



Photo 1 : Porcelaine de la dynastie Qing.
Musée d'Honolulu – Crédit photo : Hiart (Wikipédia).

Jean-Pierre Hauet

Les enjeux du cobalt pour la mobilité électrique

Cobalt is since ancient times a strategic material used in many applications (ceramics, paints, dyes, special steel...). Demand for cobalt has grown strongly since year 2000 due to the needs of lithium-ion batteries used in computer equipment, mobile phones and tools. Demand is now circa 100,000 t/year. It is satisfied from productions located mainly in the Democratic Republic of Congo and from refining facilities located in China.

This creates a worrying strategic dependence when demand, related to the needs of the electric vehicle, is about to grow strongly.

The prospects for 2030 show that the problem must be seriously addressed. The development of electric mobility requires the definition of a cobalt plan based on three components:

- the development of mining capacities, including in Europe, and the improvement of supply chains security;
- the organization of battery recycling and the development of supply chains;
- the development of technologies much less demanding in cobalt: the NMC technology in the short term and, in a longer term, new solutions such as lithium-sulfur or lithium-air batteries. It should be the goal of a major European research and development program.

Le cobalt est depuis l'antiquité un matériau stratégique utilisé dans de nombreuses applications (céramiques, peintures, colorants, aciers spéciaux...). La demande en cobalt a crû fortement depuis l'an 2000 du fait des besoins des batteries lithium-ion utilisées dans les équipements informatiques, dans les téléphones portables et dans l'outillage. La demande atteint aujourd'hui 100 000 t/an. Elle est satisfaite à partir de productions situées majoritairement en République démocratique du Congo et d'installations de raffinage situées en Chine.

Ceci crée une dépendance stratégique préoccupante au moment où la demande, liée aux besoins du véhicule électrique s'apprête à croître fortement. Les perspectives à horizon 2030 montrent que le problème doit être traité sérieusement. Le développement de la mobilité électrique impose que soit défini un plan cobalt fondé sur trois composantes :

- le développement des capacités minières, y compris en Europe, et la sécurisation des chaînes d'approvisionnement ;
- l'organisation du recyclage des batteries ;
- le développement de filières beaucoup moins exigeantes en cobalt : les filières NMC dans un premier temps et, à plus long terme, de nouvelles filières telles que la filière lithium-soufre et la filière lithium-air. Ce devrait être l'objet d'un grand programme de recherche-développement européen.

Le cobalt est un métal clé pour la mobilité électrique dans la mesure où il est l'un des composants essentiels des batteries Li-ion. Un débat s'est engagé sur sa disponibilité et sur la dépendance vis-à-vis de certains pays producteurs qui pourraient poser problème au regard de la demande accrue liée au développement du véhicule électrique. Le présent article s'efforce de faire le point.

Le cobalt

Le cobalt est un métal qui a des propriétés physiques assez voisines de celles du fer et du nickel. Il est connu

depuis la plus haute antiquité et servait à l'époque comme pigment dans les peintures, les céramiques, le verre, les émaux, aussi bien en Chine qu'en

Egypte, en Perse, en Grèce et à Rome. Chacun a entendu parler du bleu de cobalt, un aluminat synthétisé au début du XIX^e siècle et qui est venu compléter

dans la peinture le bleu outremer fabriqué à partir du lapis-lazuli.

Plus tard le cobalt s'est imposé en métallurgie pour la fabrication d'alliages résistants, d'aciers rapides, d'aimants ou de céramiques à matrice métallique. On le rencontre également comme base de divers catalyseurs dans les industries chimiques et pétrolières. On le trouve aussi dans les pneus, les savons, les colles, etc.

Plus récemment, le cobalt est devenu l'un des composants essentiels des cathodes des batteries Li-ion, généralement sous forme d'oxyde, combiné ou non à d'autres métaux. L'électrode négative (anode) est quant à elle en graphite. En phase de décharge, l'ion Li^+ est libéré par la matrice de graphite pour laquelle il a peu d'affinité et se déplace vers l'oxyde de cobalt avec lequel il a au contraire beaucoup « d'appétence ». Lors de la charge, l'ion Li^+ est relâché par l'oxyde de cobalt et va s'insérer dans la phase graphitique (figure 1).

Le développement des batteries Li-ion pour les usages des télécommunications, de l'informatique portable et de l'outillage a entraîné une forte croissance de la demande mondiale en cobalt à partir du début des années 2000 (figure 2). Aujourd'hui, c'est le développement des batteries Li-ion pour les véhicules électriques qui est le principal vecteur de croissance et, même si les quantités en jeu sont encore relativement limitées ainsi qu'on le verra plus loin, la question de la disponibilité des ressources en cobalt est devenue une question stratégique pour l'avenir de la mobilité électrique.

