

Matériaux critiques et axes stratégiques pour l'industrie automobile

Gildas BUREAU est pilote du groupe de travail sur les matériaux stratégiques pour l'industrie automobile au sein de la plateforme automobile et mobilité (Stellantis).

Nous présentons ici les activités de la filière automobile, les enjeux du véhicule et des futures mobilités. Il sera également présenté les activités liées du groupe de travail de la filière sur les matériaux critiques (qui ne sont pas que des minerais¹) et les « leviers » mis en place pour relever les nombreux enjeux qui se présentent. Nous adresserons également les compétences rares qu'il faut obligatoirement créer pour le succès final.

1 La filière automobile et les enjeux associés

1.1. Filière automobile

La **plateforme automobile et mobilité (PFA)** rassemble tous

1. Un minéral est une roche présentant une concentration élevée en matériaux utiles. Source : Dictionnaire Larousse.

les acteurs liés à la filière automobile en France. Elle représente 4 000 entreprises, plus de 400 000 emplois et 6 milliards d'euros en recherche et développement.

Sa gouvernance s'appuie sur un conseil des présidents constitué :

- d'un collège des constructeurs (Stellantis, Renault, CCFA : comité des constructeurs français d'automobiles) ;
- d'un collège équipementiers et sous-traitants : Forvia, Michelin, Plastic Omnium, Valeo, Fiev, fédération de la carrosserie (FFC), de la mécanique (FIM), de la plasturgie (GPA), du syndicat national du caoutchouc et des polymères (SNCP).

La contribution à la thématique « Innovation R&D, enseignement-recherche » est très forte dans tout ce secteur,

la filière automobile étant la 1^{re} déposante de brevets en France.

1.2. Les enjeux

Les futurs véhicules seront **électriques, connectés et autonomes**. Ils seront également **sûrs et sécurisés**, au niveau de la recharge électrique, mais aussi au niveau de la **cyber-sécurité**. Quand nous parlons de connectivité, cela implique de nombreuses interfaces et différents moyens de communication. Toutes ces fonctions impliquent le besoin de pouvoir mettre régulièrement et rapidement le véhicule à jour. Des systèmes sophistiqués sont installés pour tout ce qui est « mise à jour embarquée » ou « mise à jour débarquée » qui passent par ces systèmes. Il y a également les réseaux – comme précédemment présenté par le Directeur de l'innovation chez Orange – pour tout ce qui est téléphonie, mais également tout ce qui est connectivité avec le réseau extérieur. Dans ces futurs véhicules connectés, selon le niveau d'autonomie, la responsabilité de la conduite du véhicule pourra être complètement déléguée. Des intrusions étant possibles, elles doivent être totalement détectées, bloquées pour sécuriser les systèmes du véhicule et de ses occupants.

Il faut aussi que le véhicule du futur reste abordable financièrement : pour une mobilité décarbonée avec le véhicule électrique, c'est un vrai enjeu pour le rendre accessible à tous. Nous observons également de nouveaux usages qui se répandent comme la grande tendance de l'usage au lieu de

la possession (avec la location longue durée). Le « **leasing** » **social** pour le véhicule électrique pour certains foyers étant le parfait exemple de ces enjeux sociétaux. Cet enjeu du véhicule électrique accessible à tous est essentiel pour éviter toute fracture sociale autour de la mobilité décarbonée.

Le véhicule du futur sera également « à faible empreinte carbone » et respectueux de l'environnement. Cela se traduit par des objectifs dans tous les secteurs d'activités – les différents scopes² – c'est-à-dire aussi bien dans l'empreinte carbone de la production des usines, la logistique, que pendant l'usage. Ainsi, au moment de la recharge d'un véhicule électrique, la décarbonation du secteur ne pourra se faire massivement que si l'électricité utilisée est à faible empreinte carbone et dans ce secteur la France dispose d'un réel avantage. Pour finir, il ne faut pas oublier la volonté européenne d'un « zéro émission », émissions de CO₂ mais aussi de toutes les émissions de polluants ou de particules.

Le « paquet climat-énergie » européen, baptisé « Fit for 55³ » encadrant notamment les émissions de CO₂, est illustré en **Figure 1**. En 2030, les émissions de CO₂ devront diminuer de 55 % (par rapport à 1990), sachant qu'actuellement elles sont est à 95 g avec une trajectoire à 0 g en 2035.

2. Scope : étendue, champ.

3. Le « Fit for 55 » est un ensemble de mesures législatives adopté par le Conseil européen en 2022 avec pour objectif de réduire d'au moins 55 % les émissions de gaz à effet de serre (le CO₂ notamment). Source : ecologie.gouv.fr.



Figure 1

Courbes d'évolution de l'émission de CO₂ en fonction des années écoulées.
Source : PFA.

Cette obligation d'atteindre le zéro émission de CO₂ en 2035, imposée à l'heure où nous parlons, que tous les véhicules hybrides ou fonctionnant avec des carburants alternatifs (hydrogène, e-fuels), **ne pourront plus être vendus en Europe** à cette date. Sans dérogations (en cours de discussions), les constructeurs auront donc obligation de mettre sur le marché soit des véhicules purement électriques, soit des véhicules à hydrogène (*fullpower*⁴, ou hybride à batterie) comme illustré sur la **Figure 2**.

Cette réglementation européenne constitue une vraie révolution pour toutes les industries du transport et notamment celles du transport terrestre. La plateforme automobile et mobilité – avec le cabinet AlixPartners – a ainsi publié fin 2021 une étude multisectorielle⁵ sur les

conséquences de ce paquet climat « Fit for 55 » sur les emplois au sein des filières, illustrant les évolutions et les transferts d'activités entre les industries mécaniques, électriques et électroniques.



