

L'avènement de la voiture électrique, quels impacts sur le marché des matières premières ?

Travail de Bachelor réalisé en vue de l'obtention du Bachelor HES

par :

Léo MILLET

Conseiller au travail de Bachelor :

Frédéric SONNEY, Professeur titulaire

Genève 16/07/2021

Haute École de Gestion de Genève (HEG-GE)

Filière Economie d'Entreprise

Déclaration

Ce travail de Bachelor est réalisé dans le cadre de l'examen final de la Haute école de gestion de Genève, en vue de l'obtention du titre de Bachelor of Science en économie d'entreprise.

L'étudiant a envoyé ce document par email à l'adresse d'analyse remise par son conseiller au travail de Bachelor pour analyse par le logiciel de détection de plagiat URKUND.
<http://www.orkund.com/fr/student/392-orkund-faq>

L'étudiant atteste avoir réalisé seul-e le présent travail, sans avoir utilisé des sources autres que celles citées dans la bibliographie

L'étudiant accepte, le cas échéant, la clause de confidentialité. L'utilisation des conclusions et recommandations formulées dans le travail de Bachelor, sans préjuger de leur valeur, n'engage ni la responsabilité de l'auteur, ni celle du conseiller au travail de Bachelor, du juré et de la HEG.

Remerciements

Je tiens à remercier mon conseiller au travail de Bachelor Frédéric SONNEY, pour m'avoir guidé dans ce travail.

J'aimerais également remercier Sylvie MILLET, pour avoir pris de son temps et m'avoir aidé pour la relecture de ce travail.

Enfin je voulais remercier tout le corps enseignant de l'HEG pour m'avoir permis d'acquérir connaissances et soif de savoir.

Résumé

Depuis maintenant plusieurs années, les véhicules électriques sont de plus en plus répandus. Aujourd'hui il n'existe pas un pays, pas un constructeur automobile qui ne fasse pas la promotion de la voiture électrique comme le moyen de transport du futur. On vante avant tout le fait que ce véhicule ne rejette aucune particule fine dans l'atmosphère lors de son utilisation. Par conséquent nous assistons à une demande grandissante vis-à-vis de ce moyen de transport, qui pour beaucoup est une solution pour limiter son empreinte carbone.

D'autres facteurs viennent également accentuer cette ascension fulgurante tel qu'un design plus travaillé, une meilleure autonomie et un coût à l'achat moins onéreux qu'auparavant. En effet, le processus de fabrication des batteries est une étape clé et souvent très coûteuse. Cette étape est de mieux en mieux maîtrisée, ce qui permet aux constructeurs de réduire leurs coûts de revient et de répercuter cette économie en abaissant le prix de vente. Cette baisse du prix de vente les rend par conséquent plus compétitifs par rapport aux véhicules thermiques. A ceci il faut ajouter les divers avantages accordés par certains gouvernements pour soutenir l'achat des véhicules électriques par le biais de subventions, d'exonérations fiscales et grâce à de nouvelles législations.

Cela dit, passer d'une voiture thermique à une voiture électrique a un coût. Ce qui différencie un véhicule à combustion classique d'un véhicule électrique, provient principalement de sa source d'énergie. L'élément clé est donc la batterie, qui permet d'emmagasiner et garder cette énergie. Ce n'est pas tout, la partie moteur étant également totalement différente d'un véhicule thermique, certains composants doivent être redesignés.

Ce travail aura tout d'abord pour but d'identifier, les principales matières premières nécessaires à la production de batteries et les autres éléments jouant un rôle crucial dans l'avenir de la voiture électrique. Nous établirons la liste des principaux acteurs de la chaîne d'approvisionnement de l'extraction minière au raffinage que nous passerons en revue. Ainsi que les acteurs, se trouvant derrière, l'assemblage des batteries, jusqu'à la commercialisation des véhicules électriques. Cette première étape nous permettra par la suite d'identifier quels sont les besoins actuels et quels sont les besoins futurs pour chacune de ces matières premières, et dans quelle mesure le marché subit déjà l'effet d'une demande croissante. La dernière étape de ce travail aura pour but d'identifier si le marché peut répondre dans l'état actuel des choses à la future demande. Est-ce qu'il faut s'attendre à d'éventuelles pénuries de ces matières premières, est-ce que l'approvisionnement parviendra à répondre à cette demande croissante ? Enfin que faut-il envisager pour rendre l'offre durable ?

Table des matières

L'avènement de la voiture électrique, quels impacts sur le marché des matières premières ?	1
Déclaration	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vi
1. Introduction	1
2. Histoire et introduction aux matières premières	3
3. La chaîne d'approvisionnement	6
3.1 Cobalt	7
3.1.1 Ressources et réserves :	7
3.1.2 Production minière :	8
3.1.3 Raffinage :	8
3.1.4 Usage finale :	9
3.1.5 Synthèse :	9
3.2 Lithium	10
3.2.1 Ressources et réserves :	10
3.2.2 Production minière	11
3.2.3 Raffinage	11
3.2.4 Usage final	12
3.2.5 Synthèse :	12
3.3 Graphite	13
3.3.1 Ressources et réserves :	13
3.3.2 Production minière :	13
3.3.3 Usage final :	14
3.3.4 Synthèse :	14
3.4 Manganèse	14
3.4.1 Ressources et réserves :	14
3.4.2 Production minière :	15
3.4.3 Usage final	15
3.4.4 Synthèse :	16

3.5 Cuivre.....	16
3.5.1 Ressources et réserves.....	16
3.5.2 Production minière :	17
3.5.3 Raffineries:.....	18
3.5.4 Usage final	18
3.5.5 Synthèse :	18
4. Qui fabrique les batteries ?.....	20
5. Qui fabrique les voitures ?.....	22
6. Facteurs clés à l'origine de l'adoption des véhicules électriques.....	23
7. Freins à la démocratisation du véhicule électrique	26
8. Projection future :	28
9. L'impact de l'essor des véhicules électriques sur les matières premières les plus critiques de 2010 à 2020.	33
10. L'offre est-elle en capacité de soutenir les besoins futurs.	37
10.1 Cuivre :.....	38
10.2 Lithium :.....	39
10.3 Cobalt.....	41
10.4 Graphite	43
10.5 Manganèse.....	45
11. Le recyclage une nouvelle source d'approvisionnement.....	46
12. Conclusion	48
Bibliographie.....	50
Annexe 1 : Share of top three producing countries in production of selected minerals and fossil fuels, 2019.....	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 2 : Share of top three producing countries in production of selected minerals and fossil fuels, 2019.....	56
Annexe 2 : Share of top three producing countries in production of selected minerals and fossil fuels, 2019.....	57

Liste des tableaux

Tableau 1: Les 10 plus grandes raffineries de cuivre en 2018	18
Tableau 2 : Tableau récapitulatif des principaux acteurs de la chaîne d'approvisionnement des éléments nécessaires à la production de véhicules électriques (2019-2020)	19
Tableau 3 : Quantité de matériaux utilisés en 2019 pour produire des véhicules électriques (2.1 millions de véhicules vendu).....	29
Tableau 4 : Tableau récapitulatif de l'accroissement de la demande des matières premières destinées à la conception des batteries de 2018 à 2030.	32

Liste des figures

Figure 1 : Processus de production de composants, de l'extraction à l'utilisation finale	6
Figure 2 : Pays producteurs de Cobalt en 2020 (140'000 tonnes)	8
Figure 3 : Cobalt raffiné sous forme chimique en 2017	9
Figure 4 : Pays producteurs de lithium en 2020 (82'000 tonnes)	11
Figure 5 : Pays producteurs de graphite naturel en 2020 (1,1 millions de tonnes)	13
Figure 6 : Pays producteurs de manganèse en 2020 (18,5 millions de tonnes)	15
Figure 7 : Pays producteurs de cuivre en 2020 (20 millions de tonnes)	17
Figure 8 : Marché du lithium de 2010 à 2020.....	34
Figure 9 : Marché du Cobalt de 2012 à 2020.....	35
Figure 10 : Prévision de l'évolution de l'offre et de la demande de 2010 à 2030.....	38
Figure 11 : Evolution de l'équilibre du marché du Graphite naturel de 2017 à 2030.	43

1. Introduction

Aujourd'hui, nous distinguons 3 principaux types de véhicules électriques. Chacun d'entre eux utilisent l'électricité comme source principale d'énergie ou simplement comme une source d'énergie complémentaire aux carburants d'origine fossile habituellement utilisés, à savoir l'essence ou le diesel.

Nous avons tout d'abord les véhicules hybrides. Ceux-ci fonctionnent principalement grâce au carburant classique et disposent d'une batterie de petite taille à moyenne. Pour les véhicules dits « hybrides », ils utilisent principalement du carburant. La batterie qui est embarquée est de faible taille et se recharge uniquement lors des phases de freinage. Évidemment, la batterie ayant une très faible capacité, le véhicule ne dispose pas d'une grande autonomie en « full » électrique, à savoir 1 à 2 km. Pour ce qui est de l'autre type de véhicule hybride, cette fois il porte l'appellation « hybride rechargeable ». Ce véhicule dispose d'une batterie plus conséquente, qui nécessite d'être branchée directement sur une prise. Cette batterie assure une autonomie plus importante au véhicule, entre 20 et 60 km, cela dit les carburants d'origines fossiles reste prédominants pour son usage (Louvét 2018). Enfin le dernier type de véhicule est la voiture dite « 100% électrique ». Ces voitures fonctionnent uniquement grâce à leur batterie qui est de taille conséquente et leur assure une autonomie entre 150 et 600km. Si l'on se réfère à la flotte de véhicules en circulation entre 2016 à 2019, en moyenne 37% des véhicules électriques sont hybrides et 63 % sont des véhicules 100% électriques. A noter que sur les dernières années la part des véhicules 100% électriques augmente plus rapidement que ceux hybrides, car en 2016 nous avions 60% de véhicules 100% électriques (810'000 véhicules), contre 67% en 2019 (3.3 millions véhicules) (IEA 2020).

Bien évidemment, chacun des véhicules cités précédemment ne disposant pas des mêmes spécificités techniques, ils ne nécessitent pas le même apport en matières premières. Le poids d'une batterie électrique dans une voiture thermique avoisine les 10 à 30 kg alors que dans une voiture électrique de type Tesla ou bien Zoe de chez Renault. La batterie représente entre 300 et plus de 600 kg selon sa capacité (Perrin 2019). Soit presque $\frac{1}{4}$ du poids total du véhicule. Il est donc évident que la quantité de matières premières nécessaires à la fabrication de véhicules électriques, couplée à la demande grandissante, les besoins actuels et futurs promettent d'être énormes.

À ce jour, le modèle de batterie le plus répandu est le lithium-ion. C'est un modèle que l'on retrouve partout, notamment dans le matériel électronique tels que nos smartphones ou ordinateurs portables. Ce modèle est actuellement le plus utilisé car il présente les meilleures

caractéristiques techniques, que ce soit en termes d'autonomie, de longévité, de capacité, de charge, de rendement et de coût de production.

De manière très synthétique, une batterie est composée de 2 parties, la cathode et l'anode. L'anode est pratiquement toujours fabriquée à partir de graphite, le graphite sera donc un élément que l'on retiendra dans notre étude. Alors que, dans la partie cathode, le lithium est lui aussi un incontournable, il constituera évidemment un des sujets de notre étude. Nous nous intéresserons également à l'usage du cobalt et du manganèse dans la production des batteries, utilisé principalement pour la conception de la cathode. Nous avons choisi de retenir ces 4 éléments car ils seront employés à la production de batteries NMC¹. En 2018 les modèles de batteries NMC représentaient 28% des parts de marché de véhicules électriques vendus par le monde. On prévoit que d'ici à 2027, ces batteries représenteront 63% du marché (Mining.com 2018). Chacun des éléments retenus est susceptible d'être utilisé davantage à l'avenir ou inversement selon les avancées technologiques et les choix faits par les constructeurs.

Comme nous l'avons vu précédemment, la batterie n'est pas le seul élément indispensable au bon fonctionnement d'un véhicule électrique. La partie moteur étant entièrement revisitée, elle va nécessiter une quantité de cuivre jusqu'à 4 fois plus importante que dans les véhicules à combustion classique. Le cuivre fera également l'objet de notre étude.

La première phase de ce travail aura pour but d'identifier quels sont les principaux acteurs de la chaîne d'approvisionnement. Puis nous nous pencherons sur le marché des batteries et des véhicules électriques dans le monde. Dans les faits, la voiture électrique n'est pas une révolution technologique mais nous essayerons d'identifier les principales raisons motivant l'augmentations des ventes. Enfin nous nous attacherons à observer dans quelle mesure les marchés des différents matières premières ont déjà ressenti un quelconque impact et surtout de savoir comment se profile l'avenir. Les marchés vont-ils pouvoir répondre ou pas à cette explosion de la demande.

1 NMC : Lithium Nickel Manganèse Cobalt Graphite

2. Histoire et introduction aux matières premières

Avant d'être associés ces divers composants avaient un usage bien différent de celui qu'on leur prête actuellement.

Le Manganèse était initialement utilisé par les hommes préhistoriques, il y a environ 30.000 ans pour peindre sur les murs des grottes. Certains dessins en témoignent notamment en France dans la région de Lascaux (AZOMATERIALS 2016). C'est au 19^{ème} siècle que l'on commence à réellement l'utiliser dans un cadre industriel. Des scientifiques s'en sont servis pour former un alliage permettant d'accroître la résistance du fer tout en préservant sa malléabilité. Aujourd'hui le Manganèse est utilisé à 90% (Cannon 2014) pour produire de l'acier et aux alentours de 10% pour des composés chimiques et batteries (UNCAD 2020). Cette proportion devrait rapidement évoluer au vu de la demande grandissante de production des batteries.

Le Cobalt fut lui initialement utilisé comme pigment en Egypte, au 16^{ème} siècle avant Jésus-Christ. Autre exemple, en Chine, il permît de donner cette couleur bleutée à la porcelaine (Boland, Kropschot 2011). Ce n'est que dans les années 1700 que l'élément sous forme de métal est isolé pour la première fois par le chimiste suédois G. Brandt. Plus tard les avancées scientifiques vont permettre de connaître toutes les propriétés de ce composant ce qui va rapidement le rendre beaucoup plus attractif. En effet, il faut savoir que le cobalt jouit d'une très grande résistance et ne perd pas en intégrité avant d'atteindre son point de fusion à 1100°C. Il conserve également ses propriétés magnétiques même sous haute température. De plus il est très résistant à la corrosion (Boland, Kropschot 2011). Le cobalt une fois raffiné peut se présenter sous 3 formes, chimique, poudre ou métal.

La forme chimique est celle qui va intervenir dans le processus de production des batteries lithium-ion, aussi appelé sulfate de cobalt (IEA 2021). Une fois mélangé avec du nickel ou du manganèse on obtient la cathode. Le cobalt sert principalement à accroître la longévité des batteries afin qu'elles puissent supporter plusieurs cycles de recharge sans perdre en autonomie. Son rôle devient de ce fait déterminant dans l'essor de la voiture électrique. A noter que sous forme de poudre ou de métal le cobalt sert majoritairement à produire un superalliage que l'on peut retrouver notamment dans l'aviation et la fabrication d'aimants (Farchy, Warren 2018).

Le graphite a été découvert au 16^{ème} siècle en Angleterre. Il était alors utilisé comme pigment pour marquer les moutons. A la fin du 16^{ème} siècle, le graphite est très largement connu en Europe pour être utilisé à des fins d'écriture (UNCTAD 2020) et aujourd'hui plus communément appelé crayon à papier. En 1855 un chimiste anglais Sir Benjamin Brodie prouve que le graphite est composé de Carbone, à la suite de cette découverte plusieurs

ingénieurs et scientifiques de l'époque vont tenter de produire du graphite artificiellement. Cela dit le procédé n'est pas simple car il nécessite de soumettre le Carbone à une très grande pression et à une forte chaleur(2600-3000°C) (Leguérine, Le Gleuher 2020). Ce procédé est très énergivore et plus coûteux que d'extraire le graphite naturel.

Ce qui va déterminer la pureté du graphite provient de sa teneur en Carbone, plus il s'approche des 100% plus son prix sera élevé. En effet, il va nécessiter moins d'efforts pour le purifier/raffiner et disposera également de meilleures propriétés (Robinson et al. 2017). Il se trouve sous 3 différentes formes, amorphe, en paillettes et en veines. La forme amorphe représente 60% du marché avec une teneur en carbone aux alentours de 70-80%. La forme paillette a une teneur entre 85/98% de Carbone. Enfin le graphite en veine lui est d'une très grande qualité avec une valeur entre 90-99% de Carbone, cela dit c'est la forme la plus rare et donc la plus précieuse (UNCTAD 2020). Il est également intéressant de noter que lorsque le graphite naturel est raffiné son taux de Carbone est supérieur à celui du graphite artificiel, il est par conséquent moins coûteux.

Le graphite présente des propriétés bien spécifiques qui le rendent si utile et difficilement remplaçable. Il dispose de capacités propres aux métaux telles que la conductivité thermique et électrique. Ainsi que d'autres propriétés tel qu'une faible inertie, une résistance thermique élevée et un pouvoir lubrifiant (Québec Energie et ressources naturelles 2019). Ces caractéristiques suffisent à expliquer pourquoi il est utilisé dans diverses industries, telles que le nucléaire, la sidérurgie, les micro-conducteurs et évidemment la production d'anodes pour batteries.

Le Lithium a été découvert dans les années 1800 en Suède par un chimiste Brésilien du nom de José Bonifácio. Le lithium est utilisé pour améliorer les propriétés physiques et chimiques des métaux et des alliages. Par exemple, un alliage comprenant du lithium et du magnésium ou de l'aluminium permet de réduire sa densité tout en augmentant sa rigidité. Ce qui est très utile notamment dans l'aérospatiale. Son usage ne se limite pas qu'à cette industrie, on l'emploie également dans l'industrie de la céramique, du verre, de la médecine et bien évidemment pour produire la cathode des batteries(Lefebvre, Tavignot 2020). Le lithium est devenu incontournable dans la transition énergétique, tant et si bien que certains le surnomment l'or blanc (Lovett, Esso 2018).