Sa disponibilité et son prix sont des éléments déterminants. Ce n'est pas le seul matériau : le lithium soulève également des interrogations. L'un et l'autre pesaient, au cours des métaux observés en 2018, de façon significative dans le prix de revient des batte-

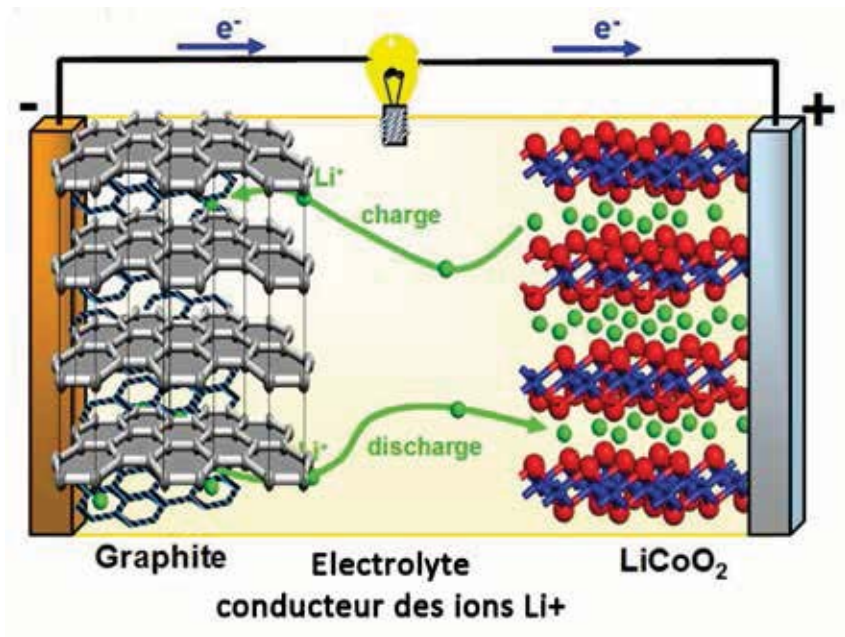


Figure 1 : Schéma de principe d'une batterie Li-ion – Source : CNRS.

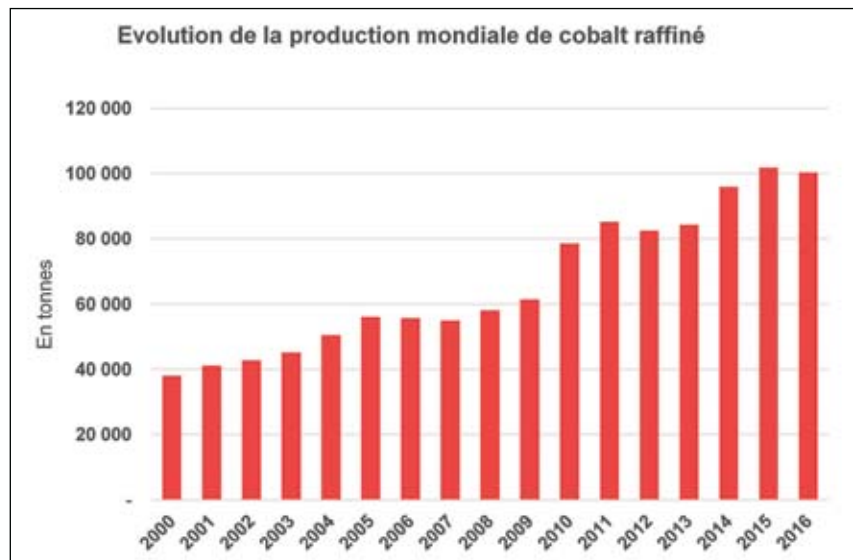


Figure 2 : Evolution de la production mondiale de cobalt raffiné depuis l'an 2000. Source : d'après BRGM.

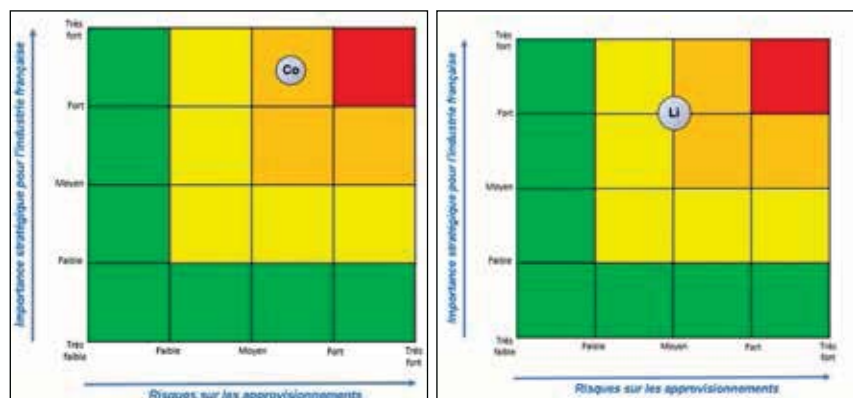


Figure 3 : Indices de criticité du cobalt (à gauche) et du lithium (à droite) - Source BRGM.

ries¹. Cependant, selon le BRGM, le cobalt présente une criticité en termes de ressources supérieure à celle du lithium (figure 3).

