envoyer.

### 3.5.4. Biais Umicore

De même, lors de l'entretien avec un représentant d'Umicore, je pense que son discours pourrait être orienté positivement. L'interlocuteur pourrait insister sur la viabilité du recyclage des batteries à long terme, en soulignant une réduction progressive des coûts grâce à des moyens de recyclage améliorés et une diminution des impacts environnementaux. Cependant, ces réponses risquent de refléter davantage la position officielle de l'entreprise que des faits totalement objectifs. Nous revenons une fois de plus sur le biais de conformité mentionné précédemment par Kowalska (2024).

### 3.5.5. Biais Pwc

Lors de l'entretien avec Monsieur Berings, nous pourrions être confrontés à un biais appelé eurocentrisme. Dans ce contexte précis, cela signifie que Monsieur Berings pourrait minimiser les impacts négatifs de cette transition sur les pays non européens, en adoptant prioritairement un point de vue européen (Sundberg, 2009). Ce biais pourrait se manifester, par exemple, si Monsieur Berings concentre exclusivement son analyse sur les Pays-Bas et l'Europe, sans prendre en compte les répercussions de cette transition au-delà des frontières européennes.

Après avoir présenté les hypothèses à tester à l'aide des outils utilisés et les biais éventuels pouvant interférer dans le processus de collecte des informations, les résultats obtenus grâce à ces outils sont présentés dans le chapitre suivant.

## 4. Résultats

### 4.1. Analyse des données quantitatives

#### 4.1.1. Analyse descriptive

Le questionnaire mis en place devait atteindre un minimum de 385 réponses. Ce chiffre a été obtenu après avoir sélectionné une marge d'erreur de 5 % et un niveau de confiance de 95 %, qui est le niveau le plus couramment choisi lors de la collecte de données (Calculer la taille d'échantillon d'un sondage, s. d.), (Appinio, 2023). L'échantillon souhaité a été calculé grâce à la formule suivante : «

$$n = \frac{t_p^2 \times P(1 - P) \times N}{t_p^2 \times P(1 - P) + (N - 1) \times y^2}$$

- n : taille de l'échantillon.
- N : taille de la population cible (nombre de ménages, d'usagers, etc.), réelle ou estimée.
- P : proportion attendue d'une réponse de la population ou proportion réelle.
- $t_p$  : intervalle de confiance d'échantillonnage.
- y : marge d'erreur d'échantillonnage. » (Boujdid, s. d. : 2)

Ce questionnaire de recherche a recueilli 402 réponses, atteignant ainsi le minimum initialement fixé. Ce nombre de réponses est passé de 402 à 398 après le tri des données. Les réponses considérées comme incohérentes ont été supprimées, ainsi que celles ayant subi des modifications lors de leur importation dans Excel.

Ces 402 réponses initialement recueillies proviennent des questionnaires que nous avons effectués en trois langues : néerlandais, anglais et français. Il y a eu 375 répondants en français, 18 en anglais et 5 en néerlandais.



Figure 12 - Répartition par langue

n = 402 répondants

Dans les réponses obtenues, la répartition entre hommes et femmes est quasi parfaite : 49,25 % des réponses proviennent de femmes et 50,75 % d'hommes, avec un total de 398 répondants (n).

Ces réponses sont réparties selon cinq tranches d'âge :

- moins de 18 ans : 0,5 %
- 18-24 ans : 42,96 %
- 25-34 ans : 17,84 %
- 35-44 ans : 11,06 %
- 45-54 ans : 16,58 %

- 55 ans et plus : 11,06 %
- n = 398 Personnes.

Il est important de souligner que 42,96 % des répondants de mon échantillon, que je souhaitais représentatif de la population, ont entre 18 et 24 ans. Cette surreprésentation s'explique par le fait que le questionnaire a d'abord été diffusé dans un milieu universitaire, principalement auprès d'étudiants, avant d'être partagé plus largement via les réseaux sociaux.

#### 4.1.2. Test des hypothèses

Dans cette section, les hypothèses présentées précédemment seront testées en s'appuyant sur les réponses du questionnaire comme support d'analyse et de réflexion.

#### 4.1.3. Connaissance des impacts sociaux et environnementaux

Plusieurs combinaisons de questions du questionnaire peuvent permettre de vérifier cette hypothèse.

##### 4.1.3.1. Première association

- « Que pensez-vous de l'impact des méthodes d'extraction du lithium, du cobalt et du nickel sur les écosystèmes locaux ? »
- « Dans quelle mesure cet aspect environnemental, qu'il soit positif ou négatif, intervient-il dans votre prise de décision ? »

Concernant la première question, 76,38 % des répondants estiment que l'impact des méthodes d'extraction est soit « catastrophique », soit « important » pour les écosystèmes locaux. Cela indique que les participants ont une connaissance avancée du sujet. Cependant, seuls 25,38 % de l'ensemble des répondants affirment que cet aspect joue un rôle prépondérant dans leur prise de décision.

Parmi ceux qui reconnaissent l'impact prépondérant de l'extraction, seulement 30,92 % prennent cette variable en compte dans leurs choix.

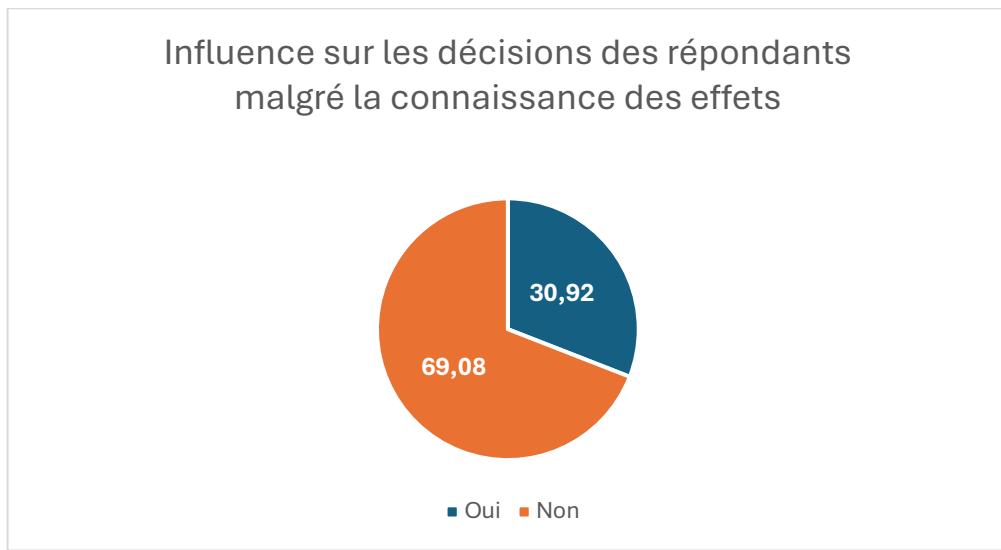


Figure 13 - Influence sur les décisions des répondants malgré la connaissance des effets

n = 398 répondants

Après avoir effectué un test de corrélation, nous avons obtenu une corrélation positive de 0,23 entre ces deux variables, ce qui indique une relation positive. Cependant, comme le suggérait l'hypothèse, les impacts environnementaux ne sont pas systématiquement pris en compte dans la prise de décision.

#### 4.1.3.2. Deuxième association

La deuxième association de questions du questionnaire quantitatif pouvant être utilisée pour vérifier notre hypothèse est la suivante :

- « Dans quelle mesure cet aspect environnemental, qu'il soit positif ou négatif, intervient-il dans votre prise de décision ? »
- « Dans quelle mesure pensez-vous que la production des batteries des véhicules électriques affecte l'environnement ? »

En réponse à la question sur la production des batteries, 77,64 % des répondants (309/398) considèrent qu'elle a un impact important sur l'environnement (addition des réponses "impact beaucoup" et des réponses "impact énormément"). Toutefois, comme énoncé dans la première association de questions utilisée pour vérifier cette hypothèse, seulement 25,38 % de l'ensemble des répondants affirment que cet aspect a un impact décisif dans leurs prises de décision.

En croisant les deux ensembles de données, on constate que seuls 27,83 % des personnes conscientes des effets environnementaux des batteries prennent cet aspect en compte dans leurs décisions finales.

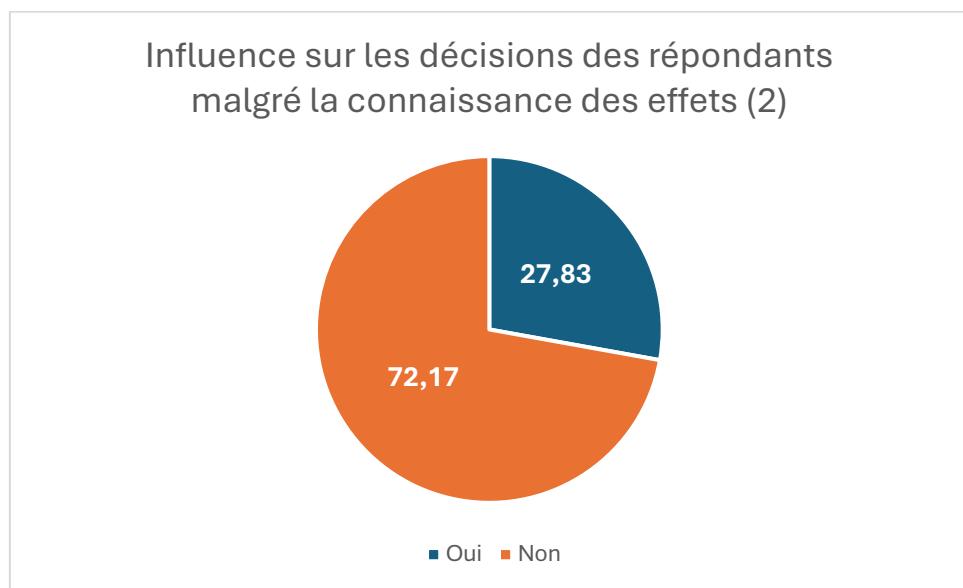


Figure 14 - Influence sur les décisions des répondants malgré la connaissance des effets (2)

n = 398 répondants

#### 4.1.4. Perception environnementale des véhicules électriques

Cette seconde hypothèse vise à démontrer que la majorité des répondants considèrent que ce type de véhicule a un impact moins néfaste sur l'environnement mondial que les véhicules thermiques. Les réponses à la question suivante permettent de vérifier cette hypothèse : « Êtes-vous d'accord pour dire que l'utilisation des véhicules électriques réduit l'empreinte carbone comparativement aux véhicules thermiques ? ».

À cette question, 41,2 % des répondants estiment que les véhicules électriques ont une empreinte carbone réduite par rapport aux véhicules thermiques. Afin de déterminer si leur réponse a été influencée par leur éventuelle possession d'un véhicule électrique, une analyse croisée des deux variables a été réalisée.

On observe ainsi que, parmi les 64 répondants possédant un véhicule électrique, 32 considèrent que ce type de véhicule a un impact environnemental plus favorable. De plus, parmi les 8 répondants

possédant un véhicule électrique personnel (et non une voiture de société), 5 estiment que l'empreinte carbone des véhicules électriques est inférieure à celle des véhicules thermiques.

Cependant, ces résultats peuvent être influencés par deux biais cognitifs :

1. **Le biais de confirmation** : ce biais influence la manière dont nous recevons, interprétons et mémorisons l'information. Nous avons tendance à interpréter les données de manière à conforter nos croyances et nos décisions initiales (Cherry, 2024).
2. **Le biais de l'engagement** : l'être humain a tendance à baser ses croyances et ses actions futures sur ses choix passés. Dans le cas des véhicules électriques, l'investissement financier peut rendre difficile une remise en question et l'admission d'une éventuelle erreur (Vitaud, 2023).

#### 4.1.5. Habitudes de recharge

L'hypothèse initiale suggérait que les utilisateurs de véhicules électriques rechargent principalement leur voiture à leur domicile plutôt que sur leur lieu de travail. Cette hypothèse reposait également sur l'idée que la majorité des voitures électriques étaient des véhicules de société fournis aux particuliers. La deuxième partie de cette hypothèse est confirmée : parmi les 64 répondants possédant une voiture électrique, 56 (soit 83,92 %) déclarent posséder un véhicule de société. Ce phénomène peut s'expliquer par l'avantage fiscal en Belgique, grâce auquel les voitures électriques sont 100 % déductibles pour les entreprises jusqu'au 31 décembre 2026 (Fiscalité des voitures de société en 2024 - CBC Banque et Assurance, s.d.).

Ensuite, l'hypothèse principale concernant la recharge à domicile est vérifiée. Parmi les 64 utilisateurs de voitures électriques, 31 (48,44 %) déclarent recharger leur véhicule à domicile, tandis que 20 (31,25 %) privilégiennent leur lieu de travail.

Cependant, une analyse plus approfondie révèle que 67,74 % des utilisateurs rechargeant leur voiture à domicile utilisent une borne installée par leur employeur. Bien que la recharge ne se fasse pas directement sur le lieu de travail, il existe une relation de causalité, car l'employeur facilite l'installation de bornes à domicile.

Une autre explication possible de la validation de l'hypothèse réside dans le nombre limité de bornes de recharge sur les lieux de travail.

- 37,5 % des répondants qui possèdent une voiture électrique personnelle déclarent ne pas avoir de borne de recharge sur leur lieu de travail.
- Parmi les répondants possédant une voiture électrique, 42,86 % indiquent cependant avoir accès à plus de 10 bornes sur leur lieu de travail et ces personnes possèdent toutes une voiture de société électrique.

Enfin, parmi ceux qui rechargent principalement leur voiture électrique à domicile, 35,48 % déclarent ne pas disposer de borne de recharge au travail, ce qui explique pourquoi ils ne peuvent pas y recharger leur véhicule. Un fait notable est que 23,21 % des personnes possédant une voiture électrique de société n'ont pas de borne de recharge sur leur lieu de travail, ce qui peut paraître paradoxal.

#### 4.1.6. Impact économique des batteries

L'hypothèse testée dans cette section suggère que, selon les répondants, les batteries électriques ont un effet économique négatif sur les pays producteurs de matériaux critiques nécessaires à leur fabrication. Pourtant, comme démontré dans la revue de littérature, l'impact économique est généralement positif, contrairement aux effets environnementaux et sociaux.

Afin d'évaluer cette perception, la question suivante a été posée dans le questionnaire : « Selon vous, la production de batteries électriques profite-t-elle économiquement aux populations locales des pays producteurs de matériaux critiques ? ».

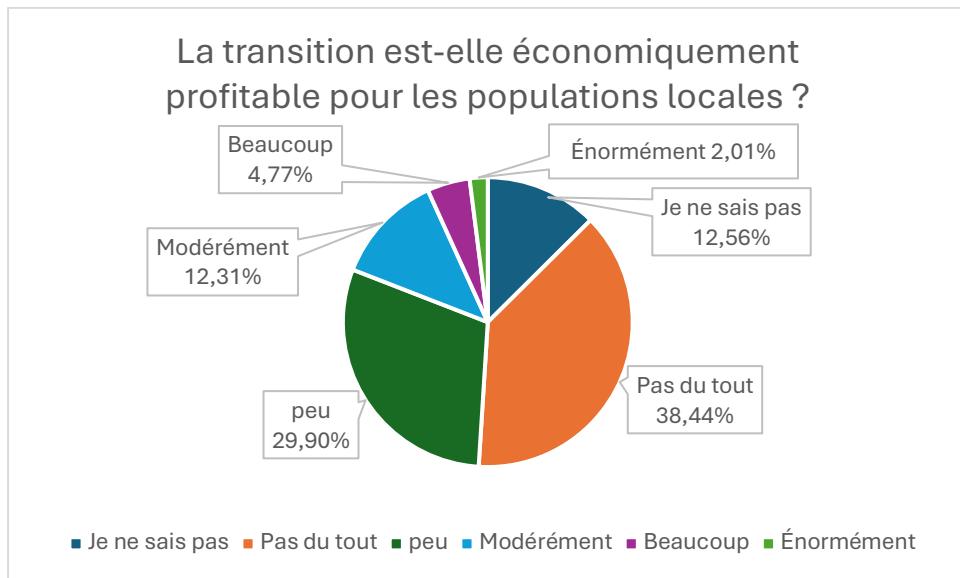


Figure 15 - La transition est-elle économiquement profitable pour les populations locales ?

n = 398 répondants

Nous observons sur ce graphique que 68 % des répondants ont confirmé l'hypothèse selon laquelle la production de batteries électriques ne génère pas un bénéfice économique suffisant aux populations locales des pays producteurs de matériaux critiques.

Une explication possible de ce résultat est que les répondants reconnaissent un impact économique positif, mais jugent qu'il demeure insuffisant pour compenser les conséquences sociales et environnementales négatives de cette transition.

#### 4.1.7. Absence de bruit

Concernant l'absence de bruit des véhicules électriques, l'hypothèse selon laquelle cette caractéristique serait perçue de manière variée a été confirmée. En effet, la répartition des réponses montre une diversité d'opinions :

- Inconvénient majeur : 12,56 %
- Inconvénient mineur : 17,84 %
- Ni avantage ni inconvénient : 23,37 %
- Avantage mineur : 30,15 %
- Avantage majeur : 16,08 %

Ces résultats indiquent que l'absence de bruit n'est ni unanimement perçue comme un avantage ni comme un inconvénient, mais qu'elle suscite des avis partagés selon les sensibilités et usages des répondants.

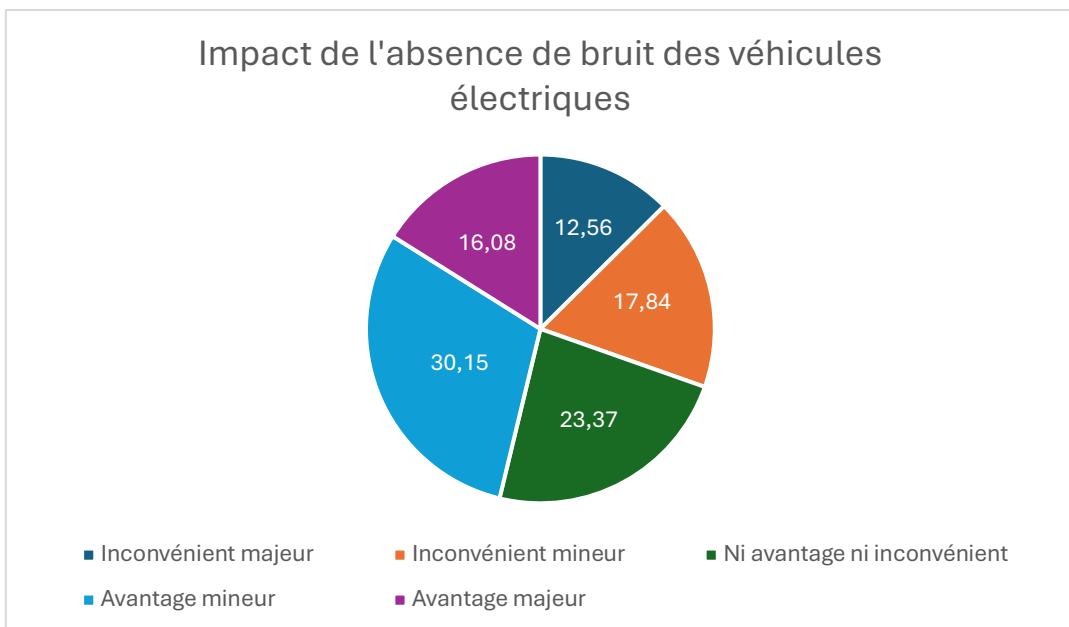


Figure 16 - Impact de l'absence de bruit des véhicules électriques

n = 398 répondants

#### 4.1.8. Connaissance sur la fin du cycle de vie des véhicules électriques

L'hypothèse initiale stipulait que la majorité des répondants n'avait pas de connaissance précise sur le devenir des véhicules électriques après leur utilisation. Cette hypothèse est confirmée par les résultats du questionnaire :

- À la question « *Savez-vous ce qu'il advient des véhicules électriques après leur utilisation (recyclage, exportation, décharge, etc.) ?* », 307 personnes sur 398 (77,14 %) ont répondu négativement.

Cependant, l'hypothèse suggérait également que les impacts sociaux et environnementaux liés au recyclage et à la gestion des déchets étaient perçus comme mineurs. Cette partie de l'hypothèse est réfutée, car 306 des 398 répondants évoquent des conséquences négatives associées au recyclage. Enfin, la même hypothèse supposait que les répondants considèrent que les infrastructures et technologies de recyclage étaient déjà suffisamment développées et qu'elles ne nécessitaient pas d'investissements urgents. Cette perception est contredite par les résultats, puisque 66,08 % des réponses indiquent que le processus de recyclage est perçu comme peu ou pas du tout développé. Néanmoins, l'analyse des réponses révèle que :

- 81,11 % des personnes ayant connaissance des conditions de fin de vie d'un véhicule électrique prennent cette variable en compte dans leurs décisions.
- Cet impact est jugé important dans 58,89 % des cas.
- L'influence de cette information est plus marquée chez les 18-24 ans que pour les autres tranches d'âge. Au sein de cette tranche d'âge, 45,56 % des répondants affirment disposer de connaissances sur la fin de cycle de vie des véhicules électriques. Parmi les répondants qui ont connaissance des conditions de fin de vie d'un VE, 76,09 % prennent cet aspect en considération dans leur décision d'achat.

