

Matières premières, criticités et axes stratégiques dans les industries de l'automobile

Par Gildas BUREAU

Pilote du groupe de travail PFA Filière « Automobile et Mobilité » sur les matériaux stratégiques pour l'automobile

Forte de 400 000 emplois en France, la filière Automobile fait partie des industries stratégiques nationales. Cette industrie utilise de nombreux équipements technologiques de plus en plus complexes qu'elle a su rendre fiables et abordables. L'intégration de ces fonctions technologiques sont nécessaires pour la sécurité, le confort, le respect des normes environnementales ou pour la connectivité des véhicules.

Ces performances techniques et économiques, à la fois durables et sûres, sont le fruit d'évolutions et de ruptures technologiques qui ont été rendues possibles grâce à l'utilisation industrielle de matières premières présentant des propriétés exceptionnelles, qu'elles soient électroniques, électriques, magnétiques, optiques...

Si nous remontons la chaîne logistique de ces différents composants automobiles, nous y trouvons des matériaux et des matières premières. Même à l'heure de la digitalisation, une automobile reste un ensemble constitué de plus d'une tonne de matériaux.

Comme nous le verrons ces matières premières sont au cœur d'un écosystème complexe, international et interdépendant, à forts enjeux. Dans ce contexte, différents leviers sont actionnables pour établir une, ou plutôt, devrais-je dire, des stratégies pour encadrer la gestion des matières premières stratégiques.

Introduction

Afin de réaliser des biens d'équipements électriques, électroniques ou de communication, les matériaux sont de fait essentiels à toutes activités manufacturières. L'industrie automobile embarque de nombreuses révolutions technologiques, et se trouve à la croisée des chemins technologiques, économiques, sociaux, sociétaux, voire géopolitiques.

L'année dernière, l'industrie automobile mondiale a produit plus de 90 millions de véhicules (particuliers et utilitaires), dont plus de 15 millions en Europe. Elle emploie plus de 13 millions de travailleurs européens et son chiffre d'affaires représente 7 % de l'économie européenne. La filière française représente plus de 4 000 entreprises et investi plus de 6 milliards d'euros par an en R&D.

Cette innovation constante s'attache à établir les futurs modes de conception, les futures technologies, et les *process* de fabrication et de commercialisation différenciants et performants de demain.

Le secteur automobile vit une profonde transition : il a vu sa relation aux besoins de mobilité, aux usages et aux déplacements urbains fortement évoluée.

Ces mutations se traduisent par un mouvement durable vers des véhicules à faible empreinte environnementale, connectés, électriques, et où l'impérieux besoin de mobilité individuelle (et collective) a souvent été remis en cause. Tout cela dans un contexte industriel et politique de sortie du Royaume-Uni de l'Union européenne (Brexit).

Puis est survenu le corona virus (SARS-CoV-2) à Wuhan, berceau de l'industrie automobile chinoise⁽¹⁾, une épidémie qui s'est transformée en pandémie au cours du 1^{er} trimestre 2020.

Avec plus de 3 milliards de dollars de produits automobiles exportés par la Chine vers la France, l'Allemagne et l'Angleterre, cette pandémie a soulevé de façon violente et profonde les flux mondiaux et l'interdépendance des industries aux approvisionnements stratégiques, et ce bien au-delà du seul secteur automobile.

(1) L'industrie automobile représente plus de 48 % des industries implantées à Wuhan (source: Statistica), notamment Dongfeng Passenger Car, Dongfeng Motors Co, Dongfeng-Renault Motor Co, Dongfeng-Peugeot Citroen Automobile Co, Dongfeng-Nissan Passenger Vehicle Co, Zhejiang Geely Automobile, SAIC General Motors Co, Nanjing Golden Dragon Bus...

Global Supply of EU Critical Minerals and Metals

The pie charts show the percent distribution of the production of critical metals and minerals. In total, it is 100% for each raw material. The area of the pies are proportional. SGU 2017.

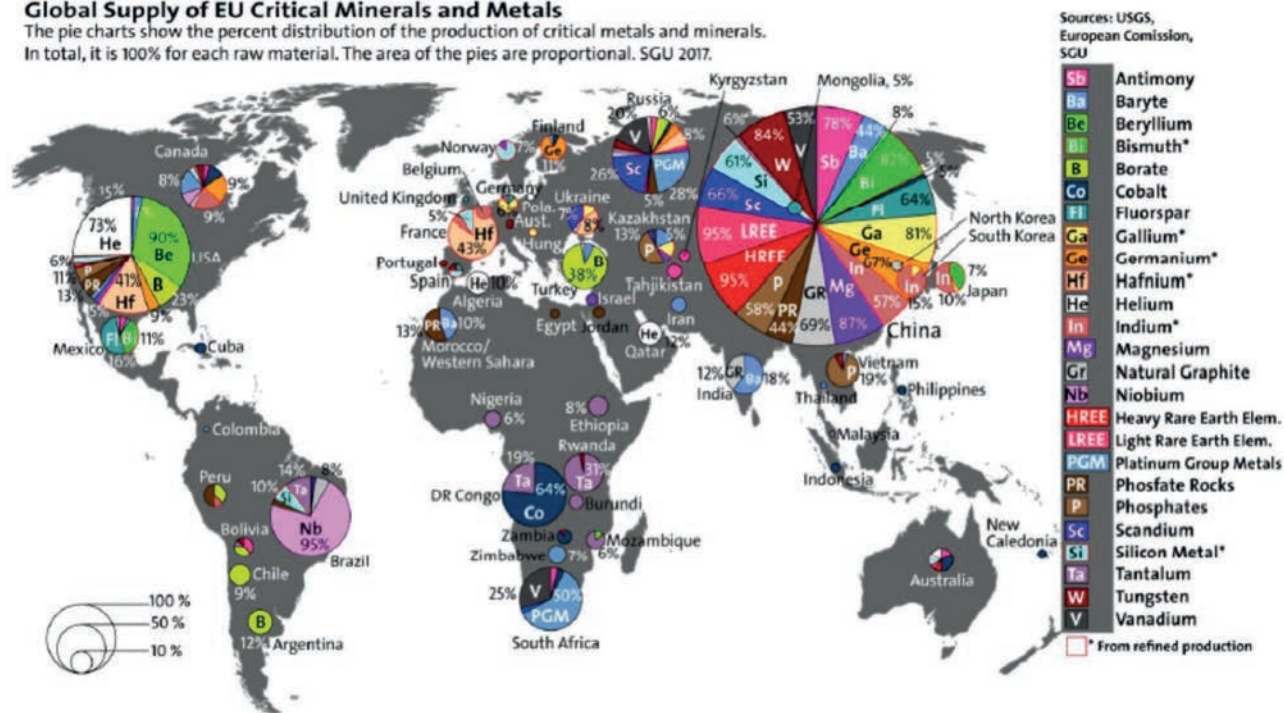


Figure 1 : Carte des approvisionnements de l'UE en matériaux critiques⁽²⁾.

Le contexte international

Comme souligné et largement documenté dans nombre des publications des *Annales des Mines*, la mondialisation et la montée en puissance de la Chine et de l'Inde ont engendré différentes tensions sur les marchés des matières premières, concrétisant un positionnement durable, profond et systématique de la Chine dans la maîtrise de certaines ressources critiques. La Chine est ainsi devenue le principal fournisseur mondial de certains matériaux considérés comme critiques, assurant plus de 70 % des exportations correspondantes⁽³⁾. L'approvisionnement en matières critiques de l'Union européenne dépend à plus de 80 % des pays situés hors de l'Union, notamment l'Asie, les États-Unis, la Russie, l'Afrique du Sud et l'Amérique du Sud.

Dans un contexte de hausse mondiale de la demande de certaines substances stratégiques pour une production automobile en pleine transition, certaines tensions progressent ou de nouvelles apparaissent. À cela s'ajoute la nécessité pour l'industrie automobile de répondre aux enjeux liés aux conditions d'extraction, de transformation et de traçabilité des matières premières.

Ainsi, au travers des récentes crises ayant affecté les marchés des matières premières – celles de 2008 (crise économique mondiale) et de 2011 (crise des quotas sur les TR chinoises) –, les grands acteurs des mondes politique et économique, mais aussi la société civile avec la crise liée au Covid-19, ont (re)pris conscience du carac-

tère stratégique des flux de matières premières pour leur économie et leurs industries stratégiques.

Différentes initiatives ont depuis été prises soit à titre privé (Allemagne,...), soit par des États (France, États-Unis, Corée, Japon⁽⁴⁾...).

Les réponses apportées par ces différents États et la Commission européenne à ces enjeux sont décrites dans la dernière partie du présent numéro de *Responsabilité & Environnement*.

Ces questions de dépendance et de souveraineté nationales s'inscrivent dans des débats d'actualité connexes à l'industrie automobile, comme l'hébergement des serveurs informatiques, la maîtrise des futures générations de réseaux téléphoniques ou, plus récemment, avec la crise du Covid-19, de la production de certains médicaments, de dispositifs médicaux nécessaires à la mise en œuvre des plans de crise et de reprise d'activité.

Il est évident que la capacité d'action de la France et de l'Europe sur l'ensemble de ces sujets stratégiques reste limitée. Mais la souveraineté nationale fait débat, constituant l'occasion de reconsidérer certaines opportunités qui s'offrent à l'Europe, laquelle s'est saisie, dès 2008, de cette question, conduisant à la mise en place de différents dispositifs, dont certains dédiés aux gisements et aux ressources⁽⁵⁾, alimentés par des outils nationaux⁽⁶⁾.

Ces questions font régulièrement débat. Mais la crise mondiale que nous vivons actuellement permettra

(2) <http://screen.eu/>

(3) <http://www.annales.org/>

(4) <http://www.annales.org/re/2016/resumes/avril/05-re-resum-FR-AN-AL-ES-avril-2016.html>

(5) <http://screen.eu/results/>

(6) <http://www.mineralinfo.fr/>

peut-être de cristalliser des orientations durables et pérennes pour l'industrie automobile.

Contexte de l'industrie automobile

Périmètre et définition techniques

Nous pouvons estimer qu'au niveau du coût des composants, la part matière représente entre 45 et 55 % du prix d'un véhicule à moteur à combustion interne.

Figure 4-5: Automotive cost components of a conventional vehicle

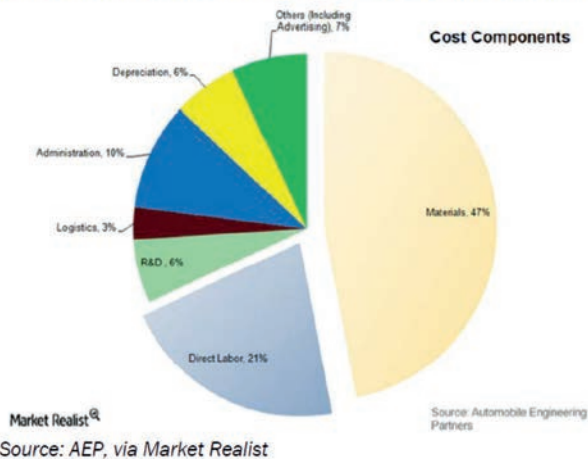


Figure 2 : Décomposition des coûts des composants d'un véhicule thermique.

Parmi ces composants, nombreux sont ceux qui font appel à des matériaux critiques. Je parlerai ici de matériaux critiques plutôt que de minerais critiques, car, pour l'industrie automobile, certains matériaux qualifiés de stratégiques peuvent être aussi bien des substances, des minerais, des métaux que des matières naturelles.

Conventionnellement, un matériau est dit stratégique quand son usage est essentiel au développement ou au maintien compétitif de la filière considérée. La criticité s'apprécie selon deux axes principaux : les risques liés à sa disponibilité (ressource, production, approvisionnement, marché...) et l'importance économique que revêt ce matériau.

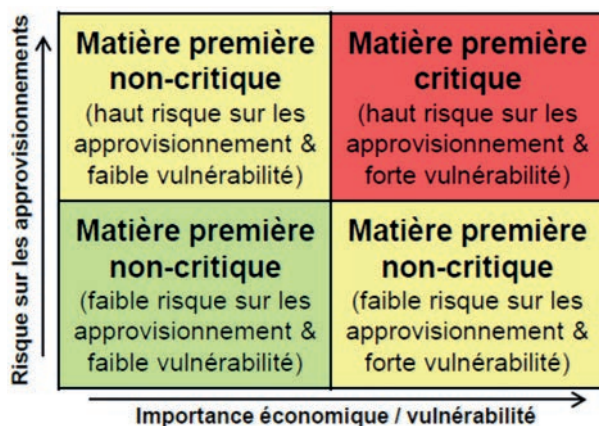


Figure 3 : Cartographie des matières premières⁽⁷⁾ (source : BRGM).

La filière Automobile et mobilité dispose d'un Conseil de recherche automobile (CRA) dédié, qui, aidé par des communautés d'experts de l'automobile, va élaborer dans le cadre des matériaux des recommandations et des points d'alerte sur les approvisionnements en matériaux stratégiques pour l'industrie automobile.

Les risques pour la filière peuvent être, selon les matériaux, politiques (insécurité, gouvernance, quotas...), économiques (concentration des acteurs, stratégies et types d'investissements...), géographiques (concentration des ressources, des productions...), géologiques (localisation des ressources minérales, réserves limitées...) et sociétaux (conditions d'extraction, impacts environnementaux, risques de corruption, prise en compte du bien-être animal...).

En complément de la description des critères stratégiques définis par le Groupe Renault⁽⁸⁾, l'attribution du qualificatif de stratégique aux matériaux de la filière est liée aux évolutions des nouvelles architectures véhicules qui accompagnent la transition énergétique, notamment les véhicules à faible empreinte environnementale.

En appréhendant les besoins à l'échelle de la filière automobile et en tenant compte de l'évolution de l'importance à venir de certains matériaux, les principaux matériaux stratégiques sont :

- les métaux utilisés dans l'électronique, l'information et la communication, et la connectivité : Ga, In, La, Ce, Be, In, Sb ;
- les matériaux nécessaires à l'électrification : Li, Co, Ni, Cu, Nd, Pr, Sm, Tb, Dy ;
- les métaux issus de zones de conflit : Sn, Ta, W, Au ;
- les matériaux servant à la dépollution des moteurs à combustion interne : Pd, Pt, Rh ;
- les matériaux d'origine naturelle : caoutchouc, mica, graphite ;
- les matériaux d'origine animale : le cuir.

L'évolution de leur consommation a été estimée comme précisé dans la Figure 4 de la page suivante.

Architectures automobiles et chaînes de traction

Le cœur d'un véhicule se structure autour de trois architectures principales : électrique/électronique, structurelle (« la caisse ») et la chaîne cinématique adaptée (« du moteur à l'échappement »). Elles font appel à de nombreux organes et composants techniques représentant entre 20 000 à 30 000 pièces selon les véhicules. Ces composants complexes doivent satisfaire les fonctions répondant aux évolutions techniques et sociétales et embarquent les technologies permettant à chaque modèle d'être différenciant sur son marché. Ces technologies doivent être performantes, fiables, abordables et durables.

Cette notion de durabilité dépasse la seule notion de durabilité liée à l'usage du véhicule. En effet, cette notion englobe également la gestion des ressources amont, des matières premières et des activités humaines associées.

(7) <http://www.mineralinfo.fr/page/matieres-premieres-critiques>

(8) <http://www.annales.org/re/2016/re82/RE-82-Article-SCHULZ.pdf>

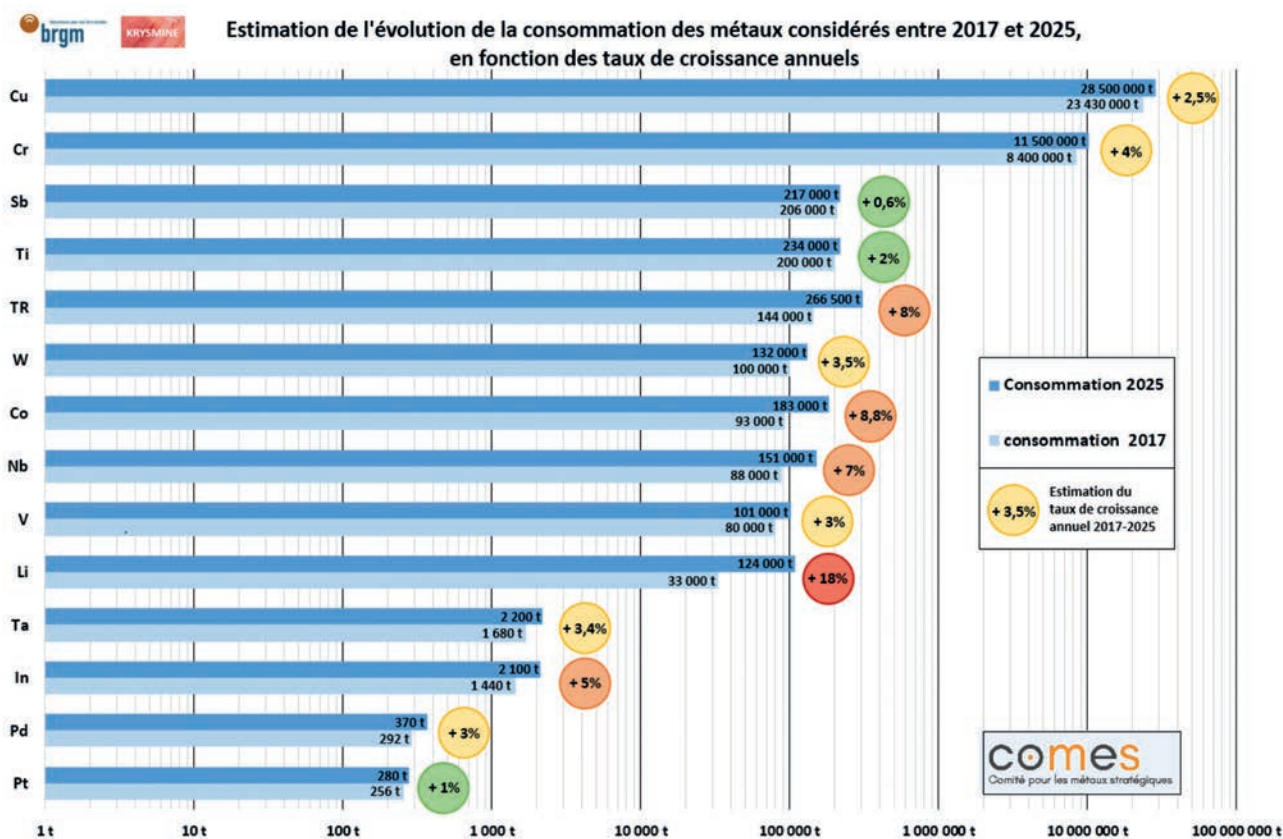


Figure 4 : Estimation de l'évolution de la consommation en matériaux critiques ⁽⁹⁾ (source : BRGM).

Par exemple, la loi française ⁽¹⁰⁾ sur le devoir de vigilance, qui s'exprime au travers de la responsabilité sociétale des entreprises (RSE), impose aux entreprises, notamment à celles de plus de 5 000 salariés, l'obligation de l'élaboration d'un plan de vigilance afin de prévenir les risques sociaux (atteinte aux droits humains...), environnementaux ou légaux (anti-corruption...), liés à leurs activités ou

à celles de leurs filiales et partenaires (sous-traitants et fournisseurs).

Les innovations technologiques développées pour accompagner la transition énergétique, qu'elles soient de nature sociale ou sociétale, font appel à des matériaux stratégiques servant à satisfaire les normes en vigueur en matière d'émissions de CO₂, de sécurité ou de connectivité : leur importance stratégique diffère selon l'architecture de plateforme considérée.

Contexte des véhicules électriques

Les véhicules électriques à batterie (BEV : *battery electric vehicle*) se caractérisent par une chaîne de traction

(9) <http://www.mineralinfo.fr/page/comite-metaux-strategiques>

(10) Loi n°2017-399 du 27 mars 2017 relative au devoir de vigilance des sociétés mères et des entreprises donneuses d'ordre.

(11) <https://www.groupe-psa.com/fr/actualites/corporate/cmp-la-plateforme-modulaire/>



Figure 5 : Architecture électrique de la plateforme e-CMP du Groupe PSA ⁽¹¹⁾.

complètement électrifiée se composant d'une (voire 2, ou même 3) machines de traction, d'une électronique de puissance, d'un système de recharge embarqué et d'une batterie qui se recharge par branchement sur le réseau électrique.

Les architectures de ce type vont recourir à plusieurs éléments stratégiques, que sont le lithium, le cobalt, le nickel, le graphite, le cuivre, le gallium, le niobium, le silicium...

Les nouveaux matériaux stratégiques sont ceux qui sont principalement liés à la fabrication des batteries lithium-ion : Li, Co, Ni et Cu. Ces batteries connaissent une évolution technologique constante (Nickel Metal hybride, Lithium-Ion, haut-nickel, sans cobalt,...) et varient selon les autonomies souhaitées, les usages et les marchés visés (forte autonomie, véhicule urbain, véhicule orienté puissance...).

Ainsi, pour le lithium, les prévisions actuelles et les évolutions futures des chimies alternatives des cathodes (magnésium, métal-air, tout solide...), ainsi que les programmes d'approvisionnement européens tendent à préserver une certaine retenue en matière de spéculation. Cependant, une inquiétude demeure en ce qui concerne les produits transformés : hydroxydes, carbonates.

S'agissant du cobalt, les perspectives de marché font apparaître un déficit à moyen terme (à horizon 2025) lié aux évolutions du marché spécifique des cathodes des batteries lithium-ion. Un autre point justifiant une surveillance est la criticité associée à la gouvernance et à l'extraction de ce minerai, principalement issue de la République démocratique du Congo (RDC). En effet, l'inscription de ce minerai à moyen/court terme sur la liste des quatre autres minerais (tungstène, étain, tantale et or) alimentant financièrement les conflits actuels, est probable.

Le secteur du nickel souffre, quant à lui, d'un déficit des investissements lié aux prix bas actuels, ce qui laisse craindre un fort risque de décalage entre l'offre et une demande grandissante. Une demande qui sera accélérée par les futures évolutions chimiques que représentent les cathodes à haut nickel. De plus, la fabrication des cathodes actuelles des batteries lithium-ion nécessitent le recours à des sulfates de nickel issus de minerai de nickel de haute pureté, dont la filière de transformation est principalement localisée en Asie.

Enfin, le cuivre reste incontournable pour les architectures électriques (400V, 800V) et hybrides (48V), ainsi que pour les composants électriques/électroniques embarqués. Sa masse totale dans un véhicule électrique peut être supérieure de 30 % à celle de son équivalent thermique. Ce marché en croissance constante dans l'automobile est également stratégique pour les infrastructures et réseaux connectés, auxquels le secteur de l'automobile fait appel, d'où une certaine concurrence industrielle. Actuellement, la demande sur le marché est supérieure à l'offre, avec des tensions fortes en cas de retard dans la concrétisation des investissements dans de nouvelles exploitations minières.

Contexte des architectures hybrides

Ces véhicules disposent d'une chaîne de traction se composant d'un moteur à combustion interne (très majoritairement à essence), d'une batterie et d'un système de recharge embarqués et d'une ou plusieurs machines électriques implantées en différents endroits : train arrière, boîte de vitesse, transmission, dans les roues ou sur l'adaptation moteur (pour les hybridations légères dite MHEV/*mild-hybride*). La batterie est rechargeable par branchement au réseau (technologie PHEV : *plug-in hybrid electric vehicle*) ou uniquement *via* le moteur thermique qui sert alors de génératrice dans le cas de la technologie HEV : *hybride electric vehicle*. Dans les deux cas, la récupération lors des phases de freinage/décélération alimente la batterie.

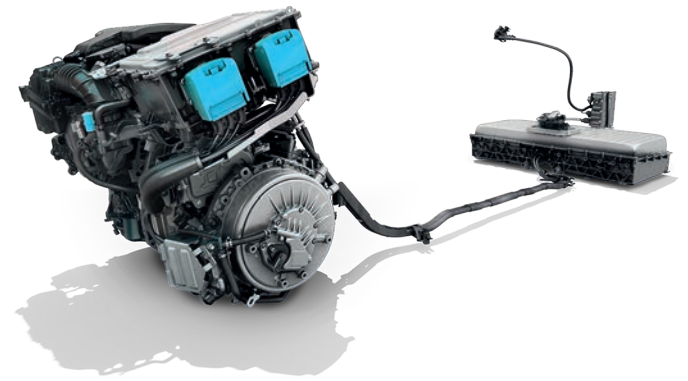


Figure 6 : Groupe moto propulseur hybride du Renault Captur E-TECH Plug-in⁽¹²⁾ (source : ©Groupe Renault, direction de la communication).

Les composants clés sont ceux liés à 1) la chaîne de traction thermique et à son système de dépollution (nécessitant l'usage de platinoïdes et de terres rares légères), et 2) aux couplages électriques associés aux organes mécaniques.

Du fait des faibles espaces disponibles pour insérer les composants électriques/électroniques, la majeure partie des systèmes embarquent des machines électriques compactes, à aimants permanents, et des batteries à forte densité volumique, mais de moindre capacité par rapport à celle des batteries des véhicules électriques (BEV).

Les matériaux stratégiques pour ces motorisations seront principalement liés à la fabrication des aimants permanents de la machine électrique (Nd, Pr, Dy, Tb), au stockage d'énergie (Li, Ni, Co, Graphite), à l'électronique de puissance (transistors GaN ou SiC), et aux besoins en certains platinoïdes (Pt, Pd, Rh) et terres rares légères (La, Ce, Y, Nd) pour la catalyse embarquée.

(12) <https://group.renault.com/news-onair/actualites/nouveau-captur-e-tech-plug-in-est-le-premier-hybride-rechargeable-du-groupe-renault/>

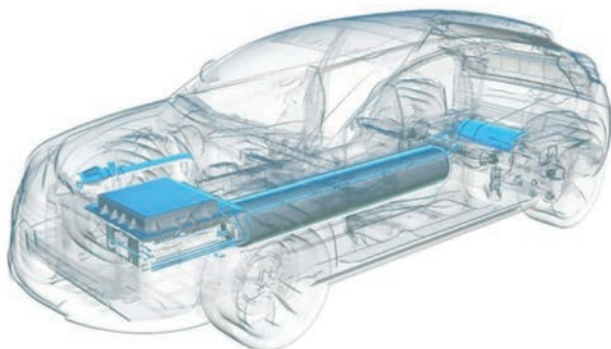
a) Chaîne de traction d'un véhicule léger ⁽¹³⁾.b) Kangoo ZE avec prolongateur d'autonomie ⁽¹⁴⁾.

Figure 7 : Exemples d'implantation de piles à combustible dans des véhicules légers (sources : 7a©Faurecia ; 7b©Symbio).

Contexte des piles à combustible

Certains véhicules électriques embarquent soit des piles à hydrogène en tant que chaîne de traction (selon différentes technologies : *full-power*, *mid-power* ⁽¹⁵⁾), soit des prolongateurs d'autonomie (*range-extender*), là encore, à hydrogène qui permettent la recharge de la batterie (voir la Figure 7 ci-dessus). Cette technologie de pile à combustible (ou pile à hydrogène) utilise des électrodes revêtues de platinoïdes, dont le platine. Selon les technologies, une pile à combustible nécessite entre 0,2-0,4 gramme de platine au kW. L'impact de ces technologies sur le marché du platine n'est pas attendu avant 2025, sachant que des efforts de R&D sont réalisés pour arriver à une substitution partielle ⁽¹⁶⁾, voire totale de ce platinoïde.

Contexte des véhicules thermiques

Ces architectures restent le cœur du marché automobile mondial, lequel est composé de motorisations à combustion interne (essence, Diesel, agro-carburants...), où la connectivité, le confort, l'économie de carburant et l'agrément de conduite n'ont cessé de progresser.

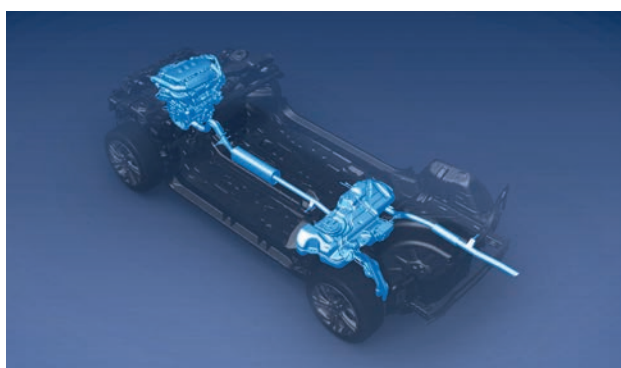


Figure 8 : Architecture type d'un véhicule thermique (source : ©Groupe PSA, direction de la communication).

(13) <https://www.faurecia.com/newsroom/la-technologie-de-la-pile-combustible-est-elle-le-nouveau-graal>

(14) <https://www.symbio.one/la-technologie-benefices/>

(15) <https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2020/02/CRA1-PTF-HYDROGENE-ET-PILES-A-COMBUSTIBLE-VF2.pdf>

(16) <https://www.afhyac.org/documents/Fiche%20Platine%20V2.pdf>

Les enjeux stratégiques pour les motorisations thermiques sont toujours ceux liés aux systèmes de catalyse, principalement le platine pour les motorisations Diesel, et le palladium rhodium pour les motorisations essence. Avec l'essor des différents mixtes énergétiques, les demandes en platinoïdes seront de plus en plus importantes pour répondre aux normes d'émission qui deviennent de plus en plus sévères au niveau mondial. De plus, les véhicules autonomes et communicants embarqueront de très nombreux capteurs (caméras, radar, lidar...) et l'électronique associée, ainsi que de nombreux composants communiquant avec les infrastructures. Tous ces éléments contribueront à une augmentation des matières critiques pour le secteur de l'électronique : Ta, Sn, Sb, In, Ga, Au, Si, Be...

Les leviers stratégiques

Face à ces enjeux, quels sont les leviers disponibles pour établir une stratégie au sein des filières, des grandes entreprises, voire même des PME ?

Une orientation réaliste n'est pas de disposer d'une indépendance sur l'ensemble des matériaux stratégiques, mais plutôt de diminuer systématiquement cette dépendance au regard des différents critères menant à la criticité. De plus, dans un marché mondialisé, il est essentiel de ne pas rechercher à tout prix notre indépendance, mais plutôt de sécuriser nos approvisionnements en matières les plus critiques en combinant différents axes stratégiques.

Il appartiendra à chaque entreprise d'établir un plan de mise en œuvre des différents leviers possibles, afin d'établir la stratégie la mieux adaptée à ses propres enjeux. Ainsi, cette stratégie doit permettre de concrétiser les avantages concurrentiels liés à la gestion des matériaux critiques.

Par exemple, le plan d'implémentation stratégique de l'Union européenne (SIP) liste 24 actions, définit 7 grandes priorités et cible au moins 3 applications de matériaux critiques à substituer ⁽¹⁷⁾.

(17) https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/eip/strategic-implementation-plan_en

La synthèse des différentes études et observatoires des secteurs industriels permet de dégager six grands leviers actionnables, notamment dans l'industrie automobile :

- la substitution ;
- la diversification des approvisionnements ;
- la sécurisation des approvisionnements ;
- l'économie circulaire, le recyclage et l'écoconception ;
- l'intelligence économique ;
- et la R&D.

La substitution

Dans le cadre d'une analyse détaillée du caractère stratégique d'une substance, ce levier est le premier à utiliser, car il permet rapidement de diminuer la dépendance à cette matière ou à son approvisionnement.

La notion même de substitution entre dans le critère de la qualification stratégique ou non d'une substance. Pour cela une analyse fonctionnelle précise doit être réalisée pour connaître l'influence de la substitution sur la performance technique et économique, et les coûts associés à un tel changement. Cela relève d'un choix d'entreprise, si techniquement cela est possible, mais peut aussi s'avérer plus onéreux. Malheureusement, cela n'est pas toujours possible et certains matériaux critiques sont peu substituables par d'autres matériaux.

Ainsi, par exemple, dans l'électronique, les quelques milligrammes de terres rares légères sont difficilement substituables, car elles sont essentielles aux propriétés électroniques.

Un exemple d'indice de non-substitution des terres rares est présenté dans le tableau 1 ci-après :

La substitution matériaux/matériaux est souvent liée à une perte d'efficacité ou de performance d'ordre technique, technologique, financier ou industriel. Celle-ci peut cependant se faire sous la contrainte, à l'exemple des aimants permanents largement utilisés dans l'automobile au travers des nombreux capteurs, actuateurs, actionneurs...

Suite à la crise des terres rares survenue en 2010, liée aux tensions sino-japonaises sur l'archipel des îles Senkaku-Diaoyu, de nombreux aimants permanents à base de terres rares (lourdes et légères) ont fait l'objet d'une substitution forcée par des aimants alternatives de type ferrite. Ainsi, une substitution du type même de la fonction aimant a eu lieu, souvent sous forme de *task-force*, face à l'envolée des prix des terres rares.

Bien sûr, ce genre de substitution ne peut se faire à iso-performances techniques et économiques ; des adaptations d'encombrement, de calibration ou de conception ont donc été nécessaires. Il s'agit bien d'une décision d'entreprise à prendre en urgence, mais surtout à prendre en considération pour adopter une approche de long terme.

Dans les moteurs électriques des véhicules hybrides, est observée une autre tendance de substitution : la substitution des terres rares lourdes des aimants néodyme-fer-bore (NdFeB).

Cet axe est tellement stratégique qu'il fait partie du plan de l'UE⁽¹⁹⁾, pour les technologies des énergies vertes.

(18) Union européenne, "Report on CRM for the EU", 2014.

(19) <https://ec.europa.eu/growth/sites/growth/files/eip-sip-part-2.pdf#page=16>

Usage	Commentaires	Indice de non-substituabilité
Aimants	Il existe des options pour remplacer les métaux rares des aimants, parmi lesquelles des matériaux magnétiques alternatifs et des technologies alternatives de moteurs	0.7
Piles	Transition de plus en plus fortes vers les piles à l'ion Lithium	0.3
Autres usages métallurgiques	L'utilisation des métaux rares dans ces autres usages n'est pas essentielle	0.3
Catalyse de cracking	Substitution difficile	1.0
Catalyse automobile	Substitution possible dans une certaine mesure	0.7
Autre catalyse	Substitution difficile	1.0
Poudres abrasives	Substitution possible dans une certaine mesure	0.7
Additifs verriers	Substitution difficile	1.0
Lampes fluorescentes	Les diodes électroluminescentes sont de plus en plus compétitives face aux lampes fluorescentes	0.7
Céramiques	Substitution difficile	1.0
Autres usages chimiques	Substitution difficile	1.0
Autres	On trouve des substituts sur certains marchés mineurs	0.5

Figure 5 : Substitutions aux métaux rares dans leurs différents usages (l'indice de non-substituabilité est compris entre 0 (valeur où la substitution est très aisée) et 1 (valeur où elle est très difficile)).

Source : Union européenne, Report on critical raw materials for the EU, 2014.

Tableau 1 : Exemples d'indices de non-substituabilité des terres rares par usage⁽¹⁸⁾.

Certaines technologies comme les nano-poudres permettent de disposer d'aimants permanents industriels sans terres rares lourdes (Dy, Tb) ; d'autres technologies seront prochainement disponibles.

Toyota a récemment présenté sa *road map* ⁽²⁰⁾ pour permettre la substitution 1) à court terme des terres rares lourdes Dy et Tb, et 2) à moyen terme d'une partie du néodyme et praséodyme par des terres rares légères moins critiques, comme le lanthane et le cérium.

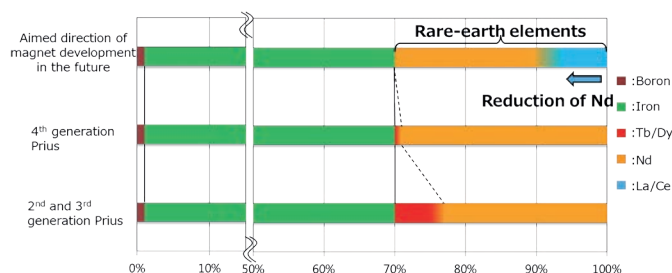


Figure 9 : *Roadmap* Toyota pour la substitution totale du Tb/Dy et partielle du Nd.

En Europe, les dernières retombées de projets scientifiques liés à différents projets européens portant sur cette même orientation technologique de substitution du néodyme ont été récemment publiées ⁽²¹⁾.

L'autre possibilité de substitution est celle d'une technologie à une autre technologie.

Toujours dans le domaine de l'électrification des chaînes de traction, les rotors bobinés des machines électriques sont un très bon exemple. Si pour répondre aux contraintes liées à la double motorisation thermique et hybride, les machines synchrones à aimants permanents sont majoritairement utilisées, les véhicules purement électriques offrent, quant à eux, plus d'alternatives technologiques, selon les architectures présentées précédemment. Ainsi, de nombreux modèles de BEV proposent des

(20) <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/21139684.html>

(21) <https://etn-demeter.eu/substituting-nd-in-nd2fe14b-based-hard-magnetic-alloys/>

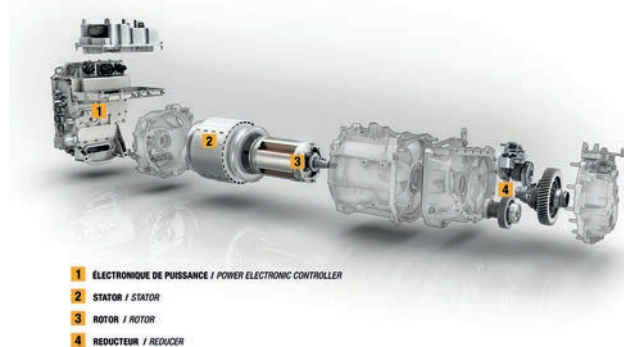


Figure 10 : Moteur électrique à rotor bobiné de la Renault ZOE (source : ©Groupe Renault, direction de la communication – Photo10a©-Pagecran ; photo10b©LA ROCCA Antoine).

machines électriques sans aimants permanents : à rotors bobinés (Renault-Zoe et Kangoo Z.E.), ou à cage d'écu-reuil (Tesla-roadster ou modèle S).

La diversification des approvisionnements

À l'heure où l'Inde et la Chine se sont transformées, d'exportateurs en importateurs nets de certaines substances critiques, l'initiative Matières premières de l'Union européenne engagée en 2008 est source d'une réflexion d'envergure sur l'approvisionnement en matières premières critiques. La France, au travers de la direction générale des Entreprises (DGE) et des Comités stratégiques de filières (CSF), a mis en place une vraie « diplomatie des matières premières » en proposant des règles de gouvernance et en aidant les industriels français, au travers des filières stratégiques, à renforcer leur potentiel de diversification en matière d'approvisionnement en matières critiques.

Ainsi, bien que de plus faible capacité et bien moins intégrée sur toute la chaîne de valeur, les exploitations minières australiennes, africaines, canadiennes, thaïlandaises, vietnamiennes ou malaisiennes peuvent parfois se positionner en sources d'approvisionnement venant en complément des principaux pays asiatiques.

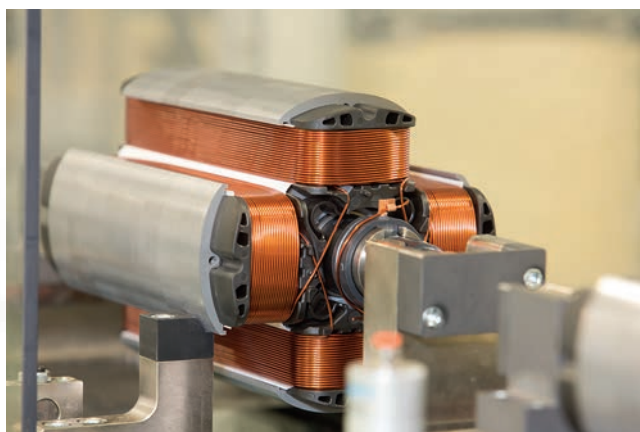
Par exemple, la Figure 11 ci-dessous restitue une présentation faite en 2019 aux acteurs industriels miniers aus-

Battery value chain : French innovation leaders

comes



Figure 11 : Illustration d'un écosystème français des matériaux stratégiques liés à la batterie (source : direction générale des Entreprises).



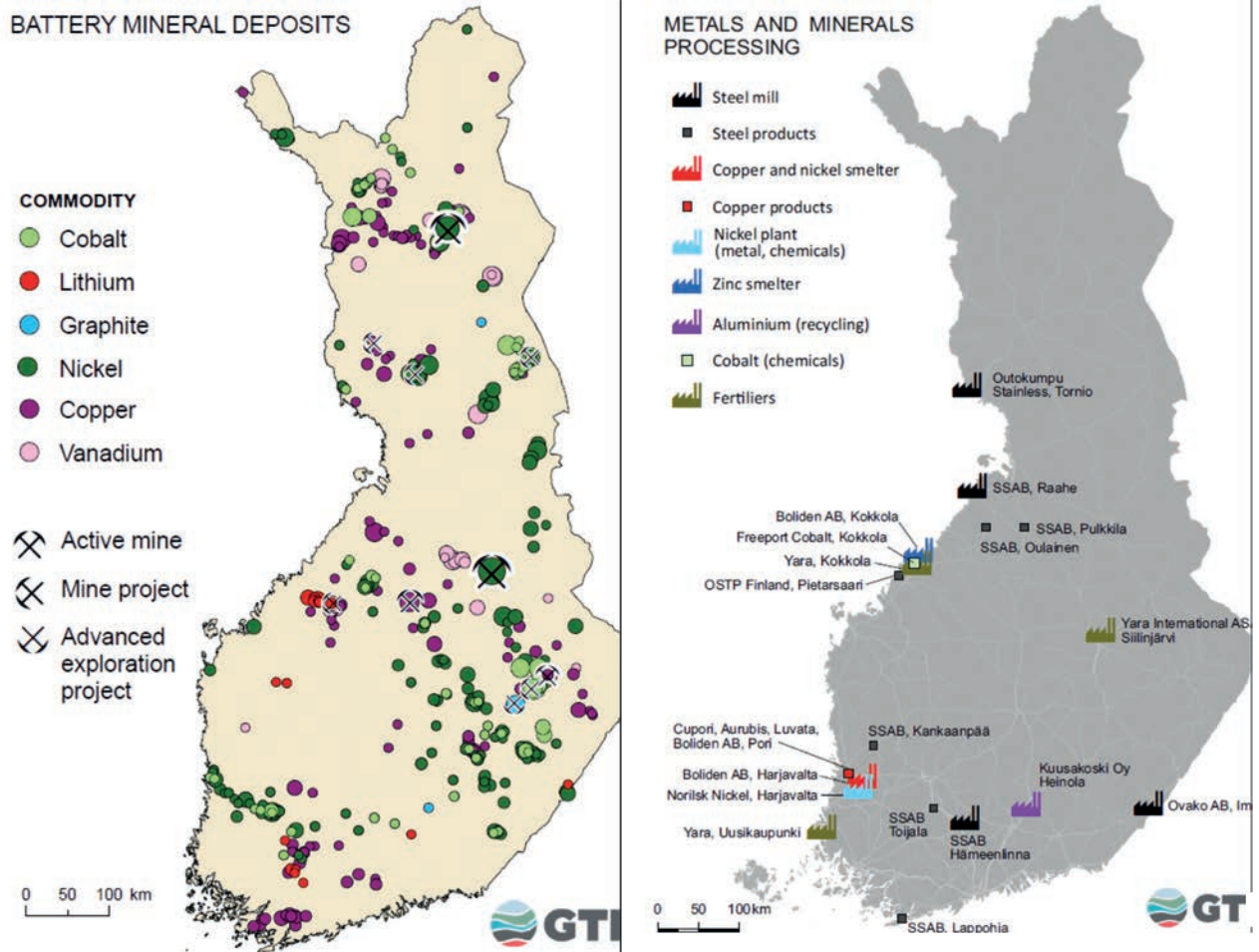


Figure 12 : Exemple de la filière minière finlandaise de minerais utilisés pour les batteries ⁽²²⁾.

traliens d'un écosystème français des matériaux stratégiques liés à la batterie.

Une autre source de diversification réside dans le travail coordonné par l'Union européenne pour développer la connaissance des gisements de matériaux critiques au sein des États membres, cela pour favoriser, développer et soutenir des approvisionnements de proximité, de tailles raisonnables et satisfaisant aux meilleurs standards environnementaux et sociaux.

Toute opportunité sera considérée comme stratégique dans le cadre du Projet important d'intérêt européen commun (PIIEC) instauré entre l'Allemagne, la Belgique, la Finlande, la France, l'Italie, la Pologne et la Suède, et visant à soutenir la recherche et l'innovation dans le secteur prioritaire européen commun des batteries ⁽²³⁾.

Ce suivi des nouvelles ressources fait également partie des pistes pouvant aboutir, ou non, à une autonomie/souveraineté minière, ou seulement à une « moindre dépendance » pour certains minerais, sous réserve que les volontés politiques techniques, économiques et légis-

latives identifient les critères différenciants pour chacune des filières concernées.

La diversification des approvisionnements permet de pondérer certains risques, notamment géopolitiques ou de gouvernance, tout en faisant jouer la concurrence. Cette stratégie est d'autant plus pertinente qu'elle peut s'accompagner d'une stratégie de substitution permettant de limiter la dépendance à une seule filière d'approvisionnement. Par exemple, la substitution des terres rares lourdes (dont l'approvisionnement est assuré à plus de 95 % par la Chine) par les nano-poudres, et/ou la substitution à venir d'une part grandissante du Nd/Pr par du Ce/La permettront de diversifier et de sécuriser les approvisionnements en ces terres rares légères, en se fournissant hors de Chine.

La sécurisation des approvisionnements

Cette sécurisation peut se faire à différents niveaux, selon le positionnement recherché dans la chaîne de valeur. Dans le cas des matériaux stratégiques, certains acteurs se positionnent soit très en amont, dès l'extraction du minerai, en investissant directement dans les mines, soit tout au long de la chaîne aval. Comme nous l'avons précisé *supra*, la majeure partie des approvisionnements étant étrangers, la sécurisation en amont de la chaîne de

(22) <https://www.gtk.fi/en/services/mineral-economics/mining-maps/>

(23) https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_19_6705

RAW MATERIALS: AGREEMENTS

MULTIPLICATION OF CONTRACTS MAINLY ON LI (LONG TERM NEED, "EASY"), WITH SOME OEM INVOLVED

Legend: OEM Implication acteur européen

LITHIUM	COBALT / NICKEL	Other
<ul style="list-style-type: none"> Posco invested 62M\$ in Pilbara, securing 5% of the company, and plans to invest in a JV in South Korea for a LiOH plant Posco concluded a deal to acquire lithium mining rights in Argentina from Australia's Galaxy Resources, for 280 M\$ CATL invested 47M\$ in North American Lithium (>90% shares of the company) Northvolt secured an offtake agreement with Nemaska Johnson Matthey signed long-term supply agreement with Nemaska for 60 ktons LiOH LG Chem concluded a 5-year agreement to buy 7 ktons/year LiOH from Nemaska LG Chem concluded offtake agreements with Ganfeng Lithium to the end of 2025 for a total of 90 ktons LCE and/or LiOH VW has signed a letter of intent with Ganfeng for 10 years supply of Li for battery cells Toyota (through Toyota Tsusho) took a 15% stake in Orocobre for 224M\$ Tesla signed a 3-year lithium supply deal with Australian miner Kidman Resources Tesla signed a deal with Pure Energy Minerals for the supply of LiOH Tesla signed an offtake deal with Ganfeng for about 20% of its LiOH production BMW signed a 5-year supply agreement with Ganfeng to get as much LiOH as it needs, at market prices Great Wall Motor secured lithium supply with Pilbara deal Tianqi Lithium bought a 24% stake in SQM for 4,1 Bn\$ Ganfeng bought SQM's 50% stake in the Cauchari-Olaroz project Ganfeng signed a long-term agreement with Pilbara Minerals SoftBank Group acquired a stake of up to 9.9% in Nemaska for 78 M\$ Hanwa signed off-take deals with Bacanora Minerals 	<ul style="list-style-type: none"> Posco set up 2 JVs to produce lithium-ion battery materials with Huayou Cobalt, one of China's top cobalt producers LG Chem agreed to build 2 precursor and cathode JVs with Huayou Cobalt to lock in supplies of cobalt for its batteries Glencore agreed to sell about 1/3 of its global cobalt production to GEM from 2018 to 2020. (GEM is a major supplier to CATL) LG Chem decided to provide capital and technical assistance for Cobalt Blue's cobalt project in Australia SK Innovation signed off-take contract for cobalt and nickel sulphates with Australian Mines BASF and Nor Nickel have signed a long-term, market-based supply agreement for nickel and cobalt feedstocks GEM, CATL (through its recycling arm Brump) invest 700 M\$ in a JV with Tsingshan to produce nickel chemicals Tsingshan teamed up with Huayou to build a nickel plant that could convert ore to matte, afterwards to sulphate Trafigura signed an offtake agreement for cobalt hydroxide running to end 2020 with Shalina Resources/Chemaf Trafigura has bought a 15% stake in nickel miner Terrafame Cobalt 27 agreed to buy the equivalent of 33% of the cobalt production from a unit of Vale (the world's first pure cobalt stream) 	<ul style="list-style-type: none"> BMW gained the right to take an equity stake in CATL, after BMW announced it would purchase 4.7Bn\$ worth of battery cells

Tableau 2 : Panorama global des partenariats conclus dans le domaine des matières stratégiques associées aux batteries.

valeur peut se concrétiser soit par des participations aux démarches initiées à l'échelon de la diplomatie internationale, telles que présentées précédemment, soit par des accords entre industriels, le plus souvent entre des acteurs internationaux issus de grandes capitalisations.

Rares sont les constructeurs automobiles qui agissent en tant qu'acteurs intervenant directement sur les matières stratégiques ; le plus souvent, ils s'associent à des acteurs majeurs qui apportent la garantie attendue sur les approvisionnements, d'où l'importance d'avoir une bonne connaissance de cette chaîne d'approvisionnement.

Le Tableau 2 ci-dessus dresse un panorama global des partenariats conclus dans le domaine des matières stratégiques associées aux batteries des véhicules électrifiés, lequel montre la diversité des parties prenantes et des stratégies possibles⁽²⁴⁾.

Une autre voie de sécurisation est la mise en place de sources alternatives d'approvisionnement, même si elles sont de faible capacité. Cela permet en effet de disposer d'une source sûre, validée et disponible, nécessitant néanmoins d'alimenter son approvisionnement à un niveau permettant de garantir un minimum d'activité sur les composants stratégiques. Cette stratégie est notamment utilisée pour les approvisionnements en matériaux non métalliques, où certains acteurs sont totalement intégrés dans la production de monomères ou de matières premières naturelles.

Dans ce cas, il s'agit de la volonté propre de chaque entreprise de définir le rapport gain/bénéfice qu'elle souhaite pour son activité, dans une approche probabiliste des tensions/ruptures du matériau stratégique considéré. Pour

cela, le levier de l'intelligence économique permettra de renforcer les scénarii.

Enfin, une autre possibilité est de réserver auprès du fournisseur un certain volume de production, sécurisant ainsi l'approvisionnement, surtout si celui-ci est externe. Cela passe par la conclusion de contrats, d'accords d'achat... Ce levier est le plus complexe à actionner, car il est dépendant du nombre des acteurs présents sur le marché, de la volatilité ou non, de la période couverte, de l'existence d'accords réciproques entre les acheteurs et le vendeur sur un marché qui, par définition, est tendu. De plus, en cas d'accord financier, la question de l'indice de référence, de la variation des prix et des limites et de la période de renégociation des accords est clé.

Le dernier levier, lié aux stocks de sécurité, est de plus en plus abandonné dans l'industrie automobile. Face aux stratégies agressives développées par certains acteurs dominants pour soutenir des prix permettant de limiter l'entrée de nouveaux acteurs ou, au contraire, susciter de fortes baisses des prix faisant ainsi le marché, les prix fluctuants de certaines matières premières (comme les terres rares) ont montré majoritairement l'inefficacité de ces stocks. Des stocks qui mobilisent et immobilisent des capitaux importants et qui ne préservent que peu efficacement contre les retournements de tendance ou des effondrements volontaires des cours.

La sécurisation des approvisionnements passe également par une meilleure connaissance de la chaîne d'approvisionnement et une bonne répartition des responsabilités tout au long de cette chaîne, avec l'implication de chacun des acteurs de celle-ci afin de sécuriser outre les approvisionnements, la provenance de ceux-ci. Dans le cas des minerais, notamment de conflit⁽²⁵⁾, la traçabilité des impor-

(24) Source : Renault, sur la base de rapports d'études communiqués à la presse, à la mi-2019.

(25) Règlement 2017/821 du Parlement européen et du Conseil du 17 mai 2017.

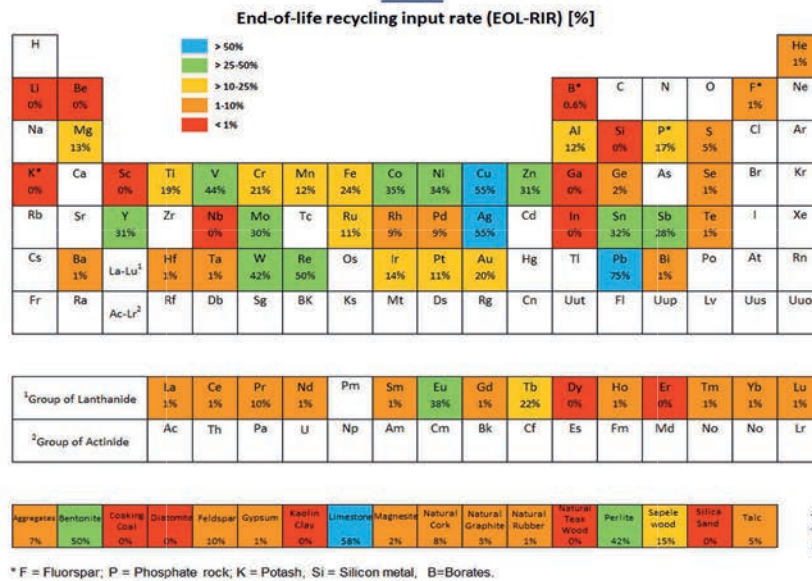


Tableau 3 : Taux de recyclage des éléments présents dans les équipements en fin de vie, au sein de l'UE.

tations est essentielle : elle doit être garantie aux utilisateurs aval de la filière, pour leur permettre de se conformer aux procédures liées au devoir de diligence. Pour cela, certains groupes de travail de la PFA ont été mis en place pour évaluer les différents moyens disponibles : vérification des informations par une tierce partie indépendante, audits des approvisionnements réalisés par une tierce partie, cryptage et traçabilité des données par le biais de la *blockchain*...

L'économie circulaire

Avec un *business* estimé au niveau européen à plus de 600 Mds d'euros, tous les leviers de l'économie circulaire doivent être actionnés pour apporter un complément de réponse aux enjeux liés aux matières stratégiques au travers de leur identification, leur réutilisation et leur recyclage. En effet, l'économie circulaire permet de réduire la consommation de matières primaires, de contribuer partiellement à la sécurité de l'approvisionnement, de diminuer les quantités de déchets automobile mis en décharge et de diminuer la consommation d'énergie : gain estimé à 2-3 % en termes de réduction des émissions de CO₂ au niveau européen⁽²⁶⁾.

Le positionnement central de l'économie circulaire, en général, et du recyclage, en particulier, a été réaffirmé ces derniers mois au travers des engagements européens et français (package Économie circulaire de la CE et feuille de route Économie circulaire de la France).

En complément de l'article de Jean-François Labbé publié dans le présent numéro des *Annales des Mines*, dans

lequel il précise que le « recyclage ne suffira pas », cette stratégie de recyclage doit être complémentaire d'autres axes d'approvisionnement, car, à lui seul, le recyclage ne pourra se substituer à aucune des filières d'approvisionnement en matériaux critiques. Nous devons en effet partir du constat que les matériaux critiques sont peu recyclés, et ce aussi bien en France (bien que les compétences et certaines filières existent), qu'au niveau européen, comme le souligne le tableau ci-dessus⁽²⁷⁾.

Dans l'industrie automobile, la directive de 2000 sur les véhicules hors d'usage (VHU) permet d'organiser un flux majeur des VHU vers des centres homologués, en réduisant les mises en décharge et en identifiant les composants dangereux pour l'environnement (comme ceux contenant du plomb). Elle permet également d'augmenter l'accès à certains composants stratégiques, comme les platinoïdes présents dans les lignes d'échappement, les composants électriques/électroniques et, bien sûr, l'aluminium, l'acier et les composants non métalliques.

De plus, le suivi des composants automobiles (par exemple, composition chimique, origine, étiquetage de composants contenant du plomb) améliore le tri et l'alimentation des filières aval existantes. Ainsi, la filière de recyclage des catalyseurs automobiles est particulièrement mature en Europe avec un taux de recyclage supérieur à 80 %. Selon Johnson Matthey⁽²⁸⁾, le marché des PGM est alimenté à hauteur de 25 % par du platine et du palladium secondaires.

(27) Source : JRC.

(28) <https://matthey.com/en/news/2020/pgm-market-report-february-2020>

(26) Source : Era-mines.

Source Comp.	Key CRM Equipment	Waste Type	CRMs	Required/Viable Input for End-processing	Current Economic Feasibility	
Fluorescent powders	Fluorescent lamps	WEEE	Eu, Tb, Y, Ce, La	Fluorescent powder	No*	
	CRT monitors and TVs		Y, Tb, Eu, Gd, La, Ce	Fluorescent powder		
Nd-magnets	Temperature exchange equipment (engine, compressor)	WEEE	Nd (+ Dy, Gd, Pr, Tb)	Magnets	No	
	Household appliances other than temperature exchange equipment (motors/drives)					
	Laptops (HDD)					
	Desktop Computers, prof. IT (HDD)					
	BEV, (P)HEV (electro engine)					
Printed Circuit Board	Desktop computers, prof. IT	WEEE	Au, Ag, Bi, Pd, Sb	Entire devices w/o battery (mobile phones), PCBs (shredded, unshredded), CuPM granulate	Yes	
	Laptops					
	Mobile phones					
	Tablets					
	External CDDs, ODDs, devices with internal CDDs/ODDs					
Li-ion batteries	Laptops	WEEE	Co	Batteries	Yes	
	Mobile phones					
	Tablets					
	Li-ion batteries in other WEEE					
	BEV, (P)HEV					
NIMH battery	NIMH batteries in WEEE	WEEE	Co, Ce, La, Nd, Pr	Batteries	Yes (Co)	No (REEs)
	HEV	ELV				
Lead acid batteries	Lead-acid batteries	WEEE	Sb	Batteries	Yes	
		ELV				

*Recent developments in countries outside the EU have been reported but detailed information about the economic feasibility is not yet available.

Tableau 4 : Exemple de matériaux stratégiques exploitables dans les véhicules hors d'usage (ELV, en anglais) ⁽²⁹⁾.

Dans un marché en forte croissance comme celui de l'électrification, et compte tenu des transitions technologiques observées dans les chimies des cathodes (moins riches en cobalt) et de la disponibilité sur un temps long des déchets (batterie, machines électriques...), certaines filières de métaux critiques seront essentielles, même si :

- selon une étude du cabinet Circularenergystorage ⁽³⁰⁾, le lithium recyclé ne pourra couvrir que 9 % des besoins en 2025 et le cobalt recyclé couvrira 20 % de la demande.
- l'ADEME ⁽³¹⁾ observe « qu'en raison de l'importance des tonnages de cuivre nécessaires à la transition énergétique, le cuivre recyclé en fin de vie ne représentera qu'un pourcentage très faible du cuivre produit »,
- selon les projections du projet SCRREEN ⁽³²⁾, le néodyme recyclé ne représentera que 6-8 % des besoins en 2030 et seulement 2-4 % pour le dysprosium, et ce même en maintenant les efforts de R&D au-delà de 2025.

(29) <https://cewaste.eu>

(30) <https://circularenergystorage.com/news/2017/11/30/press-release-recycled-lithium-to-reach-9-percent-of-total-lithium-battery-supply-in-2025>

(31) ADEME, fiche technique de juin 2017, Alain Geldron.

(32) <http://screen.eu/results/>

Ainsi, l'approvisionnement en matières premières secondaires doit prendre en compte les considérations fondamentales suivantes :

- L'accès aux gisements et les flux de déchets contenant des matières stratégiques. Malheureusement, une bonne partie des déchets à valeur économique positive quitte le marché communautaire (~50 % des VHU) ; ce flux de déchets n'est donc plus exploitable pour la filière européenne. Ce taux de fuite est estimé à 25 % pour les véhicules PHEV ⁽³³⁾.
- La capacité technologique pour extraire et purifier la matière présente dans des assemblages à la complexité croissante, avec des teneurs en matières critiques de plus en plus faibles, ces dernières, en définitive, pouvant se trouver mélangées à de nombreuses impuretés.
- Des déchets automobiles riches ou, au contraire, dispersés. Un exemple de matériaux dispersés est celui des terres rares légères, présentes en quelques milligrammes dans de nombreux composants électriques ou électroniques : diodes, capteurs, écrans, cartes électroniques...