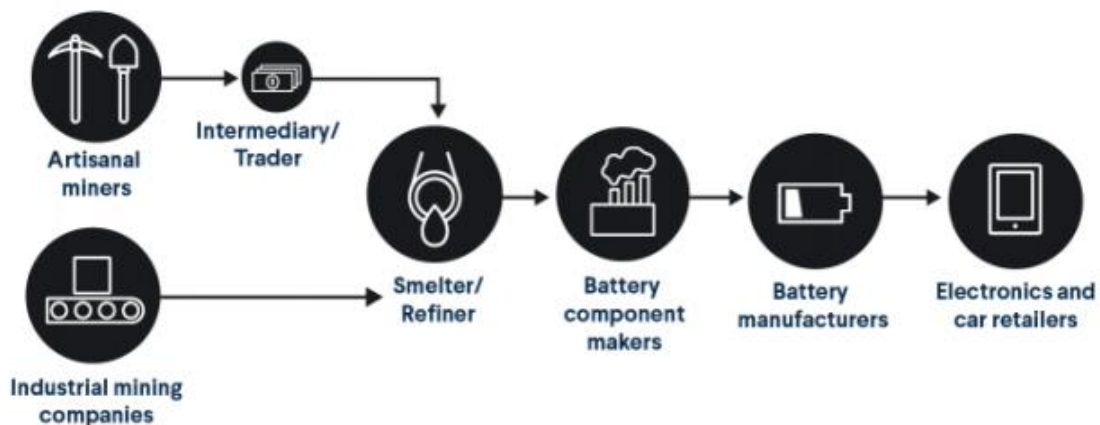
Enfin le cuivre fait partie des premiers métaux utilisés par l'homme. Il est d'ailleurs à l'origine d'une période que l'on nommera l'âge de Bronze de -2200 à -800 avant J-C. Le Bronze étant formé de l'alliage du cuivre et celui de l'étain. A cette période le bronze sert majoritairement à fabriquer des armes, des outils et des parures(Inrap 2016). Il dispose de nombreuses propriétés qui en font un élément presque incontournable à ce jour. Il est très malléable, ductile

et jouit d'une très grande résistance à la corrosion (Futura [sans date]). Aujourd'hui il est majoritairement employé comme matériau conducteur d'électricité, disposant de la plus grande conductivité au monde après celle de l'argent. On le retrouve en grande partie dans le secteur du transport (véhicules électriques), dans les équipements industriels (boîtes de vitesse, pales de moteur d'avion, bateaux). Il est également très présent dans le domaine de la construction de bâtiment et d'infrastructure et dans les appareils électroniques (ICSG 2020).

3. La chaîne d'approvisionnement

A présent, nous allons nous attarder sur l'origine de ces matériaux et leur chaîne d'approvisionnement. Savoir quels sont les principaux acteurs, les régions, pays ou encore entreprises derrière leur production. Nous verrons que leur répartition aux quatre coins du globe est souvent inégale. Certains pays vont avoir un quasi-monopole sur les matériaux sujets de notre réflexion.

Figure 1 : Processus de production de composants, de l'extraction à l'utilisation finale



(Felter 2019)

De manière générale chacune des matières premières citées précédemment repose sur ce schéma (cf. Figure 1), on retrouve donc la partie extraction minière en amont de la chaîne, suivie par l'étape consistant à raffiner/concentrer les matières premières au travers des raffineries et des fonderies. Une fois cette étape réalisée, chacun des éléments est prêt à être utilisé dans le processus de fabrication de batteries et véhicules électriques.

3.1 Cobalt

3.1.1 Ressources et réserves :

Les ressources² en Cobalt de la croûte terrestre sont estimées à environ 25 millions de tonnes en 2020. Quant à la partie que l'on qualifiera de réserve³ elle s'élève à 7.1 millions de tonnes. La majeure partie des réserves identifiées à ce jour se trouve en République Démocratique du Congo (RDC) avec près de 50% de ce volume soit 3.6 millions de tonnes découvertes à ce jour, l'Australie en second avec 17% soit 1.4 million de tonnes et enfin en troisième position nous retrouvons Cuba avec 7% soit 0.5 million de tonnes. Les Philippines, la Russie et le Canada disposent eux aussi de ressources importantes en Cobalt avec environ 220-260 tonnes chacun (USGS 2021a).

Point non négligeable, on estime qu'environ 120 millions de tonnes métriques de Cobalt se retrouvent sur le plancher de l'Océan Atlantique, Pacifique et Indien. Cela dit, la localisation à plus de 6000 mètres de profondeur rend son extraction encore impossible ou du moins trop coûteuse dans les conditions technologiques actuelles (USGS 2021a).

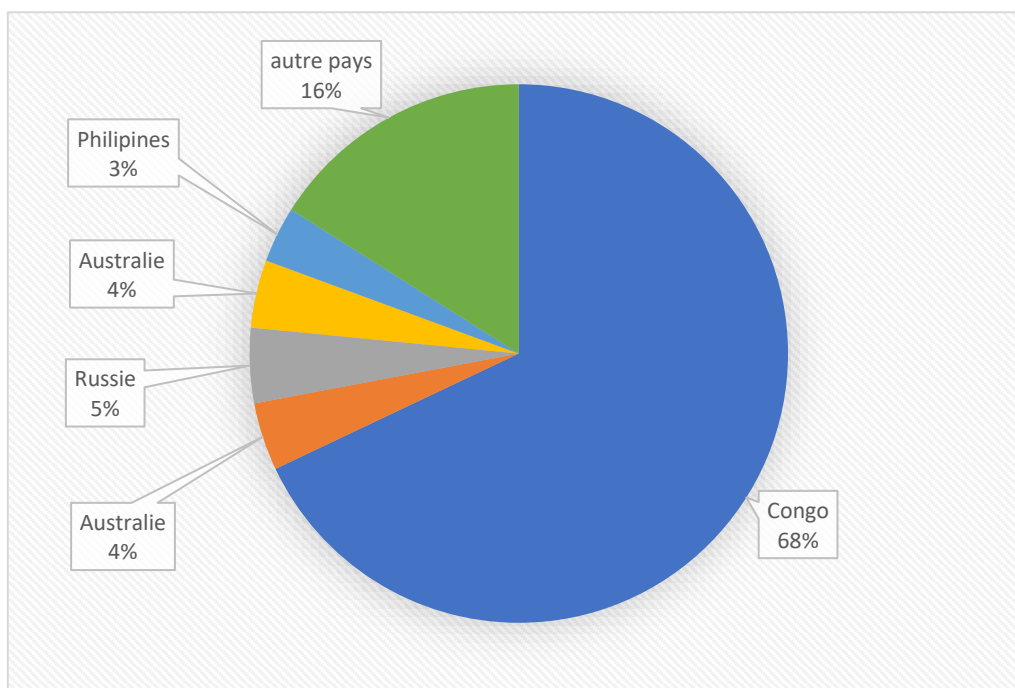
L'une des particularités du Cobalt est qu'il est extrait comme un sous-produit, c'est-à-dire qu'il est souvent produit grâce à l'extraction de minerai de cuivre ou bien de nickel. Son extraction est donc monitorée par la demande du cuivre et de nickel (Desjardins 2017).

2 « Les ressources (minières) rassemblent l'ensemble des gisements connus susceptibles de faire l'objet d'une exploitation au moment où les conditions techniques et économiques le permettraient. Il s'agit d'un périmètre aux caractéristiques essentiellement géologiques » (Geldron 2017)

3 « Les réserves correspondent à la part des ressources qui peut techniquement et surtout économiquement être exploitée, au moment même où elles sont déclarées, en fonction d'un certain nombre de paramètres (volume global du gisement, teneur en métaux recherchés, profondeur, nature géologique, éléments sociaux-environnementaux et prix des matières premières considérées). Ce concept couple données géologiques et données économiques » (Geldron 2017)

3.1.2 Production minière :

Figure 2 : Pays producteurs de Cobalt en 2020 (140'000 tonnes)



*réalisation personnelle

(USGS 2021)

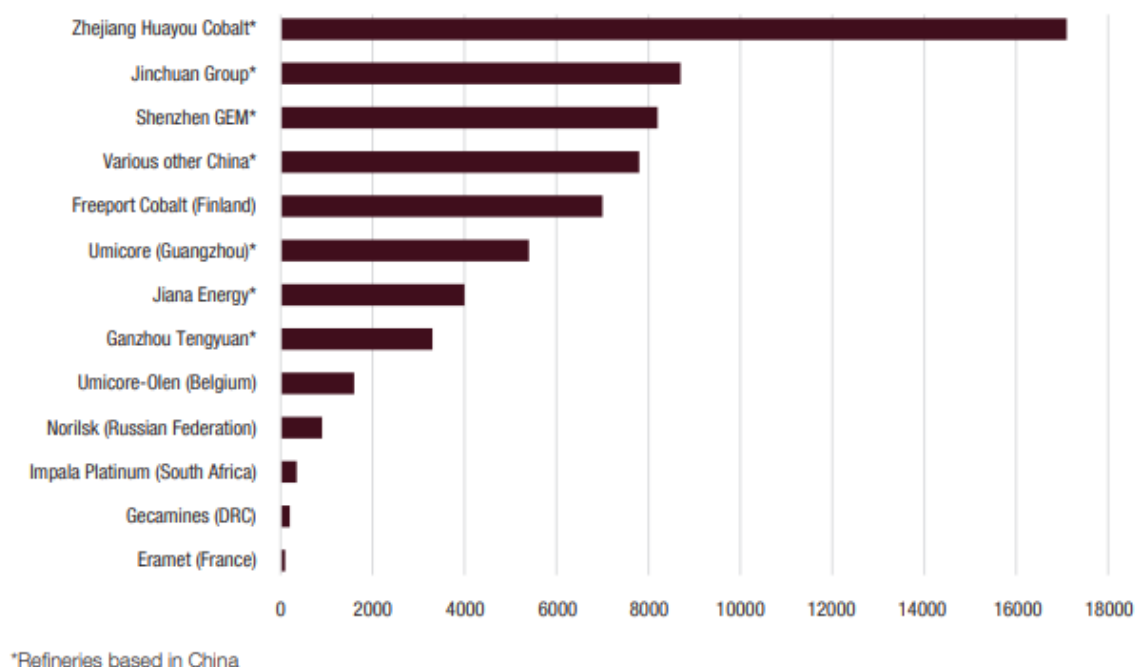
La production minière en 2020 s'élève à 140'000 tonnes. Là encore la République Démocratique du Congo s'avère être loin devant les autres pays. A elle seule, elle est à l'origine de 68% (cf Figure 2) de la production minière mondiale soit 95'000 tonnes en 2020, suivie par la Russie avec 5% (6'300 tonnes), l'Australie 4% (5'700 tonnes) et les Philippines avec 3% (4'700 tonnes)(USGS 2021a). Bien que l'année de référence soit 2020, une année très compliquée due à la Covid-19 l'ordre de grandeur est relativement proche de l'année 2019 avec une baisse de près 3% par rapport à cette année-là. En 2018 sur 148.000 tonnes extraites, Glencore en a extrait 29% (42'200 tonnes), CMOC 13% (18 747 tonnes) et enfin Vale 3.4% (5'093 tonnes)(Statista 2020a).

3.1.3 Raffinage :

Une fois la matière extraite du sol elle est parfois raffinée de manière partielle dans son pays d'origine avant d'être exportée vers d'autres destinations. Le Congo réalisait 87% des exportations de minerai et de concentrés de cobalt en 2019 (202 millions \$) et la Chine occupait 75% des importations (169 millions \$) (OEC.WORD 2020e). En 2019, le plus grand

exportateur de cobalt raffiné était la Chine avec 30% du montant des exportations (202 millions \$), ensuite nous retrouvons la Finlande avec pas loin de 30% (191 millions \$) et enfin la Belgique avec 13% (87.4 millions \$). La Chine disposant des plus grandes raffineries de cobalt sous forme chimique du monde ce n'est pas étonnant de la retrouver en première position (cf. figure 2). Nous savons également que la Chine est le plus gros consommateur de cobalt du monde. Concernant les importations nous retrouvons la Corée du Sud en premier avec 35% du montant des importations (236 millions \$), suivie par la Zambie 10.2% (68.2 millions) et enfin l'Espagne 8.15% (54.4 millions \$)(OEC.WORD 2020a).

Figure 3 : Cobalt raffiné sous forme chimique en 2017



(Bloomberg)

3.1.4 Usage finale :

La production chinoise est permise en majeure partie grâce aux importations de la RDC. Ce qui permet aux chinois de produire 80% du cobalt raffiné mondial (Matthews 2020). Approximativement 50% de la demande de cobalt est guidée par la production de batterie et 18% à produire des supers alliages (Desjardins 2017).

3.1.5 Synthèse :

Le cobalt est un élément essentiel dans la production de batteries. Nous avons identifié 2 principaux acteurs dans sa chaîne d'approvisionnement. Au premier rang on trouve la République Démocratique du Congo, première nation en termes d'extraction minière et d'exportation. Au second rang on trouve, la Chine, pays qui a importé le plus de cobalt en

2019, avec 75% des importations. Cela n'a rien d'étonnant car elle dispose des plus grandes infrastructures pour le traiter et la demande intérieure est énorme. La Chine est le pays produisant la plus grande quantité de cobalt raffiné, sous forme de sulfate. Le fait qu'uniquement 2 pays régissent quasiment la totalité de l'offre de cobalt nécessite de garder cette matière première à l'œil, car elle comporte un risque de volatilité accru. Enfin, l'extraction et le prix du cobalt sont souvent monitorés par l'utilisation d'autres matières premières tels que le cuivre ou le nickel.

3.2 Lithium

3.2.1 Ressources et réserves :

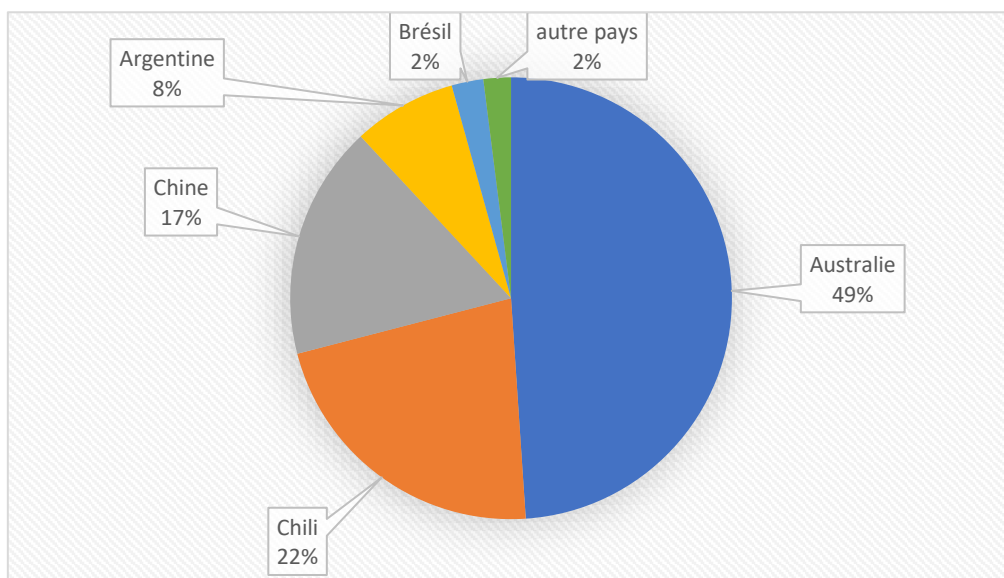
A présent intéressons-nous au cas du Lithium. Les ressources terrestres de Lithium sont quant à elles estimées aux alentours de 86 millions de tonnes à l'échelle mondiale. L'Argentine, le Chili et la Bolivie forment le fameux triangle du Lithium, à eux trois ces pays disposent de presque 60% des ressources mondiales actuellement identifiées (Les Echos 2019). Les réserves sont de 21 millions de tonnes. Le Chili se détache largement des pays cités précédemment avec presque 44% des réserves mondiales actuellement découvertes sous forme de saumure⁴ ou bien de pegmatite⁵ soit plus de 9,2 millions de tonnes. Il est talonné par l'Australie avec 22.4% soit 4.7 millions de tonnes et l'Argentine 9% soit 1.9 millions de tonnes (USGS 2021d). Il semblerait que la Bolivie disposerait également d'un stock très important avec près de 9 millions de tonnes, mais aucune données officielles n'ont encore été communiquées (UNCTAD 2020).

4 Saumure définition : solution aqueuse de sel (Wikipédia)

5 Pegmatite définition : roche magmatique (Wikipédia)

3.2.2 Production minière

Figure 4 : Pays producteurs de lithium en 2020 (82'000 tonnes)



(USGS 2021)

La production minière de Lithium en 2020 s'élève à 82'000 tonnes. Contrairement à l'industrie du Cobalt ce ne sont pas les pays disposant des plus grandes réserves qui produisent le plus. L'Australie domine assez largement le marché avec 49% (cf figure 4) de la production mondiale en 2020 (40.000 tonnes), suivie par le Chili 22% (18.000 tonnes) et enfin la Chine vient compléter ce « podium » avec 17% (14.000 tonnes)(USGS 2021d). Bien que l'année de référence soit 2020, année très compliquée due à la Covid-19 l'ordre de grandeur est relativement proche de l'année 2019 avec une baisse de moins de 5%. Nous retrouvons 5 compagnies minières qui dominent la production, Albemarle une société américaine qui en 2019 était à l'origine de 19% de la production (16 340 tonnes), en second nous retrouvons Sociedad Química y Minera S.A. (SQM) avec 17% des parts (14 620 tonnes) et en 3 -ème et 4 -ème position 2 entreprises chinoises Tianqi, Ganfeng avec respectivement 13% (11 180 tonnes) et 12% (10 320 tonnes). Une entreprise Américaine vient en 5^{ème} position , Livent qui a produit quant à elle 10% en 2019 (8 600 tonnes)(Statista 2019a).

3.2.3 Raffinage

Une fois extrait, le lithium est raffiné dans son pays d'origine ou exporté sous sa forme brute. 4 entreprises dominent le marché du raffinage de lithium, SQM, Talison, Chemetall et FMC(UNCTAD 2020). La partie importation et exportation peut être exprimée de 2 manières. En effet, les échanges de lithium sont principalement effectués sous 2 différentes formes, l'une que l'on qualifie de brut, sous forme de minerai et l'autre que l'on qualifie de concentré de

lithium sous forme de saumure. Pour la partie concentré le Chili est le pays qui en exporte le plus en réalisant presque 58% du volume des ventes en 2019 (880 millions \$), l'Argentine se retrouve en 2^e-ème position avec 15.6% (236 millions \$) et enfin la Chine en 3^{ème} position avec 10.6% (161 millions \$). Sous cette forme les pays qui importent le plus sont la Corée du Sud 27.6% (419 millions \$), le Japon 19.2% (292 millions \$) et la Chine 15.5% (235 millions \$)(OEC.WORD 2020b).

Concernant le lithium sous forme brut, l'Australie réalise 70% des exportations en 2018 (1.1 milliards \$) et la Chine réalise 80% des importations (1.4 milliard \$) (LaRocca 2020). Une fois raffiné, le lithium prend l'appellation de lithium carbonate, on estime que 1kg de lithium pur, permet de fabriquer 5.323Kg de lithium carbonate (Louvet 2018). C'est donc ce dérivé de lithium qui est utilisé dans la production de batteries.

3.2.4 Usage final

L'usage du lithium est décomposé de la manière suivante en 2020. 71% étaient utilisés pour produire des batteries que l'on retrouve dans nos appareils électroniques ainsi que les voitures électriques déjà commercialisées et 14% pour le verre et la céramique(Statista 2021a). Cette tendance devrait se préciser à l'horizon 2022, ou l'on estime que 54% du lithium servira à la conception de batteries rechargeables pour véhicules électriques (Statista 2018).