#### 4.1.9. Connaissance générale du sujet

Lors de la conception du questionnaire, l'option « Je ne sais pas » a été incluse dans 10 des 27 questions. Cette option permettait aux répondants de s'abstenir de répondre lorsqu'ils ne disposaient pas d'assez d'informations, réduisant ainsi les réponses aléatoires.

L'objectif de cette approche était de vérifier l'hypothèse selon laquelle une part significative des participants ne dispose pas d'informations suffisantes sur le sujet.

Voici les résultats obtenus pour chacune des questions.

Question	Résultat
Dans quelle mesure pensez-vous que la production des batteries des véhicules électriques affecte l'environnement ?	Je ne sais pas : 4,27 %
Que pensez-vous de l'impact des méthodes d'extraction du lithium, du cobalt et du nickel sur les écosystèmes locaux ?	Je ne sais pas : 14,82 %
Selon vous, la transition vers les véhicules électriques est-elle financièrement bénéfique pour les consommateurs ?	Je ne sais pas : 6,30 %
Pensez-vous que la transition vers les véhicules électriques représente un avantage financier pour les constructeurs automobiles ?	Je ne sais pas : 14,82 %
Pensez-vous que les coûts des batteries des véhicules électriques sont un obstacle à leur adoption généralisée ?	Je ne sais pas : 10,05 %
Selon vous, la production de batteries électriques profite-t-elle économiquement aux populations locales des pays producteurs de matériaux critiques ?	Je ne sais pas : 12,56 %
Quels effets sociaux percevez-vous dans les pays producteurs de matériaux critiques comme le cobalt (République démocratique du Congo) et le lithium (Chili) ?	Je ne sais pas : 23,37 %
Comment évalueriez-vous les implications sociales négatives causées par la transition vers les véhicules électriques dans les pays en développement ?	Je ne sais pas : 21,86 %
À votre avis, la filière de recyclage des batteries est-elle assez développée pour gérer la transition vers les véhicules électriques à grande échelle ?	Je ne sais pas : 14,07 %
Comment évalueriez-vous les conséquences négatives environnementales et sociales liées au recyclage des batteries en fin de vie ?	Je ne sais pas : 15,58 %
Moyenne	13,77 %

Tableau 4 - Répartition des réponses "je ne sais pas" tout au long de l'enquête

Ce pourcentage de 13,77 % confirme l'hypothèse initialement énoncée. Cependant, bien que cette option ait été intégrée pour limiter le nombre de réponses hasardeuses, il est essentiel de considérer plusieurs biais potentiels :

- Gain de temps : Certains répondants ont pu choisir « Je ne sais pas » pour aller plus vite sans réellement refléter leur niveau de connaissance.

- Biais de désirabilité sociale : d'autres ont pu éviter cette réponse et ont donc décidé de sélectionner une option au hasard, ne souhaitant pas admettre leur manque de connaissance sur le sujet (Nikolopoulou, 2022).

Certaines valeurs, qui n'étaient pas prévues dans les hypothèses initiales et qui n'ont pas été utilisées pour les vérifier, sont apparues. Ce sont des résultats surprenants qu'il convient de souligner, car nous n'avions pas d'hypothèses à leur sujet ou que les données présentées ne nous permettaient pas d'en effectuer.

## 4.2. Valeurs aberrantes et/ou résultats surprenants

Dans le but de comprendre la raison pour laquelle certains répondants ne souhaitaient pas acheter une voiture électrique dans le futur, trois réponses ressortent essentiellement de nos résultats.

L'autonomie, jugée trop faible, est la réponse la plus fréquemment mentionnée : elle constitue l'une des principales raisons de ce refus d'adoption future. En outre, la durée de recharge d'un VE, proportionnellement beaucoup plus longue que la simple action de faire son plein de carburant dans un VMT, semble être déterminante. Alors que la plupart des conducteurs prennent majoritairement en compte les deux aspects analysés ci-dessus, les bénéficiaires de véhicules de société évoquent, eux, une décision de l'entreprise, pour laquelle ils n'ont pas pu émettre leur avis. L'éventualité d'opter pour un VE n'est donc pas de leur ressort.

De plus, l'idée générale qui ressort du questionnaire est que peu de personnes possèdent une voiture électrique et, par conséquent, nous en sommes encore à une étape initiale de la transition. Il est également possible de comprendre qu'une part importante des répondants est sceptique, et cela n'est nullement lié au niveau d'étude ou à l'âge de ces derniers.

## 4.3. Robustesse et limitations

Une des premières limitations des tests récemment effectués est que la corrélation et la causalité sont deux termes distincts. Ce n'est pas parce qu'il existe une corrélation qu'il y a une notion de causalité. Il peut exister une variable dépendante expliquant le lien entre les deux (Janse et al., 2021).

De plus, les réponses et les conclusions qui en ont été tirées proviennent de 398 réponses. Bien que cet échantillon excède en termes de taille l'échantillon cible, il reste relativement petit et une partie importante des participants ont entre 18 et 24 ans, ce qui signifie qu'il n'est pas possible de tirer de conclusions généralisées à partir d'un échantillon aussi restreint.

Après l'analyse des résultats obtenus grâce au questionnaire, il est également important d'analyser les données et les résultats recueillis lors des entretiens effectués auprès des experts du secteur.

## 4.4. Analyse des résultats des interviews qualitatives

Cette seconde partie de la section des résultats vise à analyser les données qualitatives recueillies au cours de nos interviews.

### 4.4.1. Entretien Engie

#### 4.4.1.1. Contexte de l'entretien

Afin d'obtenir une meilleure compréhension des aspects liés à l'électricité, ainsi que des informations plus détaillées, une analyse approfondie est nécessaire. En effet, comme nous l'indiquons à plusieurs

reprises, l'électricité constitue un point central dans la transition vers les véhicules électriques. Une interview a été réalisée avec un membre d'Engie, l'interlocuteur est le responsable *Pricing and Risk Management* de l'entreprise ; celui-ci est fortement impliqué dans la transition énergétique. Engie est le principal fournisseur d'électricité et de gaz naturel, servant environ 2,8 millions de clients en Belgique. L'entreprise est également le plus grand producteur d'électricité du pays, exploitant un mix énergétique diversifié comprenant des centrales nucléaires, des centrales au gaz et des installations d'énergies renouvelables telles que l'éolien et le solaire. De plus, en tant que propriétaire des centrales nucléaires belges, Engie joue à la fois le rôle de producteur et de fournisseur.

#### 4.4.1.2. Défis énergétiques en Belgique

Par rapport au niveau de consommation d'électricité consommé en Belgique en 2023, notre intervenant souligne qu'il est nécessaire de se préparer à une augmentation de plus de 50 % d'ici 2050. Au niveau européen, cette augmentation se chiffrerait à 80 % sur la même période. Les deux principaux secteurs concernés par cette augmentation sont le transport et l'industrie. Ce sont les énergies renouvelables qui permettront de répondre à cette hausse de la demande d'électricité.

L'électricité est principalement produite grâce à l'éolien offshore (essentiellement en mer) et à l'énergie solaire, avec une faible contribution de l'hydroélectricité, étant donné le manque de montagnes et de cours d'eau importants dans notre pays.

La Belgique s'oriente vers une sortie graduelle du nucléaire, ce qui nécessitera le recours temporaire à des centrales à gaz. Celles-ci seront possiblement alimentées par du gaz vert, ce qui permettrait d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2045-2050, conformément aux objectifs européens.

Un autre point crucial de cette transition énergétique est la flexibilité. Le représentant d'Engie explique que celle-ci est essentielle, car l'électricité est difficile à stocker et doit donc être utilisée en temps réel. C'est pourquoi il est impératif de pouvoir se connecter aux pays voisins, afin de garantir l'équilibre de l'approvisionnement. L'électricité ne pouvant être stockée, elle doit être consommée instantanément, ce qui implique d'éventuelles importations ou exportations d'énergie, en fonction des besoins.

#### 4.4.1.3. Solutions pour la flexibilité

Pour résoudre ce problème de flexibilité, les batteries peuvent être considérées comme l'outil idéal : l'énergie stockée en journée peut être utilisée lors d'un pic de consommation d'électricité par l'utilisateur. En effet, nous savons que la consommation est plus élevée en journée que la nuit, et plus importante en hiver qu'en été. Cependant, les batteries actuelles offrent une flexibilité limitée et il est actuellement impossible de stocker l'électricité produite en été pour une réutilisation en hiver.

Dans le cadre de l'amélioration de la flexibilité liée aux voitures électriques, le responsable *Pricing and Risk Management* proposait une modification des batteries de voitures électriques, dans le but que celles-ci deviennent bidirectionnelles et non plus monodirectionnelles. L'objectif du bidirectionnel est de permettre la décharge de la batterie du véhicule afin d'injecter de l'électricité dans le réseau et ainsi de pouvoir faire face à une augmentation accrue de la demande à un instant donné. Ceci va rendre donc rendre l'utilisateur plus vulnérable et plus dépendant du réseau électrique.

#### 4.4.1.4. Gestion intelligente de la recharge

À présent, nous analysons cette transition chez les particuliers. Lors de notre interview, il a été rappelé que charger une voiture électrique nécessitait une puissance importante, bien supérieure à celle requise pour les équipements domestiques traditionnels. Cela peut entraîner une saturation de la capacité électrique d'une habitation. Pour éviter cela, deux solutions ont été proposées : la première est de renforcer la connexion électrique de l'habitation et la seconde est de mettre en place des mécanismes de gestion intelligente, qui ajustent la charge du véhicule en fonction de la consommation domestique.

Par exemple afin d'éviter de surcharger le réseau, la priorité est donnée aux usages domestiques, ce qui peut limiter la charge du véhicule électrique. Une fois la demande domestique réduite, la recharge reprend automatiquement. Ce système favorise également la recharge nocturne, période durant laquelle la consommation est plus faible (moins d'utilisation de l'éclairage, des appareils électroménagers, etc.). Ce système permet ainsi une meilleure répartition de la demande en électricité sur la journée et rappelle le principe du compteur bihoraire utilisé en Belgique. En effet, les ménages disposant de ce type d'installation voient le coût de leur électricité varier entre deux périodes : la nuit et le jour. Le prix de l'électricité est naturellement moins élevé la nuit, ce qui offre un incitatif à charger son véhicule durant cette période, au lieu de le faire en journée.

#### 4.4.1.5. Solutions proposées

La solution qu'offre Engie à ce potentiel problème est l'offre « Drive », spécifiquement destinée aux détenteurs de véhicules électriques. Elle existe aussi bien en prix fixe qu'en prix variable. En quelque sorte, un tarif différencié est appliqué entre les heures creuses et les heures pleines, qui est plus ou moins important en fonction du moment de la journée. Une autre initiative proposée par Engie est le Drive APP, les utilisateurs sont rémunérés pour contribuer au Smart Charging, c'est-à-dire à l'optimisation de la charge en fonction de la disponibilité du réseau et des périodes de faible demande. Ce système n'est donc pas uniquement contraignant, il offre aussi des avantages économiques aux clients en valorisant leur flexibilité énergétique, tout en laissant le contrôle à leur fournisseur d'électricité.

#### 4.4.1.6. Risques et solutions face à la dépendance électrique

Le transport présente un risque de dépendance accrue à l'électricité, ce qui pourrait engendrer des défis à l'avenir. Cependant, les scénarios ne sont pas catastrophiques car des solutions d'adaptation existent. Le télétravail pourrait atténuer la pression exercée sur la demande en électricité, et les professions essentielles, telles que les policiers et les pompiers, seraient priorisées ou conserveraient des véhicules thermiques si nécessaire. Comme l'a souligné le responsable du Risk Management chez Engie, en cas de contrainte majeure sur le réseau, des délestages ciblés par zone pourraient être envisagés pour préserver l'équilibre énergétique.

#### 4.4.1.7. Opinion et solution concernant la transition énergétique

Bien que le passage à la voiture électrique permette indéniablement de réduire la pollution par rapport aux véhicules thermiques, il ne signifie pas pour autant l'élimination totale des impacts environnementaux. Comme l'a souligné le responsable d'Engie, la seule énergie véritablement propre est celle qui n'est ni consommée, ni produite (le kilowattheure non consommé). Cela met en lumière l'importance de la sobriété énergétique et d'un changement d'habitudes en matière de mobilité.

Aujourd'hui, l'usage de la voiture individuelle est profondément ancré dans notre quotidien, souvent sans remise en question de son utilité réelle. Même avec une électrification du parc automobile, si les habitudes restent identiques, comme le maintien des trajets en solitaire et les déplacements systématiques en voiture sur de courtes distances, l'impact environnemental persistera. Une partie de la solution repose donc sur une approche plus globale : repenser nos besoins en mobilité, privilégier des alternatives telles que la marche, le vélo et les transports en commun, et réduire la consommation énergétique inutile.

Toutefois, ces évolutions requièrent une véritable évolution des mentalités. La sobriété énergétique ne doit pas être perçue comme une contrainte, mais comme une démarche collective vers un modèle plus durable. L'enjeu est de parvenir à ces ajustements sans donner l'impression d'une perte de confort, un enjeu majeur de la transition énergétique actuelle.

#### 4.4.1.8. Défis futurs

Malgré les sujets abordés et les pistes de solution envisagées, certaines situations restent, selon lui, sans réponse. Parmi elles, la capacité du réseau et l'installation électrique des immeubles, qui ne

peuvent pas absorber la charge de plusieurs voitures électriques (2, 3, 4 ou 5). À cela s'ajoute la problématique des copropriétés qui refusent d'accueillir des véhicules électriques dans leurs garages.

#### 4.4.1.9. Analyse de l'hypothèse sur la transition énergétique

En conclusion, l'entretien avec l'expert d'Engie a confirmé l'hypothèse selon laquelle, pour l'entreprise Engie, la transition vers les véhicules électriques, combinée à la sortie du nucléaire, est envisageable. Toutefois, cette transition entraînera une hausse significative de la demande en électricité, nécessitant des adaptations dans la vie quotidienne des particuliers, notamment pour la gestion de la recharge et l'optimisation de la consommation.

Malgré les défis persistants, notamment liés aux infrastructures et à la flexibilité du réseau, cette évolution constitue aussi une opportunité pour les fournisseurs d'électricité belges, leur permettant de développer de nouveaux services adaptés à cette transition énergétique (Drive/Drive App).

### 4.4.2. Entretien Umicore

#### 4.4.2.1. Contexte de l'entretien

Dans le but d'obtenir une vision plus claire de la dernière étape de l'analyse du cycle de vie des voitures électriques, à savoir le recyclage des batteries, un entretien avec un membre de la société Umicore a été mené.

Notre interlocuteur travaille chez Umicore depuis deux ans et demi, dont un an et demi consacré au recyclage des batteries. Il occupe le poste de *Value Chain Development Manager*, collaborant avec des partenaires externes pour le transport, l'entreposage et la préparation des matériaux destinés au recyclage.

L'entreprise Umicore est spécialisée dans la technologie des matériaux et le recyclage. Elle œuvre à l'utilisation de technologies propres, à la promotion du recyclage et au développement d'une mobilité plus respectueuse de l'environnement, tant pour les voitures actuelles que pour celles de demain. Elle est également active dans la production de matériaux avancés pour l'énergie, l'électronique et bien plus encore (About Umicore, s. d.).

Lorsque les batteries atteignent leur fin de vie ou que des déchets sont générés lors de la production, ces flux sont collectés afin de recycler les différentes catégories de batteries. Ce processus de recyclage est réalisé à Hoboken, en Belgique. Une fois recyclés, les matériaux subissent un affinage supplémentaire avant leur réintégration dans le cycle de production.

#### 4.4.2.2. Maturité du marché du recyclage en Europe

Dans le but de répondre à l'hypothèse selon laquelle le marché du recyclage des batteries est encore à un stade précoce (*early stage*), l'employé de la société Umicore nous a expliqué qu'actuellement, de nombreux acteurs investissent et se lancent dans le recyclage des batteries électriques.

Cependant, dans des pays européens comme la Belgique, la concurrence avec les acteurs asiatiques est aujourd'hui forte. En Chine et en Corée du Sud, la fabrication et le recyclage des batteries sont bien plus développés, ce qui accroît la compétitivité et exerce une pression sur le marché européen. Une partie des batteries usagées y est exportée, tandis qu'en Europe, le marché existe mais son niveau de maturité est bien moins élevé. Notre interlocuteur valide ainsi l'hypothèse, tout en nuancant son propos, expliquant que le marché est effectivement à un stade précoce comparé à celui de l'Asie. Cette situation s'explique en partie par les directives européennes qui imposent des exigences strictes en matière d'efficacité du recyclage. Il est donc impératif que la solution technique garantisse ces niveaux d'efficacité, faute de quoi l'usine ne pourra être exploitée.

D'un point de vue économique, un marché émergent et en expansion peine à rivaliser avec un marché prospère et solidement établi. En Asie, les économies d'échelle permettent une réduction des coûts, contrastant avec la situation actuelle en Europe.

#### 4.4.2.3. Processus de recyclage utilisé

Umicore utilise un procédé de pyrométallurgie pour recycler les batteries. Au cours de ce processus, comme défini préalablement dans la revue de littérature, les batteries sont fondues en phases liquides métalliques. Ce procédé engendre différentes phases et un mélange hétérogène. Les métaux lourds, tels que le cuivre, le cobalt et le nickel, se concentrent dans la phase alliée sous l'effet des hautes températures.

À l'heure actuelle, le marché, encore très immature, est marqué par le développement du recyclage direct. Ce procédé vise à récupérer les cathodes pour en extraire directement le cobalt et le nickel, qui sont ensuite réintroduits dans le cycle de production, tout en minimisant la génération de déchets.

#### 4.4.2.4. Impacts positifs du recyclage

Pour ce spécialiste, l'impact environnemental le plus significatif du recyclage des batteries concerne des matériaux comme le cobalt, le nickel et le lithium. Selon lui, ces métaux sont principalement extraits hors d'Europe, notamment en Indonésie pour le nickel et en République démocratique du Congo pour le cobalt.

L'exploitation minière de ces matériaux génère d'importantes émissions de CO<sub>2</sub> et requiert une grande quantité d'énergie. Le recyclage de ces métaux permet de limiter considérablement leur impact environnemental, soulignant ainsi son importance pour l'avenir.

De plus, cette approche renforcera l'indépendance des pays européens, tels que la Belgique, vis-à-vis de ces zones d'extraction. En effet, l'exploitation minière dans ces régions entraîne non seulement des effets environnementaux néfastes, mais aussi des conséquences sociales graves : certains habitants sont contraints de quitter leur domicile et les conditions de travail y sont souvent précaires.

Bien que les métaux primaires soient indispensables à l'entrée sur le marché, il est crucial de les recycler une fois qu'ils sont disponibles.

#### 4.4.2.5. Concurrence déloyale et réduction des coûts

Un autre problème lié à la concurrence déloyale avec l'Asie est la disparité des réglementations. Les entreprises européennes comme Umicore, doivent respecter des normes strictes concernant les émissions de CO<sub>2</sub> durant le processus de production. Cela n'est pas le cas des entreprises chinoises présentes sur le marché européen. Cette situation instaure des standards différents et favorise une concurrence inégale.

Une autre directive européenne qui aura un impact majeur sur les batteries électriques concerne le contrôle de la teneur en métaux recyclés. Ainsi, à l'avenir, chaque batterie devra disposer d'un passeport indiquant clairement le pourcentage de métaux issus du recyclage. Cela explique également pourquoi l'Union européenne encourage activement l'utilisation de ces métaux secondaires, leur incorporation réduisant significativement les émissions de CO<sub>2</sub>.

Il est impératif de réduire les coûts du recyclage des batteries pour assurer sa viabilité économique. Si le recyclage demeure plus coûteux que l'exploitation minière, il risque de ne pas être viable, et les problèmes environnementaux liés à l'extraction des ressources perdureront.

Concernant la concurrence, l'entreprise détient actuellement un monopole en Belgique, n'ayant aucun rival sur ce marché. Toutefois, au niveau européen, elle fait face à de nombreux concurrents, notamment en Allemagne, qui représente un acteur clé en raison de ses nombreux constructeurs automobiles. La concurrence est également forte en Asie, avec des acteurs majeurs tels que Samsung SDI.

#### 4.4.2.6. Durée de vie d'une batterie

Les fabricants automobiles évaluent la durée de vie des batteries en nombre de cycles, c'est-à-dire le nombre de chargements qu'elle peut supporter. Cette durée varie entre 2.000 et 4.000 occurrences. À l'origine, ils estimaient la durée de vie entre 8 et 10 ans, mais la réalité se rapproche plutôt de 13 à 15 ans.

L'intervenant précise qu'après cette durée, la batterie électrique, et par extension la voiture, ne serait plus adaptée au marché européen. Toutefois, certains marchés comme l'Afrique pourraient se montrer intéressés par ce type de véhicule.

#### 4.4.2.7. Importance des batteries dans la transition énergétique

L'expert d'Umicore partage l'avis de celui d'Engie concernant l'usage des batteries électriques au-delà du secteur automobile. Tous deux soulignent leur rôle essentiel dans la transition énergétique, en mettant en avant leur capacité de stockage d'électricité et leur contribution majeure à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> grâce à cette technologie innovante.