(33) <https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2019/06/PTF-Recyclage-batterie-lithium.pdf>

- Le temps d'immobilisation du matériau. Dans le cas de l'automobile, la majeure partie des composants de première monte, à forte valeur ajoutée, sont réutilisés (rechange, réparation, seconde vie...). Puis, dans certains cas, un troisième marché peut exister hors du domaine automobile (par exemple, des batteries de traction converties en stockage stationnaire). Considérant que l'âge moyen des véhicules en Europe est de 12 ans, mais que l'âge des véhicules en fin de vie est de plus de 15 ans, de nombreux déchets automobiles ne seront donc pas disponibles avant un délai de plus de 15 ans.
- Mais le principal frein au recyclage est bien le bilan technico-économique sur le long terme. Pour répondre à l'objectif d'optimisation des usages, il faut traiter des concentrations souvent faibles qui nécessitent des installations et procédés pour réaliser des opérations de tri souvent complexes, dans le respect des meilleures pratiques. Comme nous l'avons vu, les temps d'immobilisation peuvent être longs, et certaines ruptures technologiques peuvent rendre inexploitable certaines ressources sur le long terme (batteries NiMeH remplacées par des batteries lithium-ion, substitution progressive des terres rares lourdes dans les aimants permanents...).

Afin de disposer d'un écosystème couvrant le démontage, les technologies de recyclage et les débouchés des produits, la filière automobile, en partenariat avec les pouvoirs publics et différentes autres filières industrielles, s'est engagée dans un travail de réflexion concrétisé au travers :

- des recommandations du COMES préconisant le développement de compétences industrielles françaises dans le recyclage des métaux critiques⁽³⁴⁾,
- du groupe de travail sur l'économie circulaire réfléchissant au développement d'une filière intégrée de recyclage des batteries lithium – que concrétise le projet structurant développé par la Plateforme Automobile⁽³⁵⁾ – et le recyclage des véhicules hors d'usage de demain, correspondant respectivement aux actions 5 et 6 issues du contrat de filière du CSF Mines et métallurgie de 2019⁽³⁶⁾,
- d'études sur la création d'une filière de recyclage des aimants dans les secteurs clés des transports, de l'énergie, de l'électronique, des biens de consommation... Ainsi, plusieurs scénarii sont à l'étude pour permettre l'extraction de certains métaux stratégiques, comme le nickel ou le cobalt, ou proposer des poudres de terres rares pour l'industrie des matériaux magnétiques.

La R&D

Cette stratégie sur le moyen-long terme pourra mener à la substitution ou à la rupture technologique permettant de diminuer ou annuler une dépendance. Elle sera donc un axe fort d'agilité, dès lors qu'elle sera associée à une politique de long terme (politique d'innovation). Ce soutien

à la R&D est largement acquis dans l'industrie automobile à travers tout son écosystème :

- Au niveau international, au travers du projet ERAMIN2⁽³⁷⁾.
- À l'échelle européenne, grâce au Projet Important d'Intérêt Européen Commun visant à soutenir la recherche et l'innovation dans le secteur prioritaire des batteries⁽³⁸⁾.
- Au plan national, au travers des différents soutiens à la recherche et à l'innovation industrielle, de la politique des pôles de compétitivité ou du programme Investissements d'avenir (PIA).
- Au niveau régional, grâce notamment aux pôles de compétitivité ayant pour mission d'accompagner les projets de R&D, notamment ceux des PME, ou aux plateformes de transferts de technologie des Instituts de recherche technologique (IRT) ou des Instituts pour la transition énergétique (ITE). Ainsi, pour l'expression des besoins stratégiques de la filière Automobile et mobilité, la PFA dispose d'une plateforme d'*open Innovation*⁽³⁹⁾.

Cette dynamique forte de R&D s'est traduite en ce qui concerne le recyclage des matériaux critiques par le lancement de plus de 180 projets en France ces dix dernières années⁽⁴⁰⁾.

Project	Full name	Links	CRM relevance
MICA	Mineral Intelligence Capacity Analysis	http://www.micaproject.eu	Mica
METGrow+	Metal Recovery from Low Grade Ores and wastes	http://metgrowplus.eu	Ni, Cu, Zn, Co, In, Ga, Ge
ADIR	Next generation urban mining - Automated disassembly, separation and recovery of valuable materials from electronic equipment	http://www.adir.eu/	REEs, Ta, Ge, Co, Pd, Ga, W
AVAR	Added Value Alumina Refining	https://eitrawmaterials.eu/project	Gallium, Vanadium
CloseWEEE	Integrated solutions for pre-processing electronic equipment, closing the loop of post-consumer high-grade plastics, and advanced recovery of critical raw materials antimony and graphite	http://closeweee.eu/	Critical Minerals and Metals
CYCLED	Cycling resources embedded in systems containing Light Emitting Diodes	http://www.cyc-led.eu/	Ga, In, REEs, Au, Ag, Sn
PLATIRUS	PLATInum group metals Recovery Using Secondary raw materials	http://www.platirus.eu/	PGMs
PARTIAL-PGMs	Development of novel, high-performance hybrid TWV/GPF automotive after-treatment systems by rational design: substitution of PGMs and Rare Earth materials	https://www.partial-pgms.eu/	PGMs, REEs
REE4EU	Integrated high temperature electrolysis (HTE) and Ion Liquid Extraction (ILE) for a strong and independent European	http://www.ree4eu.eu/	REEs

Tableau 5 : Exemples de projets relatifs à l'approvisionnement ou au recyclage des matériaux critiques⁽⁴¹⁾.

Dans le tableau ci-dessus, sont mentionnés les projets suscitant les plus fortes attentes sur les platinoïdes, les terres rares et certains composants critiques pour le véhicule électrique et connecté.

Les filières industrielles cherchant toutes à faire un usage efficace des matériaux stratégiques, seule la R&D est à même de couvrir l'ensemble des besoins de-

(34) <http://www.mineralinfo.fr/actualites/recommandations-comite-metiaux-strategiques-comes-developpement-competences-industrielles>

(35) <https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2019/06/PTF-Recyclage-batterie-lithium.pdf>

(36) https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/conseil-national-industrie/Contrats_de_filiere/dossier-presse-CSF-mines-et-metallurgie-18012019.pdf

(37) <https://www.era-min.eu/>

(38) https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_19_6705

(39) <http://www.inovev.com/index.php/fr/pfa-auto>

(40) <https://www.industrie-techno.com/article/metaux-rares-a-consommer-avec-moderation.52708>

(41) Sources : CORDIS, H2020, JRC, ERA-NET, EIT Raw Materials websites and databases.



Figure 13 : Écosystème de la PFA mobilisé pour assurer une veille en matière d'intelligence économique.

puis les briques scientifiques et technologiques, jusqu'à la conception et l'économie circulaire. Les publications associées à ces activités de R&D sont également des leviers d'attractivité forts.

L'intelligence économique (IE)

Ce levier, selon les enjeux, peut se construire au niveau des sociétés, des groupes ou des filières. Il ne sera pas fait référence ici aux possibilités existant au niveau des entreprises, chacun des acteurs de la filière restant maître de sa stratégie. La priorité est bien de disposer d'outils afin de proposer les meilleures orientations et briques de décision afin de consolider les stratégies de sécurisation, et ainsi mieux anticiper les évolutions majeures. Cette intelligence économique est indispensable pour consolider les hypothèses des outils de prospective relatives aux évolutions pouvant impacter la chaîne de valeur, depuis l'extraction minière jusqu'aux technologies de commercialisation.

L'IE va s'appuyer sur différents réseaux présents dans l'écosystème automobile et connexe. Dans le cadre de la PFA, un exemple d'écosystème activé pour assurer une veille mobilisant l'IE est celui restitué dans la Figure 13 ci-dessus.

Conclusion

Comme nous l'avons vu, une grande partie des éléments de la classification périodique des éléments sont utilisés dans l'industrie automobile, laquelle se caractérise par une chaîne logistique parfois complexe et une chaîne de valeur très spécifique. Certaines matières premières sont stratégiques et indispensables à l'activité de la filière et

de son écosystème. L'approvisionnement en ces matières est critique au regard des nombreux enjeux économiques (importance financière, concentration des acteurs), financiers (montant des investissements et retour sur investissement, stratégie de long terme...), géopolitiques (gestion des ressources, politique de gouvernance, d'exportation...), technologiques (difficulté de la substitution, défis de l'extraction, défis des filières de recyclage..) ou encore géologiques, environnementaux et sociétaux.

Face à ces nombreux enjeux et à leur importance dans l'industrie automobile, il est essentiel pour les industriels de diminuer leur vulnérabilité en accroissant leur indépendance vis-à-vis des différentes matières critiques. Pour cela différentes stratégies peuvent être mises en œuvre en prenant en compte l'importance du coût de ces matières par rapport aux revenus de l'entreprise, en acquérant une meilleure connaissance de la boucle d'approvisionnement, en développant la capacité à piloter un plan de substitution et d'innovation de long terme, en facilitant l'intégration de l'économie circulaire (en amont et en aval), et ce tout en anticipant les futures contraintes réglementaires environnementales et sociétales, sans oublier les concurrences éventuelles entre les différentes filières industrielles.

Ainsi, la mobilisation de ces différents leviers stratégiques permettra de mieux accompagner une transition énergétique plus responsable et respectueuse de l'environnement, avec pour objectif d'atteindre la neutralité carbone en 2050, tel que préconisé dans le Pacte vert européen, lequel prône une utilisation efficace des ressources, et donc des matériaux critiques, notamment grâce à l'essor de l'économie circulaire.