3.2.5 Synthèse :

Le lithium contrairement au cobalt bénéficie d'une chaîne d'approvisionnement un peu plus diversifiée. Bien que l'on estime que 60% des réserves soient en Amérique latine. Nous distinguons donc 2 acteurs majeurs avec le Chili et l'Argentine comme principaux fournisseurs de lithium, qu'il soit raffiné ou non. Pour ce qui est des pays importateurs, nous retrouvons principalement des pays d'Asie, avec la Chine, la Corée du Sud et le Japon, qui nous le verrons par la suite, sont les principaux producteurs de batteries électriques. Une question se pose : pourquoi l'Australie, qui dispose de moins de réserves que le Chili, en extrait beaucoup plus. Premièrement, c'est surtout au cours des 10 dernières années qu'on a vu une explosion de l'usage des batteries et donc de la nécessité de produire du lithium. Le Chili s'est probablement mis très tard à en produire. Deuxièmement, la composante de prix a sûrement joué un rôle capital. L'Australie étant géographiquement proche des pays importateurs, cela induit des coûts de transport beaucoup plus faibles. Il est alors moins coûteux de se fournir en lithium d'origine australienne que de lithium d'origine chilienne.

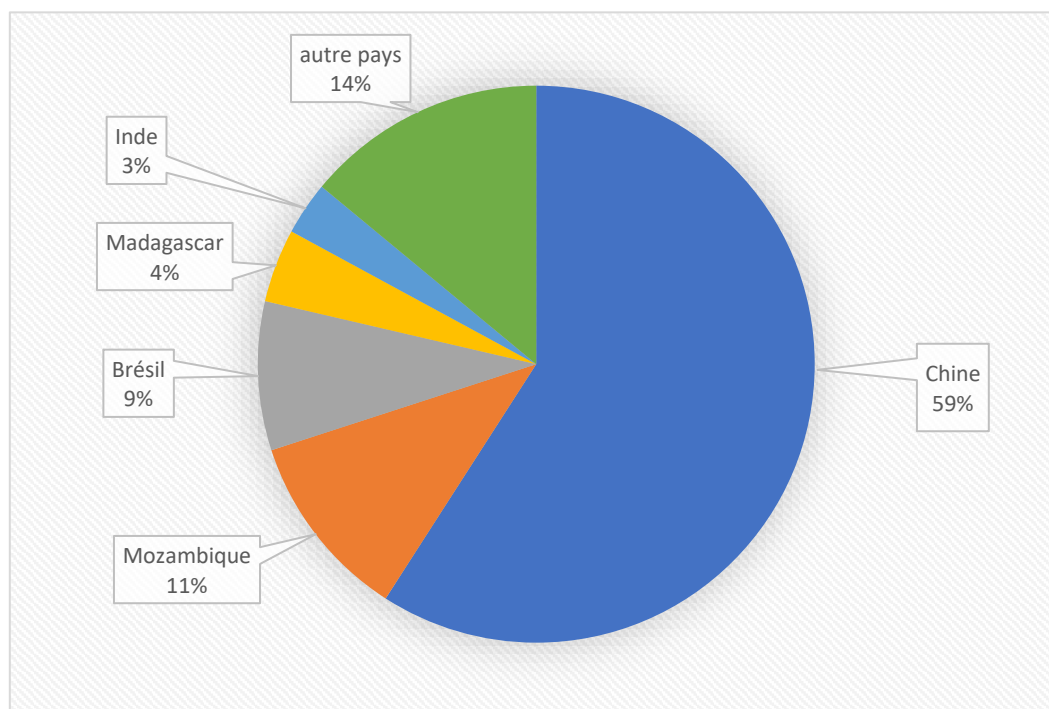
3.3 Graphite

3.3.1 Ressources et réserves :

Le graphite naturel semble quant à lui présent en plus grande quantité que les matières premières citées précédemment. Les ressources terrestres de graphite sont estimées à près de 800 millions de tonnes dont la moitié serait composée de graphite en paillettes disposant donc d'une qualité moyenne à élevée (85%-98% de teneur en carbone). Les réserves identifiées à ce jour s'élèvent à 320 millions de tonnes. La Turquie serait le pays avec la plus grande réserve identifiée 28% soit 90 millions de tonnes, suivie par la Chine avec 23%, soit 73 millions de tonnes et enfin le Brésil 22% soit 70 millions de tonnes (USGS 2021c).

3.3.2 Production minière :

Figure 5 : Pays producteurs de graphite naturel en 2020 (1,1 millions de tonnes)



(USGS 2021)

En 2020 la production mondiale a certes été affectée par la covid-19 cela dit on ne relève pas de changements en termes de quantités produites. En 2020 par rapport à 2019, 1.1 millions de tonnes ont été produites au cours de chacune de ces années. La Chine devance de très loin les autres pays miniers avec presque 60 % (cf figure5) de la production mondiale (650.000 tonnes), vient en second le Mozambique avec 11% de la production (120.000 tonnes) et enfin le Brésil 9% (95.000 tonnes). Bien que la Turquie dispose des plus grandes réserves, le pays extrait une quantité infime en comparaison des autres nations 0.1% (USGS 2021c).

Sans surprise nous retrouvons la Chine comme principal exportateur de graphite naturel en 2019, avec 49% du volume (282 millions \$), le Mozambique en seconde position avec 13.6% (78.5 millions \$), enfin ex aequo en 3 -ème position le Brésil et l'Allemagne avec 4.75% (27.4 millions \$). Le Japon est le pays qui réalise le plus gros des importations 35.4% (109 millions \$), en second on retrouve la Corée du Sud avec 25.8% (79.7 millions \$) et enfin les Etats Unis avec 7.13% (22 millions \$) (OEC.WORD 2020d).

La Chine, le Japon et les Etats unis sont les principaux pays producteurs de Graphite raffiné.

3.3.3 Usage final :

En 2020 on estime qu'environ 22% du graphite était utilisé dans la conception de batterie (Nouveau Monde 2021).

3.3.4 Synthèse :

Le graphite comme dit précédemment, est présent en beaucoup plus grandes quantités que les matières premières citées jusque-là. Cependant, très peu d'acteurs entrent en ligne de compte dans la chaîne d'approvisionnement. La Chine a réalisé à elle seule presque les 2/3 de la production mondiale. Enfin, le graphite n'est pas exclusivement utilisé pour la production de batteries. En 2014, seulement 8% du graphite naturel était utilisé dans la production de batteries et 4% de graphite synthétique, ce qui laisse une certaine marge pour une éventuelle augmentation de la demande liée à ce secteur.

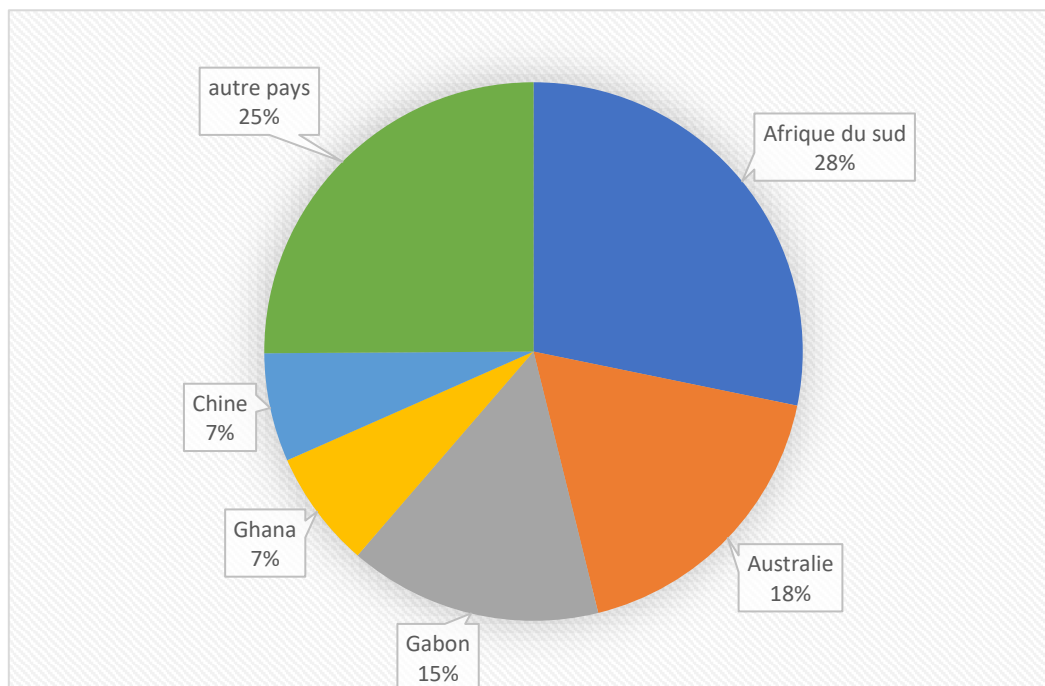
3.4 Manganèse

3.4.1 Ressources et réserves :

Les ressources terrestres de Manganèse sont estimées à environ 17 milliards de tonnes (UNCTAD 2020). Les réserves terrestres mondiales de Manganèse sont estimées à 1.300 millions de tonnes en 2021. L'Afrique du sud recèle près de 40% de ce volume (520 millions de tonnes), le Brésil 21% (270 millions de tonnes), l'Australie 18% (230 millions de tonnes) et enfin l'Ukraine 11% (140 millions de tonnes) (USGS 2021e).

3.4.2 Production minière :

Figure 6 : Pays producteurs de manganèse en 2020 (18,5 millions de tonnes)



(USGS 2021)

La production mondiale en 2020 était de 18.5 millions de tonnes, en baisse de presque 6% par rapport à 2019. Une diminution que l'on peut aisément imputer au Covid-19. L'Afrique du Sud est le pays qui produit plus de 28% (cf. figure 6) du volume total (5.2 millions de tonnes), en second nous retrouvons l'Australie 18% (3.3 millions de tonnes) et enfin le Gabon 15% (2.8 millions de tonnes) (USGS 2021e). Nous retrouvons BHP Billiton, Eramet, Comollog, Vale et OM holdings comme principaux fournisseurs de minerai de manganèse (UNCTAD 2020).

Concernant les exportations, l'Afrique du Sud fournit 41.3% (3.16 milliards \$) des exportations en 2019, suivie par l'Australie 20.7% (1.59 milliards \$) et le Gabon en 3^{ème} exportateur avec 16.7% (1.28 milliards \$). La Chine concentre les 2/3 (5.05 milliards \$) des importations de ce précieux minerai et l'Inde pays qui se positionne juste après en importe 7% (536 millions \$)(OEC.WORD 2020c).

3.4.3 Usage final

La Manganèse sert principalement à produire de l'acier dans 90% des cas, les 10% restants le sont pour produire des batteries ainsi que des composés chimiques.

3.4.4 Synthèse :

La production de manganèse est également plutôt bien diversifiée avec plusieurs pays d'origine disposant d'énormes réserves. Dernièrement, on estimait que seulement 10% du manganèse était utilisé pour produire des composés chimiques, ainsi que dans la production de batteries. Si l'on estime que la part de marché des batteries NMC va plus que doubler dans les 10 prochaines années. Il faut s'attendre à ce que ce pourcentage évolue. Maintenant, si l'on se réfère au large volume de réserve, à la capacité d'extraction et de raffinage, on peut s'attendre à ce que la chaîne d'approvisionnement réussisse à combler cette demande dans le futur.

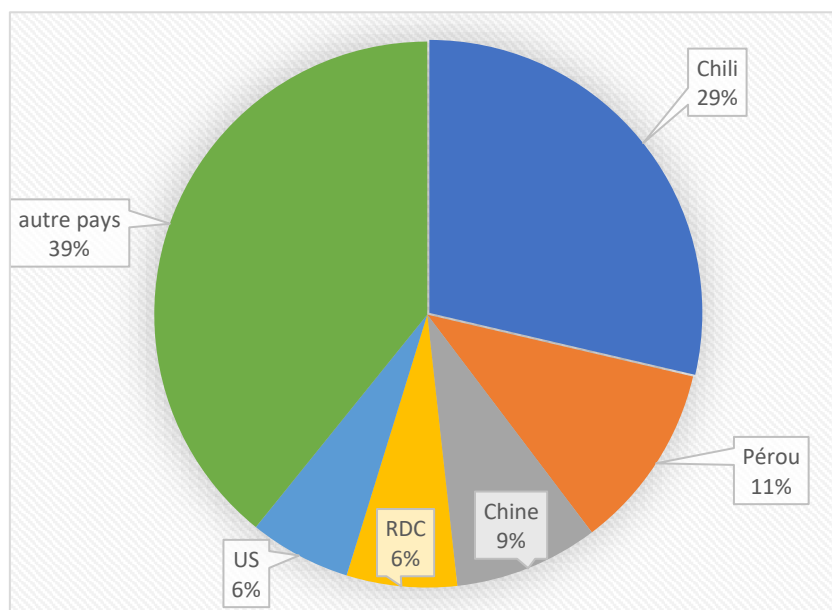
3.5 Cuivre

3.5.1 Ressources et réserves

Enfin nous allons parler du Cuivre. Les ressources de cuivre identifiées s'élèvent à 2.1 milliards de tonnes. Les réserves sont également très importantes avec 870 millions de tonnes. Une fois encore le Chili dispose d'une ressource très importante en cuivre au même titre que le Lithium. Avec 23% des réserves (200 millions de tonnes), vient ensuite le Pérou avec 11% (92 millions de tonnes) et l'Australie avec 10% des réserves (88 millions de tonnes) (USGS 2021b). Contrairement aux autres matières citées jusque-là, le Cuivre semble être mieux « réparti » à l'échelle mondiale. Certes le Chili dispose d'une partie relativement importante mais le reste est relativement bien étalé.

3.5.2 Production minière :

Figure 7 : Pays producteurs de cuivre en 2020 (20 millions de tonnes)



(USGS 2021)

En ce qui concerne la production, le Covid-19 n'a pas épargné le cuivre avec une baisse de production de 2% comparé à 2019. On retrouve 2 principaux types de cuivre, l'un sous forme brut, que l'on qualifie d'oxyde de cuivre (20% de la production) et l'autre sous la forme de sulfate de cuivre (80% de la production) (IEA 2021). La différence entre ces 2 formes de minerai provient de la manière dont ils sont extraits de la roche. Le Chili domine avec 30% du volume produit à l'échelle mondiale en 2020 (cf. figure 7) (5.7 millions de tonnes), suivi par le Pérou 11% (2.2 millions de tonnes) et enfin la Chine avec 9% (1.7 million de tonnes). L'entreprise Chilienne Codelco est l'entreprise qui a produit le plus en 2019 avec plus de 8% de la production totale (1.7 millions de tonnes), derrière on retrouve Glencore une entreprise Suisse avec presque 7% (1.37 millions de tonnes) et en 3 -ème position Freeport-McMoRan une entreprise Américaine à l'origine de presque 6% des extractions minières (1.17 millions de tonnes) (Basov 2021). Les trois principaux exportateurs de minerai et de concentré de cuivre en 2019 sont le Chili qui réalise 30.7% des exportations de cuivre (18.4 milliards \$), le Pérou 20.3% (12.2 milliards \$) et l'Australie 7.68% (4.61 milliards \$). Concernant les importations nous retrouvons majoritairement des pays d'Asie, la Chine régit 52.3% du volume des importations (31.1 milliards \$), vient en second le Japon avec 13% (7.79 milliards \$) et enfin la Corée du Sud 6.57% (3.94 milliards \$)(OEC.WORD 2021).

3.5.3 Raffineries :

Le paysage est un petit peu différent en ce qui concerne les raffineries. La Chine domine largement le marché avec près de 39% de cuivre raffiné (9.8millions de tonnes) en 2019, alors qu'ils ne sont que 3 -ème en termes d'extraction. Cela dit, c'est un pays qui importe énormément, car la Chine représente 50% de la demande de Cuivre raffiné et 9 des plus grandes raffineries du monde sont chinoises (cf. tableau 1). Le Chili arrive en second avec 10% (2.4 millions de tonnes) et enfin le Japon, absent jusque-là de nos classements avec 6% (1.6 millions de tonnes) (USGS 2021b). En 2019, 50% du cuivre produit par les fonderies était issu de Chine, loin devant la Japon qui n'en a produit que 8%.

Tableau 1: Les 10 plus grandes raffineries de cuivre en 2018

Nom	Pays	Compagnie	Capacité (kt)
Guixi	Chine	Jiangxi Copper	1000
Jinchuan	Chine	Jinchuan Non-Ferrous	650
Daye/Hubei	Chine	Daye Non-Ferrous	600
Yunan Copper	Chine	Yunnan Copper Industry	500
Birla	Inde	Birla Group (Hidalco)	500
Pyshma Refinery	Russie	UMMC	460
Besshi/Ehime	Japon	Sumitomo	450
Amarillo	USA	Grupo Mexico	450
Chuquicamata	Chili	Codelco	450
Onsan Refinery 1	Corée du S.	LS-Nikko Co	415

(ICSG 2018)

3.5.4 Usage final

On estime en 2019 que 13% du cuivre produit est utilisé dans le secteur du transport. Un secteur qui regroupe donc les véhicules électriques et thermiques en tout genre, voitures, bus, trains, bateaux et même avions (Statista 2020b).

3.5.5 Synthèse :

Les réserves de cuivre sont relativement bien réparties aux quatre coins du globe. Cependant, on observe encore une fois que l'Amérique latine domine dans l'extraction minière d'une des matières premières critiques à l'essor des véhicules électriques. En effet, le cuivre représente un pilier de l'économie chilienne, c'est d'ailleurs au Chili que l'on trouve la mine de cuivre à ciel ouvert disposant de la plus grande capacité de production annuelle mondiale. La mine d'Escondida disposait d'une capacité de 1.4 millions de tonnes en 2020, ce qui est quasiment le double de la capacité de la deuxième plus grande mine située en Indonésie (ICSG 2020) . Le cuivre contrairement aux autres matières premières est recyclé dans une proportion beaucoup plus importante. En 2018, presque 1/3 du cuivre consommé était issu de la branche recyclable,

soit 9.7 millions de tonnes (Leguérinel, Gleuher 2019).

Enfin, pour la partie raffineries et fonderies, c'est la Chine qui sort première disposant des plus grandes infrastructures à ce jour et de la plus grande demande intérieure en cuivre raffiné.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des principaux acteurs de la chaîne d'approvisionnement des éléments nécessaires à la production de véhicules électriques (2019-2020)

Matière première	Principaux acteurs de l'extraction minière	Principaux pays importateurs
Cobalt	RDC 68%	Chine 75%
Lithium	Australie 49% Chili 22 % Chine 17%	Chine 80%
Graphite	Chine 59% Mozambique 11%	Japon 35,4%, Corée du Sud 25.8%
Manganèse	Afrique du Sud 28% Australie 18% Gabon 15%	Chine 66%
Cuivre	Chili 29% Pérou 11% Chine 9%	Chine 50% de la demande de cuivre raffiné

(Réalisation personnelle)

4. Qui fabrique les batteries ?

A présent nous connaissons l'origine des principaux composants sujet de notre étude et leur pays de destination. La question est de savoir qui intervient dans la production des batteries lithium-ion. Nous retrouvons 5 principaux acteurs en 2018. Le leader à ce jour est Panasonic Sanyo, une entreprise japonaise réalisant 21% des ventes et fournissant notamment des constructeurs européens tels que Ford, PSA et Volkswagen. Suivi par deux entreprises chinoises en 2^{ème} et 3^{ème} position, CATL et BYD. CATL est spécialisé dans la production de batteries et d'accumulateurs depuis 10 ans et réalise 14.4% des parts de marché, elle fournit principalement BMW, Daimler et Volkswagen. BYD quant à elle, est à l'origine, spécialisée dans la production de batteries mais s'est diversifiée dans l'automobile en 2003. En 4^{ème} et 5^{ème} position nous retrouvons 2 entreprises sud-coréennes, LG chem avec 10.6% et fournit notamment Volkswagen et enfin Samsung avec 5.57% des parts de marché également fournisseur de Volkswagen (Manthey 2018).