Marché et ressources

Le marché du cobalt croît aux environs de 5 % par an. C'est donc un marché dynamique, affecté par des fluctuations de prix liées à des événements politiques au niveau des pays producteurs ou par des phénomènes spéculatifs d'anticipation qui, souvent, finissent par retomber comme le soufflet. Ainsi le prix du cobalt qui était monté sur les marchés internationaux jusqu'à 80 €/t en mai 2018, suscitant alors beaucoup d'interrogations sur son devenir, est retombé à la fin janvier 2019 à 30 €/t (figure 4). Certains se sont avancés à faire un parallèle entre le marché du cobalt et celui du pétrole. Certes, comme tous les marchés de commodités, les fluctuations et les tensions peuvent être brutales. Mais il faut garder présents à l'esprit les ordres de grandeur : en 2018, le marché du cobalt représentait un peu plus de cinq milliards d'euros alors que le marché du pétrole dépassait 1 500 milliards.

Les batteries sont en passe de prendre une place dominante sur le marché du cobalt puisqu'elles ont représenté quasiment la moitié des quantités écoulées en 2017 (figure 5). Mais il s'agit encore pour l'essentiel des batteries des équipements informatiques et de l'outillage. La mobilité électrique émerge mais en 2017 ne représentait pas plus de 9 % du marché mondial soit environ 9 000 t de cobalt.

Les besoins actuels, de l'ordre de 100 000 t/an, sont largement satisfaits

¹ On peut estimer que, sur la base des cours en fin d'année 2018 et des technologies disponibles à cette date, le cobalt pèse pour environ 500 € dans le prix de revient d'une batterie de 50 kWh cependant que le lithium pèse de son côté pour environ 400 € (avec des ratios de 0,2 kg de cobalt par kWh et de 0,14 kg de carbonate de lithium par kWh).

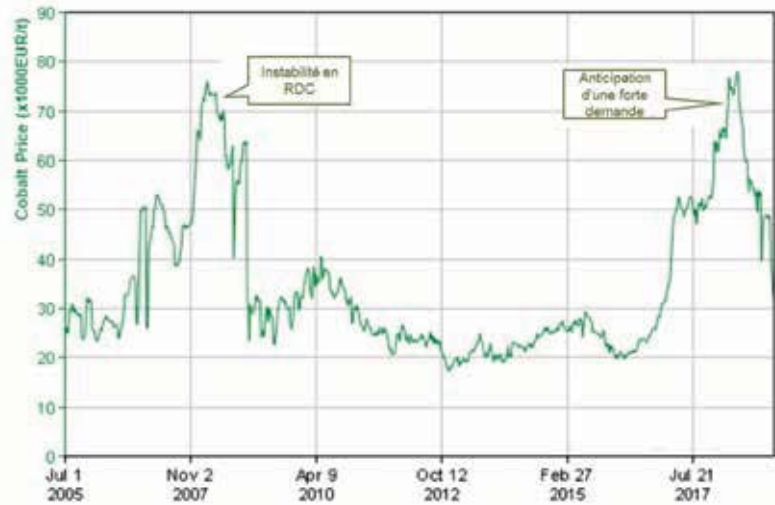


Figure 4 : Evolution du prix du cobalt depuis 2005 (en €/t) – Source : Infomine.com.

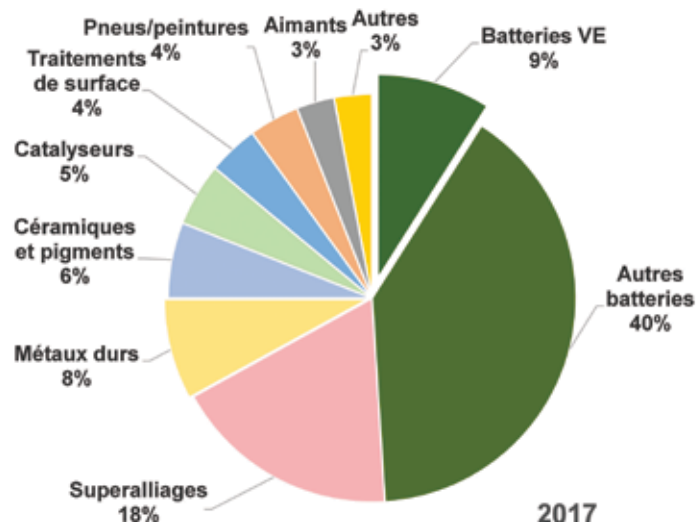


Figure 5 : Le marché du cobalt en 2017 – Source : D'après JRC (2018)

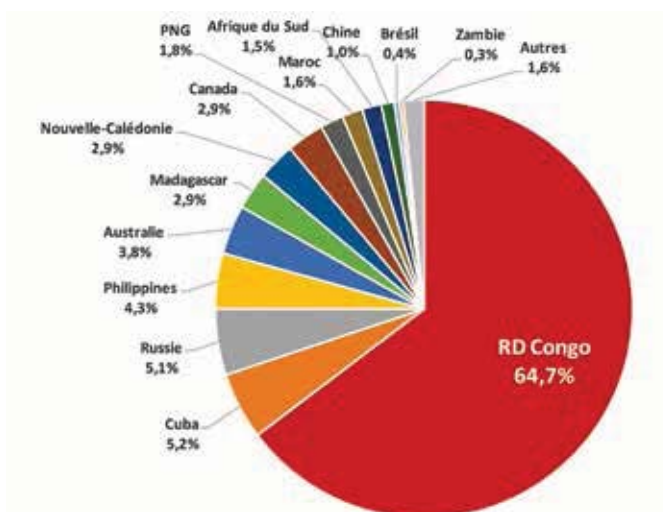


Figure 6 : Répartition de la production mondiale de cobalt en 2017. Source : Darton Commodities et BRGM (2017).