### 4.4.3. Entretien effectué avec un expert du secteur automobile néerlandais et européen

Afin d'obtenir un point de vue objectif sur la transition en cours dans le secteur automobile, un entretien a été mené avec Stan Berings, associé fiscal chez PwC aux Pays-Bas. Il est également responsable de l'équipe automobile aux Pays-Bas et, à ce titre, il intègre l'équipe automobile européenne, EMEA et mondiale de PwC. Cette dernière étant composée de membres issus de différentes expertises liées à l'industrie automobile. Bien que PwC soit un acteur clé de cette transition, cet entretien offre une analyse plus globale et transversale des enjeux du secteur.

#### 4.4.3.1. Défis principaux

Trois défis majeurs liés à la transition vers les véhicules électriques ont été clairement identifiés. Selon S. Berings, ces défis doivent être considérés séparément, car chacun comporte des enjeux spécifiques susceptibles d'influencer durablement l'avenir du secteur automobile.

##### 4.4.3.1.1. Enjeux éthiques et géopolitiques liés aux matières premières

Lors de l'entretien, une question a été soulevée concernant l'origine des matériaux utilisés dans les batteries des véhicules électriques, notamment ceux provenant de pays comme la République démocratique du Congo ou le Chili. Ces matières premières stratégiques, comme le cobalt et le lithium, posent d'importants défis éthiques, environnementaux et géopolitiques.

Une série de réglementations émerge actuellement afin d'encadrer les conditions de travail dans les pays producteurs et de renforcer la transparence sur les pratiques sociales et environnementales. Toutefois, Monsieur Berings souligne qu'il est peu courant d'entendre des plaintes émanant directement de ces pays, ce qui, selon lui, pourrait révéler une certaine forme de désinformation ou un manque de visibilité sur la réalité du terrain.

Dans ce contexte, plusieurs entreprises et États s'efforcent de développer des alternatives technologiques ou industrielles, afin de réduire la dépendance à ces matériaux sensibles. Un enjeu stratégique d'autant plus essentiel qu'il s'inscrit dans un contexte de tensions commerciales croissantes à l'échelle mondiale.

#### 4.4.3.1.2. Limites du réseau électrique face à l'électrification massive

Un autre enjeu soulevé lors de l'entretien porte sur la capacité énergétique de l'Europe à soutenir une adoption massive des véhicules électriques. D'après l'intervenant, aux Pays-Bas, si tous les véhicules devaient électriques, cela ne représenterait qu'environ 7 % de la consommation totale d'électricité du pays, un chiffre qui, pris isolément, ne semble pas poser de problème majeur.

Toutefois, le principal défi réside dans la simultanéité de diverses transitions énergétiques, notamment dans l'industrie et dans d'autres secteurs à forte consommation d'énergie. Autrement dit, la transition vers l'électromobilité ne représente pas un risque en soi ; c'est son addition à d'autres processus d'électrification qui pourrait mettre sous pression les infrastructures énergétiques existantes.

Cette accumulation de demandes croissantes en électricité pourrait, à terme, entraîner des risques de saturation, de pénurie, voire d'instabilité énergétique. Le véritable défi réside donc dans la convergence de plusieurs transitions simultanées, conduisant à une électrification massive de l'économie.

#### 4.4.3.1.3. Les tensions géopolitiques et les politiques tarifaires

Parmi les défis futurs de la transition du secteur automobile, Monsieur Berings met en lumière l'émergence récente d'un enjeu géopolitique majeur : la montée des tensions commerciales, en particulier entre les États-Unis et d'autres régions du monde. Il évoque notamment l'imposition de nouveaux droits de douane par l'administration Trump, qui exerce une pression importante sur divers territoires et complexifie la gestion des chaînes d'approvisionnement.

Dans une industrie où la production d'un véhicule, qu'il soit assemblé en Allemagne, aux États-Unis, en France ou en Asie de l'Est, repose sur des composants issus de multiples régions du globe, ces politiques protectionnistes rendent le coût final des véhicules difficilement prévisible. Cette incertitude touche l'ensemble du secteur automobile, mais elle impacte aussi fortement la transition vers les VE.

Les chaînes d'approvisionnement des VE, bien que distinctes de celles des véhicules thermiques (avec moins de pièces et des composants spécifiques), restent exposées à ces fluctuations tarifaires. La prédominance de la production de véhicules électriques en Asie, particulièrement en Chine, les rend encore plus sensibles aux décisions politiques unilatérales prises par certains États.

Ainsi, ce facteur imprévisible, extérieur aux considérations strictement technologiques ou environnementales, pourrait bien représenter le principal défi de la transition dans les années à venir.

#### 4.4.3.1.4. Législation en vigueur

Notre interlocuteur est également *Partner* au sein du département droit et fiscalité de cette entreprise du Big Four<sup>5</sup>, ce qui explique son expertise dans l'application des lois et leur rôle dans la régulation du marché.

---

<sup>5</sup> Les Big Four sont KPMG, PWC, EY et Deloitte. Ce sont les quatre plus grands cabinets d'audit et de咨询 au monde.

### **Tentative de solution pour les constructeurs automobiles**

Concernant la situation des constructeurs automobiles, Monsieur Berings explique que les producteurs chinois et européens ne bénéficient pas des mêmes conditions en raison des disparités réglementaires en matière d'environnement. Il mentionne que l'Union européenne a mis en place des régulations strictes, telles que le CBAM<sup>6</sup> (Carbon Border Adjustment Mechanism), afin de garantir une concurrence équitable. Ce mécanisme impose une taxe sur les produits importés, calculée en fonction de leur empreinte carbone, dans le but de compenser les différences de normes environnementales entre l'UE et les pays tiers, notamment la Chine. Ainsi, les véhicules ou leurs composants fabriqués hors de l'UE, avec des procédés souvent plus polluants, se retrouvent soumis à des régulations compensatoires. Ce mécanisme de correction vise à créer des conditions plus équitables entre les producteurs européens et étrangers et à corriger les inégalités existantes.

### **Recyclage des batteries**

Le recyclage des batteries de véhicules électriques est une exigence légale, notamment au sein de l'Union européenne. En effet, les fabricants ont l'obligation de récupérer les batteries en fin de vie. Cependant, l'incertitude demeure quant à leur recyclage effectif et conforme aux normes, dans des régions comme l'Afrique du Nord ou l'Europe de l'Est.

Bien que des technologies de suivi des véhicules et de leur performance existent, il reste difficile de garantir que chaque batterie sera effectivement collectée et recyclée selon les normes en vigueur, en particulier dans les pays où l'infrastructure de recyclage est moins développée.

#### **4.4.3.1.5. Futur de la transition**

Monsieur Berings aborde la situation actuelle des bornes de recharge, en soulignant que les entreprises responsables de leur installation restent fortement dépendantes du marché des véhicules électriques. Le développement de ce secteur repose essentiellement sur le niveau d'adoption des VE. Il précise que, afin que ces derniers remplacent véritablement les véhicules thermiques, leur coût total de possession (Total Cost of Ownership (TCO<sup>7</sup>)) doit impérativement être inférieur à celui des VMT.

À l'origine, l'État soutenait les nouveaux acquéreurs de VE à travers diverses aides, mais ces incitants tendent à diminuer. Bien que l'électricité soit généralement moins chère que le carburant utilisé par les VMT, il convient également de prendre en compte la taxe de roulage. Celle-ci est calculée selon deux critères principaux : (1) les émissions de CO<sub>2</sub> et (2) le poids du véhicule. Si les VE présentent des émissions de CO<sub>2</sub> nulles à l'usage, ils sont en revanche beaucoup plus lourds qu'un VMT, ce qui impacte négativement la taxe.

Par ailleurs, en ce qui concerne l'assurance, il est important de noter que les VE font l'objet de primes d'assurances plus élevées. Cela s'explique notamment par le prix élevé des batteries, qui peut atteindre environ 15.000 €. En cas d'accident, dès que la batterie est endommagée, les compagnies d'assurance préfèrent généralement considérer le véhicule comme économiquement irréparable et le déclarer hors d'usage.

Concernant l'adoption des VE par les citoyens, notre interlocuteur précise qu'une législation de l'Union européenne rend la transition obligatoire d'ici 2050. Une prolongation de ce délai pourrait toutefois être envisagée si certains États membres parvenaient à négocier une extension de la date butoir. Selon

<sup>6</sup> "Le Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (CBAM) de l'UE est l'outil de l'Union européenne visant à fixer un prix équitable sur le carbone émis lors de la production de biens à forte intensité carbone importés dans l'UE, et à encourager une production industrielle plus propre dans les pays non membres de l'UE." (European Comission, 2025 :1)

<sup>7</sup> « Le TCO ou Total Cost of Ownership, représente le coût global d'un bien ou d'un service tout au long de son cycle de vie. » (Le TCO, c'est quoi?, s. d. :1)

cette législation, seuls les nouveaux véhicules électriques pourront être commercialisés à partir de 2030, tandis que le marché de l'occasion pour les VMT devrait rester actif jusqu'en 2050.

Il souligne également que l'être humain étant par nature doté d'une forte aversion au risque, tout changement d'habitude s'avère particulièrement difficile. Cette inertie comportementale pourrait compliquer la transition. De plus, les émotions et les jugements personnels influencent les comportements d'achat, perturbant parfois le marché pendant plusieurs années. À titre d'exemple, certains consommateurs refusaient d'acheter des véhicules de la marque BYD simplement parce qu'elle était chinoise. Or, la qualité de ces véhicules a depuis été vérifiée et la marque est aujourd'hui reconnue pour offrir le meilleur rapport qualité-prix sur le marché.

À l'inverse, le cas de Tesla illustre comment la perception du public peut impacter les ventes : bien que la marque ait été pionnière dans la transition vers l'électrique, elle a connu une chute significative de ses ventes après que son directeur général Elon Musk a affiché un rapprochement politique avec Donald Trump.

#### 4.4.3.1.6. Alternatives énergétiques

La question de savoir si la transition vers les VE constitue l'unique solution à long terme demeure complexe. Bien que l'électrification soit l'axe principal en Europe, d'autres alternatives telles que l'hydrogène pourraient jouer un rôle majeur à l'avenir.

L'hydrogène, encore en développement, pourrait compléter l'électrification, notamment dans certains secteurs industriels à forte consommation énergétique. Toutefois, à ce jour, l'Union européenne priviliege l'électrification, ce qui pourrait engendrer des défis liés à l'approvisionnement énergétique, en particulier pour l'industrie.

Les débats autour de l'énergie nucléaire et d'autres sources de production restent ouverts, laissant entrevoir des ajustements possibles dans les stratégies énergétiques futures.

Après avoir recueilli les données et les informations durant la revue de littérature et grâce à la recherche menée dans ce mémoire, il est désormais possible de répondre à notre question de recherche.

## 5. Discussion

Sur base des données collectées auprès de spécialistes, de celles recueillies auprès d'un échantillon plus large de la population et après avoir réalisé la revue de littérature, cette partie vise désormais à répondre à la question centrale de ce mémoire. Celle-ci porte sur les risques que la transition des véhicules thermiques vers les véhicules électriques engendre tout au long du cycle de vie du produit, ainsi que sur ses implications environnementales, sociales et économiques. Elle vise également à identifier les obstacles susceptibles de freiner cette évolution.

Cette section présentera les éléments de réponse obtenus et explorera d'éventuelles pistes de solution.

### 5.1. Risques et enjeux

Cette sous-section mettra en lumière les risques inhérents à cette transition, qui pourraient compromettre son succès tant à court terme qu'à long terme. Toutefois, des solutions potentielles seront également explorées afin de mieux anticiper ces défis et d'accompagner efficacement cette innovation.

#### 5.1.1. Instant de la double transition

Pour commencer cette partie, je souhaiterais aborder ce qui me semble être la plus grande difficulté de cette transition : le moment auquel elle intervient. En analysant la situation de la Belgique, cette transition apparaît d'autant plus complexe, car, comme l'a souligné notre intervenant de la société française Engie, la composition de la production d'électricité en Belgique est en pleine mutation. En effet, la loi de 2003 sur la sortie progressive du nucléaire prévoit la fermeture des centrales existantes et interdit la construction de nouvelles et ce, après quarante ans d'exploitation. Toutefois, à la fin de l'année 2023, la durée de vie de deux réacteurs, Doel 4 et Tihange 3, a été prolongée jusqu'en 2035, dans le but de faciliter autant que possible cette transition énergétique. Ces deux réacteurs à eux seuls représentent 35 % de l'énergie nucléaire du pays (Reuters, 2025).

L'objectif de cette sortie du nucléaire est d'atteindre une production d'électricité neutre en carbone d'ici 2045-2050, selon Engie. Cependant, les alternatives renouvelables en Belgique restent limitées, reposant essentiellement sur l'éolien et le solaire, alors même que la consommation d'électricité est et sera en forte augmentation (+50 % en Belgique et +80 % en Europe d'ici 2050). Ces besoins accrus seront causés par le développement industriel et les besoins liés au transport.

De plus, les véhicules électriques, à l'instar des véhicules thermiques, devront pouvoir être utilisables tout au long de l'année civile. Toutefois, comme l'a évoqué notre intervenant, un défi majeur de cette transition énergétique réside dans le stockage de cette énergie, notamment afin de pallier les périodes creuses en production. Par le passé, l'énergie nucléaire pouvait produire de l'électricité tout au long de l'année. Aujourd'hui, avec les énergies renouvelables dont dispose la Belgique, nous serons dépendants des conditions météorologiques en termes de production, mais également des avancées technologiques concernant la thématique du stockage de l'électricité. En effet, nous ne pouvons actuellement pas stocker de l'énergie pour des périodes aussi longues telles que le passage de l'été à l'hiver. Cela risque de placer la Belgique dans une situation instable et obligera donc les utilisateurs à adapter leur consommation d'électricité, ainsi qu'à faire face aux éventuelles pénuries que pourrait créer cette innovation.

Cette modification du mix énergétique belge entraînera malheureusement une production d'électricité moindre qu'avec l'énergie nucléaire que nous possédons actuellement. En 2024, la Belgique a connu une année critique en matière de production d'électricité. Seuls 88 % de l'électricité consommée par les Belges ont été produits sur le territoire, tandis que 12 % ont été importés depuis

les pays voisins, faisant de la Belgique un importateur net d'électricité. Cela marque un changement significatif par rapport à la période 2019-2022, durant laquelle le pays était autosuffisant. En 2023, par exemple, seulement 2 % de l'électricité consommée en Belgique provenait de l'importation (Steel, 2025).

Il est également essentiel de noter que 42 % de l'électricité belge est actuellement produite par le nucléaire. L'abandon progressif de cette source d'énergie, combiné à une baisse de la production éolienne de 11 % en 2024, nous a poussés à devenir importateur net, ce qui souligne à quel point la Belgique demeure fortement dépendante du nucléaire, en particulier lors des périodes durant lesquelles la production d'énergies renouvelables est moins favorable (Steel, 2025). Nous serons donc, à l'avenir, dépendants des conditions météorologiques et devrons accepter une production d'électricité instable, fluctuante d'une année à l'autre.

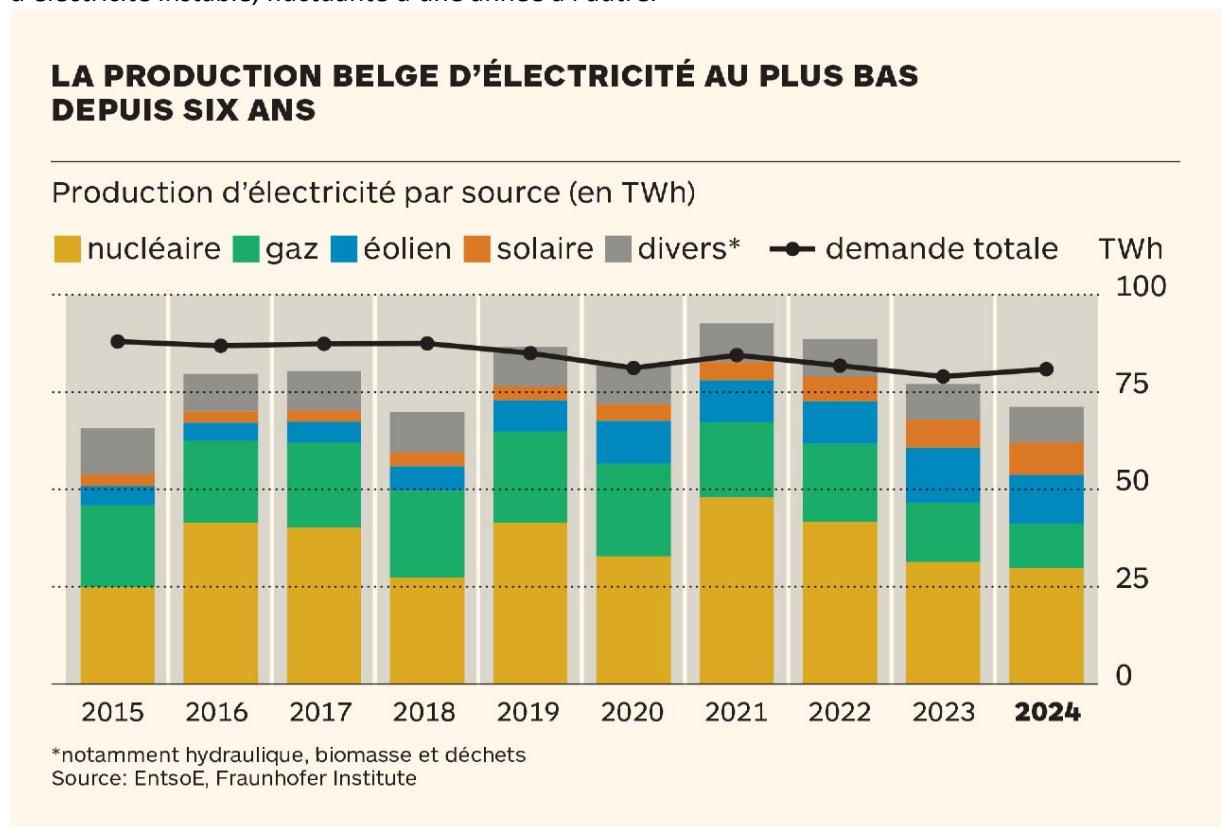


Figure 17 - Production d'électricité belge par source (en térawattheures) (Steel, 2025 :1).

Par conséquent, la cohabitation de ces deux transitions (la sortie progressive du nucléaire et le développement de la mobilité électrique), allant dans des directions opposées, semble compromise, voire impossible. En effet, la transition des véhicules thermiques vers les véhicules électriques est également prévue pour 2035 selon l'Union européenne (il est cependant important de signaler que la directive européenne ne mentionne en aucun cas les voitures électriques, mais bien des véhicules produisant zéro émission de CO<sub>2</sub>) (Schmitt & Steinmann, 2024), soit la même année que la fin du nucléaire en Belgique. Cela signifie que le pays devra simultanément faire face à une hausse de la demande en électricité, tout en réduisant sa capacité de production, ce qui constitue un véritable défi.

Cette transition vers des véhicules ne produisant pas de CO<sub>2</sub> concerne tous les pays de l'Union européenne. Toutefois, il est intéressant d'examiner lesquels d'entre eux dépendent encore de l'énergie nucléaire. Prenons l'exemple de l'Allemagne, qui a mis fin à son programme nucléaire en 2023. Aujourd'hui, 16 % de son mix énergétique repose sur le charbon (Fiche pédagogique, 2024), une source d'énergie bien plus néfaste pour l'environnement que le nucléaire. Cela démontre que l'abandon du nucléaire ne rime pas nécessairement avec une alternative plus propre, tel que le

charbon qui ne constitue pas une solution viable à long terme et remet potentiellement en question la décision de la Belgique d'abandonner le nucléaire.

Un autre exemple significatif est celui de l'Italie. Après avoir renoncé à l'énergie nucléaire, le pays envisage désormais de faire marche arrière et de la réintroduire afin d'atteindre son objectif de zéro émission de CO<sub>2</sub> d'ici 2050 (Le Monde-AFP, 2024). Cette évolution pourrait créer une incertitude supplémentaire et inciter le gouvernement belge à reconsidérer ses propres choix en matière de transition énergétique.