Figure 2

Architecture d'un véhicule utilitaire avec pile à combustible et batterie de traction.

Source : Symbio-Stellantis.

4. *Fullpower* : pleine puissance ; fait référence aux véhicules purement à hydrogène.

5. « Fit for 55 » – Quelles conséquences pour la filière automobile française. – PFA (pfa-auto.fr).

1.3. Évolution des véhicules

Comment cette évolution au niveau des énergies et des réglementations se traduit-elle sur **le véhicule connecté autonome électrique** ? Nous allons avoir par exemple de nouveaux composants au niveau de la chaîne de traction pour piloter et gérer les batteries ou les piles à combustibles. Ceux-ci nécessiteront de nouveaux matériaux stratégiques ou des usages plus intensifs de certains métaux critiques. Par exemple, cela imposera le recours massif au lithium, au cobalt, au nickel, au graphite, au niveau des batteries ou, avec la pile à combustible, nous pouvons également évoquer les platinoïdes⁶ ou intensifier l'usage de métaux conducteurs électriques comme le cuivre (**Figure 3**).

Si les nombreuses technologies des batteries des

6. Nom donné aux groupes des métaux de la famille du platine. On y distingue les platinoïdes légers, comme le ruthénium, le rhodium et le palladium, ainsi que les platinoïdes lourds, comme l'osmium, l'iridium et le platine.

véhicules électriques sont souvent prises en exemple, l'architecture complète d'un véhicule électrique est également complexe et nécessite de nombreux nouveaux matériaux. En voici quelques exemples :

- Une chaîne de traction électrique peut disposer d'une, de deux, voire trois machines électriques sur un même véhicule et pour certaines mobilités légères ou autonomes, une machine électrique est intégrée au niveau de chacune des roues. Ces machines nécessiteront de l'aluminium (carter), du cuivre, des composants électroniques et des terres rares pour les machines électriques à aimants permanents.
- Au niveau architecture électrique et électronique, le véhicule doit pouvoir piloter ces machines électriques (via de « l'électronique de puissance »), être connecté aux nombreux calculateurs internes, au réseau externe, au téléphone des utilisateurs, aux infrastructures voire aux autres véhicules. Ces fonctions nécessiteront des composants

Figure 3

Évolution de l'utilisation des matières premières des véhicules électriques par rapport au moteur à combustion. ICE : Internal Combustion Engine = moteur à combustion interne. BEV : Battery Electric Vehicle = Véhicule à batterie électrique.

Source : PFA-AlixPartners.

Matière première	Différence de poids nette BEV vs ICE (kg)	
Cuivre	64	+250 %
Graphite	56	
Autres	54	
Aluminium	42	+24 %
Électrolyte (hors lithium)	36	
Nickel	29	
Cobalt	10	
Manganèse	9	
Lithium	7	
Caoutchouc	-1	-1 %
Plastiques	-6	-4 %
Fluides & lubrifiants	-16	-32 %
Acier	-106	-20 %
TOTAL	+179 kg	+19 %*

utilisant du silicium, cuivre, plomb, étain, et pour les futures technologies de calculateurs le nitrure de gallium (GaN) ou carbure de silicium (SiC).

- Le véhicule électrique nécessite également le recours à des polymères techniques⁷, comme les matériaux pour les « barrières thermiques⁸ » pour renforcer la résistance au feu du véhicule, ou des membranes séparatrices au sein de la batterie ou de la pile à combustible.

- Au niveau de la connectivité et des systèmes d'aide à la conduite (ADAS⁹), les besoins seront également considérables pour ces systèmes d'aide dont beaucoup sont déjà disponibles et contribuent à la sécurité passive. Au-delà des TICs¹⁰ évoquées précédemment, des nouveaux équipements seront nécessaires pour les véhicules

7. Polymères techniques : famille de polymères possédant de hautes propriétés mécaniques, thermiques et chimiques, supérieures à celles des polymères courants.

8. Permet de renforcer la résistance du véhicule à l'emballlement thermique de la batterie.

9. ADAS : *Advanced Driver Assistance System* : système d'assistance à la conduite.

10. TIC : Technologies de l'Information et de la Communication.

autonomes comme les caméras, les radars, les sonars, des lidars¹¹ (Figure 4).

Une autre dimension à prendre en compte est les différents usages liés au véhicule électrique : urbains, routiers, péri-urbains.

Par exemple, dans le cas des usages routiers, les attentes sur l'autonomie orientent les choix vers l'allègement et l'aérodynamique : c'est ici qu'interviennent les capotages¹², l'utilisation des matériaux plus légers-plus résistants, ou la diminution de la résistance aux frottements. Avec, par exemple chez Michelin (Figure 5), des pneumatiques adaptés aux véhicules électriques. Tous ces leviers permettent d'améliorer l'autonomie des véhicules à iso-chimie de batterie.

Des réflexions existent également pour adresser le concept de « *vehicule as a service* », c'est-à-dire utiliser un véhicule typé urbain pour les utilisations urbaines, et

11. Le lidar (*Light Detection and Ranging*) correspond à la télédétection par laser, et permet de mesurer une distance précise. Source : Wikipédia.

12. Correspond au recouvrement d'un moteur, d'une machine par un capot en tôle ou en alliage léger. Source : Dictionnaire Larousse.



Figure 4

Exemple de fonctions ADAS.

Source : Valeo.

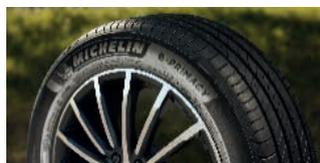


Figure 5

Modèle de pneu Michelin pour véhicule électrique.