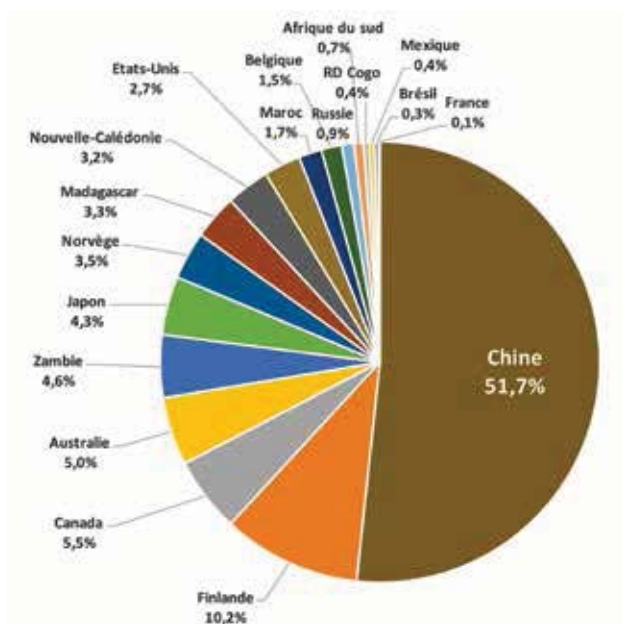


Figure 7 : Répartition de la production de cobalt raffiné dans le monde. Source : Darton Commodities 2017, USGS et BRGM (2017).

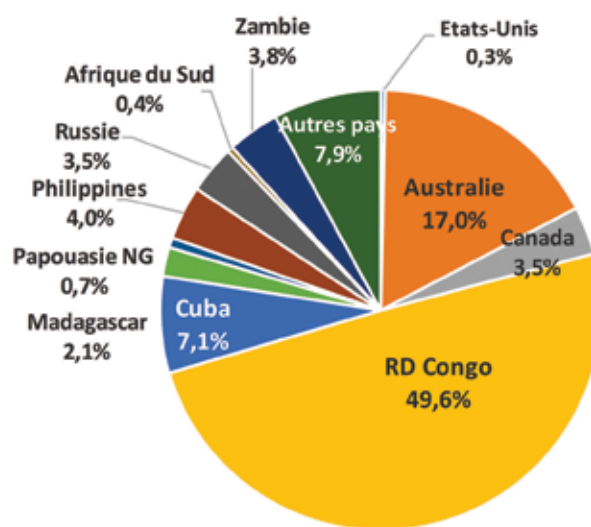


Figure 8 : Les réserves de cobalt dans le monde – Source : USGS.

à partir de la capacité de production aujourd'hui opérationnelle dans le monde, ce qui peut expliquer que les tensions sur le marché ne peuvent être, pour l'instant, que sporadiques. On estime cette capacité aux environs de 160 000 t, d'où proviennent les 100 000 t appelés par le marché (figure 6).

La part prépondérante de la République démocratique du Congo appelle évidemment l'attention et cette situation, dont les origines sont à la fois géologiques et historiques, suscite des interrogations. Elle interpelle sur le plan politique, environnemental et sociétal, compte tenu notamment de rapports faisant état d'un travail des enfants dans des conditions déplorables.

Cependant, sur les marchés internationaux, le négoce se fait davantage sous forme de cobalt raffiné que de minerai brut. Et sur ce point la répartition de la production est sensiblement différente (figure 7). On voit en effet apparaître le rôle prépondérant de la Chine qui a su prendre des intérêts dominants au Congo et a développé chez elle une puissante industrie

du raffinage. Cet état de fait soulève à nouveau un questionnement quant à la dépendance excessive vis-à-vis de la Chine qui pourrait occasionner le développement de la mobilité électrique. On notera cependant que des voies d'approvisionnement alternatives existent, en Europe notamment, où les installations finlandaises bénéficient de bonnes cotations internationales sur le plan de la responsabilité sociale des entreprises, et même en France dont le potentiel néo-calédonien ne doit pas être négligé.

Si l'on considère à présent les réserves, leur montant dépend comme toujours des sources qui les évaluent. L'USGS (U.S. Geological Survey) les estime à 7,1 Mt soit 65 ans de production actuelle (figure 7). On notera que ce ratio est tout à fait similaire à celui que l'on rencontre pour d'autres commodités telles que le pétrole ou le gaz. Les ressources, c'est-à-dire les quantités non démontrées mais ayant de bonnes possibilités d'exister, pourraient atteindre 25 Mt et même 120 Mt si, un jour, on parvient à exploiter de façon

économique les nodules de manganèse localisés au fond des mers.