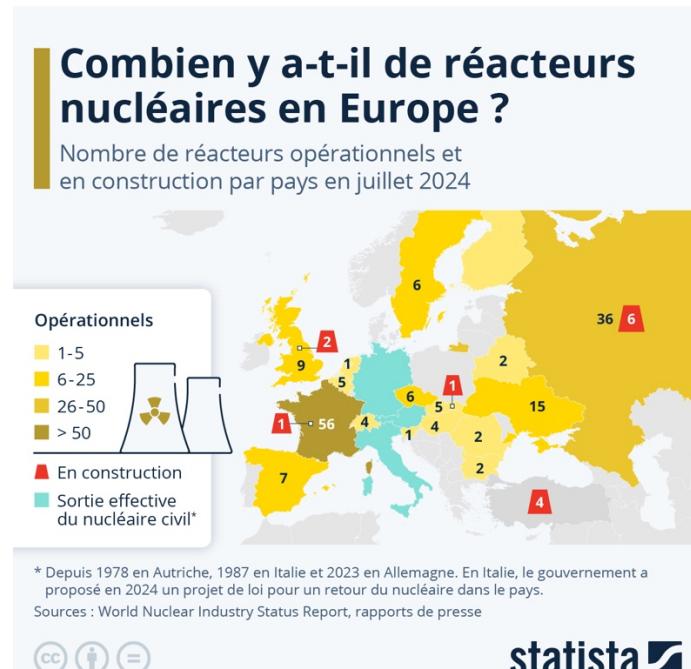


Figure 18 - Combien y a-t-il de réacteurs nucléaires en Europe (Gaudiaut, 2024 : 1)

D'un point de vue européen et belge, comme l'a souligné Monsieur Berings, le problème ne réside pas tant dans l'arrivée des voitures électriques mais c'est la présence de celle-ci dans l'électrification généralisée de l'ensemble de notre environnement. Il devient donc essentiel d'établir un ordre de priorités clair, afin de gérer efficacement cette transition énergétique à grande échelle.

#### 5.1.1.1. Solutions éventuelles

De notre point de vue, plusieurs pistes peuvent être explorées. La plus simple serait de décaler dans le temps l'une des deux transitions, soit en reportant l'abandon des voitures thermiques dans le but d'avoir uniquement des voitures zéro émission de CO<sub>2</sub>, soit en prolongeant la durée de vie des centrales nucléaires. En pratique, il serait plus aisés pour la Belgique de repousser la sortie du nucléaire plutôt que d'aller à l'encontre d'une directive de l'Union européenne sur les véhicules thermiques. Cependant, le gouvernement fédéral « Arizona<sup>8</sup> » a déjà obtenu une prolongation des centrales jusqu'en 2035, après un accord avec Engie. Il est donc peu probable qu'une seconde extension soit envisagée après cette échéance.

La Belgique pourrait également effectuer un virage à 180 degrés et se tourner vers de nouveaux types de véhicules thermiques qui sont les véhicules roulant au E-fuel. Ce carburant de synthèse permettrait à l'État belge de terminer sa transition vers un mix énergétique sans le nucléaire, pour effectuer ensuite sa transition vers les véhicules électriques. De plus ce nouveau carburant est parfaitement compatible avec les motorisations thermiques actuelles (diesel, essence) (E-Fuels, 2022). Ceci offre une

<sup>8</sup> Le gouvernement fédéral "Arizona" est le gouvernement fédéral belge, avec Bart De Wever comme premier ministre, constitué en 2025 et devant théoriquement être en place jusqu'en 2029.

possibilité à l'État belge de s'adapter aux nouvelles directives européennes sans toutefois devoir déstabiliser le pays.

La seule ombre au tableau de ce nouveau carburant est son prix très élevé, qui malheureusement risque de rendre son utilisation plus compliquée pour les particuliers (Cassoret, 2024).

### 5.1.2. Conditions de production

D'après mon analyse, si l'on élargit la réflexion aux conséquences mondiales plutôt qu'à la seule situation en Belgique, la situation la plus préoccupante liée à cette transition concerne le début du cycle de vie des batteries lithium-ion. Ces batteries présentes dans les véhicules électriques sont un des enjeux majeurs de cette transition écologique.

Comme cela a été mentionné précédemment, le nickel, le cobalt et le lithium sont les trois éléments principaux composant ces LIB, qui sont utilisés notamment dans les véhicules électriques. Or, ces matériaux sont principalement extraits dans des pays en développement : le cobalt en République Démocratique du Congo, le lithium en Bolivie et le nickel en Indonésie. Cela signifie que leur exploitation repose sur des ressources situées dans des régions dans lesquelles les conditions économiques et sociales sont fragiles, et où les impacts environnementaux et humains sont particulièrement préoccupants.

Dans ces pays, les conditions d'extraction et de raffinage de ces matériaux ont des conséquences néfastes sur les populations locales. Si l'on se concentre d'abord sur l'aspect environnemental, le nickel, classé parmi les matériaux ayant un fort potentiel de réchauffement climatique (classe 1), voit entre 57 et 70 % de son impact total attribué aux phases d'extraction et de raffinage. En effet, ces processus nécessitent une combustion massive d'énergies fossiles, générant d'importantes émissions de gaz à effet de serre et affectant directement la qualité de vie des populations locales.

Pour ce qui est du lithium, son extraction repose sur l'extraction de saumures riches en lithium, suivi d'un processus d'évaporation éliminant jusqu'à 95 % de l'eau contenue dans ces solutions. Ce procédé entraîne une raréfaction des ressources en eau et accentue la sécheresse dans certaines régions du Chili et de Bolivie, ce qui peut compromettre l'accès à l'eau potable et limiter le développement de l'agriculture locale.

Concernant le cobalt en République Démocratique du Congo, la situation est légèrement différente. Contrairement au nickel et au lithium, le cobalt extrait ne peut actuellement pas être raffiné sur place. Il est donc principalement exporté vers la Chine, qui détient une position dominante dans le raffinage de ce matériau. Toutefois, des alternatives émergent avec des infrastructures de raffinage en Finlande et au Canada, offrant des options plus durables sur le plan environnemental et stratégique. La Chine reste néanmoins le choix le plus économique, mais aussi le plus énergivore et le moins respectueux de l'environnement. Pour la Belgique et l'Union européenne, cette dépendance vis-à-vis de la Chine constitue une vulnérabilité, tandis que la Finlande et le Canada, avec leurs relations diplomatiques plus stables, représentent des options plus sûres pour l'approvisionnement futur.

Sur le plan social, l'extraction et le raffinage de ces matériaux ont un impact considérable sur les populations locales. Il est impossible d'évoquer cette question sans aborder les conditions de travail extrêmement précaires dans les mines de cobalt en RDC. Le travail des enfants y est particulièrement préoccupant, représentant environ 20 % de la main-d'œuvre dans certaines exploitations. De plus, l'instabilité politique actuelle en RDC rend cet approvisionnement encore plus risqué et pourrait, à terme, constituer un obstacle majeur à la transition vers les véhicules électriques.

En plus de cette situation de guerre existante en RDC, notamment dans les régions proches de la frontière avec le Rwanda, causé par un groupe appelé M23<sup>9</sup>, il est important de souligner la prise de décision du gouvernement congolais qui a interdit toute exportation de cette matière première pour une période de quatre mois de mars à juillet 2025. Ce refus d'exportation prend place après que le prix du cobalt a drastiquement diminué. Le prix a été divisé par quatre au cours des trois dernières années, la cause de cette diminution étant la surabondance de l'offre au sein du marché. En respectant les règles de l'offre et la demande la RDC souhaite faire remonter le prix de ce métal essentiel à la conception des LIB qui elle-même joue un rôle majeur pour les nouvelles technologies. L'impact de cette interdiction se fera principalement ressentir au niveau des importateurs chinois, car à la différence des États-Unis, ils n'ont pas diversifié leurs chaînes d'approvisionnement de ce métal (Enendu, 2025).

Cette interdiction pourrait avoir un impact sur les particuliers car l'impact économique de l'arrêt de l'exportation du cobalt se fait déjà ressentir. Si cette absence dépasse les 3 mois, il se pourrait que cette interdiction ait également des effets sur le portefeuille du consommateur et l'acheteur de ces outils utilisant du cobalt. Cependant, il est important de préciser que cela n'est pas des plus profitables pour ce pays car les importateurs de cobalt pourraient se retourner vers d'autres pays tels que l'Australie et l'Indonésie pour pallier cette demande ; nous pouvons donc conclure en affirmant qu'une interdiction prolongée ne sera pas profitable pour le Congo.

L'extraction des deux autres éléments essentiels d'une batterie engendre un impact social péjoratif sur les peuples d'Indonésie et du Chili/Bolivie. On considère que ces impacts néfastes sont directement corrélés aux impacts environnementaux car la sécheresse pour ces pays sud-américains et la pollution des eaux pour l'Indonésie vont amener à des problèmes d'alimentation dans ces pays moins développés.

Les différents impacts environnementaux négatifs qui viennent d'être cités rejoignent l'opinion de 77,64 % des répondants, qui considèrent que la production des batteries électriques a un impact important sur l'environnement. Cependant, cet aspect semble être relativement peu pris en compte dans les décisions d'achat des futurs consommateurs. Cela pourrait suggérer que, malgré les effets néfastes environnementaux, c'est principalement l'aspect financier qui influe sur le choix d'acquisition d'un nouveau véhicule, ce qui pourrait limiter l'impact des préoccupations écologiques sur l'adoption généralisée des véhicules électriques.

Il est aussi important de sensibiliser un nombre maximal de personnes, car comme l'a mentionné Monsieur Berings, il n'a jamais reçu de plaintes concernant la situation des habitants issus des pays dans lesquels ces matériaux sont extraits. Là se situe l'entièreté du problème : un manque crucial de visibilité sur les conditions de production. Il faut avoir le courage de dénoncer ces réalités souvent mises de côté.

#### 5.1.2.1. Solutions éventuelles

La meilleure manière d'apporter une réponse efficace à cet enjeu d'extraction et de production est de se concentrer sur la dernière étape du cycle de vie des batteries des véhicules électriques : leur recyclage. Cependant, comme l'a confirmé le membre de la société Umicore lors de l'interview, le recyclage des batteries en est encore à un stade peu avancé, voire inexistant en Belgique.

Notre étude a également révélé que l'impact environnemental et sociétal de l'extraction des matières premières n'a qu'une influence limitée sur les décisions des consommateurs. En effet, seuls 30,92 %

<sup>9</sup> Le M23 (Mouvement du 23 mars), est un groupe armé opérant dans la province du Nord-Kivu, en République Démocratique du Congo. Il a été formé le 6 mai 2012 par des officiers des Forces armées de la RDC qui se sont rebellés contre le gouvernement congolais. Ce groupe armé est soutenu par le Rwanda (Guidi, 2025).

des répondants, conscients des effets néfastes de cette extraction, prennent cet aspect en compte lors de leur décision d'achat. Le facteur déterminant reste le prix. Par conséquent, une simple sensibilisation des consommateurs ne suffit pas : il serait nécessaire d'imposer des taxes ou des sanctions aux pays qui ne respectent pas les normes d'exploitation des ressources, tout en offrant des incitatifs fiscaux aux États qui s'engagent à respecter ces normes.

Le recyclage est une solution prometteuse mais présente également une série de défis. Son développement en Europe est encore limité, et tant que le coût du recyclage d'une batterie électrique restera supérieur à celui de l'achat d'une batterie neuve, les industries automobiles privilégieront ces dernières. Cependant, un principe économique clé peut jouer en faveur du recyclage dans le futur : l'économie d'échelle. Plus il y aura de batteries à recycler, plus les coûts fixes pourront être répartis, ce qui rendra le processus progressivement plus rentable. Ce n'est actuellement pas le cas, car les voitures électriques sont toujours en pleine pénétration sur le marché automobile belge et il faudra attendre la fin de vie de ces véhicules pour pouvoir commencer à observer des avancées en termes de recyclage. Le recyclage actuel, tel qu'il est pratiqué par Umicore à Hoboken, n'est pas une solution parfaite. L'entreprise utilise la pyrométauxurgie, une technique qui consiste à fondre les batteries à très haute température (1.500°C). Ce procédé génère du CO<sub>2</sub> et ne permet pas de récupérer tous les matériaux (perte d'un des trois matériaux, le lithium), limitant ainsi son efficacité écologique.

Un autre défi majeur réside dans la concurrence déloyale avec l'Asie. L'Union européenne impose des normes strictes aux fabricants européens, mais ces réglementations ne s'appliquent pas aux batteries importées de Chine ou de Corée du Sud, ce qui complique la transition vers une économie circulaire. Cette réglementation se base sur les émissions de CO<sub>2</sub> produites durant cette pratique.

De plus, conformément à une directive de l'Union européenne, toutes les voitures électriques devront posséder un passeport de batterie indiquant le pourcentage de matériaux recyclés que cette dernière contient. Le minimum à atteindre sera de 63 % de matériaux recyclés dans une batterie électrique d'ici la fin de l'année 2027 et de 73 % d'ici la fin de l'année 2030 (Union Européenne, 2023). Ces normes disproportionnément restrictives envers les acteurs européens m'amènent à penser que l'Union européenne ne soutient pas suffisamment ses propres acteurs durant cette transition.

Bien que le recyclage soit la solution la plus viable à long terme, il est essentiel de reconnaître que les batteries ont déjà une durée de vie relativement longue et que leur recyclage permettrait d'en prolonger encore davantage l'utilisation. Comme pour toute innovation, il faudra du temps avant d'atteindre une maturité technologique et économique suffisante pour en faire une solution pleinement efficace.

Comme l'indique Monsieur Berings, des alternatives aux matières premières sont en cours d'exploration. Il me semble que celles-ci devront, à terme, constituer la solution définitive pour résoudre cette problématique.

Dans l'attente d'une montée en maturité du recyclage et de l'émergence d'alternatives plus respectueuses de l'environnement et socialement responsables, il me semble primordial que les entreprises se concentrent sur les conditions de travail des mineurs et veillent à ne pas s'approvisionner en matériaux issus de sources ne respectant pas ces conditions. Pour cela, elles devraient être prêtes à payer un coût plus élevé pour leurs matières premières, ce qui pourrait également contribuer à améliorer leur image de marque.

Cependant, ces pratiques comportent un risque de greenwashing et de fairwashing. Une solution éventuelle serait l'utilisation de logiciels tels que Watershed ou Carbemee, qui permettent d'analyser et de vérifier si chaque partenaire de la supply chain respecte bien la réglementation ESG<sup>10</sup>.

D'autres facteurs extérieurs peuvent avoir un impact sur cette transition, comme la présence d'incitatifs, notamment financiers, pour encourager les gens à opérer un changement et modifier leurs habitudes. Cela reste une mission très complexe, comme l'a confirmé Monsieur Berings.

### 5.1.3. Rôle des entreprises belges et de l'État belge

#### 5.1.3.1. Véhicules électriques

Dans le but de favoriser la meilleure pénétration possible pour les véhicules électriques sur le marché belge, l'État a décidé d'offrir des incitants à l'achat de voitures électriques, en opposition à l'achat de véhicules à moteur thermique. Pour les entreprises, la déduction fiscale liée à l'achat d'une voiture électrique de société dépend de l'année d'acquisition du véhicule ; celle-ci sera toutefois de moins en moins importante au cours des prochaines années.

Année	Déduction fiscale
2025	100 %
2026	100 %
2027	95 %
2028	90 %
2029	82,50 %
2030	75 %
2031 et après	67,50 %

Tableau 5 - Déductibilité des VE (Voitures de société électriques et stations de recharge, s. d. :1)

Pour les voitures à moteur thermique, la déductibilité est également décroissante au fur et à mesure des années, mais celle-ci démarre d'un niveau plus faible.

Année	Déduction fiscale
2025	75 %
2026	50 %
2027	25 %
2028	0 %

Tableau 6 - Déductibilité des VMT (Les voitures de société en 2025, s. d. :1)

L'influence des entreprises et de l'État sur le marché des véhicules électriques est indéniable, comme le confirment les résultats du questionnaire. En effet, parmi les répondants possédant une voiture électrique, 83,92 % déclarent qu'il s'agit d'un véhicule de société. Nous pouvons considérer que notre échantillon est représentatif de la population belge. En effet, « en Belgique, sur un total de 127.908 voitures électriques nouvellement immatriculées en 2024, 110.583 ont été immatriculées par des entreprises (86 %) et 17.325 par des particuliers (14 %) » (*Immatriculations de véhicules / Statbel, 2025:1*).

Ce chiffre souligne le rôle clé des entreprises dans l'adoption des véhicules électriques, mais il soulève également des interrogations quant à leur avenir sur le marché des particuliers. En effet, seuls 2 % des répondants au total possèdent un véhicule électrique personnel, non financé par une entreprise, ce qui reste une part marginale et laisse planer des doutes sur l'adoption de cette technologie par les particuliers.

<sup>10</sup> ESG : « La réglementation ESG est une évaluation des facteurs environnementaux, sociaux et de gouvernance (ESG) qui fournit des informations sur la performance en matière de durabilité d'une entreprise ou d'un instrument financier » (European Comission, s. d.).

Ces observations nous amènent à deux questions cruciales : comment les particuliers pourront-ils adopter ce changement vers la voiture électrique ? À ce titre, quels seront les incitants que l'État utilisera à l'avenir pour faciliter cette transition ?

Il faut également ajouter que, selon les réponses à la question liée, 27,14 % des votants ont répondu qu'ils ne souhaitent pas acheter de véhicule électrique, indépendamment des considérations sociales et environnementales.

Cela suggère que la transition vers l'électrique pour les particuliers reste un défi de taille, d'autant plus qu'il n'existe actuellement aucun avantage fiscal pour l'achat d'un véhicule électrique par un particulier. À l'inverse, l'État français propose un bonus écologique, sous réserve que le véhicule respecte certaines conditions : un prix toutes taxes comprises inférieur ou égal à 47.000 € et un poids inférieur à 2,4 tonnes (*Je change ma voiture*, s. d.)

#### 5.1.3.2. Bornes électriques

Pour ce qui concerne l'analyse des résultats, je me dois d'admettre que la situation concernant les bornes de recharge en Belgique est semblable à celle des véhicules électriques (par extension) : leur expansion dépend également des entreprises belges et des mesures prises par le gouvernement. De plus, comme l'a mentionné Monsieur Berings, le déploiement des bornes de recharge constitue une variable dépendante de l'arrivée et de l'essor des véhicules électriques.

À titre d'exemple, le questionnaire démontre que sur l'échantillon des 398 répondants, 31,25% des personnes possédant une voiture électrique rechargent leurs véhicules principalement sur leur lieu de travail. Cela peut sembler cohérent ; cependant, quand on s'intéresse de plus près aux personnes qui rechargent leurs voitures à domicile, il est important de préciser que 67,74% d'entre elles bénéficient d'une borne de recharge installée par leur employeur.

L'État a une fois encore une part de responsabilité prépondérante dans cette intervention des employeurs du pays, car comme pour les véhicules électriques, les avantages fiscaux sont importants. Les avantages s'étendaient du début de l'année 2021 jusqu'au 31 août 2024 :

Période	Montant maximum déductible
2021	1.750 euros
2022	1.750 euros
2023 - août 2024	1.750 euros pour les bornes unidirectionnelles 8.000 euros pour les bornes bidirectionnelles

Tableau 7 - Déductibilité des bornes de recharge(Bornes de recharge pour voitures électriques | SPF Finances, s. d. :2)

La déductibilité fiscale ne s'applique qu'une seule fois et octroyée moyennant le respect de conditions rigoureuses. Ces dernières sont reprises ci-après :

*“La borne de recharge doit :*

- *avoir été achetée à l'état neuf,*
- *être fixe : la borne de recharge doit être fixée de manière permanente au sol ou au mur, cela veut dire que le système de recharge ne peut pas être désolidarisé du sol ou du mur. Les câbles de recharge ne sont pas considérés comme des bornes de recharge fixes et n'entrent donc pas en considération.*
- *être installée dans ou à proximité immédiate de l'habitation où vous avez établi votre domicile (fiscal) au 1<sup>er</sup> janvier de l'exercice d'imposition :*
  - *L'installation d'une borne de recharge fixe dans ou à proximité d'un bien immobilier où le contribuable n'a pas établi son domicile (fiscal) (par exemple une seconde résidence) n'entre donc pas en considération pour la réduction d'impôt.*

- *Il doit s'agir du domicile (fiscal) au 1<sup>er</sup> janvier de l'exercice d'imposition pour lequel la réduction d'impôt est demandée. L'appréciation ne s'effectue donc pas au moment de l'installation de la borne de recharge fixe ou du paiement.*
  - *Il n'est pas exigé que la borne de recharge fixe soit installée à l'intérieur de l'habitation. Les dépenses relatives à des bornes de recharge fixes installées contre une façade extérieure ou sur des places de stationnement extérieures à proximité immédiate de l'habitation peuvent également entrer en considération pour la réduction d'impôt.*
  - *Les dépenses relatives à une borne de recharge fixe installée dans un garage qui n'est pas attenant à l'habitation mais qui se situe à proximité immédiate de celle-ci peuvent également entrer en considération pour la réduction d'impôt. Il doit alors bien s'agir d'un garage sur lequel le contribuable a des droits d'usage.*
  - *être intelligente: le temps de charge et la capacité de charge doivent pouvoir être transmis par un système de gestion énergétique, qui est capable de renvoyer des notifications sur la capacité de charge réelle et son état.*
  - *utiliser uniquement de l'électricité verte au 1<sup>er</sup> janvier de l'exercice d'imposition lié à la période imposable pendant laquelle les dépenses ont été faites :*
    - *Pour les dépenses faites en 2024, la borne de recharge doit uniquement utiliser de l'électricité verte au 1<sup>er</sup> janvier 2025.*
    - *L'électricité verte est l'électricité qui est produite sur place à partir de sources d'énergies renouvelables ou l'électricité fournie par un fournisseur d'électricité qui s'est engagé contractuellement à ne fournir que de l'électricité provenant de sources d'énergies renouvelables.*
  - *être approuvée par un organisme de contrôle agréé."*
- (Bornes de recharge pour voitures électriques / SPF Finances, s. d. :2).*

L'aide de l'État belge ne peut malheureusement pas répondre aux principales préoccupations des utilisateurs belges de véhicules électriques, comme observé dans l'étude. En effet, ces derniers se plaignent principalement des temps de recharge trop longs et de la nécessité d'intégrer cette contrainte dans leur organisation quotidienne. A l'inverse, les utilisateurs de véhicules thermiques n'ont pas à se soucier de l'endroit ou de la durée de leur prochain plein de carburant.

Bien que le nombre de bornes de recharge soit en forte augmentation, leur accessibilité reste inférieure à celle des stations-service pour les véhicules thermiques. De plus, la durée de recharge étant plus longue qu'un simple plein d'essence, même avec un réseau plus dense, les bornes sont occupées plus longtemps. À cela s'ajoute le fait que l'autonomie des véhicules électriques est encore inférieure à celle des voitures thermiques, ce qui oblige les utilisateurs à recharger plus fréquemment qu'ils ne faisaient le plein auparavant. Cela justifie en partie l'aide actuelle de l'État, car avec une accessibilité réduite et des temps de recharge plus longs, il est essentiel de trouver des solutions adaptées.

Cependant, ces aides ont leurs limites. Certains utilisateurs se plaignent de ne pas pouvoir installer de bornes de recharge à domicile pour diverses raisons. Comme l'a souligné notre intervenant de la société Engie, la qualité des installations électriques existantes peut poser problème, certaines n'étant pas en mesure de supporter l'ajout d'une borne. De plus, vivre en copropriété constitue un obstacle supplémentaire à l'installation de bornes de recharge, ce qui freine l'adoption des véhicules électriques.

#### 5.1.3.3. Solutions éventuelles

Plusieurs solutions peuvent être envisagées pour résoudre le problème de la dépendance aux avantages fiscaux accordés par l'État belge, ainsi que pour stimuler l'achat de bornes de recharge par les entreprises du pays. Il s'agit d'un véritable défi, car la transition vers les véhicules électriques repose

actuellement sur des subventions gouvernementales et des déductions fiscales. Or, ces aides sont limitées dans le temps, ce qui signifie que la déductibilité est amenée à s'estomper, pour ensuite disparaître. Il faudra donc être capable de poursuivre cette transition, notamment en développant les infrastructures de recharge.

Selon moi, il existe deux approches pour résoudre ce problème. La première consiste à améliorer le nombre et la qualité des bornes de recharge électriques. La seconde repose sur une solution de substitution, en trouvant une alternative aux bornes électriques traditionnelles.

La première méthode de résolution nécessitera l'utilisation des innovations et des évolutions effectuées, car comme l'a souligné notre intervenant de la société Engie, les bornes de recharge bidirectionnelles joueront un rôle prépondérant à l'avenir. Grâce à elles, un véhicule électrique pourra non seulement se charger à partir du réseau, mais aussi réinjecter de l'énergie en fonction de la demande et de la consommation. Cette technologie n'aidera malheureusement pas le consommateur vivant dans une rue où la consommation du réseau est plus importante, le rendant ainsi vulnérable. De plus, il est encore trop tôt pour savoir si l'électricité réinjectée dans le réseau apportera un avantage financier pour l'utilisateur. Cette dépendance accrue pourrait également entraîner des conflits entre les utilisateurs du même réseau, notamment si l'un d'eux se retrouve avec une voiture électrique à 0 % après qu'un autre a consommé une trop grande quantité d'électricité. Par ailleurs, des inégalités pourraient émerger, car les infrastructures de recharge et d'approvisionnement en électricité varient d'un endroit à l'autre, engendrant ainsi des besoins différents. Les innovations technologiques permettront également de développer des bornes plus puissantes et donc plus rapides pour les utilisateurs. À titre d'exemple, l'entreprise BYD a annoncé une nouvelle borne de recharge capable de fournir 400 kilomètres d'autonomie en seulement 5 minutes (Manière, 2025).

En 2024, le nombre de bornes électriques a augmenté de 45 % en Belgique, passant de 15.184 à 22.037 en une seule année. Toutefois, cette progression reste inégalement répartie, puisque la Région flamande possède à elle seule quatre fois plus de bornes que la Wallonie et la Région bruxelloise réunies (Rouzeeuw, 2025). Si l'augmentation du nombre de bornes est une avancée positive, leur utilisation efficace dépendra aussi de la volonté des conducteurs de véhicules électriques. Il faudra encourager le partage des places de stationnement à proximité des bornes, notamment sur les lieux de travail, et promouvoir l'adoption de bornes bidirectionnelles permettant d'alimenter le réseau lorsque cela est nécessaire. Les utilisateurs devront également être prêts à adapter leurs habitudes de voyage et à intégrer ces innovations dans leur quotidien.

Concernant la solution de substitution, un projet d'autoroute électrique est en cours d'expérimentation en France, sur un tronçon de deux kilomètres de l'A10. L'objectif est de recharger les batteries des véhicules électriques par induction pendant leur trajet. Ce test coûtera à l'État français plus de 26 millions d'euros (Delacroix, 2024). Un projet similaire est également prévu en Suède, avec l'ambition de construire une route électrifiée de 3.000 km reliant Stockholm, Göteborg et Malmö (Dubois, 2024). Toutefois, même si cette technologie se développe, il faudra encore beaucoup de temps et d'investissements avant de pouvoir transformer un grand nombre de routes en systèmes de recharge par induction.

Ces innovations technologiques permettront de résoudre de nombreuses problématiques, mais certains défis persisteront dans le futur. La question des immeubles à appartements soulève des enjeux similaires. Comme l'a souligné notre intervenant, pourrons-nous dans le futur garantir que le réseau électrique de ces immeubles supportera la charge de plusieurs véhicules électriques en même temps ? Ce sont d'éventuelles limitations qui devront être étudiées et faire l'objet de solutions dans le futur.

Comme pour toutes les innovations, il est important d'effectuer un transfert d'informations et de connaissances vers la population afin d'expliquer l'origine et le but de cette dernière. Cependant, si cette communication est mal effectuée, cela peut créer de la méfiance et compliquer le processus de transition.

#### 5.1.4. Communication

Une autre conséquence négative de cette transition est la confusion qui entoure certaines informations. Au début de cette transition, la réduction du bruit des véhicules électriques était présentée comme un avantage majeur, car les transports étaient considérés comme la principale source de nuisances sonores. Cependant, après leur mise en circulation, il est apparu que cette absence de bruit posait également des problèmes de sécurité pour les usagers de la route.

L'étude menée sur notre échantillon de population confirme que cette réduction sonore est perçue de manière mitigée. Bien que la tendance générale penche légèrement en faveur de cet avantage, certaines personnes considèrent au contraire que le manque de bruit nuit au charme des véhicules. Ce flou dans la communication autour des bénéfices et des inconvénients de cette transition peut donner l'impression d'un projet mal maîtrisé. De plus, les constructeurs automobiles ont dû adapter leurs véhicules en intégrant le système AVAS pour émettre un son artificiel et ainsi prévenir les piétons et cyclistes de leur présence.

Par ailleurs, une comparaison fréquente est faite avec le marché chinois. Certes, les pays de l'Union européenne accusent un retard par rapport à ce leader du secteur, mais il est important de prendre en compte les différences réglementaires et environnementales. Comme l'a souligné notre intervenant de la société Umicore, cette disparité crée une concurrence déloyale au sein de la supply chain. En Chine, la forte dépendance au charbon dans le mix énergétique génère un impact environnemental beaucoup plus lourd, annulant ainsi en grande partie les effets positifs des efforts européens visant à promouvoir une énergie plus verte. Cette asymétrie rend la compétition inéquitable et, bien que la Chine semble en avance, il ne serait pas pertinent d'engager une course à tout prix sans considérer ces différences structurelles.

C'est précisément ce type de contradictions et de comparaisons biaisées qui, selon moi, font de la communication un obstacle à l'adoption des véhicules électriques. Celle-ci manque parfois de clarté et entretient une confusion qui peut déstabiliser les utilisateurs potentiels.

Des erreurs de communication pourraient entraîner la modification de certains aspects des VE, ce qui aurait un impact supplémentaire sur les constructeurs automobiles, déjà en pleine évolution.

#### 5.1.5. Situation des constructeurs automobiles

D'un point de vue économique, bien que le prix d'achat d'un véhicule électrique soit très élevé, il pourrait s'avérer moins rentable à long terme pour les constructeurs automobiles. En effet, les moteurs électriques sont considérés comme quasiment sans entretien, ce qui entraînerait à terme une diminution du chiffre d'affaires et des bénéfices des constructeurs.

Bien que 35,18 % des répondants estiment que cette transition sera financièrement profitable pour les constructeurs, la réalité pourrait être bien différente. Les véhicules électriques ont une durée de vie potentiellement plus longue que les véhicules thermiques. Toutefois, ce point ne peut pas encore être pleinement évalué car la pénétration des véhicules électriques sur le marché en est encore à un stade précoce. Il faudra attendre une dizaine d'années pour confirmer si leur durée de vie prolongée et leur faible besoin d'entretien sont réellement avérés.

Comme mentionné précédemment, il faut également prendre en considération que cette transition entraînera d'importantes pertes d'emplois. Bien que les estimations varient selon les sources, celles-ci s'accordent sur une fourchette de postes supprimés en Europe allant de 190.000 à 275.000, ce qui témoigne des conséquences potentiellement graves de cette transition.

Après avoir analysé la situation des constructeurs automobiles, abordons désormais celle des acheteurs et des futurs utilisateurs de véhicules électriques. En effet, ces derniers sont les premiers acteurs de la transition vers un parc automobile belge composé de VE.

### 5.1.6. Situation des acheteurs

Comme cela a pu être analysé, le facteur de décision le plus important pour un acheteur de véhicule électrique est son prix.

#### 5.1.6.1. Prix des voitures électriques

Il s'agit d'une toute nouvelle supply chain et d'un cycle de vie inédit pour les VE, entraînant de nombreuses modifications. Cela explique pourquoi cette chaîne d'approvisionnement est plus coûteuse que la chaîne traditionnelle. Afin de comprendre pourquoi le prix d'achat des VE est sensiblement plus élevé que celui des VMT, il est crucial de se pencher également sur l'impact de ce dernier, tant sur les constructeurs automobiles que sur les particuliers. En effet, le cycle de vie du VE ne se limite pas à la création et au recyclage, il comporte des étapes intermédiaires qui sont mises en place pour le maintenir utilisable le plus longtemps possible. Cependant, celles-ci ont un coût non négligeable, qui doit être comparé avec le coût relatif des voitures thermiques.

#### 5.1.6.2. Prix des batteries

L'adoption future des voitures électriques est et sera freinée par leur prix élevé, principalement dû au coût des batteries. En effet, d'après le sondage effectué, 72,86 % des répondants estiment que le coût des batteries électriques constitue un obstacle majeur à leur généralisation. Les matières premières représentent jusqu'à 50 % du coût d'une LIB. Toutefois, le recyclage des matériaux pourrait permettre de réduire ce coût de 30 %, tout en évitant les frais liés à la gestion des déchets, en orientant les batteries usées vers le recyclage plutôt que vers la mise en décharge. Il est donc essentiel de favoriser le recyclage des batteries pour faire baisser leur prix. Le temps sera un facteur clé dans la réduction du coût des véhicules électriques. Il est important de souligner que toutes les LIB ne sont pas similaires, leur prix varie donc également. Dans certains cas, le prix des batteries peut être multiplié par quatre en fonction du type de batterie utilisé, ce qui a des conséquences directes et importantes sur le prix final du véhicule, lorsque l'on sait qu'environ un quart du prix d'une voiture électrique est lié à sa batterie.

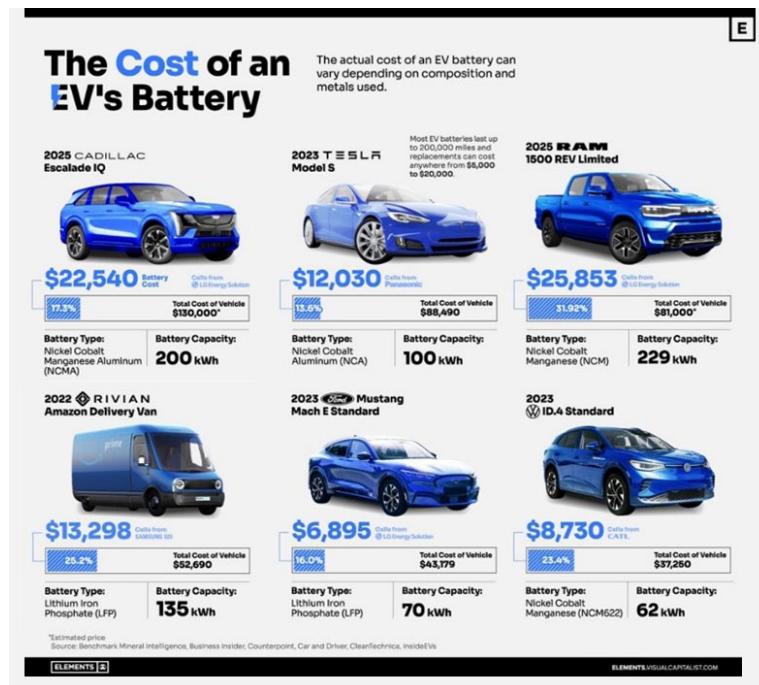


Figure 19 - Le coût d'une batterie de VE (Sergère, 2023 :1)

Tout chose restant égale par ailleurs, une baisse du prix des matières premières entraînerait une baisse des prix des batteries, et de facto, du prix d'achat des VE. Bien que l'analyse des courbes de prix du lithium et du nickel mette en lumière une baisse depuis plusieurs années, il est important de souligner que, comme mentionné précédemment, le prix du cobalt a récemment augmenté suite à la suspension des exportations décidée par la RDC pour une durée de quatre mois. Sans cette nouvelle décision, sa courbe de prix aurait également été décroissante.

Par ailleurs, seulement 19,10 % des personnes interrogées considèrent que l'exploitation de ces matériaux nécessaires à la fabrication des batteries est économiquement profitable aux populations locales. Pourtant, en prenant l'exemple de l'exploitation des mines de cobalt en RDC, malgré des conséquences sociales et environnementales souvent désastreuses, cette industrie permet tout de même à 150.000 à 200.000 mineurs artisanaux de subvenir à leurs besoins, ainsi qu'à ceux de leurs familles. Cela est d'autant plus crucial pour ces populations vivant dans des régions reculées du pays (Buxton, 2022).

Après l'analyse du prix des véhicules électriques et du principal responsable de cette augmentation de prix, il est important d'effectuer une comparaison avec celui des VMT.

#### 5.1.6.3. Comparaison

L'impact financier pour l'acheteur se fait ressentir dès l'acquisition du véhicule. Voici une comparaison directe entre des véhicules électriques et thermiques de la même gamme, mettant en évidence les différences de prix existantes.

Modèle du véhicule thermique	Prix du véhicule thermique en 2022	Modèle du véhicule électrique	Prix du véhicule électrique en 2022	Surcoût
BMW 440iA 326 ch	58.600 €	i4 eDrive40 340 ch	59.950 €	+2,30 %
Fiat 500 1.0 70 ch	15.690 €	Fiat 500e	26.200 €	+67 %
Twingo 3 1.0 sce 65 ch	15.750 €	Twingo 3 électrique R80 82 ch	24.050 €	+52,70 %
Megane 4 1.0 tce 115 ch	25.100 €	Megane E-tech 130 ch EV40	35.200 €	+40,20 %

Tableau 8 - Comparaison de coût entre VMT et VE (Surcoût de l'électrique par rapport au thermique, s. d. :2)

Pour un même modèle de véhicule, il est important de prendre en compte dans l'analyse des différences de prix que la version électrique dispose généralement d'une puissance supérieure (mesurée en chevaux) par rapport à la version thermique.

Comme l'a souligné l'entreprise Umicore lors de son interview, la durée de vie d'une batterie électrique et donc d'un véhicule électrique ne se mesure pas en années, mais en cycles de charge et de décharge. Selon notre intervenant, les batteries actuelles peuvent supporter entre 2.000 et 4.000 cycles, ce qui signifie qu'avec un kilométrage annuel entre 15.000 km et 30.000 kilomètres, la durée de vie d'un véhicule électrique pourrait atteindre plusieurs dizaines d'années (Alvarez, 2022). En comparaison, les véhicules thermiques commencent généralement à montrer des signes de défaillance aux alentours de 300.000 kilomètres.

Toutefois, la batterie électrique reste sensible aux conditions extérieures : les variations de température, les saisons et l'humidité peuvent accélérer sa dégradation et réduire sa durée de vie. En ce qui concerne les pièces appelées d'usure, leur durabilité varie selon le type de véhicule. Par exemple, les pneus s'usent plus rapidement sur un véhicule électrique car celui-ci est plus lourd qu'un modèle thermique, ce qui entraîne un remplacement plus fréquent. À l'inverse, les plaquettes de frein des véhicules électriques ont une durée de vie environ deux fois plus longue que celles des véhicules thermiques, grâce au système de freinage régénératif qui réduit leur sollicitation.

Voiture électrique	90.000 km
Voiture thermique	45.000 km

Tableau 9 - Comparaison de la durée (en kilomètre) de conservation de plaquettes de frein (Monin, 2023:1)

Bien que décrites comme sans entretien en raison de l'absence de vidanges et d'autres opérations typiques des moteurs thermiques, les voitures électriques nécessitent tout de même un entretien. Celui-ci permet notamment de vérifier l'état de la batterie, des freins et d'autres composants essentiels. Cependant, cet entretien est plus simple, plus rapide et comporte moins d'étapes, ce qui le rend moins coûteux que celui d'un véhicule thermique.

Voiture électrique	800 euros/an
Voiture thermique	1.000 euros/an

Tableau 10 – Comparaison du coût de l'entretien des VE et des VMT (Monin, 2023:1)

De plus, il est important de souligner que la voiture électrique présente un avantage en termes de fréquence d'entretien. En moyenne, une voiture thermique nécessitera deux fois plus d'entretiens qu'une voiture électrique.

Voiture thermique	15.000 Km
Voiture électrique	30.000 Km

Tableau 11 - Comparaison de la distance à effectuer avant entretien (Monin, 2023:1)

En plus des coûts mentionnés précédemment, il est essentiel de prendre en compte les taxes et les frais d'assurance, qui peuvent être plus élevés pour les véhicules électriques que pour les véhicules à moteur thermique. En ce qui concerne l'assurance, les VE sont généralement plus coûteux à couvrir, notamment en raison du prix élevé de la batterie, dont le remplacement est onéreux. Quant aux taxes, bien que les VE n'émettent pas de CO<sub>2</sub>, leur poids supérieur compense cet avantage dans certains systèmes de taxation, rendant la charge fiscale globalement comparable à celle des VMT.

En effectuant l'analyse du TCO, procédure suggérée par monsieur Berings, il est apparu que le coût total d'une voiture électrique et d'une voiture thermique s'équilibrerait après 15.000 kilomètres annuels pour un particulier. Cette durée se réduit encore davantage pour une voiture de société, grâce aux avantages fiscaux mentionnés précédemment (Leclercq, 2023).

Après la première utilisation de ces véhicules électriques, il est important d'analyser ce qu'ils deviendront à l'avenir et quelles seront les conséquences éventuelles de cette seconde vie.

### 5.1.7. Seconde vie en Afrique

Une grande majorité des votants, à savoir 77,14 %, ignorent ce qu'il advient des véhicules électriques après leur utilisation. Cette méconnaissance révélée par les résultats du questionnaire peut être perçue comme une forme de désinformation. Ce constat est d'autant plus préoccupant que 40 % des véhicules usagés dans le monde sont exportés vers le continent africain. Cette exportation de véhicules usagés n'est pas sur le point de s'arrêter avec la transition vers les véhicules électriques, selon l'entreprise Umicore.

En revanche, il est encourageant de constater que parmi ceux qui sont informés sur la fin de vie des véhicules électriques, une majorité considère cet aspect comme un élément clé dans leurs décisions. Cette sensibilité est particulièrement marquée chez les jeunes de 18 à 24 ans, laissant entrevoir une prise de conscience croissante pour l'avenir.

#### 5.1.7.1. Présence des outils essentiels

##### 5.1.7.1.1. Électricité

Pour que les voitures électriques puissent avoir une seconde vie sur le continent africain, comme cela est prévu selon monsieur Berings, il est nécessaire que l'électricité soit disponible en quantité suffisante. Or, cette condition est loin d'être remplie : en Afrique subsaharienne, seulement 48 % de la population a accès à l'électricité, et ce taux chute à 24 % en Afrique centrale.

Dans ces conditions, envisager l'exportation de véhicules électriques vers ces régions semble utopique. Cela reviendrait à demander aux populations locales d'utiliser de l'électricité pour leurs voitures alors que beaucoup n'en disposent même pas pour leur propre foyer. Une telle approche paraît donc déconnectée des réalités du terrain.

##### 5.1.7.1.2. Afrique du Sud

En analysant la situation énergétique du pays considéré comme le leader de cette transition sur le continent africain, l'Afrique du Sud, on constate que l'accès à l'électricité y atteint environ 94 %, un taux supérieur à la moyenne mondiale de 90 %. Cependant, cette accessibilité repose principalement sur un mix énergétique pour la production d'électricité, dominé par le charbon.

L'arrivée des véhicules électriques sur le marché sud-africain soulève ainsi des problématiques environnementales. En effet, une recharge complète d'un véhicule électrique entraîne une augmentation des émissions d'oxydes d'azote de 200 % à 600 % par rapport à un plein de carburant. De plus, les émissions d'oxyde de soufre sont de 35 à 50 fois supérieures aux niveaux habituels. Au total, la recharge d'une voiture électrique pourrait entraîner une hausse des émissions de gaz à effet de serre comprise entre 65 % et 115 %.

Dans un pays où l'électricité provient majoritairement du charbon, les chiffres susmentionnés suggèrent que la transition vers les véhicules électriques pourrait avoir des conséquences environnementales et sanitaires préoccupantes pour les populations locales.

Concernant l'électricité, cette transition me semble prématurée pour le continent africain, qui accuse déjà un retard considérable en matière de production d'électricité. Lui imposer une seconde transition énergétique serait une exigence démesurée pour des pays encore en phase de développement.

Il est d'ailleurs possible d'établir un parallèle avec la Belgique, où une double transition énergétique présente également des défis et des risques importants. Si l'Afrique du Sud, pourtant le pays le plus riche du continent (en se basant sur le produit intérieur brut (IMF, 2025)) avec un accès quasi total à l'électricité, subit des effets inverses à ceux escomptés initialement, cela ne laisse rien présager de bon pour le reste du continent (Delestre, 2024).

Les bornes de recharge constituent un élément essentiel de la transition vers les véhicules électriques. Toutefois, en Afrique, leur déploiement pose actuellement problème. Cependant, il s'agit d'un défi à long terme, car installer des milliers de bornes sans garantir un accès fiable à l'électricité semble inadapté. Cela serait comparable à avoir des milliers de stations-service sans carburant.

Concernant la transition vers les véhicules électriques en Afrique, la première étape essentielle est d'établir une liste de priorités et de diviser cette transition en plusieurs phases, afin de garantir une certaine stabilité. Sans cela, le processus serait trop risqué.

La priorité absolue devrait être d'assurer une stabilité énergétique, en permettant à chaque pays d'offrir un accès fiable et suffisant à l'électricité pour répondre aux besoins de la population. Ensuite, il est crucial de revenir à l'objectif fondamental de cette transition : réduire l'impact environnemental du transport, en particulier du transport routier. Il faut donc s'assurer que les conséquences sur l'environnement et les populations locales soient moindres qu'avec les véhicules thermiques, faute de quoi cette transition perdrait tout son sens.

L'Afrique devrait viser à atteindre cette stabilité énergétique et ces innovations dans les 10 à 15 prochaines années. En effet, c'est après cette période que les véhicules électriques utilisés en Europe, en Asie et sur le continent américain arriveront en fin de vie. Après cette première utilisation, ces véhicules seront massivement envoyés vers l'Afrique, comme c'est déjà le cas pour les voitures thermiques. Cette thèse a été confirmée par notre intervenant de chez Umicore.

Il serait également nécessaire de développer un réseau de bornes de recharge dans les pays concernés. Toutefois, si la transition vers un mix énergétique plus propre prend plus de temps que prévu, les pays développés risquent de se retrouver sans destination pour leurs véhicules en fin de vie, ce qui ralentirait indirectement la transition en Afrique.

D'un point de vue stratégique, l'Afrique du Sud doit être le moteur de la transition énergétique sur le continent. Si le pays le plus riche d'Afrique ne parvient pas à opérer ce changement, il sera encore plus difficile pour les autres nations d'y parvenir.

Un défi supplémentaire réside dans la consommation électrique sud-africaine, qui est en constante augmentation. Cette transition sera donc d'autant plus complexe, car il ne s'agit pas seulement de produire de l'énergie de manière plus verte, mais aussi d'augmenter la production pour répondre à une demande croissante. Selon les estimations, cette demande devrait augmenter de 40 % à 60 % d'ici 2030 par rapport à 2009, ce qui impose une préparation rigoureuse.

## 6. Conclusion

Pour conclure ce mémoire de recherche portant sur les impacts liés à la supply chain dans le cadre de la transition des véhicules thermiques vers les véhicules électriques, il apparaît malheureusement que cette transition ne peut pas être qualifiée de durable au sens scientifique du terme. Une innovation est considérée comme durable lorsqu'elle répond à trois critères essentiels : économique, environnemental et social. Or, dans le cas présent, aucun des maillons de la chaîne de valeurs ne parvient à satisfaire pleinement ces trois dimensions.

Du point de vue des producteurs, notamment ceux impliqués dans l'extraction des matières premières nécessaires à la fabrication des batteries (lithium, cobalt, nickel), la dimension économique est certes présente, mais les aspects environnementaux et sociaux sont gravement négligés. L'exemple de l'Indonésie est particulièrement révélateur : les opérations minières y causent une déforestation massive, une pollution des écosystèmes, et surtout une expropriation de territoires indigènes, violant ainsi des droits fondamentaux. De plus, la quasi-totalité des matériaux extraits est envoyée en Chine pour raffinage, ce qui accroît la dépendance géopolitique et limite l'autonomie de production européenne.

Du côté des constructeurs automobiles, la transition est tout aussi complexe. Ces derniers doivent faire face à une concurrence déloyale, notamment chinoise, ainsi qu'à des contraintes réglementaires strictes en Europe. Sur le plan économique, bien que les voitures électriques soient actuellement plus chères à l'achat, on peut espérer une baisse des prix dans les années à venir, notamment en raison de la réduction des coûts des batteries. Toutefois, cette baisse pourrait ne pas être suffisante pour compenser les pertes économiques liées à la transition. En effet, les véhicules électriques nécessitent moins d'entretien, comportent moins de pièces détachées et bénéficient d'un processus de fabrication davantage automatisé. Ces facteurs, combinés à la réduction progressive de la production de moteurs thermiques, entraîneront une diminution significative des besoins en main-d'œuvre. En Europe, une étude estime que 501.000 emplois pourraient devenir obsolètes en raison de cette transition. Du côté des créations d'emplois, on estime que le développement de la filière électrique pourrait créer environ 226.000 emplois, ce qui n'est pas suffisant pour compenser les pertes évoquées et entraînerait dès lors une perte nette de 275.000 emplois. Une autre source évoque une suppression de 190.000 emplois d'ici 2035, malgré la création d'emplois compensatoires dans l'ingénierie automobile. Toutefois, le solde global resterait négatif, ce qui constituerait une véritable catastrophe sociale.

Pour le consommateur final, l'aspect économique reste problématique : le coût d'acquisition d'un véhicule électrique demeure élevé, malgré les aides étatiques. Ces aides ne sont pas permanentes, elles s'estompent et s'estomperont encore à l'avenir, ce qui réduira l'accessibilité à ces véhicules, accentuant toujours plus les inégalités sociales. L'introduction des bornes bidirectionnelles intelligentes, censées alléger la pression sur les réseaux électriques en permettant aux véhicules de restituer de l'énergie, soulève des enjeux technologiques et sociaux importants. En plus de devoir s'adapter à un système complexe, les citoyens sont indirectement sollicités pour devenir des acteurs du réseau énergétique, sans en avoir toujours eu le choix. L'être humain est naturellement réfractaire au changement, et encore plus lorsqu'il y est contraint. L'acceptabilité sociale est donc loin d'être acquise. De plus, du point de vue environnemental, il est impératif d'analyser la méthode de production d'électricité propre à chaque pays si l'on veut être capable d'évaluer correctement l'empreinte carbone des véhicules électriques. Par exemple, la Belgique envisage de sortir du nucléaire, ce qui pourrait réduire son approvisionnement en électricité bas carbone, alors même que la demande énergétique ne cesse de croître avec l'électrification de nos modes de vie.

Enfin, en fin de vie, les véhicules électriques risquent de suivre le même parcours que les véhicules thermiques, finissant en Afrique ou en Europe de l'Est, sans véritable politique de recyclage systématique des batteries. Cela pose de graves questions, tant en matière d'environnement que de justice sociale internationale.

Sur le plan économique, on observe que la dynamique de lancement des véhicules électriques a été largement soutenue par des subventions étatiques, ce qui n'est pas soutenable à long terme. Par conséquent, une transition complète à l'horizon 2030 ou même 2050 semble irréaliste, du moins dans l'état actuel des choses.

Il est important de noter que ce mémoire n'a pas traité le cas des véhicules hybrides, considérés comme une solution transitoire. Les hybrides non rechargeables devront disparaître des ventes d'ici 2030, et les rechargeables pourraient bénéficier d'un sursis de plusieurs années. Dans les deux cas, ces véhicules continuent à émettre du CO<sub>2</sub>, ils échappent donc aux objectifs fixés par l'UE.

Une piste d'amélioration future pour cette recherche serait d'analyser les impacts environnementaux liés à l'extraction des terres rares, qui ne sont pas mesurés en équivalent carbone, mais dont les conséquences sur la biodiversité sont inconnues. D'autre part, l'évolution du contexte géopolitique, en particulier des droits de douane imposés par l'administration Trump à la Chine, aura vraisemblablement un impact décisif sur cette transition. Il est aujourd'hui impossible de produire des véhicules électriques sans se passer de la Chine, qui reste un acteur incontournable dans le raffinage des matières premières.

Je reconnais également une limitation importante dans ce mémoire : malgré une tentative d'inclure des perspectives globales, mon approche reste eurocentrée. Cela s'est reflété notamment dans les réponses aux questionnaires, pour lesquels les répondants étaient principalement issus de pays européens. Une analyse plus poussée aurait été nécessaire, afin d'inclure les implications inhérentes aux pays du Sud, souvent relégués aux rôles d'extracteurs ou de décharges.

Si je devais conclure par une opinion personnelle, je dirais que la voiture électrique, telle qu'elle est pensée aujourd'hui, n'est pas durable. Pour autant, tout n'est pas à rejeter. Cette transition peut fonctionner, mais elle nécessite des bases plus solides, un engagement collectif équitable et surtout, une révision profonde de notre modèle de consommation.

Je n'ai pas traité ici des alternatives à l'électrique, comme l'hydrogène, ni des futures innovations dans les matériaux pouvant remplacer le lithium, le cobalt ou le nickel. Pour l'instant, ces trois éléments constituent le cœur de cette transition, mais ils pourraient, demain, être remplacés par des solutions plus soutenables, à condition que la recherche et la coopération internationale suivent.

## 7. Bibliographie

- *About Umicore.* (s. d.). Consulté 28 février 2025, à l'adresse <https://www.uminicore.com/en/about/>
- Akram, M. N., & Abdul-Kader, W. (2023). Sustainable Development Goals and End-of-Life Electric Vehicle Battery : Literature Review. *Batteries*, 9(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/batteries9070353>
- Alvarez, G. (2022, mars 21). *Voiture électrique (2022) : Quelle est sa durée de vie ?* Auto Journal. <https://www.autojournal.fr/environnement/voiture-electrique-duree-de-vie-277826.html>
- Appinio, R. (2023, septembre 25). *Calculer la marge d'erreur et taille d'échantillon | Blog Appinio.* <https://www.appinio.com/fr/blog/etudes-de-marche/marge-d-erreur-et-taille-echantillon>
- Ayetor, G. K. (2022). Towards Net Zero Electric Vehicle Emissions in Africa. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 9(4), 70-76. <https://doi.org/10.1007/s40518-022-00204-z>
- Beaudet, A., Larouche, F., Amouzegar, K., Bouchard, P., & Zaghib, K. (2020). Key Challenges and Opportunities for Recycling Electric Vehicle Battery Materials. *Sustainability*, 12(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/su12145837>
- Bellanger, L. (2024). *La transition énergétique pourrait entraîner la suppression de 190 00 emplois d'ici à 2035.* <https://www.auto-infos.fr/article/la-transition-energetique-pourrait-entrainer-la-suppression-de-190-00-emplois-d-ici-a-2035.284490?>
- Berlier, E. (2015). *La voiture dite 'propre' l'est-elle vraiment ? Si l'on prend en compte le processus en aval et en amont nous pouvons actuellement dire que non.*
- Borgstede, M., & Scholz, M. (2021). Quantitative and Qualitative Approaches to Generalization and Replication—A Representationalist View. *Frontiers in Psychology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.605191>
- *Bornes de recharge pour voitures électriques | SPF Finances.* (s. d.). Consulté 18 mars 2025, à l'adresse <http://fin.belgium.be/fr/particuliers/avantages-fiscaux/bornes-de-recharge-pour-voitures-electriques>
- Boujdid, M. (s. d.). *Calcul échantillon.* Consulté 26 mars 2025, à l'adresse [https://www.academia.edu/41753781/Calcul\\_échantillon](https://www.academia.edu/41753781/Calcul_échantillon)
- Buxton, A. (2022, août 11). *Vers une meilleure exploitation minière du cobalt.* <https://www.iied.org/fr/vers-une-meilleure-exploitation-miniere-du-cobalt>
- *Calculer la taille d'échantillon d'un sondage.* (s. d.). SurveyMonkey. Consulté 16 février 2025, à l'adresse <https://fr.surveymonkey.com/mp/sample-size/>
- Campanari, S., Manzolini, G., & Garcia de la Iglesia, F. (2009). Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations. *Journal of Power Sources*, 186(2), 464-477. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.09.115>
- Canada, R. naturelles. (2022, janvier 18). *Faits sur le lithium.* Ressources naturelles Canada. <https://ressources-naturelles.canada.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/donnees-statistiques-et-analyses-sur-l-exploitation-miniere/faits-mineraux-metaux/faits-sur-le-lithium/24010>

- Cassoret, P.-É. (2024, juillet 20). *Auto. Fin des voitures thermiques en 2035 : Bruxelles autorise finalement les e-fuels.* <https://www.ledauphine.com/magazine-automobile/2024/07/20/fin-des-voitures-thermiques-en-2035-bruxelles-autorise-finalement-les-e-fuels>
- Cherry, K. (s. d.). *Confirmation Bias : Hearing What We Want to Hear.* Verywell Mind. Consulté 25 février 2025, à l'adresse <https://www.verywellmind.com/what-is-a-confirmation-bias-2795024>
- CLEPA. (2021, décembre 6). An Electric Vehicle-only approach would lead to the loss of half a million jobs in the EU, study finds | CLEPA. <Https://Www.Clepa.Eu./https://www.clepa.eu/insights-updates/press-releases/an-electric-vehicle-only-approach-would-lead-to-the-loss-of-half-a-million-jobs-in-the-eu-study-finds/>
- Cobalt—Prix / 2010-2025 Données / 2026-2027 Prévisions. (s. d.). Consulté 23 mars 2025, à l'adresse <https://fr.tradingeconomics.com/commodity/cobalt>
- Das, J., Kleiman, A., Rehman, A. U., Verma, R., & Young, M. H. (2024). The Cobalt Supply Chain and Environmental Life Cycle Impacts of Lithium-Ion Battery Energy Storage Systems. *Sustainability*, 16(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/su16051910>
- Delacroix, G. (2024, septembre 23). *L'autoroute qui recharge les véhicules électriques expérimentée dès 2025.* [https://www.lemonde.fr/economie/article/2024/09/23/l-autoroute-qui-recharge-les-vehicules-electriques-experimentee-des-2025\\_6328982\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2024/09/23/l-autoroute-qui-recharge-les-vehicules-electriques-experimentee-des-2025_6328982_3234.html)
- Delestre, S. (2024, mars 22). *Produit intérieur brut (PIB) des pays d'Afrique les plus riches.* Statista. <https://fr.statista.com/statistiques/564296/produit-interieur-brut-pib-de-certaines-regions-mondiales/>
- De Luca, G., Maystadt, J.-F., Sekeris, P. G., Ulimwengu, J. M., & Folledo, R. (2012). *Mineral Resources and Conflicts in the Democratic Republic of the Congo : A Case of Ecological Fallacy.* <https://hdl.handle.net/10568/153922>
- Ding, Y., Cano, Z. P., Yu, A., Lu, J., & Chen, Z. (2019). Automotive Li-Ion Batteries : Current Status and Future Perspectives. *Electrochemical Energy Reviews*, 2(1), 1-28. <https://doi.org/10.1007/s41918-018-0022-z>
- Directive 1999/31/CE du Conseil du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets, CONSIL, 182 OJ L (1999). <http://data.europa.eu/eli/dir/1999/31/oj/fra>
- Domergue, S., & Taszka, S. (2017). *Analyse coûts bénéfices des véhicules électriques. Les voitures.* Ministère de la transition écologique. Paris. <https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/387978/analyse-couts-benefices-des-vehicules-electriques-les-voitures>
- Dubois, Q. (2024, décembre 10). *Route qui recharge : Est-ce le futur de nos autoroutes ?* Auto Journal. <https://www.autojournal.fr/actu/route-qui-recharge-est-futur-autoroute-372302.html>
- E-Fuels : *Tout savoir sur ce nouveau carburant.* (s. d.). FEBIAC. Consulté 17 mars 2025, à l'adresse <https://www.febiac.be/fr/article/e-fuels-tout-savoir-sur-ce-nouveau-carburant>
- Le Monde-AFP. (2024, octobre 21). *En Italie, le gouvernement de Giorgia Meloni prépare un possible retour au nucléaire.* [https://www.lemonde.fr/energies/article/2024/10/21/en-italie-le-gouvernement-de-giorgia-meloni-prepare-un-possible-retour-au-nucleaire\\_6357690\\_1653054.html](https://www.lemonde.fr/energies/article/2024/10/21/en-italie-le-gouvernement-de-giorgia-meloni-prepare-un-possible-retour-au-nucleaire_6357690_1653054.html)
- Enendu, C. (2025, mars 5). *RDC : L'interdiction des exportations de cobalt pèse sur les prix des téléphones et des véhicules électriques.* BBC News Afrique. <https://www.bbc.com/afrique/articles/c5yxxy2vq9wo>

- European Comission. (s. d.). *ESG rating activities—European Commission*. Consulté 24 mars 2025, à l'adresse [https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/esg-rating-activities\\_en](https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/esg-rating-activities_en)
- European Comission. (2025, mars 28). *Carbon Border Adjustment Mechanism—European Commission*. [https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism\\_en](https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en)
- Farnier, J. (2020, septembre 30). Théorie de l'auto-détermination, motivation et bien-être. *La psychologie positive*. <https://www.lapsychologiepositive.fr/theorie-de-lauto-determination-motivation-et-bien-etre/>
- *Fiche pédagogique : L'énergie en Allemagne*. (s. d.). Consulté 17 mars 2025, à l'adresse <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/fiche-lenergie-en-allemagne>
- *Fiscalité des voitures de société en 2024—CBC Banque et Assurance*. (s. d.). CBC. Consulté 25 février 2025, à l'adresse <https://www.cbc.be/entreprendre/fr/produits/credits/fiscalite-voitures-de-societe.html>
- Gaudiaut, T. (2024, juillet 18). *Infographie : Combien y a-t-il de réacteurs nucléaires en Europe ?* Statista Daily Data. <https://fr.statista.com/infographie/29251/nombre-de-reacteurs-nucleaires-operationnels-et-en-construction-en-europe>
- Global Carbon Atlas. (2023). Carbon Emissions. *Global Carbon Atlas*. <https://globalcarbonatlas.org/emissions/carbon-emissions/>
- Guidi, E. (2025, janvier 29). RD-Congo : Qu'est-ce que le M23, ce groupe armé qui mène une offensive éclair sur Goma ? *La Croix*. <https://www.la-croix.com/international/rd-congo-qu-est-ce-que-le-m23-ce-groupe-arme-qui-mene-une-offensive-eclair-sur-goma-20250129>
- Gutiérrez, G., & Ruiz-León, D. (2024). Lithium in Chile : Present status and future outlook. *Materials Advances*, 10.1039.D4MA00625A. <https://doi.org/10.1039/D4MA00625A>
- *Iceland—Countries & Regions*. (s. d.). IEA. Consulté 29 octobre 2024, à l'adresse <https://www.iea.org/countries/iceland>
- Igwe, E. (s. d.). *Water Security Issues for Lithium Mining in Chile*.
- Janse, R. J., Hoekstra, T., Jager, K. J., Zoccali, C., Tripepi, G., Dekker, F. W., & Van Diepen, M. (2021). Conducting correlation analysis : Important limitations and pitfalls. *Clinical Kidney Journal*, 14(11), 2332-2337. <https://doi.org/10.1093/ckj/sfab085>
- IMF. (2025, avril). *World Economic Outlook (April 2025)—GDP, current prices*. <https://www.imf.org/external/datamapper/NGDPD@WEO>
- *Immatriculations de véhicules / Statbel*. (2025, janvier 30). <https://statbel.fgov.be/fr/themes/mobilite/circulation/immatriculations-de-vehicules#news>
- *Je change ma voiture*. (s. d.). Je change ma voiture. Consulté 26 mai 2025, à l'adresse <https://jechangemavoiiture.gouv.fr/jcmv/aide-achat.html>
- Kalungi, P., Yao, Z., & Huang, H. (2024). Aspects of Nickel, Cobalt and Lithium, the Three Key Elements for Li-Ion Batteries : An Overview on Resources, Demands, and Production. *Materials*, 17(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/ma17174389>
- Kowalska, K. (s. d.). *Common Types of Survey Bias and How to Avoid Them*. Consulté 26 novembre 2024, à l'adresse <https://blog.hubspot.com/service/survey-bias-types>
- Laib, F., & Schmidt, J. A. (2019). *Acoustic Vehicle Alerting Systems (AVAS) of electric cars and its possible influence on urban soundscape*.
- LaMonaca, S., & Ryan, L. (2022). The state of play in electric vehicle charging services – A review of infrastructure provision, players, and policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111733. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111733>

- Lan, G. (2024, décembre 13). *Electric Vehicle Tariffs by the US, EU, and Canada: Different Approaches and Implications for the WTO* / ASIL. <https://www.asil.org/insights/volume/28/issue/12>
- Larousse. (s. d.-a). *Définitions : Européocentrisme, eurocentrisme—Dictionnaire de français Larousse*. Consulté 23 avril 2025, à l'adresse <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/europ%C3%A9ocentrisme/31733>
- Larousse, É. (s. d.-b). *Définitions : Saumure - Dictionnaire de français Larousse*. Consulté 23 mars 2025, à l'adresse <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/saumure/71144>
- Lauer, A. (2022, août 1). Finding the Country with the Cleanest Energy—Analysis 2023. *Shrink That Footprint*. <https://shrinkthatfootprint.com/finding-the-country-with-the-cleanest-energy-analysis/>
- *Le TCO, c'est quoi?* (s. d.). FEBIAC. Consulté 24 mars 2025, à l'adresse <https://www.febiac.be/fr/article/le-tco-c-est-quoi>
- Leclercq, D. (2023, juillet 2). *La voiture électrique pas plus chère que la thermique selon le Bureau du Plan*. Gocar.be. <https://gocar.be/fr/actu-auto/electrique/la-voiture-electrique-pas-plus-chere-que-la-thermique-selon-le-bureau-du-plan-2023>
- Leijon, J., & Boström, C. (2022). Charging Electric Vehicles Today and in the Future. *World Electric Vehicle Journal*, 13(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/wevj13080139>
- *Les voitures de société en 2025*. (s. d.). Securex. Consulté 18 mars 2025, à l'adresse <https://www.securex.be/fr/lex4you/employeur/actualites/les-voitures-de-societe-en-2025-impacts-sociaux-et-fiscaux>
- *Lithium—Prix / 2017-2025 Données / 2026-2027 Prévisions*. (s. d.). Consulté 23 mars 2025, à l'adresse <https://fr.tradingeconomics.com/commodity/lithium>
- Liu, X., Hildebrandt, D., & Glasser, D. (2012). Environmental impacts of electric vehicles in South Africa. *South African Journal of Science*, 108(1-2), 01-06.
- Manière, P. (2025, mars 18). *Une recharge électrique aussi rapide qu'un plein d'essence : BYD mise sur l'innovation pour distancer les Européens*. <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/automobile/une-recharge-electrique-aussi-rapide-qu-un-plein-d-essence-byd-mise-sur-l-innovation-pour-distancer-les-europeens-1020910.html?id=47801071239579>
- Lucas, I., & Gajan, A. (2021, février 15). *Le parcours du lithium—Depuis l'extraction jusqu'à la batterie* / CultureSciences-Chimie. <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-physique/electrochimie/le-parcours-du-lithium-depuis-l-extraction-jusqu-a-la>
- Melin, H. E. (2019). *State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries*. <https://www.energimyndigheten.se/globalassets/forskning-innovation/overgripande/state-of-the-art-in-reuse-and-recycling-of-lithium-ion-batteries-2019.pdf>
- Michel, T. (2024, juin 27). *Voitures électriques : L'enfer environnemental de l'extraction de nickel en Indonésie* / Ifri. <https://www.ifri.org/fr/presse-contenus-repris-sur-le-site/voitures-electriques-lenfer-environnemental-de-lextraction-de>
- Miron, A., & Brehm, J. (2024). Reactance Theory—40 Years Later. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/240218056 Reactance Theory - 40 Years Later>
- Mistry, M., Gediga, J., & Boonzaier, S. (2016). Life cycle assessment of nickel products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(11), 1559-1572. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1085-x>

- Monin, P. (2023, juillet 13). Quel est le coût d'entretien d'une voiture électrique ? *Webzine auto BYmyCAR.* <https://www.bymycar.fr/webzine/quel-est-le-cout-d-entretien-d-une-voiture-electrique/>
- Moore, T. (2025, mai 7). *Likert Scale Questions : Craft Smarter Surveys Today.* <https://www.clixie.ai/blog/mastering-likert-scale-questions-your-guide-to-smarter-surveys?>
- Reuters. (2025, février 4). New Belgian government considers building new nuclear plants, report says. *Reuters.* <https://www.reuters.com/business/energy/new-belgian-government-consideres-building-new-nuclear-plants-report-says-2025-02-04/>
- *Nickel—Price—Chart—Historical Data—News.* (s. d.). Consulté 23 mars 2025, à l'adresse <https://tradingeconomics.com/commodity/nickel>
- Nikolopoulou, K. (2022, juin 24). *What Is Social Desirability Bias? | Definition & Examples.* Scribbr. <https://www.scribbr.com/research-bias/social-desirability-bias/>
- Evans, S. (2023, octobre 24). Factcheck : 21 misleading myths about electric vehicles. *Carbon Brief.* <https://www.carbonbrief.org/factcheck-21-misleading-myths-about-electric-vehicles/>
- Pardo-Ferreira, M. C., Torrecilla-García, J. A., Heras-Rosas, C. de las, & Rubio-Romero, J. C. (2020). New Risk Situations Related to Low Noise from Electric Vehicles : Perception of Workers as Pedestrians and Other Vehicle Drivers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186701>
- Poupon, L. (2017). *L'acceptation de la voiture électrique : Étude d'un processus, de l'acceptabilité à l'acceptation située* [Phdthesis, Université de Lyon]. <https://theses.hal.science/tel-01587732>
- Poupon, L., Philipps-Bertin, C., Bobillier Chaumon, M.-É., & Kalampalikis, N. (2017). L'acceptation de la voiture électrique : Un agent transformateur des pratiques socio-domestiques. *Activités*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.4000/activites.3044>
- Prates, L., Karthe, D., Zhang, L., Wang, L., O'Connor, J., Lee, H., & Dornack, C. (2023). Sustainability for all? The challenges of predicting and managing the potential risks of end-of-life electric vehicles and their batteries in the Global South. *Environmental Earth Sciences*, 82(6), 143. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10806-5>
- Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2019). Three pillars of sustainability: In search of conceptual origins. *Sustainability Science*, 14(3), 681-695. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0627-5>
- Qualtrics. (s. d.). *Echelle de Likert : Définition et utilisation.* Qualtrics. Consulté 24 mars 2025, à l'adresse <https://www.qualtrics.com/fr/gestion-de-l-experience/etude-marche/echelle-likert/>
- Rouzeeuw, M. (2025, février 10). La Flandre a quatre fois plus de bornes de recharge que Bruxelles et la Wallonie réunies. *VBO FEB - Verbond van Belgische Ondernemingen - Fédération des Entreprises de Belgique.* <https://www.vbo-feb.be/fr/nouvelles/la-flandre-a-quatre-fois-plus-de-bornes-de-recharge-que-bruxelles-et-la-wallonie-reunis/>
- Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A Review on Electric Vehicles : Technologies and Challenges. *Smart Cities*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/smartcities4010022>
- Sarniak, R. (s. d.). *9 types of research bias and how to avoid them | Articles.* Consulté 26 novembre 2024, à l'adresse <https://www.quirks.com/articles/9-types-of-research-bias-and-how-to-avoid-them>

- Schmitt, F., & Steinmann, L. (2024, juillet 18). *Fin des voitures thermiques : Bruxelles maintient la date butoir de 2035*. Les Echos. <https://www.lesechos.fr/industrie-services/automobile/fin-des-voitures-thermiques-bruxelles-maintient-la-date-butoir-de-2035-2108833>
- Sergère, V. (2023, octobre 18). *Combien coûte réellement la batterie d'une voiture électrique*. Frandroid. [https://www.frandroid.com/survoltes/voitures-electriques/1833473\\_combien-coute-reellement-la-batterie-dune-voiture-electrique](https://www.frandroid.com/survoltes/voitures-electriques/1833473_combien-coute-reellement-la-batterie-dune-voiture-electrique)
- Shah, S. (2019, janvier 3). *7 Biases to avoid in qualitative research*. Editage Insights. <https://www.editage.com/insights/7-biases-to-avoid-in-qualitative-research>
- Sheppard, V. (2020). *3.2 Exploration, Description, Explanation*. <https://ecampusontario.pressbooks.pub/researchmethodsandethics/chapter/3-2-exploration-description-explanation/>
- Steel, T. (2025, janvier 3). *La production belge d'électricité au plus bas depuis six ans*. L'Echo. <https://www.lecho.be/entreprises/energie/la-production-belge-d-electricite-au-plus-bas-depuis-six-ans/10580905.html>
- Sundberg, J. (2009). Eurocentrism. In R. Kitchin & N. Thrift (Éds.), *International Encyclopedia of Human Geography* (p. 638-643). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.00093-6>
- *Surcoût de l'électrique par rapport au thermique*. (2022, juillet 22). <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/argent-economie/s-2608-surcout-de-l-electrique-par-rapport-au-thermique.php?>
- UCL. (2022, mars 22). *'English is often considered the de facto global language...* Culture Online. <https://www.ucl.ac.uk/culture-online/case-studies/2022/mar/english-often-considered-de-facto-global-language>
- Union européenne. (2023, juillet 10). *Le Conseil adopte un nouveau règlement relatif aux batteries et aux déchets de batteries*. Consilium. <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2023/07/10/council-adopts-new-regulation-on-batteries-and-waste-batteries/>
- Règlement (UE) 2023/851 du Parlement européen et du Conseil du 19 avril 2023 modifiant le règlement (UE) 2019/631 en ce qui concerne le renforcement des normes de performance en matière d'émissions de CO<sub>2</sub> pour les voitures particulières neuves et les véhicules utilitaires légers neufs conformément à l'ambition accrue de l'Union en matière de climat (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE), 110 OJ L (2023). <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/851/oj/fra>
- Venkatesh, Thong, & Xu. (2012). Consumer Acceptance and Use of Information Technology : Extending the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology. *MIS Quarterly*, 36(1), 157. <https://doi.org/10.2307/41410412>
- Vitaud, L. (s. d.). *L'escalade d'engagement : Quand vos idées fixes vous empêchent de bien manager / Welcome to the Jungle*. Consulté 25 février 2025, à l'adresse <https://www.welcometothejungle.com/fr/articles/engagement-perte-argent-temps>
- *Voitures de société électriques et stations de recharge : Avantages fiscaux à partir de 2023 / SD Worx*. (s. d.). Consulté 18 mars 2025, à l'adresse <https://www.sdworx.be/fr-be/actualites/tendances/mobilite/avantages-fiscaux-voitures-societe-electriques-bornes-recharge-2023>
- Waseem, M., Lakshmi, G. S., Sreeshobha, E., & Khan, S. (2025). An electric vehicle battery and management techniques : Comprehensive review of important obstacles, new advancements, and recommendations. *Energy Storage and Saving*, 4(1), 83-108. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.09.002>

- Wilson, L. (2022a, juin 28). Shades of Green : Electric Car Emissions - 2023. *Shrink That Footprint*. <https://shrinkthatfootprint.com/electric-car-emissions/>
- Wilson, L. (2022b, juin 28). The « Electric Cars Aren't Green » Myth Debunked—2023. *Shrink That Footprint*. <https://shrinkthatfootprint.com/electric-cars-green/>
- Wu, J., & Wong, J. (2024). Child Labour in Cobalt Mining. *J.P. Morgan Asset Management*. <https://am.jpmorgan.com/content/dam/jpm-am-aem/global/en/insights/child-labour-in-cobalt-mining.pdf>
- Yang, C., & Shi, H.-J. (2023). Prospects of battery assembly for electric vehicles based on patent analysis. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 18, 1134-1139. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctad095>
- Yao Tsoekeo, A., & Boutueil, V. (2022). What Place for Electric Vehicles as a Research Object and a Practical Alternative to Internal Combustion Engine Vehicles in Africa? *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.1177/03611981221116355>
- Zaino, R., Ahmed, V., Alhammadi, A. M., & Alghoush, M. (2024). Electric Vehicle Adoption : A Comprehensive Systematic Review of Technological, Environmental, Organizational and Policy Impacts. *World Electric Vehicle Journal*, 15(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/wevj15080375>

## 8. Annexes

### 8.1. Annexe 1 : tableaux et graphiques

#### - Tableau 1

	Facilite	Menace
Besoin d'autonomie	<ul style="list-style-type: none"><li>• Proposer des choix</li><li>• Recueillir les avis et préférences</li><li>• Permettre à la personne de s'auto-évaluer et de s'auto-renseigner à travers des questions guidantes</li><li>• Communiquer de manière informationnelle plutôt que contrôlante</li><li>• Apporter des explications et des raisons aux contraintes et décisions</li><li>• Repérer ce qui motive la personne et a du sens pour elle et lui permettre de s'en rapprocher</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Imposer systématiquement</li><li>• Ignorer ce que la personne préfère</li><li>• Contrôler ce que la personne fait et être en posture de savoir à sa place en ignorant son expertise</li><li>• Communiquer pour contrôler avec directivité et culpabilité</li><li>• Ne jamais expliquer les décisions</li></ul>

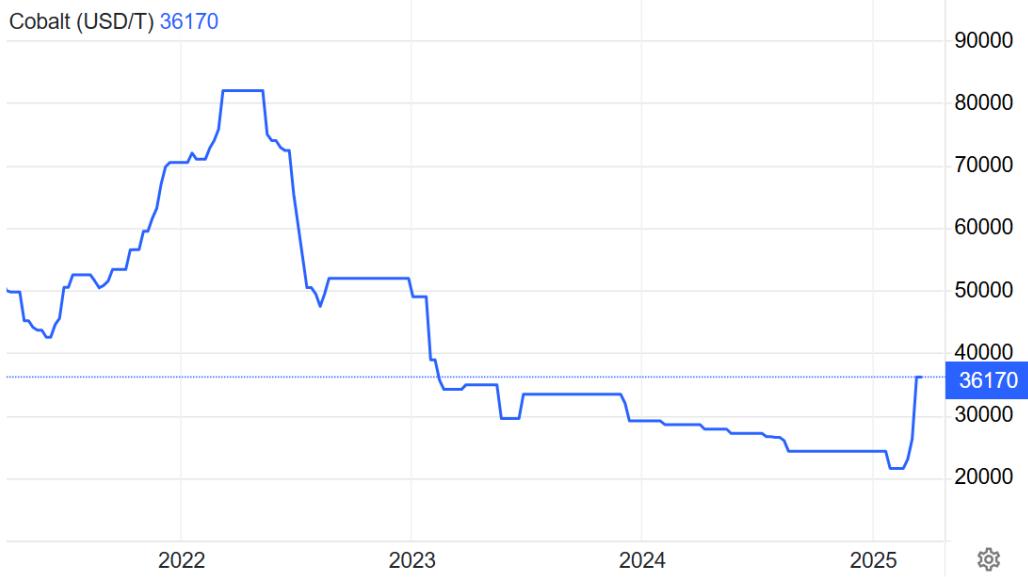
Tableau 12 - Facteur facilitateur ou menaçant l'autonomie (Farnier, 2020 :2)

#### - Figure 1

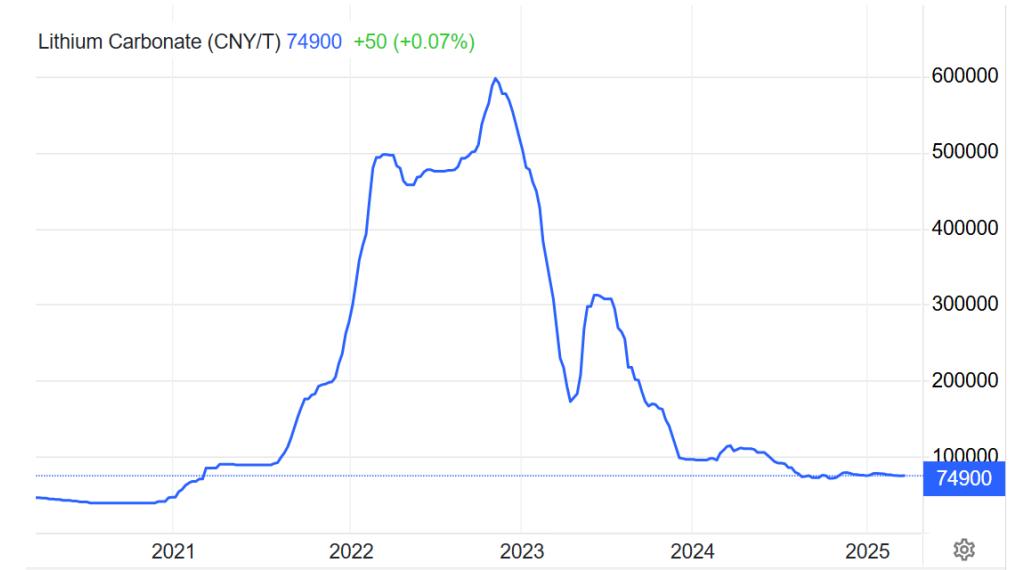


Figure 20 - Courbe de prix du Nickel (Nickel - Price - Chart - Historical Data - News, s. d.:1)

- **Figure 2**



- **Figure 3**



## 8.2. Annexe 2 : Guide d'entretien

### 8.2.1. Quantitatif

#### 8.2.1.1. Questionnaire en français

##### **Transition vers les véhicules électriques : Enjeux et Risques liés à la Chaîne logistique**

Ce questionnaire a pour objectif de recueillir vos opinions et perceptions sur divers aspects liés à la **transition vers les véhicules électriques (VE)**. Nous abordons les risques et enjeux associés à cette transition, notamment ceux liés à la chaîne logistique, ainsi que leurs impacts environnementaux, économiques et sociaux.

Vos réponses permettront d'éclairer les défis et les opportunités liés à cette transition, en identifiant les obstacles potentiels et en mettant en lumière les aspects critiques comme la gestion des déchets et le recyclage des batteries.

Vos réponses contribueront directement à la réussite de mon mémoire, et je vous en suis reconnaissant pour le temps et l'attention que vous y consacrerez.