Source : Michelin.

une extension d'autonomie pour un usage routier. Dans ce sens-là, le véhicule et sa batterie deviennent un « service », comme pour d'autres applications courantes mais sans changer de véhicule.

2 Matériaux critiques, stratégiques et leviers mis en place

2.1. Approche de la criticité des matériaux stratégiques

Ainsi, dans ce contexte, un groupe de travail de la PFA est entièrement dédié aux matériaux critiques et stratégiques pour la filière automobile.

Le travail se base notamment sur les différentes matrices de criticité établies au niveau mondial : Union européenne, États-Unis, Asie (Figure 6). Ces États dressent également,

en fonction des besoins, des approvisionnements et de l'importance économique, leurs matrices de criticité à certains matériaux.

Au sein de ce groupe, nous étudions ensuite les différentes évolutions du véhicule du futur, les mix énergétiques et technologiques pour étudier l'importance des différents matériaux. À partir de là, nous avons publié en 2021 une position de filière, qui présente l'état des matériaux stratégiques pour l'automobile (Figure 7).

Également, autour de ce groupe de travail, une approche systémique a été mise en place. Cette approche permet d'échanger rapidement, directement, de façon très active et très réactive avec l'écosystème automobile français. Cette organisation

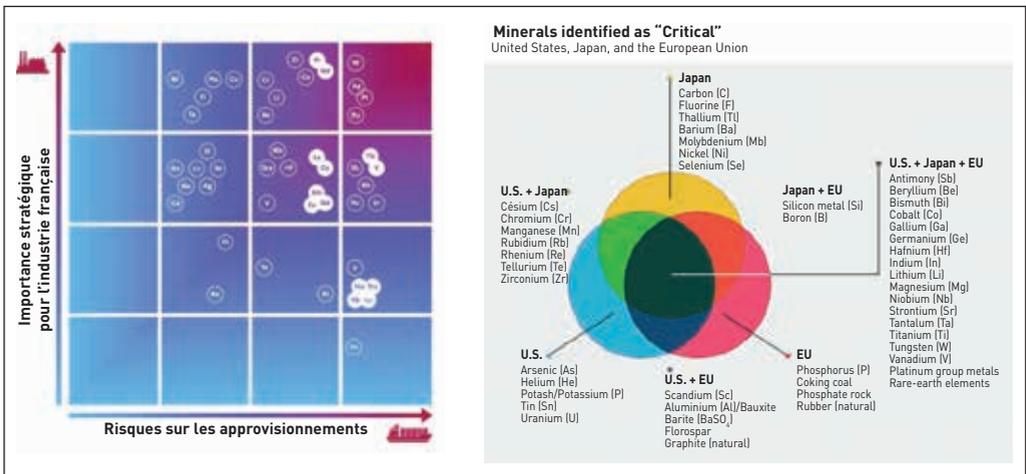


Figure 6

À gauche, matrice de criticité pour différents matériaux : en ordonnée, l'importance stratégique pour l'industrie française, et en abscisse, les risques sur les approvisionnements. À droite, les minéraux identifiés comme étant critiques suivant certains pays.



Figure 7

Position technique de filière sur les matériaux stratégiques.

Source : PFA.

a démontré tous ses intérêts face aux récents conflits, tensions géopolitiques, réglementations qui rendent nécessaire le traitement de ces nombreuses évolutions. Cela permet également le partage d'informations croisées, de renforcer l'évaluation des risques et favorise l'adoption rapide de décisions pour la filière et son écosystème.

Prenons le cas de l'Ukraine : le grand public a (re)découvert l'importance des échanges industriels entre l'Ukraine, la Russie et l'Europe, et le rôle de ce pays dans l'approvisionnement de certains composants automobiles ou de matériaux critiques.

Ainsi, dans l'automobile, nous ne parlons pas de matériaux « rares » mais de matériaux « critiques » qui sont utilisés dans de nombreuses applications (**Figures 8 et 9**) et qui, pour certains usages au sein de la filière automobile, vont devenir stratégiques.

2.2. Quels sont les matériaux stratégiques ?

Ils sont décrits dans la position de filière (**Figure 7**). Citons les platinoïdes, les matériaux pour batterie, les terres rares – beaucoup de terres rares sont utilisées dans l'automobile –, dans différents composants : actuateur¹³, composants électroniques, aimants permanents...

Certains métaux stratégiques sont associés à des exigences réglementaires comme « les minerais issus des zones de conflits » portant sur l'approvisionnement des 4 métaux Sn, Ta, Au, W (**Figure 10**), très utilisés dans les composants électriques et électroniques.

Mais il y a aussi des polymères dont certains monomères deviennent difficiles à approvisionner ou à diversifier.

13. Actuateur : dispositif permettant de réguler le débit et la pression d'un fluide (air, gasoil, huile). Source : lalanguefrancaise.com.

IUPAC periodic table of the elements

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71 Lanthanides	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89-103 Actinides	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Ts	118 Og
Lanthanides :		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
Actinides :		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

Figure 8

Cartographie des matériaux critiques dans l'automobile (en rouge).

Source : PFA.