On notera que l'Europe est faiblement dotée mais des ressources existent en Finlande, au Portugal, en Suède, dans les Balkans et même en France, sans oublier la Nouvelle-Calédonie que l'USGS semble ignorer. Il est possible que d'autres gisements viennent à être découverts. Mais il faut noter que le cobalt est pour l'essentiel un produit secondaire du cuivre (54 %) ou du nickel (34 %). Les gisements sont donc assez bien connus et ceci rend le volume produit fortement dépendant de la production des métaux primaires. Cependant, ce caractère marginal du cobalt pourrait évoluer si le marché associé au développement du véhicule électrique venait à prendre une importance primordiale.

En se fondant sur les structures actuelles du marché, le Joint Research Center de l'Union européenne (JRC) a procédé en 2018 à une évaluation très détaillée de l'évolution du potentiel de production mondiale, en tenant compte des productions actuelles, des pers-

pectives d'épuisement de certains gisements et, au contraire, des potentialités de développement de nouveaux sites². Bien évidemment le développement de nouvelles ressources minières dépend de plusieurs facteurs :

- identification des sites ;
- délais de mise en valeur ;
- évolution des marchés primaires du cuivre et du nickel ;
- données économiques, politiques, environnementales et sociétales.

Au terme de ses évaluations, le JRC estime que la capacité mondiale de production du cobalt pourrait se situer en 2030 entre 193 000 et 237 000 t/an. La question est à présent de savoir si cette capacité sera suffisante pour faire face aux besoins prévisibles à cet horizon compte tenu de la croissance de la mobilité électrique.

Quels besoins prévisionnels en cobalt en 2030 ?

Pour tenter de répondre à cette question, nous nous placerons tout d'abord dans l'hypothèse d'un statu quo technologique en ce qui concerne les besoins en cobalt par kWh. Nous supposons également, dans un premier temps, que le recyclage n'est pas mis en œuvre, ce qui est pratiquement le cas aujourd'hui.

Dans un tel corps d'hypothèses, la donnée centrale est celle du rythme de développement de la mobilité électrique. Nous n'en sommes aujourd'hui que dans la phase d'amorçage du marché et la fourchette de son développement possible est très ouverte. Le JRC, dans l'étude précitée, a identifié quatre scénarios possibles à horizon 2030, représentés par la figure 9 et qui s'étalent, en marché annuel, de 7,5 à 27,5 millions de véhicules mis sur le marché en 2030.

Trois scénarios de l'Agence Internationale de l'Énergie :

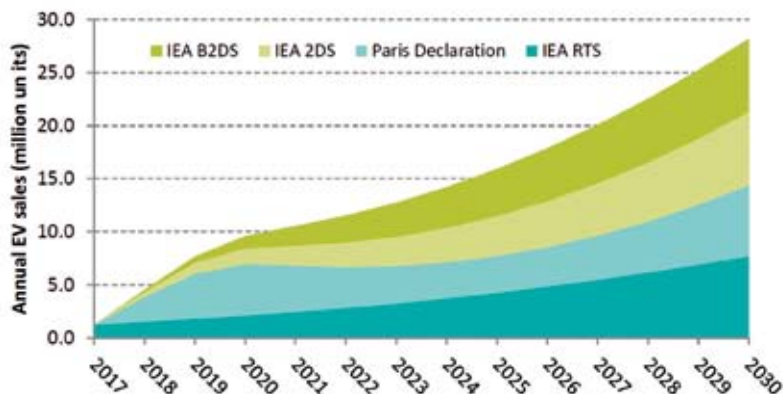


Figure 9 : Quatre scénarios d'évolution possible du marché mondial du véhicule électrique à horizon 2030 - Source : JRC (2018).

- IEA RTS : scénario de référence correspondant aux mesures annoncées ;
- IEA 2DS : scénario correspondant à 160 millions de véhicules en circulation dans le monde en 2030 – Scénario homogène avec une probabilité de 50 % de limiter le réchauffement des températures moyennes à 2 °C ;
- IEA B2DS : scénario correspondant à 200 millions de véhicules en service en 2030 et permettant d'atteindre la neutralité carbone du secteur vers 2060.
- Le scénario « Paris Declaration » correspondant aux déclarations faites lors de la COP21 et conduisant à environ 100 millions de véhicules en circulation en 2030.

Dans la suite de cet article nous supposons que le marché se situe aux environs de 20 millions de véhicules par an en 2030, ce qui correspond à une évolution dynamique du marché mais qui pourrait cependant être dépassée.