**\* Indique une question obligatoire**

##### **Quel est votre genre ?\***

- Homme
- Femme
- Non binaire
- Je ne souhaite pas le préciser

##### **Dans quelle tranche d'âge vous situez-vous ?\***

- Moins de 18 ans
- 18-24 ans
- 25-34 ans
- 35-44 ans
- 45-54 ans
- 55 ans et plus

##### **Quel est le plus haut niveau de diplôme que vous avez obtenu ?\***

- Certificat d'enseignement secondaire inférieur (CE1D ou équivalent) ou inférieur
- Certificat d'enseignement secondaire supérieur (CESS ou équivalent)
- Bachelier (Licence ou équivalent)
- Master
- Doctorat

##### **Possédez-vous un permis de conduire ?\***

- Oui
- Non

##### **Possédez-vous un véhicule ?\***

- Oui
- Non

## 2. Environnement

**Dans quelle mesure pensez-vous que la production des batteries des véhicules électriques affecte l'environnement ?\***

- Pas du tout
- Un peu
- Modérément
- Beaucoup
- Énormément
- Je ne sais pas

**Êtes-vous d'accord pour dire que l'utilisation des véhicules électriques réduit l'empreinte carbone par rapport aux véhicules thermiques ?\***

- Pas du tout d'accord
- Plutôt pas d'accord
- Neutre
- Plutôt d'accord
- Tout à fait d'accord

**Que pensez-vous de l'impact des méthodes d'extraction du lithium, du cobalt et du nickel sur les écosystèmes locaux ?\***

- Aucun impact
- Faible impact
- Impact modéré
- Impact important
- Impact catastrophique
- Je ne sais pas

**Dans quelle mesure cet aspect environnemental, qu'il soit positif ou négatif, intervient-il dans votre prise de décision ?\***

- Pas du tout
- Un peu
- Modérément
- Beaucoup
- Totalement

## 3. Économie

**Selon vous, la transition vers les véhicules électriques est-elle financièrement bénéfique pour les consommateurs ?\***

- Pas du tout bénéfique
- Plutôt pas bénéfique
- Neutre
- Plutôt bénéfique
- Très bénéfique
- Je ne sais pas

**Pensez-vous que la transition vers les véhicules électriques représente un avantage financier pour les constructeurs automobiles ?\***

- Pas du tout bénéfique
- Plutôt pas bénéfique

- Neutre
- Plutôt bénéfique
- Très bénéfique
- Je ne sais pas

**Pensez-vous que les coûts des batteries des véhicules électriques sont un obstacle à leur adoption généralisée ?\***

- Pas du tout
- Un peu
- Modérément
- Beaucoup
- Complètement
- Je ne sais pas

**Selon vous, la production de batteries électriques profite-t-elle économiquement aux populations locales des pays producteurs de matériaux critiques ?\***

- Pas du tout
- Peu
- Modérément
- Beaucoup
- Énormément
- Je ne sais pas

**Possédez-vous une voiture électrique ? (en cas de voiture hybride la réponse appropriée est "non")\***

- Oui
- Non

**Si oui, s'agit-il d'un véhicule personnel ou d'une voiture de société ?**

- Véhicule personnel
- Voiture de société

**Parmi les lieux suivants, lequel utilisez-vous le plus fréquemment pour recharger votre véhicule ?**

- À domicile
- Sur le lieu de travail
- Sur des bornes publiques
- Autre

**Si vous rechargez principalement à domicile, qui a installé et financé votre borne de recharge ?**

- Moi-même / mon ménage
- Mon employeur
- Autre

**Combien de bornes de recharge y a-t-il sur votre lieu de travail ?**

- Aucune
- 1 à 5
- 6 à 10
- Plus de 10

#### 4. Social

**Quels effets sociaux percevez-vous dans les pays producteurs de matériaux critiques comme le cobalt (République démocratique du Congo) et le lithium (Chili)?\***

- Aucun effet
- Effet mineur
- Effet modéré
- Effet important
- Effet catastrophique
- Je ne sais pas

**En quoi l'absence de bruit dans les véhicules électriques est-elle un avantage ou un inconvénient pour les utilisateurs ?\***

- Inconvénient majeur
- Inconvénient mineur
- Ni avantage ni inconvénient
- Avantage mineur
- Avantage majeur

**Comment évalueriez-vous les implications sociales négatives causées par la transition vers les véhicules électriques dans les pays en développement ?\***

- Aucune implication
- Des implications mineures
- Des implications modérées
- Des implications significatives
- Des implications majeures
- Je ne sais pas

**Si vous avez acheté ou envisagez d'acheter un véhicule électrique, dans quelle mesure tenez-vous compte des impacts sociaux et environnementaux liés à la production et à l'utilisation des batteries électriques ?\***

- Pas du tout
- Un peu
- Modérément
- Beaucoup
- Totalement
- Je ne compte pas acheter de véhicule électrique

**Si vous ne comptez pas acheter de véhicule électrique, Pourquoi ?**

(Question ouverte)

#### 5. Gestion des déchets et du recyclage

**À votre avis, la filière de recyclage des batteries est-elle assez développée pour gérer la transition vers les véhicules électriques à grande échelle ?\***

- Pas du tout développée
- Peu développée
- Moyennement développée
- Bien développée
- Très bien développée
- Je ne sais pas

**Comment évalueriez-vous les conséquences négatives environnementales et sociales liées au recyclage des batteries en fin de vie ?\***

- Aucune conséquence
- Conséquences mineures
- Conséquences modérées
- Conséquences majeures
- Conséquences très importantes
- Je ne sais pas

**Savez-vous ce qu'il advient des véhicules électriques après leur utilisation (recyclage, exportation, décharge, etc.) ?\***

- Oui
- Non

**Si vous avez répondu "Oui", est-ce que cela influence votre décision d'achat ?**

- Oui, cela a un impact important
- Oui, cela a un impact mineur
- Non, cela n'a pas d'impact

#### 8.2.1.2. Questionnaire en anglais

##### Transition to Electric Vehicles: Challenges and Risks Related to the Supply Chain

This questionnaire aims to gather your opinions and perceptions on various aspects related to the transition to **electric vehicles (EVs)**. We address the risks and challenges associated with this transition, particularly those related to the supply chain, as well as their environmental, economic, and social impacts.

Your responses will help shed light on the challenges and opportunities of this transition by identifying potential obstacles and highlighting critical aspects such as waste management and battery recycling. Your answers will directly contribute to the success of my thesis, and I sincerely thank you for your time and attention.

\* Indicates a required question

#### 1. General Information

**What is your gender? \***

- Male
- Female
- non-binary
- Prefer not to answer

**What is your age group? \***

- Under 18
- 18–24 years
- 25–34 years
- 35–44 years
- 45–54 years
- 55 years and above

**What is the highest level of education you have completed? \***

- Lower secondary school certificate or below
- Upper secondary school certificate
- Bachelor's degree (or equivalent)
- Master's degree
- Doctorate

**Do you have a driver's license? \***

- Yes
- No

**Do you own a vehicle? \***

- Yes
- No

#### 2. Environment

**To what extent do you think the production of electric vehicle batteries affects the environment? \***

- No impact
- Low impact
- Moderate impact
- Significant impact

- Catastrophic impact
- I don't know

**Do you agree that using electric vehicles reduces the carbon footprint compared to traditional vehicles? \***

- Strongly disagree
- Disagree
- Neutral
- Agree
- Strongly agree

**What do you think about the impact of lithium, cobalt, and nickel extraction methods on local ecosystems? \***

- No impact
- Low impact
- Moderate impact
- Significant impact
- Catastrophic impact
- I don't know

**To what extent does this environmental factor, whether positive or negative, influence your decision-making? \***

- Not at all
- A little
- Moderately
- A lot
- Entirely

### **3. Economy**

**Do you think the transition to electric vehicles is financially beneficial for consumers? \***

- Not beneficial at all
- Slightly not beneficial
- Neutral
- Slightly beneficial
- Very beneficial
- I don't know

**Do you think the transition to electric vehicles is financially advantageous for automobile manufacturers? \***

- Not beneficial at all
- Slightly not beneficial
- Neutral
- Slightly beneficial
- Very beneficial
- I don't know

**Do you think battery costs for electric vehicles are a barrier to widespread adoption? \***

- Not at all
- A little
- Moderately
- A lot

- Completely
- I don't know

**Do you think the production of electric batteries economically benefits the local populations of critical material-producing countries? \***

- Not at all
- Slightly
- Moderately
- A lot
- Enormously
- I don't know

**Do you own an electric vehicle? (If you own a hybrid, the appropriate answer is "No") \***

- Yes
- No

**If yes, is it a personal or company car?**

- Personal car
- Company car

**Where do you most frequently charge your vehicle?**

- At home
- At work
- At public charging stations
- Other

**If you primarily charge at home, who installed and financed your charging station?**

- Myself / My household
- My employer
- Other

**How many charging stations are available at your workplace?**

- None
- 1 to 5
- 6 to 10
- More than 10

#### 4. Society

**What social effects do you perceive in critical material-producing countries such as Democratic republic of Congo (cobalt) and Chile (lithium)?\***

- No effect
- Minor effect
- Moderate effect
- Significant effect
- Catastrophic effect
- I don't know

**How would you rate the absence of noise in electric vehicles as an advantage or disadvantage for users? \***

- Major disadvantage
- Minor disadvantage

- Neither an advantage nor disadvantage
- Minor advantage
- Major advantage

**How would you evaluate the negative social implications caused by the transition to electric vehicles in developing countries?\***

- No implications
- Minor implications
- Moderate implications
- Significant implications
- Major implications
- I don't know

**If you have purchased or are considering purchasing an electric vehicle, to what extent do you consider the social and environmental impacts related to battery production and use?\***

- Not at all
- A little
- Moderately
- A lot
- Entirely
- I don't plan to purchase an EV

**If you do not plan to buy an electric vehicle, why not?**

(Open-ended question)

## 5. Waste Management and Recycling

**In your opinion, is the battery recycling sector sufficiently developed to manage the large-scale transition to electric vehicles? \***

- Not developed at all
- slightly developed
- Moderately developed
- Well developed
- Very well developed
- I don't know

**How would you evaluate the negative environmental and social consequences of end-of-life battery recycling? \***

- No consequences
- Minor consequences
- Moderate consequences
- Major consequences
- Very significant consequences
- I don't know

**Do you know what happens to electric vehicles after their use (recycling, export, landfill, etc.)? \***

- Yes
- No

**If you answered "Yes", does that influence your purchasing decision?**

- Yes, it has a significant impact

- Yes, it has a minor impact
- No, it has no impact

#### 8.2.1.3. Questionnaire en néerlandais

### Overgang naar elektrische voertuigen: uitdagingen en risico's met betrekking tot de toeleveringsketen

Deze vragenlijst heeft als doel uw mening en percepties te verzamelen over verschillende aspecten met betrekking tot de **overgang naar elektrische voertuigen (EV's)**. We bespreken de risico's en uitdagingen die gepaard gaan met deze overgang, met name die met betrekking tot de toeleveringsketen, evenals de milieutechnische, economische en sociale impact.

Uw antwoorden zullen helpen om inzicht te geven in de uitdagingen en kansen van deze overgang, door mogelijke obstakels te identificeren en kritieke aspecten zoals afvalbeheer en recycling van batterijen te belichten.

aandacht.

\* Verplichte vraag

#### Wat is uw geslacht? \*

- Man
- Vrouw
- Niet-binair
- Verkies niet te antwoorden

#### Tot welke leeftijdscategorie behoort u? \*

- Jonger dan 18 jaar
- 18–24 jaar
- 25–34 jaar
- 35–44 jaar
- 45–54 jaar
- 55 jaar of ouder

#### Wat is het hoogste diploma dat u heeft behaald? \*

- Lager secundair onderwijs (of lager)
- Hoger secundair onderwijs (of gelijkwaardig)
- Bachelor (of gelijkwaardig)
- Master
- Doctoraat

#### Heeft u een rijbewijs? \*

- Ja
- Nee

#### Bezit u een voertuig? \*

- Ja
- Nee

### 2. Milieu

#### In welke mate denkt u dat de productie van batterijen voor elektrische voertuigen het milieu beïnvloedt? \*

- Helemaal niet
- Een beetje

- Matig
- Veel
- Enorm
- Ik weet het niet

**Bent u het ermee eens dat het gebruik van elektrische voertuigen de ecologische voetafdruk vermindert in vergelijking met traditionele voertuigen? \***

- Helemaal niet mee eens
- Niet mee eens
- Neutraal
- Mee eens
- Helemaal mee eens

**Wat denkt u van de impact van lithium-, kobalt- en nikkelwinning op lokale ecosystemen? \***

- Geen impact
- Lage impact
- Matige impact
- Grote impact
- Catastrofale impact
- Ik weet het niet

**In welke mate beïnvloedt deze milieufactor, positief of negatief, uw beslissingen? \***

- Helemaal niet
- Een beetje
- Matig
- Veel
- Volledig

### 3. Economie

**Denkt u dat de overgang naar elektrische voertuigen financieel voordeelig is voor consumenten? \***

- Helemaal niet voordeelig
- Niet erg voordeelig
- Neutraal
- Enigszins voordeelig
- Zeer voordeelig
- Ik weet het niet

**Denkt u dat de overgang naar elektrische voertuigen financieel voordeelig is voor autofabrikanten? \***

- Helemaal niet voordeelig
- Niet erg voordeelig
- Neutraal
- Enigszins voordeelig
- Zeer voordeelig
- Ik weet het niet

**Denkt u dat de kosten van batterijen voor elektrische voertuigen een obstakel vormen voor algemene adoptie? \***

- Helemaal niet
- Een beetje
- Matig
- Veel

- Volledig
- Ik weet het niet

**Denkt u dat de productie van batterijen economische voordelen oplevert voor de lokale bevolking in landen die kritieke materialen produceren? \***

- Helemaal niet
- Weinig
- Matig
- Veel
- Enorm
- Ik weet het niet

**Bezit u een elektrisch voertuig? (Indien u een hybride bezit, gelieve "Nee" te antwoorden) \***

- Ja
- Nee

**Zo ja, is het een persoonlijk voertuig of een bedrijfswagen?**

- Persoonlijk voertuig
- Bedrijfswagen

**Waar laadt u uw voertuig het vaakst op?**

- Thuis
- Op het werk
- Bij openbare laadstations
- Anders

**Als u voornamelijk thuis oplaadt, wie heeft uw laadstation geïnstalleerd en gefinancierd?**

- Ikzelf / Mijn huishouden
- Mijn werkgever
- Anders

**Hoeveel laadstations zijn er op uw werkplek?**

- Geen
- 1 tot 5
- 6 tot 10
- Meer dan 10

#### **4. Maatschappij**

**Welke sociale effecten ziet u in landen die kritieke materialen produceren, zoals kobalt (Democratische Republiek Congo) en lithium (Chili)? \***

- Geen effect
- Klein effect
- Matig effect
- Groot effect
- Catastrofaal effect
- Ik weet het niet

**Hoe beoordeelt u het gebrek aan geluid in elektrische voertuigen als een voordeel of nadeel voor gebruikers? \***

- Groot nadeel
- Klein nadeel
- Geen voordeel of nadeel

- Klein voordeel
- Groot voordeel

**Hoe zou u de negatieve sociale implicaties van de overgang naar elektrische voertuigen in ontwikkelingslanden beoordelen? \***

- Geen implicaties
- Kleine implicaties
- Matige implicaties
- Significante implicaties
- Grote implicaties
- Ik weet het niet

**Als u een elektrisch voertuig heeft gekocht of overweegt er een te kopen, in hoeverre houdt u rekening met de sociale en milieueffecten van batterijproductie en -gebruik? \***

- Helemaal niet
- Een beetje
- Matig
- Veel
- Volledig
- Ik ben niet van plan een EV te kopen

**Als u niet van plan bent een elektrisch voertuig te kopen, waarom niet?**

(Open vraag)

## 5. Afvalbeheer en Recycling

**Denkt u dat de recyclingssector voor batterijen voldoende ontwikkeld is om de grootschalige overgang naar elektrische voertuigen aan te kunnen? \***

- Helemaal niet ontwikkeld
- Weinig ontwikkeld
- Matig ontwikkeld
- Goed ontwikkeld
- Zeer goed ontwikkeld
- Ik weet het niet

**Hoe zou u de negatieve milieu- en sociale gevolgen van batterijrecycling aan het einde van hun levensduur beoordelen? \***

- Geen gevolgen
- Kleine gevolgen
- Matige gevolgen
- Grote gevolgen
- Zeer significante gevolgen
- Ik weet het niet

**Weet u wat er gebeurt met elektrische voertuigen na gebruik (recycling, export, stortplaats, etc.)? \***

- Ja
- Nee

**Als u "Ja" heeft geantwoord, beïnvloedt dit uw aankoopbeslissing?**

- Ja, het heeft een grote impact
- Ja, het heeft een kleine impact
- Nee, het heeft geen impact

## 8.2.2. Qualitatif

### 8.2.2.1. Interview Umicore

#### **Introduction**

1. Thank you for your time. Could you introduce yourself and explain your role at Umicore?

2. What is Umicore's main mission in the context of the energy transition and sustainable development?

#### **Electric Battery Recycling: Current State**

3. How would you describe the current state of the electric battery recycling industry?

4. In your opinion, what are the main technical and economic obstacles currently limiting battery recycling?

5. Are there significant differences between battery types in terms of recyclability (e.g., lithium-ion, nickel-metal hydride)?

#### **Processes and Technological Innovations**

6. Could you briefly explain how Umicore recycles electric batteries today?

7. What technological innovations are underway to make battery recycling more efficient and cost-effective?

8. How do you manage critical materials such as lithium, cobalt, or nickel to minimize their environmental impact during recycling?

#### **Environmental Challenges and Sustainability**

9. To what extent does battery recycling help reduce the environmental impact of electric vehicles?

10. What are the main expected environmental benefits of recycling compared to extracting new resources?

11. Do you see any environmental limitations or risks related to recycling, such as energy consumption or waste generation?

#### **Future Outlook**

12. Do you think electric battery recycling will become economically viable on a large scale in the coming years?

13. What are Umicore's medium- and long-term goals regarding battery recycling?

14. Do you see potential collaborations with battery or vehicle manufacturers to optimize the recycling value chain?

15. How do you assess the role of European regulations in supporting the development of battery recycling?

#### **Conclusion and Global Vision**

16. What role do you see for battery recycling in the overall support of the energy transition?

17. If you had a message to convey to consumers or policymakers to support this transition, what would it be?

#### 8.2.2.2. Interview Engie

##### **Introduction**

1. Pouvez-vous brièvement vous présenter et expliquer votre rôle chez Engie ?
2. Expliquer ce qu'est Engie ?

##### **Production actuelle d'électricité en Belgique**

3. Comment l'électricité est-elle principalement produite en Belgique aujourd'hui ?
4. Quel rôle joue Engie dans la production d'électricité nationale ?
5. Quelles sont, selon vous, les principales limites environnementales des méthodes actuelles de production d'électricité en Belgique ?

##### **Transition énergétique et enjeux environnementaux**

6. L'abandon progressif de l'énergie nucléaire est un sujet majeur en Belgique. Quels défis cela pose-t-il pour Engie ?
7. Quelles solutions Engie met-il en œuvre pour compenser la fermeture des centrales nucléaires ?
8. Quels impacts environnementaux ces nouvelles solutions pourraient-elles avoir, positifs et négatifs ?

##### **Nouvelle production et compatibilité avec les véhicules électriques**

9. Pensez-vous que la production d'électricité en Belgique est ou sera suffisante pour soutenir la montée en puissance des véhicules électriques ?
10. Quelles adaptations sont nécessaires pour équilibrer l'offre et la demande d'électricité avec l'augmentation des véhicules électriques ?
11. Quels types d'énergies renouvelables priorisez-vous pour répondre à ces besoins supplémentaires (éolien, solaire, hydraulique, etc.) ?
12. Comment Engie intègre-t-il des technologies durables et innovantes dans ses projets pour minimiser les impacts environnementaux ?

##### **Impact sur la vie quotidienne des habitants**

13. Comment voyez-vous la coexistence entre la montée des véhicules électriques et la vie quotidienne des citoyens belges ?
14. Quelles initiatives ou partenariats Engie mène-t-il pour sensibiliser les citoyens à cette transition énergétique ?
15. Voyez-vous des risques potentiels liés à une dépendance accrue à l'électricité pour les transports ? Si oui, comment les adresser ?

### 8.2.2.3. Interview PWC

#### **Introduction**

1. To begin, could you briefly introduce yourself, your role at PwC, and the types of projects or missions you are involved in within the automotive sector?
2. From your perspective, what is currently the biggest challenge facing the automotive industry in the transition to electric vehicles, specifically from a supply chain standpoint?

#### **Supply Chain Risks & Challenges**

3. Do you believe Europe and Belgium currently has sufficient energy supply to support a large-scale adoption of electric vehicles?
4. What are the main vulnerabilities identified in the electric vehicle supply chain – particularly concerning critical raw materials such as lithium, nickel, or cobalt?
5. From what you hear on the ground, what concerns are being raised by manufacturers or suppliers regarding the conditions under which these raw materials are extracted?
6. Charging infrastructure is evolving rapidly. However, do you think the deployment of charging stations remains a bottleneck today?

#### **Recycling & Circular Economy**

7. Battery recycling is often cited as a key lever for making the supply chain more sustainable. What is your view on the current state of recycling in the electric vehicle industry?
8. Is PwC currently supporting any projects or innovations in this area (e.g., second-life batteries, partnerships with recycling firms, etc.)?

#### **Comparing ICE vs. EV Supply Chains**

9. From your experience, what are the key differences between internal combustion engine (ICE) and electric vehicle (EV) supply chains in terms of risks, flexibility, or sourcing strategies?

#### **Link to Social Acceptability (UTAUT2, SDT, Reactance Theory)**

10. From a behavioral standpoint, do you think the facilitating conditions (infrastructure, information, accessibility) are sufficient to support electric vehicle adoption today?
11. Have you observed signs of psychological reactance among consumers? For instance, rejecting EVs as a form of political or economic imposition?
12. In your opinion, how can the automotive sector improve informative communication over controlling communication, to support a more autonomous and willing adoption of EVs (in reference to Self-Determination Theory)?

#### **Personal Opinion**

13. As an expert in this field, are you personally convinced that the electric transition is the right long-term solution? Or do you believe other complementary alternatives should also be explored (such as hydrogen, biofuels, etc.)?

## EXECUTIVE SUMMARY

Following the European Union legislation stating that it will no longer be possible to sell new internal combustion engine vehicles from 2030–2035, and that no CO<sub>2</sub> emitting vehicles should be in circulation by 2050, it is essential to analyze the sustainability of the electric vehicle life cycle. This analysis is divided into five stages: the production of raw materials, vehicle purchase, electricity supply, infrastructure needed for the transition, and the second life or recycling of vehicles.

This current topic concerns all citizens of the world, as this transition has global impacts. The extraction of raw materials mainly takes place in Asia, Africa, and South America. Battery production and refining are predominantly carried out in China, battery second life is developing in Eastern Europe and North Africa, while the primary use of electric vehicles is concentrated in Europe. It is therefore a global issue, which justifies the implementation of a quantitative survey to better understand public opinion and knowledge regarding this transition. The results show that the economic aspect is the main factor influencing the decision to switch or not to an electric vehicle.

In addition to this accessible survey, interviews were conducted with industry experts, including in the fields of electricity and recycling in Belgium, as well as with a global expert on the topic, in order to gain a comprehensive perspective.

The analyses carried out and the interviews conducted lead us to the conclusion that this transition is not sustainable at any of the five stages of the life cycle. At no point are the three pillars of sustainability, environmental, social, and economic simultaneously respected in any of these stages.

**KEYWORDS:** Supply chain – Electric vehicles – Internal combustion engine vehicles – Electrification – Life cycle – Battery – Producer – Economic aspect – Environmental aspect – Social aspect – Sustainable

**WORD COUNT: 27,806**



---

*Ecole de Gestion de l'Université de Liège*