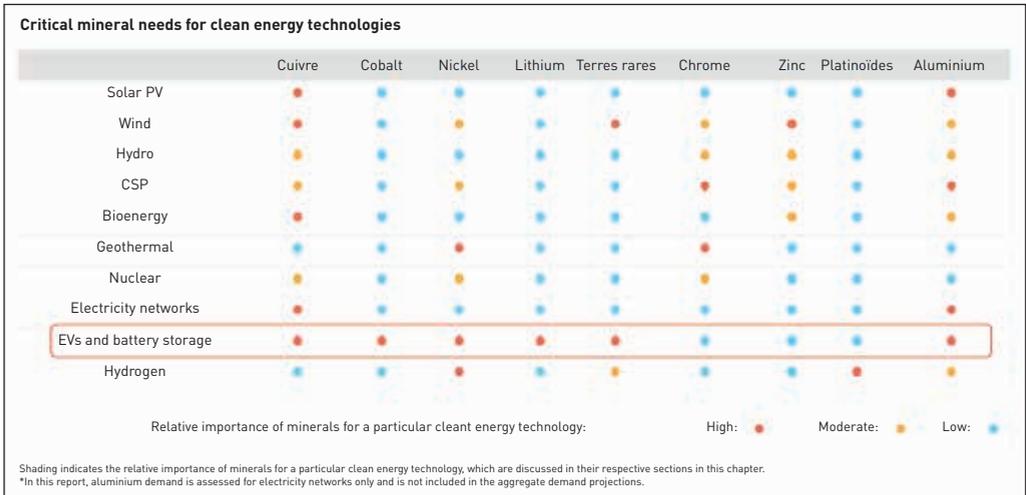


Figure 9

Matériaux critiques nécessaires pour les technologies des énergies vertes, encadrés en rouge pour les véhicules électriques et les batteries. Point rouge : haute importance relative, point orange : importance modérée, point bleu : faible importance.

Terre rare : famille de 17 métaux

Source : IEA.

Ainsi, les matériaux stratégiques pour le secteur automobile sont :

1. Les platinoïdes : principalement Pt, Pd, Rh
2. Les matériaux pour batteries / électrification : Li, Co, Ni, Cu, Graphite
3. Les terres rares (lourdes et légères) : Nd, Pr, La, Ce, Sm, Tb, Dy
4. Les métaux du numérique, de la connectique et de l'électronique (commun aux autres industries) : Ge, Ga, In
5. Les métaux issus de zones de conïit: Sn, Ta, Au, W
6. Certains plastiques : PA, PPE, PVDF
7. Autres matériaux d'origine minérale ou naturelle qui présentent des risques RSE forts comme :
 - le caoutchouc naturel : non substituable à court terme (applications pneumatique / système antivibratoire,...)
 - le mica (charges, pigments, additifs, feuillets...)
 - le cuir, au niveau des questions liées au bien-être animal

Figure 10

Liste des matériaux stratégiques dans le secteur automobile.

Source : PFA.

Les producteurs chimiques deviennent de plus en plus multinationaux, et, souvent, regroupent leurs capacités de production de monomères essentiels à la transition énergétique (dont certaines interviennent dans les batteries par exemple). Ainsi, en cas d'accidents industriels, d'incidents (comme les récents incidents climatiques), nous pouvons avoir une forte dépendance et des ruptures d'approvisionnement très importantes.

D'autres matériaux sont moins souvent cités : ce sont ceux d'origine naturelle, par exemple le caoutchouc naturel, le mica, mais aussi le cuir. Leurs approvisionnements peuvent se heurter à des questions sociales, environnementales ou sociétales (le bien-être animal, l'exploitation de surfaces agricoles).

Des facteurs politiques peuvent également profondément modifier certains approvisionnements : cela peut prendre la forme d'aides ou de subventions, de choix normatifs, de quota, d'obligations d'usage (« contenu recyclé » par exemple) ou d'interdictions d'exportations.

2.3. Les leviers mis en place

Au sein de ce groupe de travail, nous manipulons six leviers afin d'essayer d'alléger les contraintes d'exposition aux matériaux stratégiques (**Figure 11**).

Le 1^{er} levier, la substitution, est déjà largement pratiqué : voici des exemples.

Le parc automobile européen devient de moins en moins diesel, de plus en plus essence, donc la dépollution demande une technologie différente. Ces travaux liés à l'évolution du mix énergétique permettent de substituer certains platinoïdes (surtout platine/palladium) en fonction des carburants, des technologies nécessaires (véhicule thermique vs véhicule hybride) ou des tensions sur les marchés des platinoïdes.

L'utilisation des terres rares fournit un autre bon exemple de substitution en cours. Pour les aimants permanents par exemple, Toyota a publié une feuille de route très précise et pédagogique (**Figure 12**). Actuellement, les aimants contiennent du dysprosium et

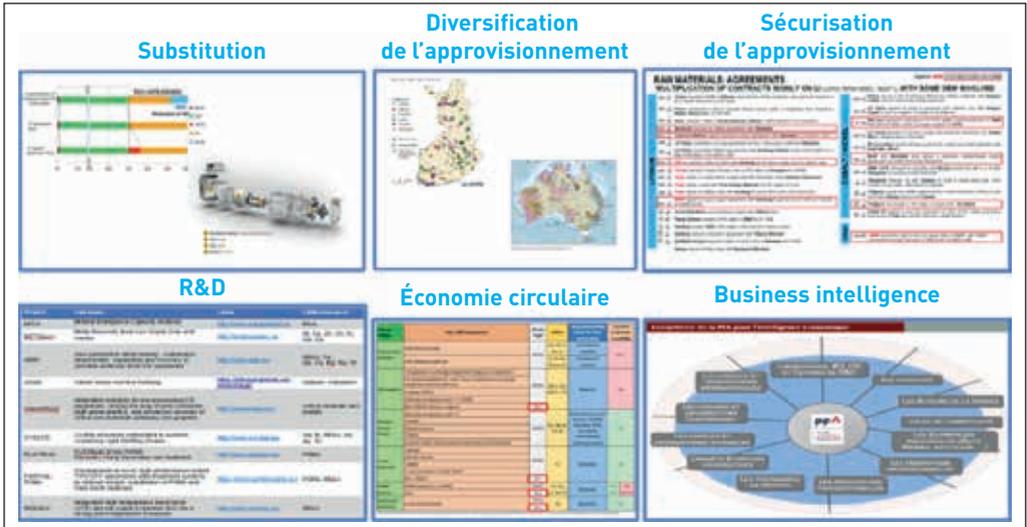


Figure 11

Ensemble des 6 leviers.