Le deuxième grand facteur à prendre en considération est celui de l'évolution du ratio entre véhicules tout électriques batteries (BEV) et véhicules hybrides rechargeables (VHER). Cette question est débattue mais la plupart des études de marché concluent à un rétrécissement progressif du marché de l'hybride rechargeable au fur et à mesure que les véhicules tout batteries verront leur rayon d'action s'accroître. L'hybridation impose

en effet une double motorisation, prend plus d'espace dans le véhicule et ne permet pas de bénéficier des économies de maintenance attendues du véhicule électrique. Il est supposé que la part des VHR passe progressivement de 34 % en 2017 à 25 % en 2030.

Le troisième facteur pesant directement sur la demande en cobalt est l'évolution de la capacité moyenne des batteries. Celle-ci est clairement orientée à la hausse et les véhicules mis sur le marché en 2019/2020 offriront pour la plupart des batteries une capacité de 50 à 60 kWh. Sauf pour les véhicules de haut de gamme, il n'est pas démontré que cette course à la capacité se poursuivra au-delà : une batterie de 60 kWh permet une autonomie réelle de 300 km et le développement des infrastructures de recharge devrait permettre d'augmenter le rayon d'action dans des conditions d'utilisation satisfaisantes pour l'utilisateur. Nous ferons donc l'hypothèse que la capacité moyenne des batteries passe, entre 2017 et 2030, de 30 kWh par véhicule tout batteries à 60 kWh en 2030. Pour les hybrides, la capacité des batteries ira également en croissant, passant de 10 à 30 kWh, sous l'effet notamment des réglementations qui deviendront rapidement moins généreuses quant à l'octroi d'avantages financiers au profit de ce type de véhicules. Tous véhicules compris, la capaci-

² Cobalt : demand-supply balances in the transition to electric mobility – JRC Science for Policy Report (2018).

té moyenne des batteries passerait ainsi de 23 kWh en 2017 à 53 kWh en 2050.

A technologie inchangée, c'est-à-dire en supposant un besoin en cobalt de l'ordre de 200 grammes par kWh, il en résulterait une demande annuelle de cobalt pour le véhicule électrique de l'ordre de 220 000 t/an en 2030, très supérieure aux 9 000 t évoquées précédemment pour 2017.

Mais avant de comparer ces besoins aux ressources disponibles, il faut tenir compte de l'évolution des autres marchés. Le marché de l'informatique, des téléphones, de l'outillage restera dynamique mais est assez bien balisé. Par contre, un autre marché peut se développer fortement : celui du stockage sur réseaux électriques, en amont ou en aval des compteurs³. De façon tentative, nous estimerons que ce marché pourrait générer une demande en cobalt de 55 000 t en 2030.

En cumulant ces diverses évaluations, on parvient à la conclusion que la demande en cobalt pourrait atteindre en 2030, 410 000 t, c'est-à-dire un volume très supérieur aux capacités de production prévisibles à cet horizon, estimées par le JRC entre 193 et 237 000 t/an.

L'apport du recyclage

Dans une telle situation, on pense en premier lieu aux possibilités de recyclage. S'agissant du cobalt, celles-ci sont réelles mais aujourd'hui trop peu développées. Le recyclage du cobalt est en effet assez difficile, compte tenu de la diversité des batteries Li-ion – chaque variété appelant un processus spécifique – et des risques que soulève la manipulation de batteries contenant une énergie résiduelle qui peut être importante et qui sont constituées de composants

³ Le lecteur pourra se référer sur ce point à l'article « Évolution des marchés du stockage dans le monde et perspectives » de Corentin Baschet et Michael Salomon paru dans la REE 2018-5.

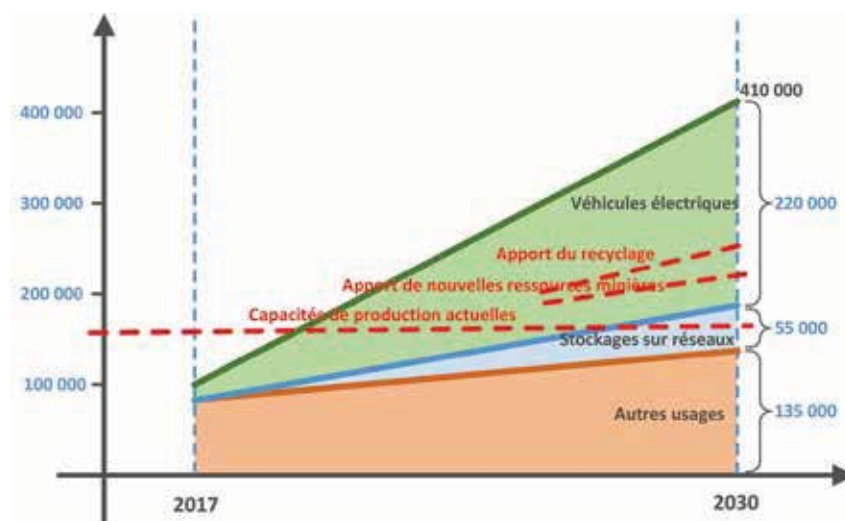


Figure 10 : Comparaison des besoins prévisionnels en cobalt en 2030 à technologies inchangées avec les ressources minières possibles à cet horizon, complétées par l'apport du recyclage.