La demande de véhicules électriques étant très importante en Chine, CATL et BYD ont vu leurs parts de marché augmenter rapidement ces dernières années au détriment de leurs concurrents coréens et japonais. Certains en ont fait leur activité principale, comme CATL par exemple alors que d'autres se sont positionnés sur d'autres marchés de la high-tech tels que la téléphonie, les téléviseurs, et évidemment l'automobile. La Chine domine actuellement la chaîne d'approvisionnement des batteries lithium-ion, avec 77% des capacités de production (Yu, Sumangil 2021). Cette grande capacité s'explique notamment par la forte demande intérieure, mais également grâce à de gros investissements privés et gouvernementaux soutenant fortement le transport électrique. Enfin, comme nous l'avons vu dans la partie précédente, la Chine contrôle une grande partie des matières premières utilisées dans la conception de batterie. Le Japon et la Corée du Sud auront du mal à suivre, sachant qu'ils ne disposent pas de capacités d'extraction et de raffinage semblables à celles de la Chine. A l'horizon 2028, CATL devrait être leader sur le marché en termes de capacité de production (307 gigawatts⁶ heure). Derrière nous devrions retrouver LG chem le leader sud-coréen (237 gigawatts heure). Tesla viendrait clôturer ce classement (135 gigawatt heure), ce qui au demeurant n'a rien d'étonnant, sachant que cette entreprise mise énormément sur les transports électriques et réalise les meilleures ventes de ces dernières années (Statista 2019c).

⁶ « GWh : Gigawatt-heure, unité de mesure de la production, de la consommation d'énergie ou du stockage. 1GWh = 1 000 000 kWh (kilowatt-heure). » (occitanie.developpement-durable.gouv)

Point intéressant également pour le futur, les Etats-Unis et l'Europe risquent de devenir de sérieux concurrents à la production asiatique. En effet, les ventes de véhicules électriques ont explosé en Europe ces dernières années. Notons également que la récente épidémie de Covid-19 a mis l'accent sur le risque de se fournir auprès d'entités à l'autre bout du monde. On peut donc envisager que dans le futur la production sera plus proche des constructeurs européens. Dans un article de S&P Global Market Intelligence, leur projection prévoit que l'Europe passera de 6% des capacités de production en 2020 à 25% en 2025, abaissant ainsi la part de marché chinoise à 65% (Yu, Sumangil 2021). Le constat est semblable aux Etats-Unis, d'autant que Joe Biden, le nouveau président a résigné les accords de Paris quelques heures après sa prise de fonction (France 24 2021). Cette nouvelle devrait permettre d'accélérer l'adoption des véhicules électriques dans ce pays, afin de se conformer aux objectifs environnementaux.

5. Qui fabrique les voitures ?

Une fois les batteries électriques assemblées, elles sont vendues et expédiées aux constructeurs automobiles à travers le globe. Les pays d'Asie dominent largement le secteur de la production de véhicules électriques. La Chine a produit presque 7 millions de véhicules disposant d'une batterie rechargeable ou hybride en 2021, le Japon plus de 1 millions et la Corée du Sud plus de 600 millions (Wagner 2019). Cette forte production peut s'expliquer par différents facteurs. Le premier étant que la demande intérieure pour les véhicules électriques y est très élevée. Deuxièmement, la main d'œuvre, notamment en Chine, est souvent moins coûteuse. Troisièmement, ces pays disposent d'installations permettant de produire à grande échelle, avec une technologie encore assez récente. Enfin, les principaux producteurs de cellules de batteries rechargeables se trouvent également en Asie (Chine, Japon, Corée du Sud), ce qui facilite grandement la chaîne d'approvisionnement et diminue les coûts pour les constructeurs automobiles asiatiques. Pour rappel, certains producteurs de batterie sont aussi constructeurs automobiles. Les Etats-Unis ont produit plus de 3 millions de véhicules électriques en 2021. L'Europe reste donc minoritaire avec seulement 3 millions de véhicules produits si l'on additionne l'Allemagne (2,247 millions) et la France (763'000) (Wagner 2019).

Les ventes de véhicules électriques viennent conforter les chiffres énoncés précédemment. En effet la Chine, l'Allemagne et les Etats-Unis regroupent à eux trois plus de 60% des ventes mondiales en 2020. La Chine ayant écoulé plus de 1 millions de véhicules, l'Allemagne presque 400'000 et les Etats Unis presque 300'000 (IEA 2021). Si l'on se projette en 2027 cette tendance devrait perdurer, les pays d'Asie seront à l'origine de plus de la moitié de la production mondiale (Chine 44%, Japon et Corée du Sud 12%). L'Europe et les Etats-Unis quant à eux devraient respectivement produire 29% et 12% des véhicules électriques en 2027(Brinley 2020).

A ce jour, c'est l'entreprise Tesla qui domine largement le classement des constructeurs ayant réalisé le plus de ventes en 2020, avec presque 500'000 unités vendues (16% des ventes). En second nous retrouvons le groupe Volkswagen avec 220'220 véhicules (13% des ventes) et enfin le géant Chinois BYD qui a écoulé 179'211 unités (6% des ventes). Sur l'année 2020 Tesla a enregistré un nombre record de ventes de son modèle 3, c'est d'ailleurs le véhicule électrique le plus vendu sur cette même année avec 365 000 (12% des ventes) unités écoulées. En second nous retrouvons le constructeur chinois Wuling ayant écoulé 120'000 (4% des ventes) véhicules de son modèle Hongguang Mini EV. Enfin nous retrouvons un constructeur européen, Renault avec la Zoe, a écoulé 100'000 (3% des ventes) unités (Pontes 2021).

6. Facteurs clés à l'origine de l'adoption des véhicules électriques.

C'est au début des années 1830 que le premier véhicule électrique fait son apparition, Robert Anderson un homme d'affaires écossais fabrique la première voiture électrique, même si en réalité il s'agissait davantage d'une carriole (Futura 2021). Ce concept très novateur pour l'époque bien que perfectionné au cours des années suivantes n'a pas rencontré de réels succès. Il faudra attendre les années 2000, et même 2010 pour voir une véritable adoption de ce type de véhicules très largement popularisé par l'entreprise Tesla. Quels facteurs expliquent ce soudain revirement ?

- **Politique gouvernementale :** Les gouvernements jouent un rôle crucial dans l'adoption des véhicules électriques par le plus grand nombre. En effet de nombreux états ont signé l'accord de Paris visant à limiter le réchauffement climatique sous la barre des 2°celsius. Un objectif qui sera possible d'atteindre en diminuant le plus fortement possible les émissions de gaz à effet de serre (CO2) actuelles et futures. Les véhicules sont souvent pointés du doigt et à juste titre lorsque l'on parle de CO2, plus particulièrement les véhicules à combustion. Si l'on considère que dans les prochaines années une bonne partie du parc des véhicules de transport sera électrique, on anticipe une diminution de 30% des émissions de gaz liées au transport (Mehta, Senn-Kalb 2021). Cette prévision prend également en compte les émissions liées à la production d'électricité nécessaire à leur bon fonctionnement. Une étude menée par Newclimate en 2016 vient appuyer ce résultat et démontre que si d'ici 2035, le parc des véhicules n'est pas complètement électrique il sera très compliqué, voire impossible d'atteindre les objectifs de l'accord de Paris. Les gouvernements sont pleinement conscients du tournant qui est à prendre par l'industrie du transport. Par conséquent, au travers des subventions et exonérations fiscales, les politiques vont chercher à promouvoir la voiture électrique. En France par exemple, les futurs acheteurs de voitures électriques ou hybride recevront un bonus de 1'000 à 7'000€ et ne paieront pas leur carte grise⁷ (BFMTV 2020). Ce n'est pas tout, les politiques vont également imposer aux constructeurs certains quotas d'émission. Pour s'y conformer ils devront compenser avec la production et commercialisation de véhicules électriques (Mehta, Senn-Kalb 2021). Enfin un dernier exemple d'incitation, la France et le Royaume-Uni, se sont engagés à interdire la vente de véhicules thermiques en 2040, alors que la Norvège veut en finir d'ici à 2025 (Kletsy 2021).

⁷ Document nécessaire à l'immatriculation d'un véhicule

- **Tesla démocratise le véhicule électrique.** En effet la plupart des gens associent le terme véhicules électrique à la marque Tesla. Pendant de nombreuses années la part de marché des voitures électriques était très mince. Ceci s'explique par différentes raisons. Premièrement les constructeurs n'y voyaient que peu d'intérêt et n'y octroyaient que peu de moyens. Les modèles proposés ne jouissaient donc pas d'un design exceptionnel et disposaient d'une autonomie réduite. Deuxièmement, la demande pour ce type de véhicule était relativement marginale, probablement pour les raisons énoncées précédemment. Parmi les critères d'achat les plus importants pour un acquéreur d'une nouvelle voiture, nous retrouvons la composante de « rendement énergétique » dans 66% des cas aux Etats-Unis et dans 58% des cas en Allemagne (Mehta, Senn-Kalb 2021). Cette composante est donc prépondérante, et facile à illustrer. En effet, avec un véhicule thermique on connaît la consommation de son véhicule, le type de carburant nécessaire et il est facile de trouver une station-service permettant de refaire le plein. Deuxième critère, la sécurité, est également très importante aux yeux de nouveaux acheteurs, dans plus de 65% des cas aux Etats-Unis et dans 57% des cas en Allemagne (Mehta, Senn-Kalb 2021).

C'est là que Tesla tire sa carte du jeu. Cette entreprise mise énormément sur l'électrique et a réussi à proposer une voiture plus attractive. Les performances sont très intéressantes surtout en termes d'autonomie et le design est au rendez-vous. Autre point intéressant, les véhicules Tesla disposent d'une intelligence artificielle rendant le véhicule pratiquement autonome et cette option est quasiment de série. La voiture est à même de prévenir et éviter un danger imminent sur la route et dans une certaine mesure conduire seule grâce à de nombreux capteurs présents sur le véhicule. Tesla est le parfait exemple d'une voiture plus sûre. Pour preuve, le succès rencontré lors de sa première semaine de lancement, le modèle 3 a enregistré 325'000 précommandes, soit une valeur de 14 milliards de dollars US (Mehta, Senn-Kalb 2021). Face à un tel engouement, les autres constructeurs se doivent de riposter.

- **Le coût de la batterie diminue :** La batterie d'un véhicule électrique représente entre 35 et 40% de la valeur finale du véhicule. Ce coût énorme est donc l'un des principaux freins pour passer d'un véhicule thermique à un véhicule électrique. Ce surcoût rend les véhicules électriques bien moins compétitifs. D'autant plus, que les prix est le troisième critère qui intervient lorsque l'on achète un nouveau véhicule (Mehta, Senn-Kalb 2021). Cependant on observe, une diminution du prix des batteries sur cette dernière décennie.

En 2010 le prix moyen par kWh était de 1'100\$ et en 2020 ce prix n'était que de 137\$

soit une diminution de 87% (BloombergNEF 2020). Une réduction qui s'explique par différents facteurs. Le premier étant que le procédé de fabrication est bien mieux maîtrisé et le second par le fait que les fabricants de batteries proposent des prix très agressifs pour gagner ou sécuriser leur part de marché (Mehta, Senn-Kalb 2021). Une recherche publiée dans le journal the Nature Climate Change en 2016 indiquait que si le prix par kWh descendait sous la barre des 150\$, les véhicules électriques deviendraient aussi compétitifs que les véhicules thermiques. Ce qui aurait pour conséquence une augmentation des ventes.

Entre 2010 et 2020 la croissance des ventes de véhicules électriques d'année en année a toujours été supérieure à 50% sauf en 2019 (Mehta, Senn-Kalb 2021). Evidemment cette augmentation des ventes n'est pas qu'imputable à la diminution du coût de la batterie mais c'est un facteur impactant.

7. Freins à la démocratisation du véhicule électrique

Plus haut nous avons listé les facteurs favorisant l'adoption des véhicules électriques comme nouveau moyen de transport, cependant il existe des facteurs encore trop contraignants pour que les consommateurs sautent le pas.

- **Le nombre d'infrastructure est encore trop faible** : Bien que les propriétaires de véhicules électriques rechargent leurs véhicules principalement à leur domicile il est nécessaire voire primordial de disposer de zone de recharge publique. Prenons un exemple simple, un utilisateur d'une Tesla, part en vacances ou en voyage d'affaires. Il doit pouvoir disposer d'une borne de rechargement sur son trajet ou du moins proche de sa destination pour refaire le plein des batteries. Malheureusement, il s'avère que le nombre de chargeurs disponibles soit encore trop limité. Ce qui va évidemment grandement déplaire à l'utilisateur, qui se verra en incapacité de recharger son véhicule. Une enquête menée par Statista en 2018 auprès des consommateurs démontre que le manque de zones de rechargement publiques est le principal frein devant le prix. Une autre étude menée par KPMG en 2017 auprès de 1000 cadres de l'industrie automobile, révèle que 62% d'entre eux, estiment que la voiture électrique va être un échec dû au manque d'infrastructures (Mehta, Senn-Kalb 2021).

En termes de chiffres, Les Pays-Bas disposent de la plus grande densité de chargeur pour véhicules électriques avec 20 stations de recharge dans un périmètre de 100km. La Chine quant à elle n'en dispose que de 3,5. les États Unis 1. Ce qui constitue un paradoxe car le marché américain représente la 2ème plus grande flotte de véhicules électriques après la Chine (McCarthy 2018). D'autant que la Chine comme les États Unis sont des territoires très étendus, le nombre de kilomètres parcourus pour aller d'un point à l'autre est rapidement conséquent. De plus, certaines infrastructures tels que les supers chargeurs de Tesla, ne sont pas disposés à accueillir d'autres véhicules car ils répondent à des normes et des connectiques différentes. Enfin, il n'existe pour le moment pas de modèle économique stable, pour répondre à cette demande (Mehta, Senn-Kalb 2021). Afin de pallier ce déficit, il serait nécessaire que les états s'impliquent davantage, ou du moins que des entreprises privées prennent le relais.

- **Un faible retour sur investissement** : Pour le moment, même si on vante des chiffres de ventes records pour Tesla, il ne faut pas oublier que pendant de nombreuses années, l'entreprise fonctionnait à perte. En 2019, l'entreprise a subi une perte de 870 millions de dollars et c'est seulement en 2020 qu'elle réalise son premier bénéfice,

690 millions de dollars (Orbis [sans date]). C'est plus ou moins le même constat avec le constructeur BMW et son modèle électrique i3. Les constructeurs ont encore du mal à dégager un profit en vendant des véhicules électriques, étant donné que ces véhicules ont des coûts de fabrication et de recherche et développement trop élevés. Le coût des composants est également très important, notamment celui des batteries. Bien que le coût de ces dernières diminue avec le temps. Malgré ces coûts plus faibles en 2019, une enquête menée par l'entreprise Shell auprès de potentiels acquéreurs de véhicules, 80% d'entre eux estimaient que le prix d'achat était encore trop élevé (Mehta, Senn-Kalb 2021). Il faut souligner que les véhicules électriques haut de gamme embarquent souvent des technologies novatrices, notamment des radars embarqués et IA pour la conduite autonome. Ces options ont bien évidemment un retentissement sur le prix de vente. Enfin, le nombre de véhicules vendus étant encore relativement faible, ces entreprises n'ont pas la possibilité de faire des économies d'échelle qui leur permettraient de dégager une plus grande marge (Mehta, Senn-Kalb 2021).

Avec une demande grandissante, on peut s'attendre à ce que cette tendance s'efface peu à peu et permette aux constructeurs automobiles d'engranger davantage de profits. Si la rentabilité s'améliore, le nombre de concurrents va augmenter et cela va naturellement favoriser le consommateur, avec des prix potentiellement plus abordables et une plus large gamme.

- **Les lobbys pétroliers et automobiles freinent l'adoption de l'électrique :** si l'on considère qu'en 2030, 50% des nouveaux véhicules immatriculés seront électriques. Il est évident que la demande pour les carburants traditionnels va chuter. Ce qui va grandement déplaire aux géants pétroliers. C'est pourquoi ils essayent et vont essayer de faire davantage pression, notamment auprès des gouvernements, en pratiquant du lobbying, pour minimiser l'adoption des véhicules électriques dans notre quotidien. Récemment, Volkswagen et Shell ont été accusés d'essayer de freiner l'adoption des véhicules électriques dans l'Union européenne en promouvant davantage l'usage des biocarburants (Mehta, Senn-Kalb 2021).

8. Projection future :

Comment le marché des véhicules électriques va évoluer, et dans quelle mesure les matières premières citées précédemment seront impactées ?

En 2019 on estime que presque 74.8 millions de voitures ont été vendues (Statista 2021b), parmi ces ventes 2.1 millions (Mehta, Senn-Kalb 2021) étaient des véhicules électriques (hybride et électrique) ce qui représente seulement 2.8% des ventes. Cela dit avec les objectifs actuels qui visent à réduire l'empreinte carbone, accompagnés par un engouement grandissant pour ce type de véhicule. Cette tendance devrait rapidement s'inverser et l'on devrait assister à un véritable tournant dans l'industrie automobile. En 2025, 14 millions de véhicules électriques devraient être vendus. Il est estimé qu'en 2030 les véhicules électriques seront vendus dans la même proportion que les véhicules thermiques. 25 millions de véhicules devraient être vendus cette année-là (Mehta, Senn-Kalb 2021). A l'horizon de 2030, on passerait de plus de 10 millions de véhicules électriques en circulation en 2020, à 127 millions en 2030 (Business Insider).

Maintenant, rapportons cette croissance à l'usage qui est fait et sera fait dans le futur de nos différentes matières premières.

Nous savons qu'une voiture électrique moyenne contient approximativement 84Kg de cuivre, alors qu'une voiture classique n'en contient que 15Kg (Copper Development Association Inc. 2017). Même chose avec le cobalt et le lithium une Tesla Model S, le 4^{ème} véhicule électrique le plus vendu en 2018 contiendrait 22.5kg de cobalt (Desjardins 2017) et 63Kg de lithium dans sa batterie (Lambert 2016). Cependant on ignore si la quantité de lithium représente du lithium pur ou un dérivé de lithium, comme le lithium carbonate. Afin d'estimer la demande future de manganèse nous prendrons l'exemple du modèle Zoé de la marque Renault. Pour rappel, ce véhicule est le 3^{ème} plus vendu en 2020, avec 100'000 unités écoulées. On trouve 11 kilos de manganèse par voiture (France info 2020). Si l'on multiplie ces chiffres par le nombre de véhicules qui devrait être vendu en 2025 et en 2030 tout en supposant que ceux-ci seront exclusivement de ce même modèle voilà ce que l'on obtient.

Tableau 3 : Quantité de matériaux utilisés en 2019 pour produire des véhicules électriques (2.1 millions de véhicules vendu)

Matière première	Quantité (tonnes)	Proportion de minerai utilisé issu des mines
Cuivre	~176'000	< 1%
Cobalt	~47'000	33%
Lithium	~132'000 (lithium équivalent carbonate)	~30%
Manganèse	~23'000	<1%

(Réalisation personnelle)

Voici le détail par matières premières :

- 2025 : 14 millions de véhicules électriques vendus

Cuivre

14'000'000 x 84kg = 1'176'000 tonnes.

En 2019 la production minière de cuivre était de 20,4 millions de tonnes (USGS 2021b). Si ce chiffre reste inchangé, la demande de cuivre pour produire un véhicule électrique devrait être relativement marginale de l'ordre de 5-6% seulement en 2025.

Cobalt

14'000'000 x 22.5kg = 315'000 tonnes.

En 2019 la production minière de cobalt s'élevait à 144'000 tonnes (USGS 2021a) et environ 50% étaient employés pour produire des batteries lithium-ion soit 72'000 tonnes. Partant de ce postulat, il faudrait plus que quadrupler la production minière de cobalt destinée à la production de batteries pour répondre à la demande en 2025.

Lithium

14'000'000 x 63kg = 882'000 tonnes.

En 2019 la production minière de lithium s'élevait à 86'000 tonnes. Il faudrait donc multiplier la production par 10 d'ici à 2025.

Manganèse

14'000'000 x 11kg = 154'000 tonnes.

En 2019 la production minière de manganèse s'élevait à 19,6 millions de tonnes. Par conséquent il faudrait multiplier par plus de 6 l'extraction minière destinée à la production de batterie.

- 2030 : 25 millions de véhicules électriques vendus

Cuivre

$25'000'000 \times 84\text{kg} = 2.1$ millions de tonnes.

Avec 2.1 millions de tonnes de cuivre nécessaires à la production de véhicules électriques pour 2030, 10% de la production minière mondiale de cuivre sera directement employée par l'industrie automobile, si on prend 2019 comme année de référence. Il est également important de rappeler que l'augmentation de la demande de cuivre ne se limite pas qu'à la production des véhicules électriques mais aussi à celle d'installation de nouvelles infrastructures liées au rechargement des voitures.

Cobalt

$25'000'000 \times 22.5\text{kg} = 562'500$ tonnes.

Dans le cas du cobalt, il faudrait multiplier la production minière par plus de 4 pour répondre à la demande des véhicules électriques. J'ajouterai également que ce calcul exclut toute augmentation qui pourrait impliquer les autres usages du Cobalt, sachant que 50% de la demande est directement liée à la production de batteries.

Lithium

$25'000'000 \times 63 \text{ kg} = 1'575'000$ tonnes.

C'est bien évidemment le lithium qui va nécessiter le plus d'efforts. Afin de répondre à la demande en 2030, il faudra extraire approximativement 18 fois plus de lithium.

Manganèse

$25'000'000 \times 11\text{kg} = 275'000$ tonnes.

La demande de manganèse restera très marginale même à l'horizon 2030, si l'on se base sur cette projection. Seulement 1.4% du manganèse extrait servira à produire des véhicules électriques. Il faut également souligner que les constructeurs tel que Tesla tendent à diminuer l'usage du cobalt dans leurs batteries. Celui-ci pourrait être remplacé, par du nickel ou bien par du manganèse qui joue pratiquement le même rôle.

À présent, si l'on compare les chiffres obtenus avec les exemples précédents, on remarque qu'ils ne sont pas si éloignés des projections réalisées. D'après Statista, en 2028, la demande de lithium pour la fabrication de batteries devrait être équivalente à 1.89 millions de tonnes (Statista 2019d). En 2019, 86'000 tonnes ont été extraites des mines (USGS 2021d). Il faudrait donc naturellement multiplier la production par 22 pour pallier une demande extrêmement

tendue dans les années à venir. Cette multiplication de la production ne prend pas en compte la demande nécessaire aux autres usages du lithium bien qu'ils soient souvent minoritaires.

Les résultats obtenus pour le cobalt ne sont pas si éloignés non plus, car nous avons trouvé une demande de 562'500 tonnes pour 2030. Alors que les prévisions prévoient 320'000 tonnes en 2028, ce qui nécessiterait tout de même de multiplier par plus de 2 la production de cobalt qui était de 148'000 tonnes en 2018 (USGS 2020), dont 58'000 tonnes (40%) étaient utilisées pour produire des batteries (Statista 2019b). Là encore, cette augmentation de la production sous-estime les besoins réels, car à ce jour seulement 50% du cobalt est employé à la fabrication de batterie.

Concernant le graphite nous ne disposons pas de données précises pour un type de véhicule commercialisé à ce jour, nous avons estimé en croisant des données que 170'000 tonnes ont été utilisées pour la production de batteries en 2018 (Statista 2019b). Sachant que sur cette même année, 1'120'000 tonnes ont été extraites (USGS 2021c). Cela indique que 15% de la production minière mondiale était directement employée pour la fabrication de batterie. Point à souligner, on ignore quelle part de graphite naturel ou artificiel est comprise dans ce pourcentage. D'ici à 2028, 2,5 millions de tonnes de graphite seront nécessaires pour répondre à la demande de production de batteries. Il faudrait alors doubler la production minière (LePan 2019). Et encore, cette augmentation ne serait probablement pas suffisante car on ne prend pas en compte la demande liée aux autres domaines d'application et leur évolution future. On peut également s'attendre à ce que le graphite artificiel vienne épauler la demande de graphite naturel.

Pour ce qui est du cuivre en 2019. 2,1 millions de véhicules ont été vendus et donc produits. Si l'on se réfère à la quantité moyenne de cuivre présent dans un véhicule électrique, à savoir 84 kilos, 176'400 tonnes auront été nécessaires pour les produire. Cette quantité sur l'année 2019 ne représente même pas 1% de l'extraction minière mondiale. Cependant, un document publié par Copper Development Association Inc, dévoile que l'usage du cuivre pour produire des véhicules électriques devrait atteindre 1,7 millions de tonnes en 2027 (Copper Development Association Inc. 2017) . Soit plus de 8% de l'extraction minière mondiale de 2019. Si la demande pour le cuivre reste inchangée dans ses autres domaines d'application, il faudra multiplier par 9 l'extraction de cuivre destinée à la fabrication des véhicules électriques.

Tableau 4 : Tableau récapitulatif de l'accroissement de la demande des matières premières destinées à la conception des batteries de 2018 à 2030.

Matière première	Demande actuelle (Ktonnes)	Proportion de l'extraction minière utilisée pour les batteries 2018-2019	Facteur de production supplémentaire	Demande horizon 2030 (million de tonnes)	Proportion de l'extraction minière rapportée
Cuivre	176*	0.86%	9,6	1,7	8.33%
Lithium	150	43%	12,6	1,89	546%
Cobalt	58	40%	5,5	0,320	216%
Manganèse	23*	0.11%	11,9	0.275*	1.4%
Graphite	170	15%	12,1	2,05	183%

*estimation personnelle

(USGS et Statista)

De manière générale, nous observons que la demande croissante pour les véhicules électriques va fortement impacter les matières premières sous-jacentes. C'est quasiment 12 fois plus de véhicules qui seront vendus à l'horizon 2030. C'est peut-être l'approvisionnement en lithium qui va nécessiter le plus d'efforts pour répondre à cette augmentation de la demande, étant l'élément phare dans la conception de batteries et disposant actuellement des plus faibles volumes de production.

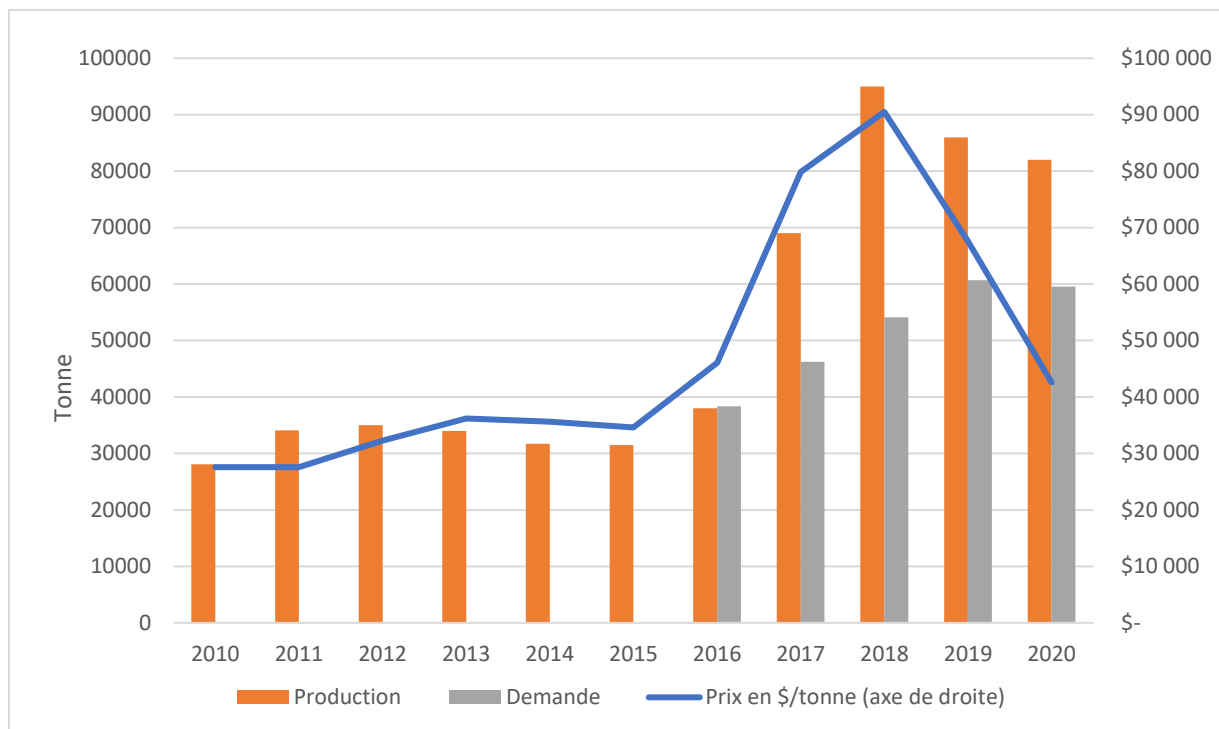
9. L'impact de l'essor des véhicules électriques sur les matières premières les plus critiques de 2010 à 2020.

Le tableau précédent (tableau 3), nous permet d'identifier quelle matière première est et sera réellement impactée par l'avènement des voitures électriques. Pour cette partie nous retiendrons 2 éléments, le lithium et le cobalt.

Ces 2 éléments contrairement aux autres sont utilisés dans une plus grande proportion pour la fabrication de batterie. Le cobalt notamment, 40% de l'extraction minière en 2018 était directement utilisés pour produire des batteries et 43% pour le lithium. Nous laisserons donc de côté pour le moment, le cuivre, le manganèse qui ont un usage inférieur à 1%. Ainsi que le graphite bien qu'utilisé à 15% en 2018. Dans les faits actuels, l'avènement des voitures électriques n'a pas encore joué un rôle décisif sur leur prix. En 2015, 500'000 véhicules électriques étaient vendus et en 2019 2,1 millions soit une augmentation de 320% (Mehta, Senn-Kalb 2021).

Première observation, c'est à partir de 2015-2016 que l'on note, une augmentation du prix des matières premières nécessaires à la production. Il y a donc un potentiel lien de corrélation avec l'augmentation des ventes, actuelles et futures (UNCTAD 2020).

Figure 8 : Marché du lithium de 2010 à 2020

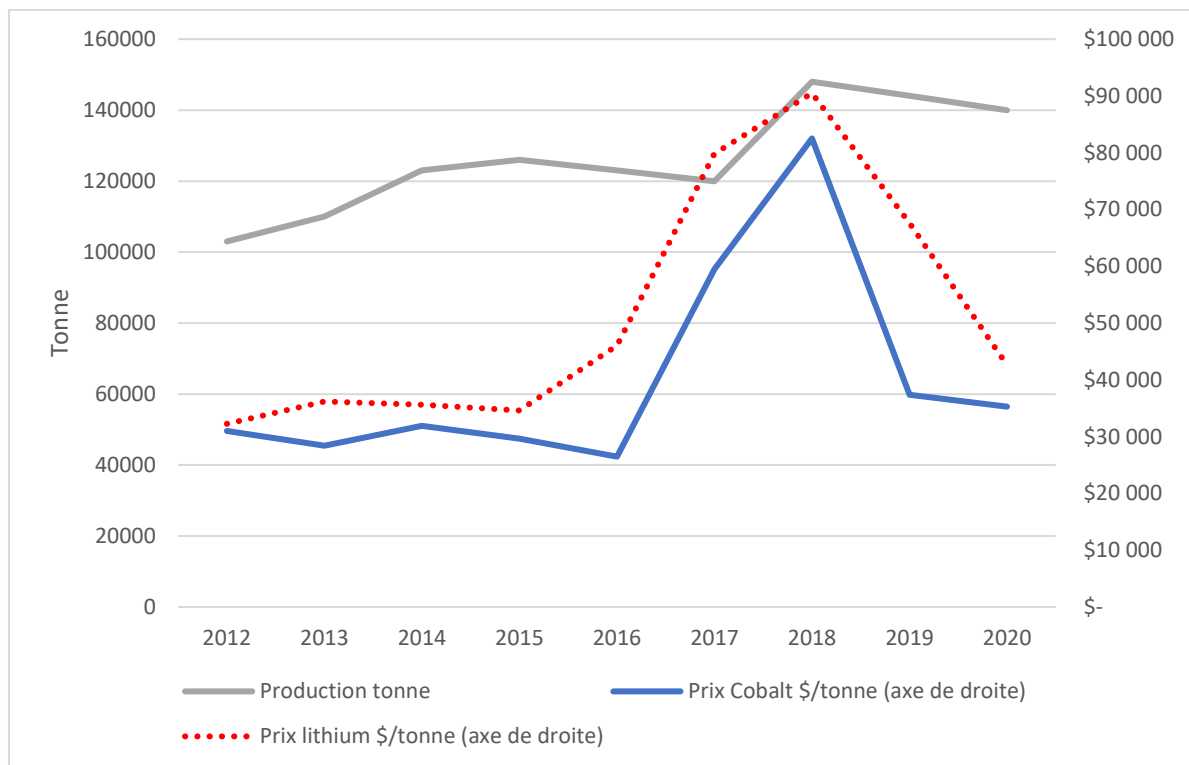


*Réalisation personnelle

(Statista)

Comme le révèle la figure 3 du marché du lithium de 2010 à 2020, le prix du lithium était relativement stable de 2010 à 2015. A partir de 2015 le prix s'est pour ainsi dire envolé pour être pratiquement multiplié par plus de 2 entre 2015 et 2018. Il oscillait jusque-là entre 25'000\$/tonne et 35'000\$/tonne, a atteint plus de 90'000\$ en 2018. Cette forte augmentation est le résultat d'une demande bien plus importante de la part des véhicules électriques à cette période et pour les projections futures. C'est entre 2017 et 2018 que l'on enregistre le record de ventes de la décennie, passant de 1,2 millions de ventes à 2 millions. Bien que l'on manque de données sur l'état de la demande avant 2016, à partir de cette date, la production de lithium est très largement excédentaire et pourtant aucune diminution des prix n'est observée avant l'année 2019. La diminution de 2019 s'explique par le fait qu'à cette période la quantité de lithium sur le marché est bien trop importante, associée à une diminution de la demande pour les véhicules électriques. Il semblerait également qu'à cette période la Chine ait revu à la baisse ses subventions pour soutenir le transport électrique (UNCTAD 2020), la Chine étant le plus gros marché actuel pour l'électrique. Ces décisions ont eu pour effet de revoir à la baisse l'évolution du marché dans le futur. En effet, en 2019 la croissance des ventes de véhicules n'est que de 5% par rapport à 2018 (Mehta, Senn-Kalb 2021). Ce qui pour le coup est le plus faible taux de croissance depuis 2010. La forte volatilité du prix du lithium est un parfait exemple de l'essor du véhicule électrique

Figure 9 : Marché du Cobalt de 2012 à 2020



*Réalisation personnelle

(Statista)

Le graphique ci-dessus, bien que manquant d'informations concernant la demande, semble reproduire exactement le même schéma que celui du lithium. Le prix du cobalt désigné par un trait bleu et celui du lithium avec le trait en pointillé rouge évoluent pratiquement dans la même proportion. Il est donc possible de faire le lien avec l'évolution des ventes de véhicules électriques et le prix de cette matière première. Alors que la croissance des ventes de véhicules double presque chaque année jusqu'en 2018, il est logique d'observer une augmentation des prix. L'engouement grandissant lié à la voiture électrique est donc le principal facteur expliquant cette hausse de prix. Cependant, dès 2018 les prix s'effondrent et diminuent de près de 55% en 2019. Différents facteurs expliquent cette diminution. La première raison est que devant l'augmentation des prix, et l'appât du gain, de nombreux producteurs locaux ont commencé à émerger notamment en RDC. De grands groupes aussi tels que Glencore et Eurasian Resources Group ont annoncé augmenter leur production entre 2018 et 2019 (Larsen 2019). Des décisions probablement prises sur la base de l'augmentation des prix et d'une demande grandissante. Cette augmentation de l'offre a rapidement dépassé les besoins réels, d'autant que ceux-ci ont fortement diminué avec une croissance du marché des véhicules électriques plus faible que prévue. La Chine a également influé sur cette chute des prix. En effet, devant une augmentation croissante des prix de mois en mois, les Chinois

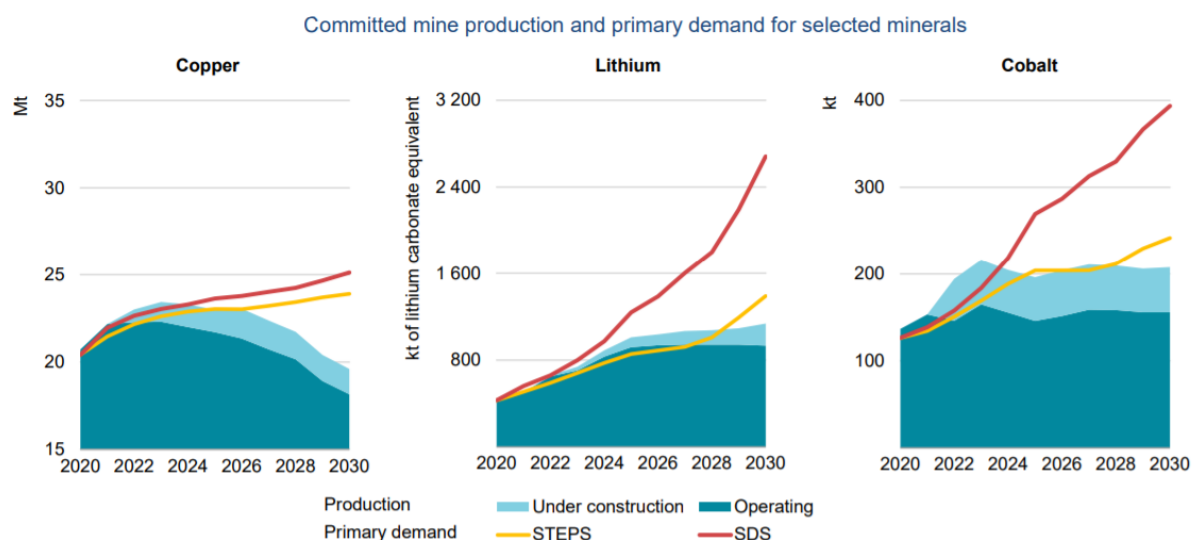
ont commencé à acheter du cobalt et le stocker en prévision d'une augmentation qui aurait risqué de porter préjudice à leurs affaires futures. La quantité de cobalt achetée en surplus pour être stockée, a contribué à fausser la demande réelle. Ce scénario ne s'étant pas réalisé, les décisions chinoises ont simplement contribué à noyer le marché (Larsen 2019). Enfin, courant 2019 Glencore a annoncé mettre l'une de ses mines au Congo (Mutanda) en « maintenance », en d'autres termes cette mine sous-performait, suite à la diminution récente des prix qui a rendu sa rentabilité trop faible (Glencore 2019). Cette nouvelle a donc provoqué une petite augmentation des prix.

Ces récents événements concernant le Cobalt et le Lithium soulignent le fait que c'est un marché qui n'est pas encore suffisamment mature. L'extrême volatilité des prix entre 2010 et 2021 témoigne du faible équilibre entre l'offre et la demande. Devant un signal fort, et même trop fort aux vues de la suite des événements, beaucoup d'acteurs ont voulu tirer bénéfice de la flambée des prix. Cet excès de production combiné à une révision à la baisse de la demande, ont provoqué l'effondrement des prix.

10. L'offre est-elle en capacité de soutenir les besoins futurs.

De manière générale, le prix est obtenu grâce à l'équilibre entre l'offre et la demande. Pour que ce prix reste stable sur le long terme, il faut avoir un contrôle parfait sur la chaîne d'approvisionnement, mais également une excellente perception de ce que sera la demande. Une projection proche de la réalité permet d'organiser la production afin de répondre au mieux à l'évolution du marché. Comme vu précédemment pour le lithium et le cobalt, ces deux composants dont l'usage à grande échelle est encore relativement récent, il est extrêmement difficile de trouver un équilibre au niveau du prix. D'autant que leur demande a augmenté très rapidement avec l'essor des véhicules électriques, entraînant une réaction probablement excessive de la part du marché et poussant de nombreux mineurs à produire pour tirer bénéfice de l'augmentation récente des prix. Cette surproduction a entraîné par la suite un déséquilibre entre l'offre et la demande, faisant aussi tôt, rechuter les prix. Nous savons que la batterie d'une voiture électrique, compte pour approximativement 30 à 40% de son prix, sur les 10 dernières années le prix pour produire une batterie a chuté de plus de 87%. Cependant les matières premières utilisées quant à elle n'ont pas vu leur prix diminuer bien au contraire, il a même souvent augmenté comme vu précédemment avec le lithium et cobalt. Le prix du graphite, et celui du manganèse ont eux aussi légèrement augmenté ces dernières années, bien que leur augmentation ne soit pas directement imputable à l'électrique (UNCTAD 2020). Par conséquent, la part des matières premières représente une plus grosse proportion, du coût de production des batteries, et le prix de vente s'en trouve impacté. Une trop grande volatilité des prix des matières premières freinerait la transition des véhicules à combustion vers les véhicules électriques. Nous allons donc essayer d'identifier vers quoi se dirige actuellement le marché, grâce à des éléments communiqués par International Energy Agency.

Figure 10 : Prévvision de l'évolution de l'offre et de la demande de 2010 à 2030



Légende :

« STEPS = Stated Policies Scenario, indique l'orientation du système énergétique basée sur une analyse secteur par secteur des politiques actuelles et des annonces politiques.

SDS = Sustainable Development Scenario, indique ce qui serait nécessaire dans une trajectoire compatible avec la réalisation des objectifs de l'Accord de Paris »

(IEA analysis based on S&P Global 2021)

10.1 Cuivre :

Si on se base sur les données de la figure 5, nous devrions assister à un pic de production vers 2023-2024, aussitôt suivi par une diminution. Cette diminution aura pour conséquence de mettre un terme à l'équilibre entre l'offre et la demande et une augmentation marquée des prix.

Cette diminution s'explique par le fait que les gisements actuels s'appauvrissent fortement et peu de nouveaux gisements exploitables ont été découverts à ce jour. Au Chili notamment, depuis ces 15 dernières années, à quantité de roche extraite égale, la teneur en cuivre a chuté de près de 30% (IEA 2021). Pour rappel, le cuivre est un pilier de l'économie chilienne, étant à l'origine de presque 30% de la production mondiale en 2020. Par conséquent, pour garantir un niveau de production équivalent, il faut dépenser plus d'énergie, d'électricité et de carburant pour les engins. Par conséquent, les charges d'exploitation vont augmenter et potentiellement entraîner une hausse des prix.

L'eau est également une ressource de plus en plus utilisée dans l'extraction minière, ce qui n'est pas viable sur le long terme. Dans le cas du Chili, il faut savoir que 80% de l'extraction minière de cuivre est réalisée dans des zones extrêmement arides, où l'eau est une denrée rare. En 2019, de sévères sécheresses au Chili, ont contraint les exploitants miniers à limiter leur consommation d'eau et donc à produire moins (IEA 2021). L'eau a par conséquent un réel impact sur la volatilité des prix.

Pour limiter une pénurie dans les années à venir, il faut envisager de nouveaux projets d'investissement et cela très rapidement afin de répondre à la demande et combler le déficit de production. D'autant que lorsqu'un nouveau gisement est identifié, entre le moment de sa découverte et son exploitation une période de 16 ans s'écoule généralement (IEA 2021). De gros efforts doivent être également réalisés notamment pour limiter l'utilisation de l'eau, des stations de désalinisation d'eau de mer sont déjà utilisées. Cette eau est souvent transportée par camion de la côte, à la mine dans les terres, c'est pourquoi son utilisation n'est économiquement et écologiquement pas durable (Geldron 2017).

Enfin il est important de souligner que le cuivre ne joue pas seulement un rôle dans l'avenir des véhicules électriques, mais également dans la transition énergétique. Le passage au transport électrique est pour de nombreuses nations le levier sur lequel ils peuvent s'appuyer pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris. Ce matériau est donc indispensable pour y parvenir et malheureusement difficilement substituable en raison de son incroyable conductivité. Cependant, l'aluminium constituerait un substitut acceptable car il est présent en abondance avec un prix moins volatile. Il partage plus ou moins les mêmes propriétés que le cuivre, malheureusement les études menées par les ingénieurs ne l'intègrent pas encore en tant qu'ersatz du cuivre. Enfin, il faut garder en tête que le cuivre est un matériau qu'on sait parfaitement recycler et qui ne perd pas de son intégrité. Il pourra par conséquent être réemployé à d'autres usages une fois arrivé en fin de vie.

10.2 Lithium :

A présent le lithium, si nous nous référons toujours à la figure 5, nous pouvons faire plus ou moins le même constat que pour le cuivre. Cela dit la production du lithium, contrairement à celle du cuivre, devrait continuer de croître, mais probablement pas suffisamment rapidement. Si on conserve le scénario de demande le plus raisonnable et dès 2022 si l'on retient le scénario le plus agressif, la demande devrait excéder l'offre à l'horizon 2028. Les prix vont donc naturellement s'envoler en prévision d'une pénurie dans les années à venir. Question : pourquoi l'offre peine-t-elle à se mettre en place ?

Premièrement le marché du lithium n'a rencontré un véritable engouement que très récemment, son marché n'est donc pas suffisamment mature. A ce jour, nous savons qu'il sert principalement à produire les batteries lithium-ion, dont 70% de la demande devrait être guidée exclusivement par l'adoption des véhicules électriques dès 2022. Ce nouveau marché semble assez dur à anticiper, car il est très difficile d'évaluer avec exactitude le nombre de véhicules électriques qui seront vendus dans le futur. D'ailleurs l'évolution des prix entre 2016 et 2019 témoigne de cette incertitude. Le problème est que cette dépréciation des prix a freiné beaucoup de projets d'expansion, voire de nouvelle construction (IEA 2021). Les prix bas du marché ont poussé beaucoup d'acteurs à se retirer, faute de rentabilité actuellement (IEA 2021). Seuls les principaux acteurs avec des fonds importants peuvent continuer d'investir, mais dans une moindre mesure. A court terme le marché devrait tout de même être bien fourni, le seul point noir provient des entreprises de raffinage qui transforment le lithium sous forme brut en lithium sous forme chimique. L'IEA estime que 5 entreprises disposent de 75% des capacités de production du lithium raffiné mondiale (IEA 2021). Si ces entreprises ne planifient pas rapidement d'étendre leur capacité de production, la pénurie serait causée en premier lieu par l'étape de raffinage et non par l'extraction minière. L'ombre d'une potentielle pénurie se profile déjà, car l'on observe les prix du carbonate de lithium remonter depuis la fin 2020 (Investing 2021). Toutefois, si l'on assiste à une envolée des prix dans les années à venir, on peut s'attendre à voir des projets d'expansion apparaître rapidement et de nouveaux producteurs prendre part au marché, car il deviendrait plus profitable. D'autant que le marché serait probablement plus réactif que celui du cuivre car entre la découverte d'un filon et le début de son exploitation une période 4 et 8 ans s'écoule en moyenne (IEA 2021).

Deuxièmement, comme pour le cuivre la majeure partie des zones d'extraction se trouve dans des zones extrêmement arides, que ce soit en Amérique latine ou en Australie. L'eau est énormément utilisée notamment au Chili, car le lithium concentré est obtenu par évaporation. Une étude menée au Chili a démontré qu'il existait une corrélation négative entre l'expansion de l'extraction du lithium et celle de l'humidité contenue dans les sols (IEA 2021). Par conséquent, pour éviter que l'eau impacte trop ce marché, les procédés de production nécessitent d'être adaptés et l'usage de l'eau limité dans le futur pour rendre la production durable.

Enfin, troisième élément, le marché du lithium est extrêmement concentré. Que ce soit au niveau de l'extraction minière où l'Australie et le Chili sont à l'origine de 70% de l'offre en 2020, mais aussi lors de l'étape de raffinage où la Chine produit 60% du lithium sous forme chimique, et 80% du lithium sous forme d'hydroxyde (IEA 2021). Nous avons donc 3 acteurs régissant pratiquement la totalité de l'offre et la demande mondiale de lithium. Le risque est que si l'un

de ses acteurs est victime du climat (inondations, sécheresses), de grèves, ou d'instabilités politiques, la chaîne d'approvisionnement sera énormément impactée et les prix s'envoleront. Il faudrait par conséquent, tenter d'initier de nouveaux projets d'extraction, mais aussi de venir capter des parts de marché du lithium raffiné par la Chine, en le produisant sur d'autres territoires tels que l'Europe ou l'Amérique du Nord, donc plus proches des constructeurs automobiles et ceci pour limiter toute dépendance.

10.3 Cobalt

Nous devrions atteindre un pic de production pour le cobalt entre 2022 et 2024, ensuite l'extraction minière devrait se stabiliser pour atteindre les 200 ktonnes annuelles. Aux alentours de 2024 l'offre devrait peiner à répondre à la demande, que l'on retienne le scénario STEPS ou SDS. 2028 marquerait l'année où la demande de Cobalt excéderait largement l'offre du marché si l'on retient le scénario le plus raisonnable. On peut donc s'attendre à ce que le prix du Cobalt augmente fortement dans les prochaines années bien qu'en 2023 l'offre devrait assez aisément surpasser la demande. La demande de Cobalt est probablement plus compliquée à anticiper que celle du cuivre et du lithium cité précédemment. Nous savons qu'environ 50% de la demande de cobalt à ce jour est guidée exclusivement par la production de batteries. Cette proportion devrait évoluer à la hausse avec l'augmentation des ventes de véhicules électriques dans les prochaines années. Cela dit, les avancées technologiques en termes d'efficacité des batteries, ne cessent de faire varier les quantités de cobalt qui pourraient être nécessaires. Les choix effectués par les constructeurs jouent également un rôle, à savoir s'ils vont opter pour une batterie contenant plus ou moins de telle ou telle matière première. D'autant plus que le Cobalt contrairement au cuivre ou au lithium peut être substitué facilement. Tesla a annoncé en 2020, qu'à l'avenir leurs véhicules ne contiendraient plus de cobalt. Le constructeur produisant déjà une bonne partie de sa flotte avec les des batteries NCA8 contiennent davantage de nickel et bien moins de cobalt. Cela dit, la demande de nickel est elle aussi tendue. Le fait d'opter pour une matière première ou une autre, risque simplement de déplacer le problème ailleurs. C'est pourquoi, Tesla en collaboration avec le constructeur CATL tenteraient de produire une batterie au lithium fer phosphate (LFP9), ne contenant ni cobalt, ni nickel (FR24 News France 2020). La production de batterie ne contenant pas de cobalt permettrait de mieux contrôler le coût de production des batteries, en privilégiant une matière première moins coûteuse et volatile.

⁸ NCA : Nickel Lithium Cobalt Graphite

⁹ LFP : Lithium Fer Graphite

Les avancées technologiques et les choix des constructeurs vont surtout avoir un impact sur la demande de cobalt, mais d'autres facteurs viennent affecter ce marché. Le cobalt est majoritairement produit comme un sous-produit de l'extraction minière de cuivre et de nickel, soit 90% (IEA 2021). Par conséquent, si aucune expansion des mines de cuivre et de nickel n'est prévue, il y a peu de chance pour que la quantité de cobalt extraite augmente dans les années à venir (IEA 2021). D'autant que le cobalt au même titre que le lithium a été victime d'une extrême volatilité des prix entre 2017 et 2018. La forte dépréciation des prix en 2019 a mis un frein aux projets d'expansion et certaines compagnies minières telles que Glencore ont mis à l'arrêt certaines mines en République Démocratique du Congo comme vu précédemment (IEA 2021). Si des instabilités du marché persistent, il est difficile de voir apparaître de nouveaux projets pour répondre à une augmentation de la demande future. Cependant des avancées en termes de procédés de production devraient permettre d'extraire une quantité jusqu'à 2 fois plus importante de minerai, comme le prouve l'entreprise Kamoto Copper Company en RDC et d'accroître les quantités disponibles, sans pour autant avoir à repartir de zéro. Toutefois, si l'écart entre l'offre et la demande devient trop grand, l'augmentation des prix permettra de voir apparaître de nouveaux projets. Cependant pour envisager l'apparition de projets de grande envergure, il faudra attendre entre plus de 12 et 16 ans, cette période correspondant à l'établissement de nouvelles mines de nickel et de cuivre (IEA 2021).

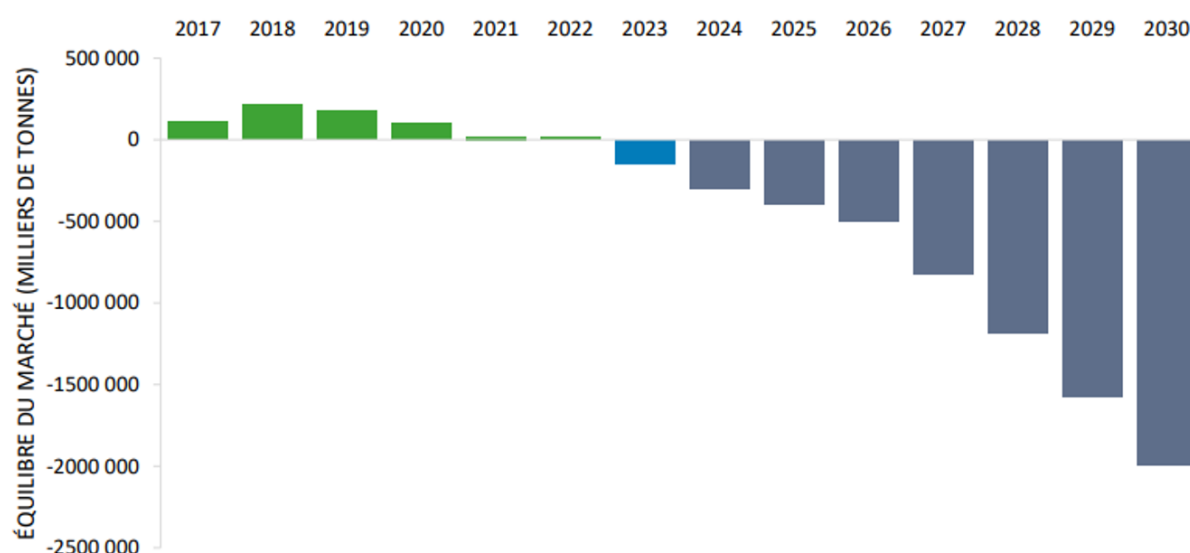
Le marché du Cobalt est très concentré, car la RDC est à l'origine de 70% de l'extraction minière et la Chine 70% du cobalt raffiné (IEA 2021). La Chine détient également de nombreuses parts dans des compagnies minières en RDC. Par conséquent, si un seul de ces pays est victime d'instabilité politique, ou de quelconque incident cela pourrait avoir un impact dramatique sur les quantités offertes et donc sur les prix. Pour rappel la RDC fait partie des pays les plus instables politiquement, avec un taux de perception de la corruption les plus élevés du monde en se classant 170ème sur 179 pays en 2020 (Transparency International 2021). Pour mémoire, la 2ème guerre du Congo a pris fin en 2003. Ce conflit a été le plus meurtrier depuis la Seconde guerre mondiale (Desjardins 2017). Tous ces faits soulignent la fragilité de l'offre de cobalt émanant de ce pays. Cette dépendance devrait se poursuivre car très peu de projets sont envisagés dans d'autre pays, ce qui rend malheureusement beaucoup d'autres acteurs fortement dépendants de ces deux pays uniquement.

On estime que 10 à 20% de la production minière de la RDC est issue de l'exploitation artisanale à petite échelle (Ziswa 2021). Dans une certaine mesure, il n'y a aucun problème à ce qu'une partie de la production soit assurée par de petits producteurs, d'autant que ceux-ci peuvent adapter plus facilement leur production, en fonction de l'évolution des prix (IEA 2021).

Le vrai problème porte avant tout sur les conditions de travail et surtout la main d'œuvre. L'UNICEF estime qu'il existe 100'000 travailleurs dans les mines artisanales en RDC, dont 40'000 seraient des enfants âgés parfois de moins de 7 ans et travaillant 12 heures par jour (Desjardins 2017). Hélas ce n'est pas tout, ces mines artisanales sont souvent clandestines et aucune mesure d'hygiène et de sécurité des travailleurs n'existent. Par conséquent, beaucoup d'acteurs de la demande, que ce soient les constructeurs automobiles, mais aussi les fabricants de batterie tendent à totalement se soustraire d'un approvisionnement très discutable. C'est la raison pour laquelle, Tesla cherche à ne plus utiliser de Cobalt dans ses batteries. Si tous les acteurs tendent à stopper, ou du moins à limiter leur approvisionnement de cobalt issu de mines artisanales, le risque est de voir disparaître une grosse partie de la production. Ce qui évidemment ferait exploser les prix et rendrait le pays encore plus instable économiquement et financièrement. Pour rappel la RDC se classe 178ème sur 184 pays en termes de PIB par habitants soit 455\$ (Desjardins 2017), pour donner un ordre d'idée la Suisse à un PIB/hab supérieur à 71'000\$ (La Banque Mondiale 2021). Ce qui fait de la RDC l'un des pays les plus pauvres au monde. D'autres mesures doivent être prises, pour tenter de formaliser la production de ces mines souvent clandestines, en les rendant plus sûres, et en interdisant le travail des enfants (IEA 2021). Une meilleure répartition des richesses devra donc être faite pour rémunérer justement les travailleurs et pour s'assurer que de jeunes enfants ne soient pas contraints d'y travailler.

10.4 Graphite

Figure 11 : Evolution de l'équilibre du marché du Graphite naturel de 2017 à 2030.



(Benchmark Mineral Intelligence)

A présent nous allons nous pencher sur le cas du graphite. Là, encore nous observons que l'offre aura de la peine à répondre à la demande, 2021 et 2022 sont déjà des années très compliquées (cf. Figure 6). C'est en 2023 que le marché décrochera véritablement avec une première année déficitaire. A l'horizon 2030, c'est de manière exponentielle que l'écart entre l'offre et la demande se creuse, avec quasiment 2 millions de tonne en moins. Evidemment cette situation aura pour conséquence de faire augmenter les prix et cela bien avant la première pénurie de 2023.

La question est de savoir ce qui creuse cet écart entre l'offre et la demande. D'après Benchmark Mineral Intelligence, à ce jour, 22% du graphite naturel et synthétique est utilisé pour la conception de batteries. D'ici 2030, on estime que cette proportion sera multipliée par plus de 3, soit 70% de la demande. Le graphique semble être privilégié au graphite synthétique pour la conception de batterie. La proportion de graphite naturel utilisée dans la production de batteries est passée de 39% à 49% entre 2020 et 2021 (Nouveau Monde 2021). Par conséquent, c'est bien l'évolution du secteur de l'automobile électrique qui génère cet excédent de demande. Le problème du graphite au même titre que le lithium, c'est que ces 2 éléments sont présents dans tous les modèles de batterie que l'on utilise que ce soient les modèles NMC, NCA, ou LFP. Donc, dans l'état actuel des choses, peu importe l'évolution du marché, pour un modèle NMC contenant moins de cobalt, voire un modèle LFP ne contenant ni cobalt, ni manganèse, le graphite comme le lithium n'ont pas encore trouvé leur substitut.

Cependant, le graphite synthétique pourrait dans une certaine mesure soutenir le marché du graphite naturel, ce qui limiterait une évolution trop importante des prix. Soulignons, qu'il est très difficile d'estimer quelle part du graphite synthétique sera nécessaire pour produire des batteries. Nous ne sommes même pas certains, que l'offre de coke de pétrole¹⁰ permettant de fabriquer le graphite synthétique, parviendra à subvenir aux besoins liés à l'augmentation de la demande.

Enfin, le graphite, comme nombre de matériaux objets de cette étude, provient quasiment et exclusivement que d'un seul pays, la Chine. Par conséquent la chaîne d'approvisionnement est relativement dangereuse, car si une interruption de production, ou l'interdiction de faire transiter du graphite en provenance de Chine intervient, ce sont tous les acteurs qui seront impactés. Par conséquent, de nouveaux projets doivent être envisagés, notamment en Turquie. La production turque permettrait de fournir les constructeurs européens, et de diversifier la source d'approvisionnement à l'échelle mondiale.

¹⁰ Coke de pétrole : coke produit à partir de charbon

10.5 Manganèse

Nos estimations nous ont permis d'identifier que la demande de ce matériau dans la conception de batterie représente actuellement une partie quasiment infime de l'offre globale. Cette partie restera inférieure 1 ou 2% même d'ici à 2030. L'offre devrait largement être en mesure de pallier une éventuelle augmentation. De plus, les prévisions de l'International Energy Agency prévoient que c'est le modèle de batteries NMC-811 qui devrait dominer le marché des véhicules légers, avec approximativement 60% des parts de marché en 2030. Ce modèle est celui qui demande le moins de manganèse de toute la gamme NMC. Enfin autre point anecdotique, dans la gamme des véhicules électriques lourds, tels que les camions et les bus, ce sont les batteries LFP, qui devraient continuer à dominer totalement le marché avec plus de 90-95% des parts. Pour rappel, ce type de batterie ne contient pas de manganèse et de cobalt (IEA 2021)

11. Le recyclage une nouvelle source d'approvisionnement.

Comme vu précédemment pour la plupart de nos matières premières faisant l'objet de notre étude, à court terme l'offre devrait parvenir à répondre à la demande croissante, mais à plus long terme l'équilibre risque d'être bouleversé si aucun investissement n'est réalisé rapidement. Peu importe le scénario retenu, des pénuries sont à prévoir dans la prochaine décennie ce qui évidemment risquerait de faire envoler les prix. Il paraît donc compliqué dans l'état actuel du marché, de voir une augmentation exponentielle des ventes de véhicules électriques car ceux-ci ne seront probablement pas suffisamment compétitifs d'un point de vue prix. Maintenant les avancées technologiques peuvent permettre d'entrevoir l'utilisation d'autres matériaux ou du moins une diminution des quantités actuellement nécessaires. Ce qui évidemment faciliterait la vie des constructeurs automobiles et celle des autres acteurs de la demande.

Enfin il existe une autre option, qui pourrait permettre de répondre à la demande future pour ces matières premières. Le recyclage pourrait et aura probablement un rôle très important à jouer. Ce qui détermine principalement l'adoption du recyclage vient de sa rentabilité. En effet, si le coût de l'extraction minière est moins élevé que le coût du recyclage, compétitivement parlant, l'élément recyclé même à pureté égale ne sera pas du tout attractif pour un potentiel acheteur. Si le marché se dirige vers une pénurie et donc une augmentation des prix, des centres de recyclage vont probablement apparaître car beaucoup plus rentables. Maintenant pour que le prix soit compétitif cela nécessite une position géographique intéressante, une proximité avec les centres de collectes et le marché secondaire ainsi qu'un processus de recyclage bien maîtrisé (UNCTAD 2020).

Le prix n'est pas l'unique facteur expliquant l'adoption à grande échelle du recyclage. Le recyclage dépend énormément de la quantité d'éléments en fin de vie à recycler, de la proportion et de la qualité de la matière première obtenue à l'issue du procédé. Dans le cas du cuivre par exemple, on estime en 2018 que 1/3 de la consommation mondiale est d'origine recyclée. C'est environ 40-50% du cuivre en fin de vie qui est recyclé (IEA 2021). Cette proportion est énorme et elle est rendue possible car son recyclage est souvent plus simple, du moins mieux maîtrisé et moins cher que pour nos autres matières premières. Le cuivre obtenu de la filière recyclage dispose d'une qualité quasiment identique à celui que l'on retrouve sur le marché. Donc si la proportion de cuivre recyclé sur le marché reste inchangée, elle devrait couvrir la demande pour plusieurs années, voire décennies.

Le cobalt et le manganèse sont eux aussi recyclés dans une proportion assez élevée, selon l'International Energy Agency, aux alentours de 30-35% du cobalt est recyclé en fin de vie (IEA 2021) contre environ un peu plus de 50% pour le manganèse en 2011 (UNCTAD 2020). Ces deux éléments sont recyclés dans une proportion assez élevée, mais seule une infime quantité est issue du recyclage de batteries. Dans le cas du manganèse, cela n'a rien d'étonnant puisqu'il n'est utilisé que dans une proportion inférieure à 1% pour produire des batteries. La majeure partie du manganèse provient du recyclage de l'acier. Pour le cobalt c'est le même constat, la majeure partie est issue du recyclage d'autres éléments que ceux des batteries tels que les super alliages. La quantité d'éléments arrivant en fin de vie couplée à un processus de recyclage bien maîtrisé rend le marché secondaire de ces 2 éléments profitable.

Pour ce qui est du lithium et du graphite, du point de vue du recyclage c'est beaucoup plus compliqué. En effet on estime qu'environ 1% du lithium et 1% du graphite en fin de vie sont recyclés (UNCTAD 2020). Pourtant ces 2 éléments peuvent être recyclés de manière quasiment infinie. Seul bémol à leur processus de recyclage, la technologie actuelle et les moyens déployés ne permettent pas de récupérer l'élément sous forme suffisamment pure, pour être réemployés notamment dans des batteries. D'autant que le marché du recyclage des batteries lithium-ion est quasiment inexistant, car il est très difficile d'extraire et traiter séparément chaque élément présent dans la batterie avec les technologies actuelles de manière économiquement viable (UNCTAD 2020). Si le taux de recyclage de ces éléments évolue à l'avenir, il servirait principalement à d'autres usages moins exigeants que celui de la fabrication des batteries. Cependant avec l'augmentation de véhicules électriques présents sur le marché, et donc de batteries arrivant en fin de vie, on peut s'attendre à ce que la filière recyclage se développe pour traiter chacune des matières premières présentes dans les batteries. Selon les avancées technologiques futures, cette source d'approvisionnement secondaire pourrait venir épauler l'offre de nos différentes matières, ce qui pourrait dans une certaine mesure limiter une éventuelle pénurie.

12. Conclusion

Nous arrivons à présent au terme de notre travail. La voiture électrique devient un mode de transport de plus en plus en vogue ces dernières années et d'après les prévisions cette tendance ne devrait pas s'inverser, avec une parité des ventes dès 2030 avec les véhicules à combustion. Malheureusement qui dit électrique, dit nouvelles technologies et nouveaux matériaux rentrant dans sa conception. Il y a quasiment 6 fois plus de minéraux présents dans une voiture électrique que dans une voiture thermique.

Le but de ce travail était donc d'identifier dans quelle mesure l'essor du véhicule électrique allait impacter le marché des matières premières sous-jacentes. Nous avons retenu 5 matières premières, le cuivre, le lithium, le cobalt, le manganèse et le graphite. Le constat est sans appel, peut être à l'exception du manganèse car d'après notre étude il ne devrait pas trop souffrir de l'accroissement de la demande issue de la fabrication de batterie lithium-ion. Cela-dit pour les autres éléments on ne peut pas dire que l'avenir soit vraiment radieux. De multiples pénuries sont à prévoir, au cours de la décennie principalement pour le lithium, le cobalt et le graphite. Evidemment, si un déficit sur le marché survient le risque est de voir les prix exploser. Ce qui aurait pour effet immédiat de freiner les ventes de véhicules électriques qui deviendraient trop onéreux. Cependant, une envolée des prix pourrait également venir accélérer les projets d'expansion et les nouveaux projets, ce qui permettrait de limiter l'écart entre l'offre et la demande. Ce phénomène s'est d'ailleurs déjà réalisé entre 2016 et 2018.

Ce travail a également mis l'accent sur la faiblesse de la chaîne d'approvisionnement. Dans l'état actuel, le marché dispose de trop peu d'acteurs à l'origine de l'extraction des principaux minéraux et la Chine a la main mise sur pratiquement l'intégralité de l'offre de minerai raffiné. Cette tendance ne devrait pas s'inverser à l'avenir. Par conséquent si l'un de ses acteurs fait défaut les effets sur le marché vont être effroyables. D'autant que les pays producteurs, notamment de lithium, et de cobalt reposent sur un fonctionnement très discutable et peu durable. Ils sont souvent sujets aux aléas climatiques (sécheresse, pollution) ou aux vicissitudes humaines (non-respect des droits de l'homme, instabilité politique, non protection des travailleurs). De plus le lithium, le cobalt et le graphite sont des matières premières disposant d'un marché encore trop flou, avec très peu de transparence concernant la production et les prix. Ce qui amène encore plus d'incertitudes.

Malheureusement l'évolution du marché des véhicules électriques est encore trop compliquée à prévoir, on présage que les ventes vont augmenter, mais il est difficile de prévoir dans quelle proportion exactement. Les progrès réalisés en termes de recherche et développement viennent aussi ajouter de l'incertitude, car on ne sait pas quel modèle de batterie sera retenu dans le futur. Bien que dans les faits, les batteries de type NMC devraient dominer le marché

au courant de la prochaine décennie. Il reste tout de même difficile de prédire quelle matière première subira le plus le marché. Les récents événements, entre 2016 et 2019 illustrent parfaitement ce phénomène. C'est pour cette raison que très peu de projets d'expansion majeurs ou de construction sont prévus pour le moment concernant l'extraction. Ce qui évidemment n'annonce rien de positif pour l'avenir.

Bien que la prévision future soit assez pessimiste il existe de nombreuses solutions :

- Réfléchir à diversifier les sources d'approvisionnement, pour minimiser les risques. De nouveaux projets d'investissement doivent être réalisés dans d'autres lieux que ceux identifiés au cours de notre travail.
- Tenter d'améliorer dans la mesure du possible chaque étape de la chaîne de valeur, de l'extraction, à l'assemblage de batteries jusqu'à la commercialisation des voitures électriques. Une amélioration des moyens technologiques propres à la production minière par exemple, permettrait d'extraire une quantité de matériaux clés plus importante, tout en limitant l'excédent d'énergie et de ressources utilisées (eau, carburant, électricité). Cet axe d'amélioration regroupe également, les recherches qui doivent être entreprises pour donner la possibilité d'avoir recours à une quantité plus faible de minéraux ou d'opter pour des substituts.
- Garantir une meilleure transparence du marché et le standardiser. Ce point vise principalement le lithium, cobalt et graphite. Ces 3 éléments disposent d'un marché encore peu mature, ne laissant filtrer que très peu d'informations aux regards du monde extérieur. Ce qui implique forcément davantage d'incertitudes et un risque de très grande volatilité. Le cobalt est le seul élément parmi les trois disposant d'un futur, alors que les autres sont traités exclusivement de gré à gré. Ce qui ne laisse pas beaucoup de marge de manœuvre quant à la transparence des prix. Par standardisation, nous entendons par là, mettre en place des normes environnementales et sociales. L'application de ces règles permettrait de rendre la production plus pérenne et par conséquent améliorer la réactivité du marché.
- Enfin dernier axe d'amélioration, promouvoir davantage le recyclage à l'avenir. Le recyclage comme discuté plus haut permettrait de soutenir l'offre, en apportant une nouvelle source d'approvisionnement. En plus, de venir soutenir la demande grandissante, la quantité de déchets issus des batteries et des véhicules électriques promet d'augmenter très rapidement, rendant son exploitation plus rentable avec des économies d'échelle potentielles. Evidemment, recycler n'aurait pas uniquement une dimension lucrative, mais également environnementale, en limitant la pollution des sols. C'est donc un véritable marché secondaire qui s'ouvre.

Bibliographie

AZOMATERIALS, 2016. The Properties and Effects of Manganese as an Alloying Element. In : *AZoM.com* [en ligne]. 20 juillet 2016. [Consulté le 16 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13027>.

BASOV, Vladimir, 2021. The world's top 10 largest copper producers in 2020 - report. In : *Kitco News* [en ligne]. 10 mars 2021. [Consulté le 10 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.kitco.com/news/2021-03-10/The-world-s-top-10-largest-copper-producers-in-2020-report.html>.

BFMTV, 2020. Les mesures mises en place pour favoriser l'achat de voitures électriques sont-elles efficaces ? In : *BFMTV* [en ligne]. 30 novembre 2020. [Consulté le 17 juin 2021]. Disponible à l'adresse : https://www.bfmtv.com/pratique/comparateur-assurance/assurance-auto-moto/les-mesures-mises-en-place-pour-favoriser-l-achat-de-voitures-electriques-sont-elles-efficaces_AN-202011300287.html.

BLOOMBERGNEF, 2020. Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh. In : *BloombergNEF* [en ligne]. 16 décembre 2020. [Consulté le 17 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>.

BOLAND, M.A et KROPSCHOT, S.J, 2011. Cobalt—For Strength and Color. In : *USGS* [en ligne]. août 2011. [Consulté le 9 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://pubs.usgs.gov/fs/2011/3081/pdf/fs2011-3081.pdf>.

BRINLEY, Stephanie, 2020. EV Production: Where, How Soon? In : *sme.org* [en ligne]. 31 août 2020. [Consulté le 15 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.sme.org/technologies/articles/2020/august/ev-production-where-how-soon/>.

CANNON, William F, 2014. *Manganese—It Turns Iron Into Steel (and Does So Much More)* [en ligne]. Fact Sheet. S.I. Fact Sheet. Disponible à l'adresse : <https://pubs.usgs.gov/fs/2014/3087/pdf/fs2014-3087.pdf>.

COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION INC., 2017. HOW COPPER DRIVES ELECTRIC VEHICLES. In : *Copper Development Association Inc.* [en ligne]. 2017. [Consulté le 17 juin 2021]. Disponible à l'adresse : https://www.copper.org/publications/pub_list/pdf/A6192_ElectricVehicles-Infographic.pdf.

DESJARDINS, Jeff, 2017. Cobalt: A Precarious Supply Chain. In : *Visual Capitalist* [en ligne]. 9 janvier 2017. [Consulté le 10 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.visualcapitalist.com/cobalt-precious-supply-chain/>.

FARCHY, Jack et WARREN, Hayley, 2018. China Has a Secret Weapon in the Race to Dominate Electric Cars. In : *Bloomberg.com* [en ligne]. 2 décembre 2018. [Consulté le 25 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.bloomberg.com/graphics/2018-china-cobalt/>.

FR24 NEWS FRANCE, 2020. Le passage de Tesla à des batteries sans cobalt est sa décision la plus importante à ce jour. In : *FR24 News France* [en ligne]. 11 juillet 2020. [Consulté le 3 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.fr24news.com/fr/a/2020/07/le-passage-de-tesla-a-des-batteries-sans-cobalt-est-sa-decision-la-plus-importante-a-ce-jour.html>.

FRANCE 24, 2021. Joe Biden annonce le retour des États-Unis dans l'accord de Paris sur le climat. In : *France 24* [en ligne]. 21 janvier 2021. [Consulté le 16 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.france24.com/fr/am%C3%A9riques/20210121-joe-biden-annonce-le-retour-des-%C3%A9tats-unis-dans-l-accord-de-paris-sur-le-climat>.

FRANCE INFO, 2020. VIDEO. Lithium, cobalt, manganèse, cuivre, aluminium : produire une voiture électrique est-il vraiment écologique ? In : *Franceinfo* [en ligne]. 17 novembre 2020. [Consulté le 22 juin 2021]. Disponible à l'adresse : https://www.francetvinfo.fr/meteo/climat/video-lithium-cobalt-manganese-cuivre-aluminium-produire-une-voiture-electrique-est-il-vraiment-ecologique_4183381.html.

FUTURA, 2021. Quand la première voiture électrique a-t-elle été inventée ? In : *Futura-science* [en ligne]. 16 juin 2021. [Consulté le 16 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.futura-sciences.com/tech/questions-reponses/voiture-electrique-premiere-voiture-electrique-t-elle-ete-inventee-966/>.

FUTURA, [sans date]. Cuivre. In : *Futura* [en ligne]. [Consulté le 9 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-cuivre-14798/>.

GELDRON, Alain, 2017. L'ÉPUISEMENT DES MÉTAUX ET MINÉRAUX : FAUT-IL S'INQUIÉTER ? In : . juin 2017. pp. 23.

GLENCORE, 2019. 2019 Half-Year Report. In : *Glencore* [en ligne]. 2019. [Consulté le 22 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.glencore.com/media-and-insights/news/2019-Half-Year-Report-release>.

ICSG, 2020. The world copper factbook 2020. In : [en ligne]. 2020. [Consulté le 21 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.icsg.org/index.php/component/jdownloads/finish/170/3046>.

IEA, 2020. Global electric car stock, 2010-2019. In : *IEA* [en ligne]. 16 octobre 2020. [Consulté le 21 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-car-stock-2010-2019>.

IEA, 2021. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. In : . mai 2021. pp. 287.

INRAP, 2016. L'âge du Bronze. In : *Inrap* [en ligne]. 19 janvier 2016. [Consulté le 8 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.inrap.fr/l-age-du-bronze-10223>.

INVESTING, 2021. Lithium Carbonate 99%Min China Spot Historique des cours - Investing.com. In : *Investing.com France* [en ligne]. 1 juillet 2021. [Consulté le 2 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://fr.investing.com/commodities/lithium-carbonate-99-min-china-futures-historical-data>.

KLETSY, Victoria, 2021. En Norvège, il s'est vendu en 2020 plus de voitures électriques que de véhicules thermiques. In : *Boursorama* [en ligne]. 5 janvier 2021. [Consulté le 16 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.boursorama.com/bourse/actualites/en-norvege-il-s-est-vendu-en-2020-plus-de-voitures-electriques-que-de-vehicules-thermiques-9547c3a575c3a341fe03dd7043d6d11f>.

LA BANQUE MONDIALE, 2021. PIB par habitant, (\$ PPA internationaux courants). In : [en ligne]. 2021. [Consulté le 7 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NY.GDP.PCAP.PP.CD>.

LAMBERT, Fred, 2016. Breakdown of raw materials in Tesla's batteries and possible bottlenecks. In : *Electrek* [en ligne]. 1 novembre 2016. [Consulté le 17 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://electrek.co/2016/11/01/breakdown-raw-materials-tesla-batteries-possible-bottleneck/>.

LAROCCA, Gregory M, 2020. Global Value Chains: Lithium in Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles. In : . juillet 2020. pp. 39.

LARSEN, Nicholas, 2019. Why Have Cobalt Prices Crashed. In : *International Banker* [en ligne]. 31 juillet 2019. [Consulté le 22 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://internationalbanker.com/brokerage/why-have-cobalt-prices-crashed/>.

LEFEBVRE, Gaétan et TAVIGNOT, Diane, 2020. Le marché du lithium en 2020 : enjeux et paradoxes. In : *minéral info* [en ligne]. 12 mars 2020. [Consulté le 9 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.mineralinfo.fr/ecomine/marche-lithium-en-2020-enjeux-paradoxes>.

LEGUÉRINE, Mathieu et LE GLEUHER, Maïté, 2020. Le graphite naturel et synthétique : une offre excédentaire que la demande atone des aciéristes et la progression lente du secteur des véhicules électriques et hybrides ne suffisent pas à réduire. In : *MineralInfo* [en ligne]. 15 juin 2020. [Consulté le 3 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.mineralinfo.fr/ecomine/graphite-naturel-synthetique-offre-excedentaire-demande-atone-acieristes-progression-lente>.

LEGUÉRINEL et GLEUHER, 2019. Le cuivre : revue de l'offre mondiale en 2019. In : *BRGM* [en ligne]. décembre 2019. [Consulté le 21 juin 2021]. Disponible à l'adresse : http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Panoramas_Metaux_Strateg/rp-69037-fr_le_cuivre-revue_de_loffre_mondiale.pdf.

LEPAN, Nicholas, 2019. The New Energy Era: The Lithium-Ion Supply Chain. In : *Visual Capitalist* [en ligne]. 11 décembre 2019. [Consulté le 17 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.visualcapitalist.com/the-new-energy-era-the-lithium-ion-supply-chain/>.

LES ECHOS, 2019. *Pourquoi la bataille du lithium ne fait que commencer* [en ligne]. 2019. [Consulté le 10 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.youtube.com/watch?v=5TFzo3cfzSE>.

LOUVET, Benjamin, 2018. Voiture électrique : quel impact sur la demande de métaux ? In : *Ofi asset management* [en ligne]. février 2018. [Consulté le 18 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.ofi-am.fr/support/voiture-electrique-quel-impact-sur-la-demande-de-metaux-/5a995d8498029>.

LOVETT, Patrick et ESSO, Gaelle, 2018. *Sous le désert salé, le lithium, or blanc des Andes* [en ligne]. France 24. 22 novembre 2018. [Consulté le 9 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.youtube.com/watch?v=rmoCOF3AFo8>.

MANTHEY, Nora, 2018. CATL & BYD rise to join world's Top 3 battery makers. In : *electrive.com* [en ligne]. 6 juin 2018. [Consulté le 15 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.electrive.com/2018/06/06/catl-byd-rise-in-rank-to-join-worlds-top-3-battery-makers/>.

MATTHEWS, Daniel, 2020. Global Value Chains: Cobalt in Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles. In : *Office of industries* [en ligne]. mai 2020. [Consulté le 21 juin 2021]. Disponible à l'adresse : https://www.usitc.gov/publications/332/working_papers/id_wp_cobalt_final_052120-compliant.pdf.

MCCARTHY, Niall, 2018. Netherlands Top For Electric Vehicle Charger Density [Infographic]. In : *Forbes* [en ligne]. 8 octobre 2018. [Consulté le 5 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.forbes.com/sites/niallmccarthy/2018/10/08/netherlands-top-for-electric-vehicle-charger-density-infographic/>.

MEHTA, Dev et SENN-KALB, Leonie, 2021. *In-depth : eMobility 2021* [en ligne]. S.I. [Consulté le 17 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.statista.com/study/49240/emobility/>.

MINING.COM, 2018. NMC batteries dominating EV – sales to reach 63% of global market. In : *MINING.COM* [en ligne]. 19 octobre 2018. [Consulté le 18 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.mining.com/nmc-batteries-dominating-ev-sales-reach-63-global-market/>.

NOUVEAU MONDE, 2021. *PROPULSER LA TRANSITION* [en ligne]. juillet 2021. S.I. : s.n. Disponible à l'adresse : https://nouveaumonde.group/wp-content/uploads/2021/02/NMG_Presentation_corporative.pdf.

OEC.WORD, 2020a. Cobalt Oxides and Hydroxides. In : *OEC - The Observatory of Economic Complexity* [en ligne]. 2020. [Consulté le 14 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://app-bee.oec.world/>.

OEC.WORD, 2020b. Lithium carbonates. In : *OEC.WORD* [en ligne]. 2020. [Consulté le 26 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://oec.world/en/profile/hs92/lithium-carbonates?yearSelector1=tradeYear1>.

OEC.WORD, 2020c. Manganese Ore (HS: 2602) Product Trade, Exporters and Importers. In : *OEC.WORD* [en ligne]. 2020. [Consulté le 3 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://oec.world/en/profile/hs92/manganese-ore?yearSelector1=tradeYear1>.

OEC.WORD, 2020d. Natural graphite in powder or flakes. In : *OEC.WORD* [en ligne]. 2020. [Consulté le 3 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://oec.world/en/profile/hs92/natural-graphite-in-powder-or-flakes?yearSelector1=tradeYear1>.

OEC.WORD, 2020e. Which countries import Cobalt ores and concentrates? (2019). In : [en ligne]. 2020. [Consulté le 26 avril 2021]. Disponible à l'adresse : https://oec.world/en/visualize/tree_map/hs92/import/show/all/5260500/2019/.

OEC.WORD, 2021. Copper ores and concentrates. In : *OEC.WORD* [en ligne]. 2021. [Consulté le 7 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://oec.world/en/profile/hs92/copper-ores-and-concentrates>.

ORBIS, [sans date]. Orbis | Company information across the globe | BvD. In : [en ligne]. [Consulté le 17 juin 2021]. Disponible à l'adresse : https://orbis.bvdinfo.com/version-202164/orbis/1/Companies/report/Index?format=_standard&BookSection=GLOBALSTANDARDFORMAT&seq=0.

PERRIN, Brice, 2019. La voiture électrique, vraiment propre ? In : *Auto Journal* [en ligne]. 5 avril 2019. [Consulté le 8 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.autojournal.fr/environnement/la-voiture-electrique-vraiment-propre-174824.html>.

PONTES, Jose, 2021. Global Electric Vehicle Top 20 — EV Sales Report | CleanTechnica. In : *CleanTechnica* [en ligne]. 4 février 2021. [Consulté le 15 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://cleantechnica.com/2021/02/04/global-electric-vehicle-top-20-ev-sales-report/>.

QUÉBEC ENERGIE ET RESSOURCES NATURELLES, 2019. Graphite : propriétés, usages et types de gisement. In : *Québec Energie et ressources naturelles* [en ligne]. 2019. [Consulté le 9 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/mineraux/mineraux-proprietes-graphite.jsp>.

ROBINSON, Gilpin R, HAMMARSTROM, Jane M et OLSON, Donald W, 2017. *Graphite* [en ligne]. Professional Paper. S.I. Professional Paper. Disponible à l'adresse : <https://pubs.usgs.gov/pp/1802/j/pp1802j.pdf>.

STATISTA, 2018. Lithium compounds and metals global demand by end use 2022. In : *Statista* [en ligne]. septembre 2018. [Consulté le 10 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.statista.com/statistics/968391/forecasted-distribution-lithium-compounds-metals-demand-worldwide-by-end-use/>.

STATISTA, 2019a. • Lithium production share worldwide by company 2019 | Statista. In : *Statista* [en ligne]. septembre 2019. [Consulté le 10 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.statista.com/statistics/606799/distribution-of-world-lithium-mineral-production-by-producer/>.

STATISTA, 2019b. Global demand of key battery raw materials in 2018, by mineral. In : *Statista* [en ligne]. décembre 2019. [Consulté le 17 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.statista.com/statistics/1099566/global-demand-of-battery-raw-materials/>.

STATISTA, 2019c. Li-ion battery production capacity by 2028, by company. In : *Statista* [en ligne]. août 2019. [Consulté le 15 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.statista.com/statistics/1103401/predicted-lithium-ion-battery-capacity-by-company/>.

STATISTA, 2019d. Projected global demand of key battery raw materials in 2028, by mineral. In : *Statista* [en ligne]. décembre 2019. [Consulté le 22 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.statista.com/statistics/1103214/battery-raw-materials-demand-forecast/>.

STATISTA, 2020a. Cobalt production volume by company worldwide. In : *Statista* [en ligne]. avril 2020. [Consulté le 2 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.statista.com/statistics/1172194/global-leading-cobalt-producing-companies-production-volume/>.

STATISTA, 2020b. World copper consumption distribution by end use 2019. In : *Statista* [en ligne]. octobre 2020. [Consulté le 10 mai 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.statista.com/statistics/605463/distribution-of-copper-consumption-worldwide-by-end-use/>.

STATISTA, 2021a. Lithium end usage in the global market share 2020. In : *Statista* [en ligne]. février 2021. [Consulté le 10 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.statista.com/statistics/268787/lithium-usage-in-the-world-market/>.

STATISTA, 2021b. Number of cars sold worldwide between 2010 and 2021. In : *Statista* [en ligne]. février 2021. [Consulté le 16 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.statista.com/statistics/200002/international-car-sales-since-1990/>.

TRANSPARENCY INTERNATIONAL, 2021. 2020 - CPI. In : *Transparency.org* [en ligne]. 2021. [Consulté le 3 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.transparency.org/en/cpi/2020>.

UNCTAD, 2020. *Commodities at a Glance: Special Issue on Strategic Battery Raw Materials* [en ligne]. S.I. : UN. [Consulté le 9 avril 2021]. *Commodities at a Glance*. ISBN 978-92-1-004829-3. Disponible à l'adresse : <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210048293>.

UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT, 2020. *Commodities at a Glance: Special Issue on Strategic Battery Raw Materials* [en ligne]. S.I. : UN. [Consulté le 8 avril 2021]. *Commodities at a Glance*. ISBN 978-92-1-004829-3. Disponible à l'adresse : <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210048293>.

USGS, 2020. Cobalt. In : *USGS* [en ligne]. 2020. [Consulté le 22 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-cobalt.pdf>.

USGS, 2021a. Cobalt. In : *USGS* [en ligne]. 2021. [Consulté le 9 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-cobalt.pdf>.

USGS, 2021b. *Copper*. Scientific Investigations Report. S.I. Scientific Investigations Report.

USGS, 2021c. Graphite (Natural). In : . 2021. pp. 2.

USGS, 2021d. Lithium. In : *USGS* [en ligne]. 2021. [Consulté le 10 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-lithium.pdf>.

USGS, 2021e. Manganese. In : *USGS* [en ligne]. 2021. [Consulté le 12 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-manganese.pdf>.

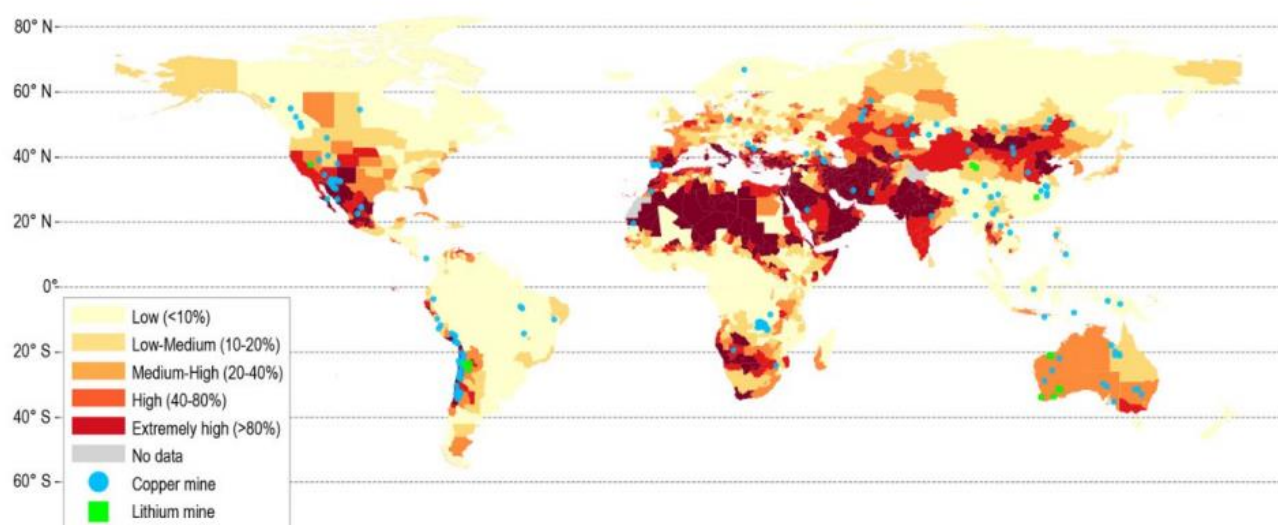
WAGNER, Isabelle, 2019. Electric Cars. In : *Statista* [en ligne]. 2019. [Consulté le 22 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.statista.com/study/62346/statista-dossierplus-on-the-electric-car-industry/>.

YU, Alice et SUMANGIL, Mitzi, 2021. Top electric vehicle markets dominate lithium-ion battery capacity growth. In : [en ligne]. 16 février 2021. [Consulté le 22 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/blog/top-electric-vehicle-markets-dominate-lithium-ion-battery-capacity-growth>.

ZISWA, Brian, 2021. Cobalt, sustainability: DRC launches monopoly over cobalt ASM to improve ESG credentials. In : *Roskill* [en ligne]. 8 avril 2021. [Consulté le 3 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://roskill.com/news/cobalt-sustainability-drc-launches-monopoly-over-cobalt-asm-to-improve-esg-credentials/>.

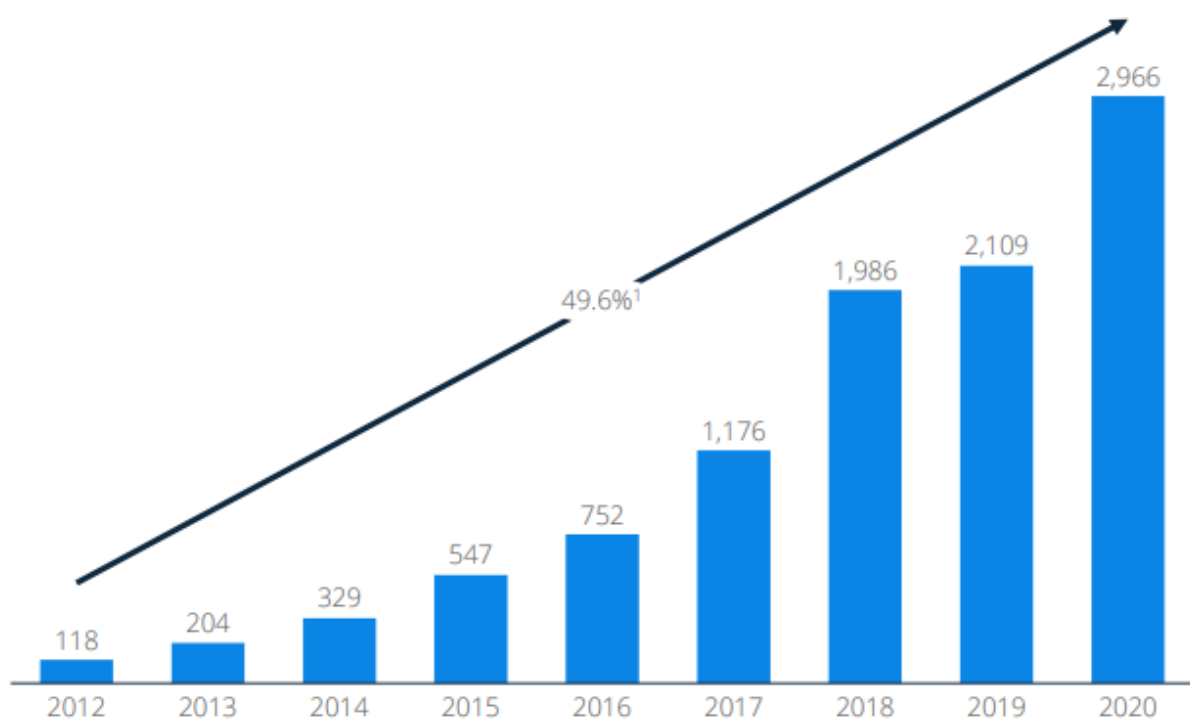
(International Energy Agency)

Annexe 2 : Share of top three producing countries in production of selected minerals and fossil fuels, 2019



(International Energy Agency)

Annexe 2 : Share of top three producing countries in production of selected minerals and fossil fuels, 2019



(International Energy Agency)