Source : PFA.

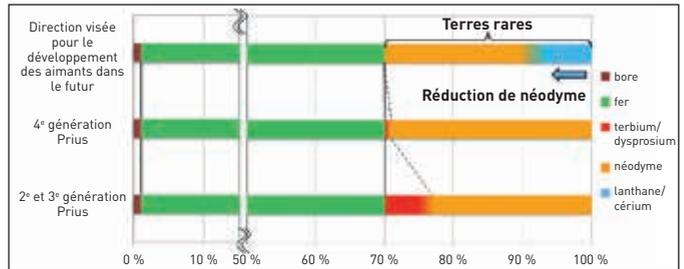


Figure 12

Feuille de route de substitution des terres rares lourdes.

Source : Toyota.

du terbium, des terres rares lourdes. À terme, Toyota diminuera cette quantité de terres rares lourdes, puis fera leur substitution par des terres rares légères. Ensuite, à moyen terme, le néodyme serait partiellement substitué par d'autres terres rares moins stratégiques comme le lanthane ou le cérium.

De même, les technologies des batteries sont en évolution

constante et illustrent un autre cas de substitution : celui du cobalt. La **Figure 13** montre l'évolution des batteries avec un contenu en cobalt de plus en plus faible. À côté des caractéristiques techniques, l'autre enjeu de cette substitution partielle ou totale réside dans les risques liés à l'extraction et l'approvisionnement du cobalt.

Substituer une technologie à une autre technologie

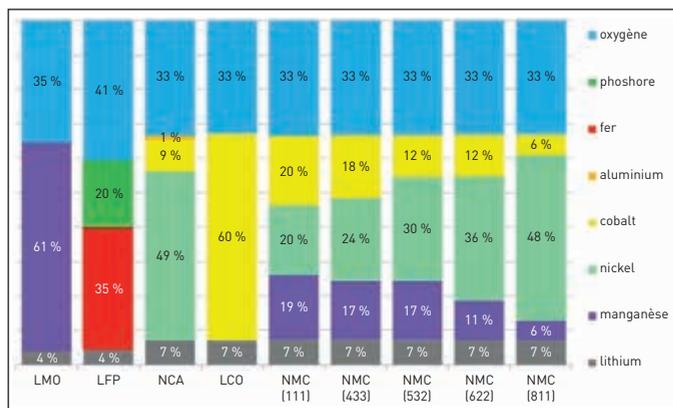


Figure 13

Composition des batteries suivant leur chimie.

Description des différents sigles : LMO : Lithium-Manganèse-Oxide ; LFP : Lithium-Fer-Phosphate ; NCA : Nickel-Cobalt-Aluminium ; LCO : Lithium-Cobalt-Oxide ; NMC : Nickel-Manganèse-Cobalt.

Source : BloombergNEF.

est également un moyen de réduire certaines tensions d'approvisionnement. Dans le cas des moteurs électriques, nous pouvons utiliser des machines synchrones qui utilisent soit des aimants permanents, soit des bobinages de cuivre (électro-aimants).

Les batteries fournissent encore d'autres exemples :

parmi les différentes chimies disponibles, certaines sont complémentaires selon les usages : ainsi la chimie LFP¹⁴ est sans nickel ni cobalt (Figure 14). Les choix dépendent d'arbitrages délicats entre les performances techniques, les usages, les

14. LFP : Lithium-Fer-Phosphate.

	NiCo FREE	Ni BASED
Matériau actif de la cathode* sur feuille d'aluminium	Fe-Mn-x	Ni-Mn-y
Matériau actif de l'anode* sur feuille de cuivre	Graphite Carbon	
Densité d'énergie** à la cellule (Wh/L)	400-500 Wh/L	600-700 Wh/L
Pack configuration 2024	Cellules (ensemble anode/cathode) en pack (sans modules)	One unique module-based
Pack configuration 2026	One unique Cell-To-Pack design	
Coût (€/kWh)	-20%	Référence

Figure 14

Différence de propriétés des batteries selon les technologies apportées.

Source : Stellantis.

* Une anode est une électrode sur laquelle se déroule une réaction d'oxydation, donc une perte d'électrons pour le métal. Pour une cathode, ce sera une réaction de réduction donc un gain d'électrons pour le métal.

** Ici, la densité d'énergie correspond à une énergie par unité de volume.

propriétés des clients, les technologies de recharge et les coûts.

Le levier de la diversification. La diversification, c'est pouvoir disposer de plusieurs sources d'approvisionnement et de les valider pour favoriser les interchangeabilités. Ainsi, pour les batteries, il faut considérer les différentes chaînes d'approvisionnement en Chine mais également au Japon, en Corée, en attendant de pouvoir disposer de capacités suffisantes en Europe. Au niveau minerais pour batteries, il y a de plus en plus de miniers qui ouvrent de plus en plus de mines, en s'engageant dans des démarches de protocoles communs, d'accords d'échanges entre États ou de standardisation. Et puis nous regardons aussi tout ce qui peut être produit en Europe, afin de construire une diversification à cette échelle : ce sont tous les travaux qui sont réalisés avec les ambassades pour faciliter les échanges commerciaux avec les grands pays miniers, ou avec les collaborations avec le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), avec les instances européennes et nationales ou interministérielles au sein de l'Observatoire français des ressources

minérales pour les filières industrielles (OFREMI). Ces collaborations conduisent à des actes concrets pour faciliter les diversifications, par exemple, sur le plan d'investissement européen de 42 milliards pour créer et produire des semi-conducteurs en Europe ou, pour créer des « gigafactories¹⁵ » sur le sol français. Toutes ces activités foisonnantes sont suivies à travers différents comités réunissant les acteurs du monde de l'automobile.

La diversification demande ainsi de sécuriser les approvisionnements au moyen d'accords avalisés par le monde politique. La France, l'Europe signent ainsi des accords de partenariats, ou favorisent l'implantation de collaborations commerciales, ou douaniers pour faciliter ces échanges. Ainsi, au sein de la filière, différents contrats commerciaux, de fusion, de rachat ou d'accords que l'on appelle des JV¹⁶, permettent de se positionner sur différents projets de diversification

15. Anglicisme désignant des grandes usines construisant des équipements, batteries ou autres.

16. JV : signifie *Joint-Venture*, et correspond à un accord de collaboration entre plusieurs entreprises.



Figure 15

Exemples de contrats entre constructeurs et équipementiers ou fournisseurs de matériaux.

des approvisionnements de matériaux stratégiques. La **Figure 15** montre différents contrats signés entre constructeurs ou équipementiers sur des approvisionnements durables, incidemment de plus en plus en Europe.

Une mesure remarquable a été la création de l'**Agence européenne de l'alliance pour les matériaux**, où a été mis en place le premier annuaire des projets industriels européens sur la chaîne de valeurs des terres rares pour la fabrication d'aimants permanents, aussi bien pour le véhicule électrique que pour l'éolien. Le prochain document qui sera publié par l'**ERMA (European Raw Materials Alliance)** portera sur les matériaux pour batteries, avec une vision forte de la diversification et de la sécurisation des approvisionnements. L'ambition est de produire en Europe jusqu'à 25 % de certains matériaux critiques nécessaires à la transition énergétique.

Le levier de l'économie circulaire est basé sur l'importance de pouvoir réutiliser ce qui est disponible en Europe pour des fabrications européennes.

Voici deux exemples : celui de la batterie et celui des aimants permanents.

Considérons une « batterie de traction » caractérisée par ses performances et sa durée de vie (**Figure 16**). Le but des constructeurs est d'augmenter la durée de vie et les cas d'usages pour diminuer l'empreinte carbone liée à sa fabrication, avant une fin de vie permettant le recyclage des métaux critiques. À partir d'un certain état de charge, la batterie n'est plus utilisable pour un usage sur véhicule, nous pouvons envisager alors son usage pour du stockage stationnaire. Cette dernière commence alors une seconde vie. En dernière phase du cycle intervient la « vraie » fin de vie de la batterie. Nous pouvons à ce moment-là recycler les matériaux critiques et les réinjecter dans des futures fabrications industrielles et, dans le cas d'une boucle fermée, les réutiliser pour fabriquer des futures batteries pour l'automobile.

Pour les aimants permanents, comme pour tout matériau critique, toutes les chutes de production, résidus ou déchets liés



Figure 16

L'économie circulaire de la batterie : de son utilisation à son recyclage.

Source : Groupe Renault.

à la production des aimants, sont recyclés. Pour l'instant, tout cela est souvent exporté en Asie pour être recyclé. Mais dans le cadre d'une intégration de l'Europe dans la chaîne de fabrication, nous pouvons envisager une approche plus locale (*Figure 17*) au travers de deux voies possibles de recyclage. Nous parlerons alors de « **boucle courte** » ou de « **boucle longue** ».

Dans la première, les aimants sont prélevés en fin de vie, et sont déstructurés pour reformer des poudres magnétiques qui serviront à la fabrication de nouveaux matériaux magnétiques. Dans l'autre, « **boucle longue** », les aimants sont broyés puis soumis à des traitements de transformations pour reformer les oxydes de terres rares qui permettent de rentrer dans la chaîne de valeurs des terres rares et dans le cas d'une boucle fermée pour refaire des aimants permanents ou des composants pour l'automobile.

Cependant, la *Figure 18* donne la cartographie européenne des taux de recyclage des matériaux critiques en Europe. Les matériaux en rouge sont recyclés, à moins de 1 % ; ce sont souvent des matériaux critiques et stratégiques pour l'automobile.

Le levier de la R&D. Il est très important parce qu'il alimente tous les autres. La gestion des matériaux critiques, ce chapitre l'a déjà montré, est multiforme, complexe et concerne toutes les activités de l'industrie automobile. De nouvelles innovations, de nouvelles solutions, sont constamment en train d'apparaître dans les laboratoires et sont approfondies par des programmes de R&D. C'est une évidence : les verrous scientifiques, technologiques et industriels sont nombreux mais les initiatives et les innovations doivent être accompagnées, car de nombreuses solutions apparaissent.

Par exemple, tous les industriels regardent attentivement les futures technologies qui émergent pour les stockeurs énergétiques : nous pouvons évoquer les batteries au sodium, les batteries solides ou pour l'hydrogène les futurs stockages. Cela implique d'anticiper, de suivre et de piloter ces évolutions pour évaluer leur impact sur le mix-énergétique. Nous évaluons les inventions, les start-ups, les brevets pour les futurs matériaux, les procédés, les technologies d'assemblages, afin de pouvoir alimenter les différents leviers présentés.

L'évolution à long terme du véhicule promet des



Figure 17

Principe de l'économie circulaire pour les aimants.

Source : BRGM.

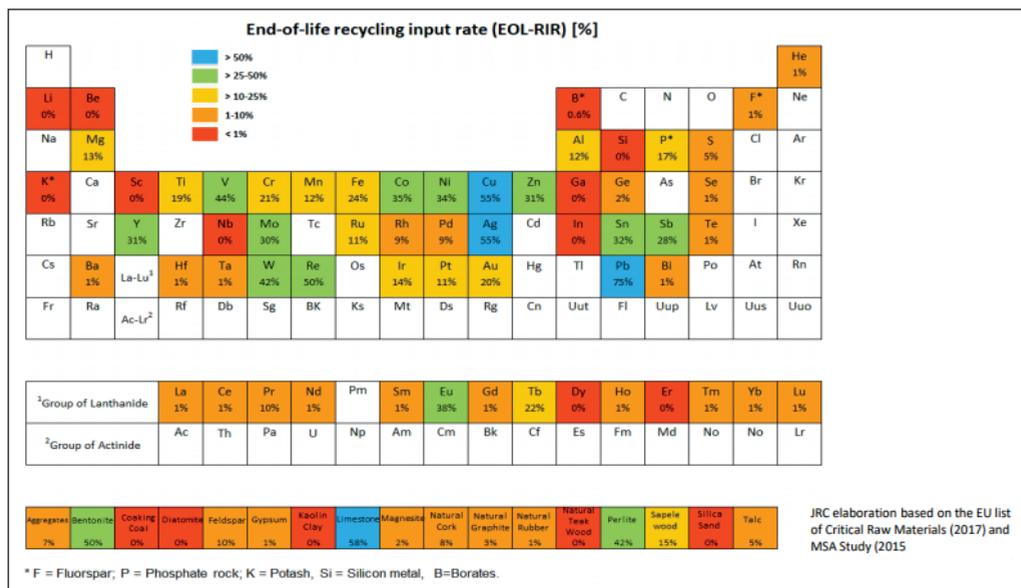


Figure 18

Cartographie européenne du recyclage des matériaux. Plus les matériaux sont bleu-vert, plus ils sont recyclés, et plus les matériaux sont orange-rouge, moins ils sont recyclés.

Source : Union européenne.

changements absolument considérables. Par exemple, la **Figure 19** montre l'évolution technologique des intérieurs de véhicule avec l'utilisation d'équipement d'info-divertissement de grandes dimensions et dans la perspective des véhicules autonomes, la disparition des commandes de conduite et du volant.

Ces transformations se préparent maintenant et il y a tout un travail d'identification, de collecte, de sélection des technologies afin d'assurer une mobilité accessible, à faible empreinte environnementale, tout en limitant l'exposition de la filière automobile à de nouveaux matériaux stratégiques.

Si nous nous projetons dans l'évolution des mobilités et non plus seulement

la voiture héritière de nos usages actuels, nous pouvons évoquer **un monde impressionnant d'opportunités, de diversité, d'inventions, de technologies à développer ou souvent même à inventer**. Ainsi, on ne s'interdit pas de prévoir les futurs concepts de continuité des mobilités terrestres et non terrestres.



Figure 19

Intérieur d'une voiture : à gauche : voiture traditionnelle ; à droite : présence de grands panneaux et d'interfaces, et absence de volant.

Source : Forvia.

Citons par exemple la collaboration entre Stellantis et la start-up Archer. Ces aéronefs adressent le chaînon manquant entre « vous êtes à pied ou en trottinette » puis « vous allez prendre le train », et via un terminal dédié, vous prenez une « navette rapide volante, électrique, autonome » vers un aéroport pour prendre un avion (Figure 20). Il s'agit de la continuité de mobilité au sens large, qui ne sera pas forcément uniquement terrestre et pose des enjeux nouveaux d'interopérabilité, de certification, d'acceptation sociétale...

En dernier lieu, **le levier d'Intelligence économique**, dont l'importance est déjà perceptible et pourrait s'imposer comme un levier majeur. Comme nous l'avons vu, l'écosystème de la filière automobile est complexe, les enjeux majeurs et les opportunités nombreuses. Ainsi, il est essentiel de pouvoir se

doter de moyens pour acquérir l'information, développer des réseaux d'échanges, de mettre en place des veilles, de savoir ce qui se passe dans l'économie, le normatif, le monde des start-ups, de voir comment tout cela est financé, disruptif et pourrait impacter le monde de l'automobile ou exposer à de nouvelles dépendances. Par exemple, les membres de la filière ont contribué à la mission Philippe Varin qui avait pour but de formuler à l'État français des recommandations pour la sécurisation et l'approvisionnement en matières premières critiques.

C'est tout l'écosystème de la filière automobile (Figure 21) qui est à l'œuvre : experts et acteurs dans chacun des domaines, avec des réseaux qui s'appuient sur chacune des sociétés, des membres de la filière et nos réseaux externes qui sont sollicités. Cela anime toutes les compétences dans une dynamique forte.



Figure 20

Aéronef à décollage et atterrissage vertical.

Source : Archer.



Figure 21

Écosystème de la filière automobile.

Source : PFA.

3 Les compétences rares

Il est indispensable, dans toutes les réflexions prospectives qui sont abordées dans ce chapitre, de ne pas oublier la place majeure des futures compétences rares et stratégiques. Leur nombre est actuellement trop restreint, vu l'importance des enjeux de la neutralité carbone, de l'électrification, de l'économie circulaire... il faut les multiplier. C'est un travail de formation qu'il faut accentuer, poursuivre, voire transformer. La PFA a travaillé avec les communautés d'experts de la Société des ingénieurs de l'automobile (SIA), pour rédiger **le livre blanc des compétences rares et d'avenir pour l'automobile (Figure 22)**, montrant que l'évolution du véhicule et des mobilités ne se fera pas sans l'évolution des compétences.

Dès lors, nous pouvons classifier les compétences selon 4 grands axes principaux :

Les compétences liées aux mega trends¹⁷, c'est-à-dire tout ce qui est évolutions profondes de nos sociétés et modes de vie. La société sera de plus en plus urbanisée, concentrée et pourtant fractionnée : on le voit avec les différentes tensions qui nous entourent. Mais également, l'évolution de l'usage plutôt que la possession. L'importance du développement durable, de la neutralité carbone ou de la digitalisation, bouscule nos modes de vivre, de travailler, de dépenser et

17. Anglicisme qui correspond à une transformation puissante qui a des répercussions sur l'économie et la société.

nos inspirations les plus profondes. Des nouvelles attentes de mobilité résulteront de ces évolutions... donc de nouvelles compétences seront nécessaires.

Il y aura aussi **les compétences liées aux nouvelles technologies**, nous en avons parlé : véhicules électriques, connectés, l'hydrogène, nouveaux services, infrastructures connectées et d'interopérabilité des systèmes y compris non terrestres... Les compétences associées à ces évolutions technologiques seront donc renforcées.

Mais un véhicule même électrique, hydrogène, ou autonome, cela reste un objet de plaisir et d'attraction. Donc il restera **des compétences « cœur de métier »** dans l'industrie de la vente, du commerce, de la sûreté de fonctionnement, de la simulation et de l'électronique, qui doivent être renforcées et adaptées.

Et puis il y a **les compétences traditionnelles à maintenir**. Un véhicule demandera toujours à être entretenu et réparé, à passer en concession, avec des circuits de logistique et de réseaux qui se transforment profondément.

Le monde enseignant dans son entièreté, professeurs et étudiants, doit être informé de ces compétences rares pour l'automobile, celles qui réclament l'effort de formation le plus urgent. C'est obligatoire pour la filière automobile, ce sont aussi des « opportunités » exceptionnelles pour les carrières.

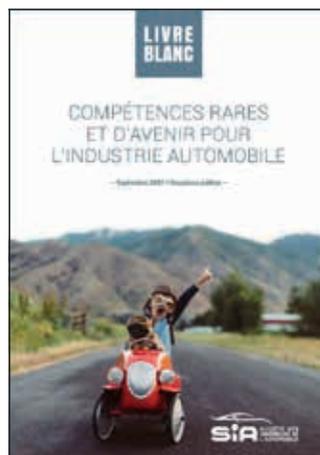


Figure 22

Livre blanc : *Compétences rares et d'avenir pour l'industrie automobile.*

Source : SIA.

Conclusion

Sur plusieurs points, ce chapitre évoque une vision futuriste et inspirante : elle s'aventure dans des technologies ou dans des pratiques souvent étonnantes dont on se demande parfois si elles sont réalistes ou simplement des fiction. Mais non, c'est bien la réalité de la planète !

L'automobile va bien plus évoluer dans les 10 prochaines années qu'elle ne l'a fait dans les 100 dernières. Toutes les technologies étaient « sur du thermique », maintenant tout sera hybride ou électrique : nous hybridons les technologies, les énergies, les matériaux et les compétences.

Un des enjeux planétaires de toutes ces évolutions est d'arriver au niveau européen à la neutralité carbone en 2050. Mais pour les constructeurs, les échéances sont plus courtes : basculer toutes les productions de véhicules sans émission au plus tard en 2035, arriver volontairement à une neutralité carbone entre 2038 et 2040. Il ne s'agit pas d'une génération, mais d'une demi-génération... un rythme de sprinter !

Les technologies vont évoluer, le contenu véhicule va évoluer, les expositions à des nouveaux matériaux vont évoluer, les dépendances aussi vont évoluer. **Tous les leviers présentés dans ce chapitre vont être utilisés** d'une manière qui dépendra des situations géopolitiques, conjoncturelles, ou structurelles. Dans l'industrie automobile, nous ne parlons pas de métaux rares pour éviter la confusion avec les terres rares. Nous parlons bien de matériaux critiques et de matériaux stratégiques pour les chaînes industrielles. Ceux-ci ne sont pas que des minerais, ce sont aussi des métaux, des polymères, des plastiques, même des ressources naturelles, qui peuvent être utilisés.



Figure 23

Citation sur la prise de conscience autour du climat en Europe.

Du côté de l'organisation collective face à ces enjeux, des outils nationaux, transnationaux et européens commencent à se mettre en place. Ce sont eux qui alimentent les différents leviers, objets du présent chapitre. **L'objectif reste dominant : il faut réduire nos dépendances en utilisant les six différents leviers présentés ici.**

Une conclusion sur la prise de conscience politique sur cette exposition aux matières stratégiques est résumée sur la **Figure 23**. Dans son récent discours de l'Union européenne, en septembre 2022, la présidente de la Commission a clairement affirmé que : « notre ambition en tant qu'Européen est de devenir le premier continent climatiquement neutre » en 2050 « et cette transition ne pourra se matérialiser sans un accès sûr et durable aux ressources ».

C'est bien là la clef de toute l'industrie automobile !¹⁸

18. Donc pour avoir une vision complète de tout ce qui est lié à la transition énergétique, consultez le rapport de l'Union européenne, qui renvoie sur tout ce qui est matériaux critiques pour les technologies bas carbone et la transition énergétique dont notamment le véhicule électrique.