Source : d'après l'étude JRC 2018.

très réactifs. En outre, le recyclage peut être à l'origine de pollutions des eaux ou de création de déchets toxiques.

L'équation économique n'est pas aisée non plus, car le recyclage se trouvera encouragé si le prix du cobalt augmente, mais ce n'est clairement pas l'objectif visé pour le développement de la mobilité électrique. De même la teneur en cobalt des batteries est appelée à diminuer, comme nous le verrons plus loin, mais ceci rend l'exercice du recyclage plus difficile.

Enfin, il faut organiser la collecte des batteries mais c'est sans doute le point le plus facile et s'agissant des batteries de véhicules automobiles, le taux minimal de collecte des batteries de 45 % imposé aux Etats membres à compter du 26 septembre 2016 par la directive 2006/66/CE du 6 septembre 2006 devra être revu à la hausse.

Il est indispensable, pour l'avenir de la filière de la mobilité électrique, que le recyclage des batteries, afin de récupérer le cobalt mais aussi d'autres matériaux (lithium, nickel) fasse l'objet de travaux de recherche-développement pour en améliorer l'efficacité et que des schémas industriels de collecte et de traitement

soient mis en place. La nécessité en est patente à terme mais les délais ne sont pas encore pressants car les batteries de véhicules électriques ont des durées de vie qui semblent devoir excéder huit voire dix ans, et certaines d'entre elles connaîtront une deuxième vie dans des applications statiques, en soutien notamment des installations photovoltaïques fonctionnant en autoconsommation.

Il ne faut donc pas surestimer l'apport du recyclage dans le bouclage du bilan cobalt à horizon 2030. On peut considérer que le recyclage commencera à porter ses fruits à compter de 2025 et pourrait permettre de mettre sur le marché des quantités additionnelles de l'ordre de 40 000 t/an en 2030 si 90 % des batteries viennent à être recyclées à compter de 2025.

La migration vers des technologies moins exigeantes en cobalt est indispensable. Elle est aujourd'hui amorcée.

La figure 10 récapitule les développements qui précèdent et permet de confronter les besoins potentiels en cobalt en 2030, à technologies inchangées, avec les ressources pouvant pro-

Nom	Abréviation	Formule chimique	Contenu en cobalt	Propriétés et applications
Lithium Cobalt Oxyde	LCO	LiCoO_2	60 %	Haute capacité, téléphones mobiles, électronique grand public
Lithium Manganèse Oxyde	LMO	LiMn_2O_4	Pas de Co	Plus faible capacité que LCO mais sécurité et durée de vie plus élevées – Outillage, vélos électriques, véhicules électriques, équipement médical. LMO et NMC sont mixées dans les VE.
Lithium Fer Phosphate	LFP	LiFeO_4	Pas de Co	
Lithium Nickel Manganèse Cobalt Oxyde	NMC	LiNiMnCoO_2	10 à 30 % selon chimie	
Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxyde	NCA	LiNiCoAlO_2	10 à 15 %	Haute capacité – Importance croissante pour les VE (Tesla), stockages sur réseau et applications médicales.

venir au même horizon de l'activité minière et du recyclage.

Cette comparaison fait apparaître en l'état, un déficit substantiel en cobalt en 2030 et à l'évidence dès les années antérieures, qui pourrait se traduire par un renchérissement important du prix des batteries voire par des difficultés sérieuses d'approvisionnement.

Il est donc indispensable de relâcher la contrainte cobalt en s'orientant vers des technologies de batteries beaucoup moins exigeantes en cobalt. Cette évolution est possible et elle est bien amorcée.

Il existe en effet différents types de batteries lithium-ion et l'un des critères les plus différenciant réside dans la nature des matériaux constitutifs de la cathode. Le tableau 1 récapitule les principales technologies aujourd'hui mises en œuvre avec leurs domaines d'application préférentiels.

La technologie LCO est celle qui permet aujourd'hui d'atteindre la plus haute capacité massique (de l'ordre de 200 Wh/kg en cellules) mais avec l'inconvénient d'une exigence en cobalt très élevée et aussi d'une sécurité moindre que celle offerte par d'autres filières.

Aujourd'hui, les constructeurs automobiles choisissent des filières moins gourmandes en cobalt, notamment celles dans lesquelles le cobalt est mixé au nickel, au manganèse ou à l'aluminium. La figure 11 représente la répartition

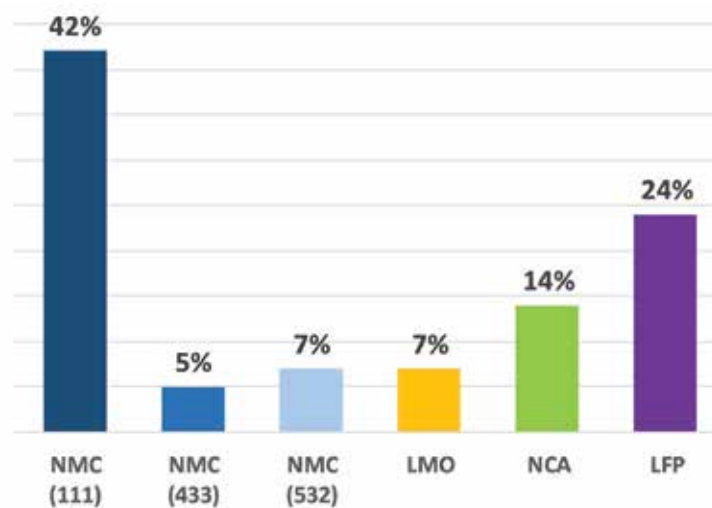


Figure 11 : Répartition du marché des batteries de véhicules électriques entre filières. Source : Bloomberg (2018).

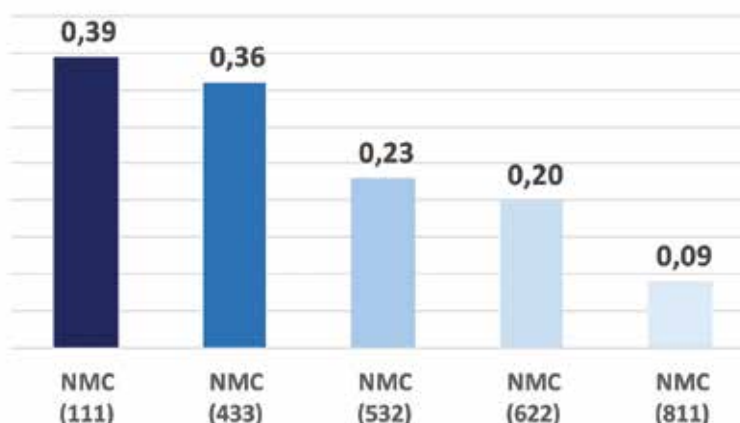


Figure 12 : Masse de cobalt requise par les principales filières de batteries Li-ion. Les indices entre parenthèses correspondent à la répartition massique des différents composants (nickel, manganèse et cobalt) dans la composition de l'alliage – Source : Olivetti & al (2017).

tition actuelle du marché des batteries pour véhicules électriques entre les différentes filières.

Les filières NMC sont aujourd'hui dominantes, bien que les filières NCA (utilisée par Tesla) et LFP soient également

très présentes sur le marché. La figure 12 représente pour chacune d'entre elles leurs exigences en cobalt en kg/kWh.

On notera que la filière NMC (811) permet de ramener la masse de cobalt nécessaire aux batteries à 0,09 kg/kWh, c'est-à-dire moins de la moitié du ratio moyen aujourd'hui observé (2 kg/kWh). La généralisation de cette technologie, si l'on réfère à la figure 10 permet de franchir sans problème l'horizon 2030.

Au-delà, les perspectives deviennent à nouveau plus incertaines. Mais de nouvelles filières se profilent qui pourraient ramener la teneur en cobalt à des niveaux encore inférieurs : substitution du manganèse au cobalt, batteries lithium-soufre et, peut-être, batteries lithium-air qui, outre l'indépendance vis-à-vis du cobalt, offriraient des capacités massives supérieures au lithium-ion actuel. C'est l'un des enjeux majeurs de la recherche sur les batteries qui pourrait, en particulier, déboucher sur des batteries à électrolyte solide, offrant de meilleures garanties de stabilité et de sécurité.

Conclusion

Le cobalt joue un rôle très important dans les batteries Li-ion et constitue donc un enjeu important pour le développement de la mobilité électrique. Il n'y a pas de risques de pénurie dans les toutes prochaines années (65 ans

de réserves en 2018) mais l'incidence du prix du cobalt est non négligeable (~ 500 € HT par VE) et le marché est, comme celui de toutes les matières premières, sujet à fluctuations importantes.

Les besoins pour le véhicule électrique vont aller en croissant rapidement et vont devenir prédominants sur le marché du cobalt. Ceci pose le problème de la chaîne d'approvisionnement (réserves, prix, données politiques, environnementales, sociales...). La dépendance vis-à-vis de la RDC et de la Chine est trop forte et doit être mitigée par l'organisation d'autres filières d'approvisionnement, sans négliger la prospection minière en Europe et dans les régions qui lui sont rattachées (Nouvelle-Calédonie).

Le recyclage des batteries et la récupération du cobalt doivent être organisés avec l'objectif d'être opérationnel d'ici quelques années. Un effort de recherche-développement devrait permettre de développer des filières de recyclage plus économiques et plus sûres.

Il est en parallèle impératif, pour passer l'horizon 2030 et préparer le grand futur, de développer des technologies beaucoup plus économes en cobalt. Ceci pourrait être l'enjeu d'un programme européen s'inscrivant dans le cadre de la politique européenne des batteries.

L'AUTEUR



Jean-Pierre Hauet est ancien élève de l'École polytechnique et ingénieur au corps des mines. Il a dirigé le centre de recherches d'Alcatel-Alsthom et a été Chief Technology Officer du groupe Alstom.

Il est aujourd'hui président du comité scientifique d'Equilibre des Energies (EdEn) et rédacteur en chef de la revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE).