

Électrification des transports

Une solution de transition écologique

Avril 2019



Un affilié de

 **NATIXIS**
INVESTMENT MANAGERS

Emmanuelle Ostiari

Analyste en investissement responsable

Avec la participation de Clément Boyer

et de Fabien Leonhardt



Édito

Nous nous imaginons déjà en 2050 expliquer à nos petits-enfants qu'avant, les voitures électriques n'existaient pas.

Partout, dans les villes, nous entendons le ronronnement des moteurs, nous pouvons, pour les plus connaisseurs d'entre nous, s'essayer à reconnaître une cylindrée rien qu'au vrombissement entendu et s'irriter sur une moto faisant résonner le son de son pot d'échappement en plein centre urbain. Nous leur parlerons également de cet air pollué qui envahissait nos poumons que l'on soit à pied, à vélo ou nous-mêmes en voiture. Peut-être même que nous évoquerons avec une petite nostalgie les émanations du pétrole dégagées lorsque nous faisons le plein à la station en se glorifiant d'en connaître l'effluve. Enfin, nous raconterons qu'à cette époque, une même famille pouvait avoir une, deux ou trois voitures parce que ce n'était pas pareil, on ne savait pas ce qu'était le CO₂, on ne croyait pas vraiment qu'il était possible de ne plus avoir de pétrole un jour, et c'était un signe de richesse, parfois même l'investissement d'une vie.

Nous faisons le pari, et il n'est pas très audacieux, qu'à ce moment-là nos enfants et petits-enfants nous diront qu'ils ne comprennent pas comment nous pouvions vivre ainsi et nous prendrons pour des hommes préhistoriques.

Nous sommes à l'aube d'une révolution de l'automobile aussi bouleversante que le fut celle des téléphones portables ou d'internet. L'électrification ne se limitera d'ailleurs probablement pas au transport routier, mais affectera l'ensemble des transports, dès lors que la problématique du stockage embarqué de l'électricité et de l'hydrogène sera maîtrisée.

En tant qu'investisseur conscient des enjeux auxquels la société fait face, nous souhaitons accompagner cette transition des transports en orientant l'épargne qui nous est confiée vers des entreprises actrices de ce changement, qui préparent à l'échelle des transports le monde de demain.

Bonne lecture à tous

Date de la publication : avril 2019

Préambule

L'électrification des transports constitue un bouleversement pour l'industrie automobile, mais aussi plus largement pour les secteurs des transports. Reposant sur des technologies en constante innovation, cette transformation amène l'ensemble des acteurs à revoir leur conception de la mobilité. En pleine phase d'accélération dans le tournant vers l'électrification des transports, cette étude a pour vocation d'éclairer sur les défis et solutions liés aux filières des véhicules électriques, mais également d'identifier les segments de l'industrie à haute valeur ajoutée dans ces filières pour orienter l'épargne vers des entreprises clefs dans la transition énergétique.

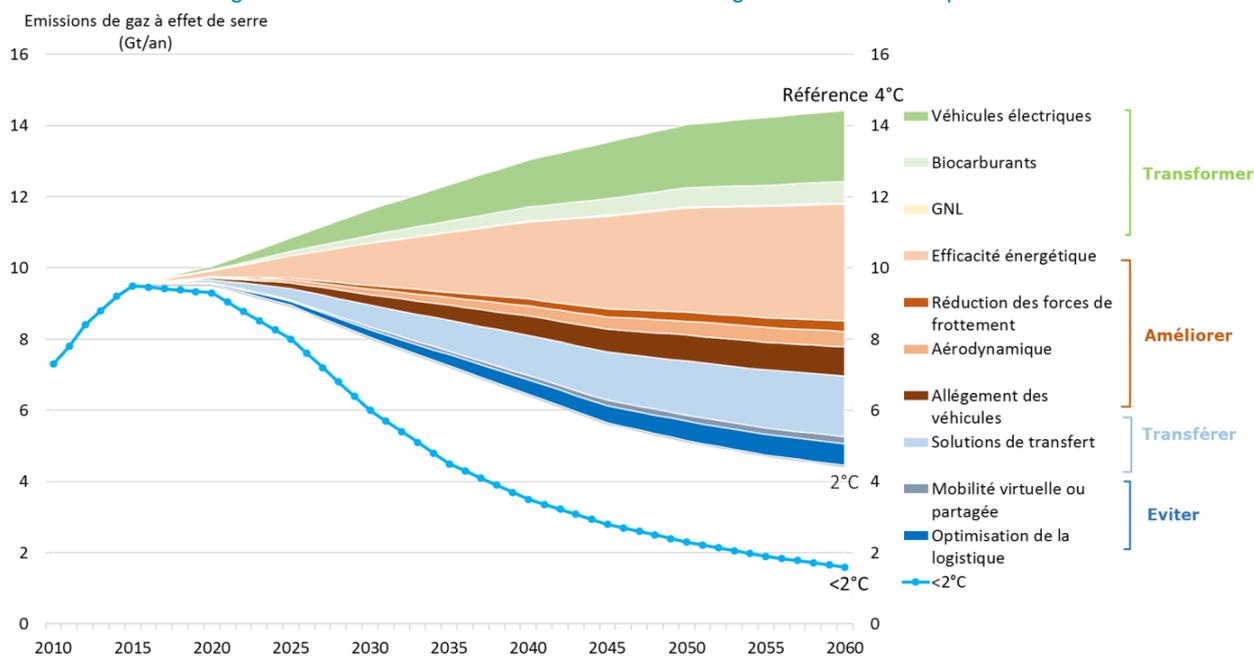
Pourquoi électrifier les transports ?

Parce que les transports d'aujourd'hui menacent l'environnement et dégradent la santé des citoyens. Même si l'électrification des transports n'est pas exempte de défis environnementaux et sociaux, elle permet globalement de réduire l'impact des transports sur le climat, de sortir de la dépendance au pétrole, de préserver la richesse des écosystèmes et de réinstaurer un contexte urbain paisible sans pollution et moins bruyant.

Est-ce la seule solution ?

Non. La transition vers une mobilité durable repose sur un panel large de solutions : l'usage du ferroviaire, des transports en commun, de la mobilité dite « douce », comme la marche à pied, le vélo ou la trottinette quand cela est possible (solutions de transfert), l'optimisation de l'efficacité énergétique des véhicules essence et diesel pour réduire leur impact sur l'environnement et l'humain (solutions d'amélioration), la reconception de la mobilité pour ne pas déplacer des biens ou des personnes quand cela est peu utile (solutions d'évitement). Toutefois, les scénarios climatiques comptent en grande partie sur l'électrification du transport routier ainsi que sur le recours aux biocarburants pour les transports maritime et aérien (solutions de transformation) ; même dans les scénarios climatiques les plus ambitieux, la forte présence des véhicules individuels induit un changement radical pour s'orienter vers la propulsion électrique. Par ailleurs, même la trajectoire du scénario de référence à +4°C présente une inflexion significative en 2020-2025 atteignable qu'à la condition d'une rupture technologique.

Figure 1 : Potentiel d'abattement d'émissions de gaz à effet de serre par solutions



Sources : Mirova/ (IEA, 2017)

Est-ce que les véhicules électriques permettent vraiment de réduire l'impact sur le changement climatique ?

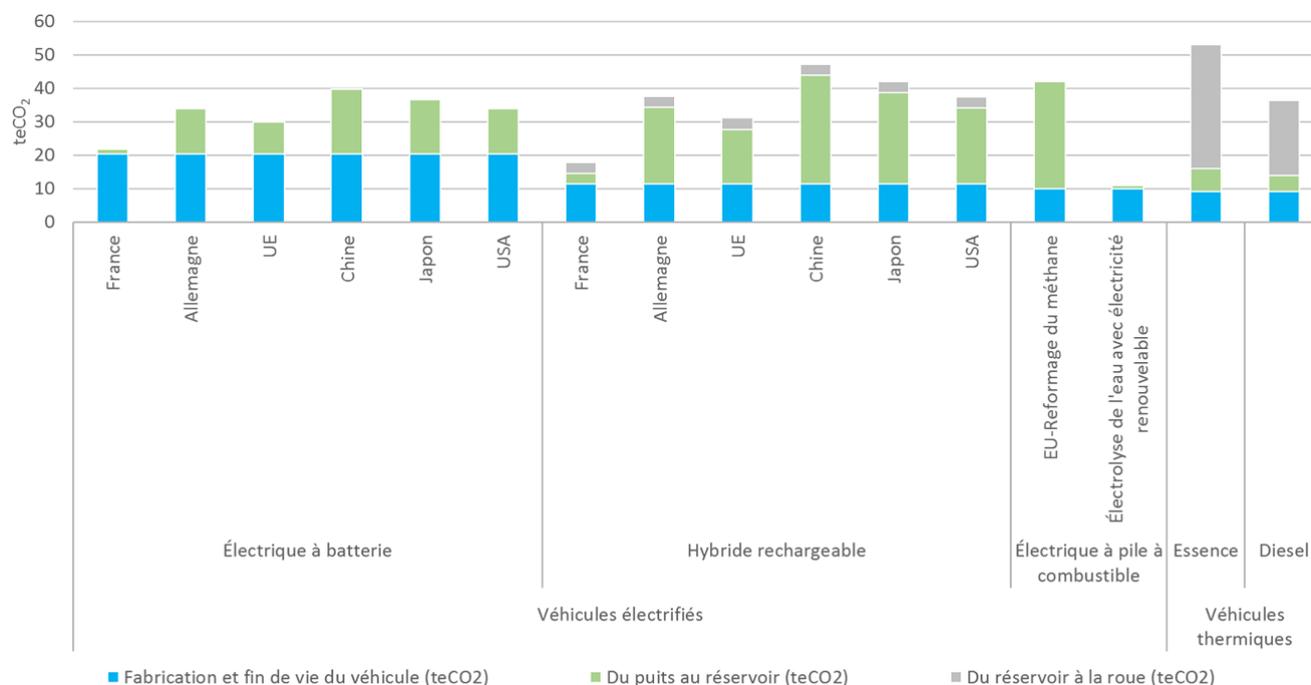
Oui. Comme pour tout changement technologique, l'impact du véhicule électrique doit faire l'objet d'études approfondies. Il faut, en effet, que l'ensemble des parties prenantes – industrie, pouvoirs politiques, investisseurs, utilisateurs - se posent les bonnes questions avant de lancer l'ensemble d'un système dans une transition. Le bénéfice pour le climat est l'un des premiers points d'attention.

Les véhicules électriques n'émettent pas de CO₂ en phase d'utilisation. Leur impact carbone est ainsi lié aux émissions de gaz à effet de serre dues à :

- La production d'électricité - qui peut être plus ou moins carbonée selon les pays - pour les véhicules électriques à batterie, ou à celle de l'hydrogène pour les véhicules à pile à combustible ;
- La production des véhicules, et plus particulièrement à la fabrication des batteries de stockage dans le premier cas et à celle de la pile à combustible et du réservoir d'hydrogène dans le deuxième cas.

En prenant l'ensemble de ces émissions, les véhicules électriques continuent d'apporter un bénéfice pour le climat par rapport aux véhicules à essence, quelles que soient les zones géographiques ou les segments de véhicules, bien que ce bénéfice soit faible dans certains pays où l'électricité est majoritairement issue du charbon. En effet, dans ces zones où l'électricité est fortement carbonée, le bénéfice pour le climat d'une berline électrique par rapport aux véhicules diesel est quasi nul.

Figure 2 : Comparaison du bilan carbone des véhicules électriques et des véhicules thermiques sur 180 000 km – segment berline



Sources : Mirova / (Zubi, Carvalho, Dufo-Lopez, & Pasaoglu, 2018) et (Ager-Wick Ellingsen, Singh, & Hammer Strømman, 2016) pour la fabrication des véhicules électrique et thermique, (GREET, 2017) pour celle du véhicule à pile à combustible/ (OECD/IEA, 2015) pour les facteurs carbone électriques des pays/ (JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration, 2014) pour les émissions du puits à la roue et du réservoir à la roue des véhicules thermiques et des véhicules à pile à combustible/ (US DOE, 2018) pour les consommations EPA des modèles en circulation en 2018

Toutefois, de nombreux efforts d'efficacité énergétique ont déjà été réalisés sur les véhicules thermiques individuels, qu'ils soient diesel ou essence, ce qui limite la marge de progression à venir, tandis que le véhicule électrique est une technologie émergente en constante

innovation. En effet, les postes d'émissions de gaz à effet de serre dans le bilan carbone des véhicules électriques sont voués à être réduits grâce :

- Au développement parallèle des énergies renouvelables qui baissera le niveau de CO₂ émis pour produire de l'électricité ;
- Aux progrès électrochimiques dans les batteries et les électrolyseurs/piles à combustible ;
- Au passage à l'industrialisation massive pour satisfaire la croissance des véhicules électriques.

Enfin, le bénéfice climat n'est pas le seul but recherché. L'électrification des transports permet de décorrélérer la mobilité des énergies fossiles et de la pollution.

La mobilité sort de sa dépendance aux énergies fossiles, mais n'est-elle pas en train de devenir dépendante d'une autre réserve non renouvelable, les métaux ?

Non. Il est vrai que les technologies de véhicules électriques actuelles ont davantage recours aux métaux critiques que les véhicules thermiques, avec un contenu de l'ordre d'une vingtaine de kilos dans les véhicules électriques, alors qu'il est quasi nul dans les véhicules thermiques. Par métaux critiques sont désignés les métaux qui présentent des problématiques d'approvisionnement (réserves, concentration de la production, impacts environnementaux et/ou sociaux liés à leur extraction) dans l'essor des technologies de transition énergétique. Les métaux critiques présents dans les véhicules électriques sont le cobalt et les terres rares, auxquels s'ajoute le platine dans les véhicules à pile à combustible. Toutefois, plusieurs solutions répondent à ce constat initial.

- Le contenu en métaux critiques des premières générations n'est plus celui des générations récemment commercialisées ou en phase d'arrivée sur le marché, se réduisant à une quantité inférieure à ~4 kg (~3,5 kg de cobalt et 500 grammes de terres rares) grâce aux progrès réalisés dans l'électrochimie des batteries.
- Les avancées technologiques attendues d'ici 2030 sur les batteries de stockage, piles à combustible et moteurs électriques permettent d'espérer un recours quasi nul à ces métaux critiques.
- Si les métaux ne sont pas renouvelables, ils sont cependant recyclables. Pour certains métaux critiques, les filières de recyclage sont aujourd'hui inexistantes, mais ne peuvent pas rester inactives dans les années à venir devant les perspectives de développement des technologies vertes et du numérique, qui requièrent dans leur ensemble des terres rares.
- Il en va de même pour les filières de production qui dépendent, pour nombre d'entre elles, de la Chine qui, jusqu'ici, a maintenu des prix assez bas pour conserver le marché des métaux des nouvelles technologies. La hausse de la demande, la croissance de technologies et d'applications nécessitant des terres rares, gallium et autres métaux critiques provenant de la Chine, conjuguées à la considération grandissante des pratiques environnementales et sociales des entreprises, devraient entraîner une hausse du prix des métaux et ainsi être source de financement pour, d'une part, développer de nouveaux gisements et procédés de raffinage respectant des normes environnementales et sociales et, d'autre part, rendre systématiques les filières de recyclage.

Il est aussi dit que le véhicule électrique va détruire des emplois. Est-ce vrai ?

Il s'agit davantage d'une évolution des chaînes de valeurs. Les véhicules électriques induisent une évolution majeure de la répartition de la valeur ajoutée : tandis que des emplois peuvent être détruits dans le secteur automobile, des opportunités considérables sont créées dans l'électrochimie, le traitement et le recyclage des métaux, la fourniture d'électricité et la production d'hydrogène. Cette évolution de la chaîne de valeur est aussi susceptible de déplacer géographiquement des activités, notamment la production des matières premières et des batteries.

Les véhicules hybrides non rechargeables peuvent-ils être considérés comme des véhicules électriques ?

Non. La définition utilisée dans cette étude désigne comme véhicules électriques les véhicules dont la propulsion principale est électrique. Dans un véhicule hybride, le moteur électrique ne fait qu'assister la motorisation thermique principale. Par ailleurs, sa source d'énergie reste le pétrole. Aujourd'hui, trois types de véhicules répondent à la définition de véhicule électrique : les véhicules hybrides rechargeables (autonomie en électrique pur limitée à moins de 50 km), les véhicules électriques à batterie et les véhicules à pile à combustible.

Les véhicules électriques et les véhicules à pile à combustible sont-ils en compétition ?

C'est difficile à dire. Au regard de la maturité technologique des deux filières et du potentiel apporté par chacune d'entre elles aux différents segments des transports, les véhicules électriques répondent aux exigences des véhicules particuliers et deux roues à court terme, tandis que les véhicules à pile à combustible semblent plus logiquement satisfaire aux caractéristiques des véhicules lourds parcourant des distances longues, comme les poids lourds. La pénétration actuelle des deux technologies dans les segments ferroviaire, maritime et aérien, semble trop expérimentale pour en dégager des enseignements sur le plus long terme.

Si l'on compare avec un véhicule thermique traditionnel, en tant qu'utilisateur, peut-on espérer avoir le même service rendu de mobilité avec un véhicule électrique à batterie en termes de coût et d'autonomie ?

A très court terme non, à court terme oui. Les progrès sur les technologies de batteries, solution de stockage de l'électricité dans ce type de véhicule, est clef de voûte de la filière. Ces progrès devraient résulter en :

- Une autonomie multipliée par deux en 5 ans (~300 km en 2018), ce qui permettra de rivaliser celle des véhicules thermiques entre 2025 et 2030 avec notamment l'avènement des batteries « solides ».
- L'atteinte d'une parité coût entre les véhicules électriques à batterie et les véhicules thermiques d'ici 2025 à l'échelle mondiale sans subventions. Signalons, qu'en considérant les aides de l'État, la parité coût est déjà presque atteinte dans certaines zones géographiques.

Toutefois, l'une des principales barrières aujourd'hui reste le changement d'habitudes pour recharger son véhicule. Bien que les progrès sur les batteries et les points de charge permettent d'espérer un ravitaillement occasionnel en une dizaine de minutes, voire moins, dans les années à venir, il faut toutefois pouvoir au quotidien alimenter son véhicule à son domicile ou à son travail. Or, tout le monde n'a pas cette possibilité, ce qui induit que les deux types de motorisation, électrique et thermique, sont amenés à coexister encore quelques années, jusqu'à l'émergence d'une technologie permettant de réduire le temps de charge à un temps équivalent à celui du véhicule thermique.

Quels avantages de ces technologies, au-delà de leurs bénéfices directs pour réduire les impacts environnementaux du secteur des transports ?

L'apport de l'hydrogène et des batteries de stockage ne se résume pas à la réduction de l'impact environnemental des transports. Ces technologies permettent également de répondre à certains enjeux de la transformation du secteur énergétique, et plus particulièrement au développement des énergies renouvelables. Les énergies renouvelables sont intermittentes, ce qui signifie que les solutions de stockage sont essentielles pour accorder production et demande. Les batteries de stockage peuvent satisfaire à ce besoin. Par ailleurs, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau peut être réalisée de manière décentralisée au pied des centrales d'énergies renouvelables et ainsi répondre à ce sujet d'intermittence. En développant l'hydrogène comme solution de stockage, la conception de l'hydrogène comme nouveau carburant propre de mobilité trouvera naturellement sa place.

Électrification des transports Une solution de transition écologique

Entreprises cotées contribuant au développement des véhicules électriques

Entreprises	Pays	Capitalisation boursière (M€) au 31.01.2019	Exposition / Technologies
Fabrication de batteries			
Tesla Inc	États-Unis	46 158	- Fabrication de batteries : expertise sur la fabrication de cathodes NCA et NMC avec Panasonic Corp ; 15 % du marché mondial 2017 dans les batteries ; Capacités : 20 000 MWh disponibles, 15 000 MWh en construction, 70 000 MWh annoncés avec Panasonic Corp. - Points de charge (2018) : 12 200 - Constructeur automobile à 100 % de véhicules électriques pour Tesla Inc
Contemporary Amperex Technology Co Ltd	Chine	21 671	- Fabrications de batteries : 100 % des revenus sur les batteries de stockage, 16 % du marché mondial 2017 dans les batteries ; capacités : 17 000 MWh disponibles, 53 260 MWh en construction, 104 260 MWh annoncés ; expertise sur les cathodes NMC et LFP ; clients majeurs (hors Chine) : Volkswagen - Recyclage : via sa filiale Brup ; capacité de 6 kt en 2017
BYD Co Ltd	Chine	15 591	- Fabrication de batteries : Batteries NMC pour automobiles (53 % des revenus 2017) et batteries pour stockage de l'énergie solaire (8 %) ; 10 % du marché mondial 2017 dans les batteries ; expertise sur les cathodes NMC ; capacités : 26 000 MWh disponibles, 34 000 en construction - Recyclage : usine de recyclage à Shenzhen - Constructeur automobile à 100% de véhicules électriques
Samsung SDI Co Ltd	Corée du Sud	12 015	- Fabrication de batteries : 15% des revenus 2017 ; expertise sur les cathodes NMC ; capacités : 5 000 MWh disponibles, 1650 MWh en construction, 2 000 MWh annoncés ; clients majeurs : Volkswagen
Guoxuan High-Tech Co Ltd	Chine	1 796	- Fabrication de batteries : NMC pour automobiles (85 % des revenus 2017) ; 4 % du marché mondial 2017 dans les batteries ; expertise sur la fabrication de cathodes LFP et NMC ; capacités : 10 500 MWh disponibles, 2 000 en construction ; clients majeurs : JAC, Zoyte
Tianneng Power International Ltd	Chine	911	Batteries pour vélos électriques (81 % of 2017 revenue), automobiles, chariots élévateurs et stockage d'énergie stationnaire
Flux Power Holdings Inc	États-Unis	73	Batteries pour chariots élévateurs et avions pour les consommations au sol
Cathodes			
Umicore SA	Belgique	9 230	- Cathodes : NMC, LCO ; capacité de 8 kt en 2016 (120 kt annoncées) et 15 % du marché NMC en 2017 - Recyclage : pyrometallurgie, hydrometallurgie ; le plus gros recycleur mondial de cobalt ; partenariat avec Tesla ; capacité de 7kt en 2017
Johnson Matthey PLC	Royaume-Uni	6 859	- Cathodes : eLNO et LFP (5 kt en 2016 avec 8 % du marché LFP en 2017) - Catalyseurs pour la production d'hydrogène
Beijing Easpring Material Technology Co Ltd	Chine	1 524	- Cathodes : NMC/LCO/NCA ; c apacité NMC de 5 kt en 2017
Ecopro Co Ltd	Corée du Sud	562	NCA : 9 kt en 2016 avec 5 % du marché NCA en 2017
L&F Co Ltd	Corée du Sud	661	NMC : 9 kt en 2016 (18 kt annoncées) avec 11 % du marché NMC en 2017
Anodes			
SGL Carbon SE	Allemagne	880	11% des revenus 2017 dans les anodes pour batteries lithium-ion
Wacker Chemie	Allemagne	4 512	Anodes en graphite & silicium
Toyo Tanso Co Ltd	Japon	387	Anode en graphite & fibre de carbone pour l'allègement des véhicules
Ilika PLC	Royaume-Uni	30	Anodes en silicium ; R&D sur les batteries solides ; partenariat(s)/investisseur(s) : Toyota
Électrolytes			
Solvay SA	Belgique	10 270	Électrolytes fluorés ; partenariat avec Solid Power Inc sur les batteries à l'état solide
Arkema SA	France	6 537	Électrolytes fluorés
Shenzhen Capchem Technology Co Ltd	Chine	1 230	Électrolytes fluorés
Production et recyclage de métaux			
Aurubis AG	Allemagne	2 160	Production et recyclage de cuivre, cobalt, nickel
Boliden AB	Suède	6 100	Production et recyclage de cuivre, cobalt, nickel
Neometals Ltd,	Australie	114	Production et recyclage (capacité de 3 650 kt annoncées)
American Manganese Inc	Canada	16	Production et recyclage (capacité de 1 100 kt annoncées)
Points de charge pour véhicules électriques à batterie			
ABB Ltd	Suisse	35 922	Fabrications de points de charge
NARI Technologies co Ltd	Chine	11 878	Fabrications de points de charge
Qingdao TGOOD Electric Co Ltd	Chine	2 261	Nombre de points de charge : 168 100
Alfen Beheer BV	Pays-Bas	260	Fabrications de points de charge
Innogy SE	Allemagne	22 709	Nombre de points de charge : 4 600
Fortum	Finlande	17 837	Nombre de points de charge : 4 612 via Charge&drive
Blink Charging Co	États-Unis	55	Nombre de points de charge : 3 500
E.ON SE	Allemagne	21 282	Nombre de points de charge : 6 000
Enel SpA	Italie	53 273	Nombre de points de charge : 2 000
EDF	France	44 988	Nombre de points de charge : 5 000 via Izivia (ex Sodetrel)
Semiconducteurs de puissance			
Infineon Technologies AG	Allemagne	22 743	Semiconducteurs de puissance (SiC) et Microcontrôleur AURIX/ XMC pour charge rapide
STMicroelectronics	Suisse	13 285	Semiconducteurs de puissance (SiC)
Hydrogène			
NEL ASA	Norvège	643	Électrolyseurs pour la production d'hydrogène ; Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
Hydrogenics Corp	Canada	100	Électrolyseurs pour la production d'hydrogène ; Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
ITM Power PLC	Royaume-Uni	73	Électrolyseurs pour la production d'hydrogène
McPhy Energy SA	France	71	Électrolyseurs pour la production d'hydrogène
Ballard Power Systems Inc	Canada	696	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
Bloom Energy Corp	États-Unis	871	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
Ceres Power Holdings PLC	Royaume-Uni	279	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
FuelCell Energy Inc	États-Unis	47	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
Plug Power Inc	États-Unis	288	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
PowerCell Sweden AB	Suède	217	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
Linde PLC	Royaume-Uni	76 613	Production d'énergie à partir de reformage de gaz et stations de distribution
Air Liquide SA	France	45 154	Production d'énergie à partir de reformage de gaz et stations de distribution
Faurecia	France	5 209	Systèmes de piles à combustibles
Kawasaki Heavy Industries Ltd	Japon	3 665	Réservoirs embarqués d'hydrogène
Plastic Omnium SA	France	3 500	Systèmes de piles à combustibles

Sources : Mirova / BNEF / Publications des entreprises

Électrification des transports Une solution de transition écologique

Entreprises non cotées contribuant au développement des véhicules électriques

Entreprises	Pays	Exposition / Technologies
Fabrication de batteries		
NorthVolt AB	SWEDEN	- Fabrication de batteries : expertise sur la fabrication de cathodes NMC ; Capacités : 8 125 MWh en construction, 24 000 MWh annoncés; partenariats avec BMW et Umicore sur le recyclage
Farasis Energy (Gan Zhou) Inc.	Chine	- Fabrication de batteries : expertise sur la fabrication de cathodes NMC ; Capacités : 5 000 MWh disponibles, 10 000 MWh en construction, 10 000 MWh annoncés
Dynavolt Renewable Power Technology Co Ltd	Chine	- Fabrication de batteries : expertise sur la fabrication de cathodes NMC et LFP ; Capacités : 1 000 MWh disponibles, 6 000 MWh en construction, 10 000 MWh annoncés
Cathodes		
Shanghai Shanshan Tech Co., Ltd.	Chine	- Fabrication de cathodes : LCO/NMC/LFP avec 11 % du marché NMC en 2017 ; - Fabrication d'anodes : 50 kt annoncées avec 5 % des parts de marché en 2017 - Fabrication d'électrolytes : LiPF6 (5% du marché en 2017)
Nichia Corp	Japon	LCO/NMC/LMO/LFP : 13 kt en 2016 (32 kt annoncées) avec 9 % du marché NMC en 2017
Ningbo Jinhe New Materials Co Ltd	Chine	LCO/NMC : 15 kt annoncées avec 9 % du marché NMC en 2017
Pulead Technology Industry Co Ltd	Chine	LFP : 10 kt en 2016 avec 9 % du marché LFP en 2017
Anodes		
Paraclete Inc	Japon	Anode en silicium
Eneate Corp	États-Unis	Anode en silicium
BTR New Energy Materials Co., Ltd.	Chine	Anode en silicium
Ningbo Shanshan New Material Technology Co Ltd	Chine	Anode en silicium
XG Sciences	États-Unis	Anode en silicium
Nexon Ltd.	Royaume-Uni	Anode en silicium
Amprius Inc.	États-Unis	Anode en silicium
Batterie à l'état solide		
Ionic Materials Inc	États-Unis	R&D sur les batteries solides ; électrolyte polymère ; Partenariat(s)/Investisseur(s) : Hyundai, Renault, Nissan
Fisker Inc	États-Unis	R&D sur les batteries solides ; électrolyte polymère ; Partenariat(s)/Investisseur(s) : Caterpillar
Front Edge Technology Inc	États-Unis	R&D sur les batteries solides ; électrolyte polymère ; Partenariat(s)/Investisseur(s) : STMicroelectronics
Ionic Materials Inc	États-Unis	R&D sur les batteries solides ; électrolyte polymère ; Partenariat(s)/Investisseur(s) : Hyundai, Renault, Nissan
Prieto Battery Inc	États-Unis	R&D sur les batteries solides ; électrolyte polymère ; Partenariat(s) : Intel/Stanley, Black & Decker
QuantumScape Corp	États-Unis	R&D sur les batteries solides ; électrolyte polymère ; Partenariat(s) : Volkswagen
Sakti3 Inc	États-Unis	R&D sur les batteries solides ; électrolyte polymère ; Partenariat(s)/Investisseur(s) : Dyson
Seeo Inc	États-Unis	R&D sur les batteries solides ; électrolyte polymère ; Partenariat(s)/Investisseur(s) : Bosch
Solid Power Inc	États-Unis	R&D sur les batteries solides ; électrolyte polymère ; anode en Li-métal ; Partenariat(s)/Investisseur(s) : Solvay
SolidEnergy Systems Corp	États-Unis	R&D sur les batteries solides ; électrolyte polymère ; anode en Li-métal ; Partenariat(s)/Investisseur(s) : GM
Points de charge pour véhicules électriques à batterie		
Broadband TelCom Power Inc	États-Unis	Borne de charge domicile / publique
Vattenfall AB	Suède	Nombre de points de charge : 9 000 via InCharge
ClipperCreek Inc	États-Unis	Borne de charge domicile / publique
Electric Motor Werks Inc	Allemagne	Borne de charge domicile / publique
ELIX Wireless Inc	Canada	Chargement sans fil
Leviton Manufacturing Co Inc	États-Unis	Borne de charge domestique / publique
WiTricity Corp	États-Unis	Chargement sans fil
Shanghai Potevio Co Ltd	Chine	Nombre de points de charge : 21 700
ChargePoint Inc	États-Unis	Nombre de points de charge : 26 000
EVBox BV	Pays-Bas	Nombre de points de charge : 20 000 ; acquis par Engie
New Motion Ltd	Hong Kong	Nombre de points de charge : 64 000 ; acquis par Shell
State Grid Corp of China	Chine	Nombre de points de charge : 84 900
Allego BV	Pays-Bas	Nombre de points de charge : 8 000 ; acquis par Meridiam
Chargemaster PLC	Royaume-Uni	Nombre de points de charge : 6 500 ; acquis par BP
PlugSurfing GmbH	Allemagne	Carte et logiciels de points de charge
POD Point Ltd	Royaume-Uni	Carte et logiciels de points de charge
Recargo Inc	États-Unis	Carte et logiciels de points de charge
Hydrogène		
Borit NV	Belgique	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
Ceramic Fuel Cells Ltd	Australie	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
Efory Investing AS	Norvège	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
GreenHydrogen.dk ApS	Danemark	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
H2Gen Innovations Inc	États-Unis	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
Intelligent Energy Ltd	Royaume-Uni	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
N2elligence GmbH	Allemagne	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
NedStack Holding BV	Pays-Bas	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
Palcan Power Systems Inc	Canada	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
Symbio FCell SA	France	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
WATT Fuel Cell Corp	États-Unis	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
WL Gore & Associates Inc	États-Unis	Pile à combustible à membrane d'échange de protons (PEMFC)
Faber Industrie SpA	Italie	Technologies de compression de l'hydrogène
FirstElement Fuel Inc	États-Unis	Stations d'hydrogène sous la marque True Zero
Hydrogenious Technologies GmbH	Allemagne	Technologies de compression de l'hydrogène
Sera Compress GmbH	Allemagne	Technologies de compression de l'hydrogène
Steelhead Composites LLC	États-Unis	Technologies de compression de l'hydrogène
Takaishi Kogyo KK	Japon	Technologies de compression de l'hydrogène

Sources : Mirova / BNEF / Publications des entreprises

Sommaire

Résumé	Erreur ! Signet non défini.
Sommaire	9
Introduction.....	10
I. Répondre aux enjeux de transition écologique et sociale des transports	11
A. Transition climatique des transports	11
B. Transition énergétique des transports	15
C. Améliorer la qualité de vie en ville	16
II. Technologies.....	17
A. Composition des véhicules	17
B. Stockage de l'énergie	18
C. Le moteur électrique	39
D. L'électronique de puissance	39
E. Infrastructure	40
F. Véhicules hybride rechargeable	49
III. Défis pour les utilisateurs.....	51
A. Coût total de possession	51
B. Disponibilité du chargement	52
C. Confiance dans la technologie.....	53
IV. Maîtrise des impacts environnementaux et sociaux	54
A. Impact carbone en cycle de vie	54
B. Enjeux de ressources	59
V. Perspectives	69
A. Applications et Croissance de marché	69
B. Acteurs clés	72
Conclusion.....	83
Annexes.....	84
Annexe I : Données clés et ordres de grandeur	84
Annexe II : Impact carbone des véhicules électriques.....	85
Annexe III : Rendement énergétique.....	85
Table des illustrations	88
Bibliographie.....	90

Introduction

La mobilité est aujourd'hui un marqueur fort des sociétés développées. Inscrite dans le quotidien, la mobilité est au cœur même du développement de la civilisation moderne et s'érige en acquis. La mondialisation des flux, des personnes ou des marchandises, et la contraction exceptionnelle du temps et des distances, rendues possibles par les révolutions techniques successives, entrent pourtant aujourd'hui en contradiction avec les limites planétaires.

Cette mobilité repose, en effet, essentiellement sur une énergie fossile abondante et bon marché : le pétrole. Les transports représentent près de 15 % des émissions de gaz à effet de serre liées à l'homme et sont à l'origine d'un certain nombre de pollutions aux conséquences néfastes pour l'équilibre des écosystèmes et pour les générations présentes et futures.

Dans ce contexte, la transition vers de nouvelles formes de mobilité, cohérentes avec le maintien de la hausse mondiale des températures en dessous de 2°C, se fait toujours plus urgente et impose dès lors la nécessité de repenser la mobilité et de tendre vers de nouvelles formes de mobilité plus durables.

La transition vers une mobilité durable regroupe quatre angles d'approche (Mirova, 2018) :

- Transformer la propulsion de la thermique à l'électrique, et les carburants du fossile aux carburants alternatifs ;
- Améliorer les véhicules thermiques en optimisant l'efficacité énergétique et en réduisant les émissions polluantes des moyens de transport existants ;
- Orienter la mobilité vers des modes de transports économes en énergie ;
- Eviter les émissions en diminuant le besoin et/ou la distance du déplacement.

Dans la présente étude, nous nous concentrerons sur l'angle de la transformation, et en particulier sur celle de la propulsion thermique vers la propulsion électrique qui inclut les véhicules électriques à batterie, les véhicules hybrides rechargeables et les véhicules à pile à combustible.

En 2018, près de 2 millions de véhicules électriques devraient être vendus dans le monde (BNEF, 2018). Le décollage confirmé de la filière amorce une transition rapide vers une mobilité bas-carbone. Soutenu par des politiques volontaristes et des objectifs de développement ambitieux, le marché du véhicule électrique franchit un cap qui invite à questionner le sens et la place de l'essor de la mobilité électrique dans la transition écologique globale.

Ce changement de mode de propulsion apparaît comme une partie de la solution. Cependant, son efficacité va de pair avec la redéfinition de la mobilité individuelle, l'évolution des usages et la mise en œuvre accélérée de la transition énergétique globale. Enfin, aborder la place du véhicule électrique dans la transition écologique, c'est aussi questionner ses vertus environnementales supposées, les conditions de leur pleine contribution et la maîtrise de nouvelles externalités environnementales et sociales. Il s'agit d'identifier les technologies et tendances au cœur de cette révolution en construction, les potentiels leviers et freins au développement, et les risques et opportunités qui se dessinent tout au long de chaîne de valeur. Depuis l'extraction des ressources clés, aux infrastructures de recharge en passant par la construction automobile, cette étude a pour objectif d'identifier les acteurs économiques clés de cette transition, les nouveaux modèles économiques et l'adaptation des acteurs traditionnels.

I. Répondre aux enjeux de transition écologique et sociale des transports

Le secteur des transports rencontre principalement quatre problématiques environnementales et sociales :

- Une contribution significative au changement climatique ;
- Une forte dépendance au pétrole ;
- Un rôle prédominant dans la pollution de l'air ;
- Une source de bruit gênante pour l'environnement direct, en particulier en contexte urbain.

La transition du véhicule thermique au véhicule électrique apporte des réponses à ces enjeux.

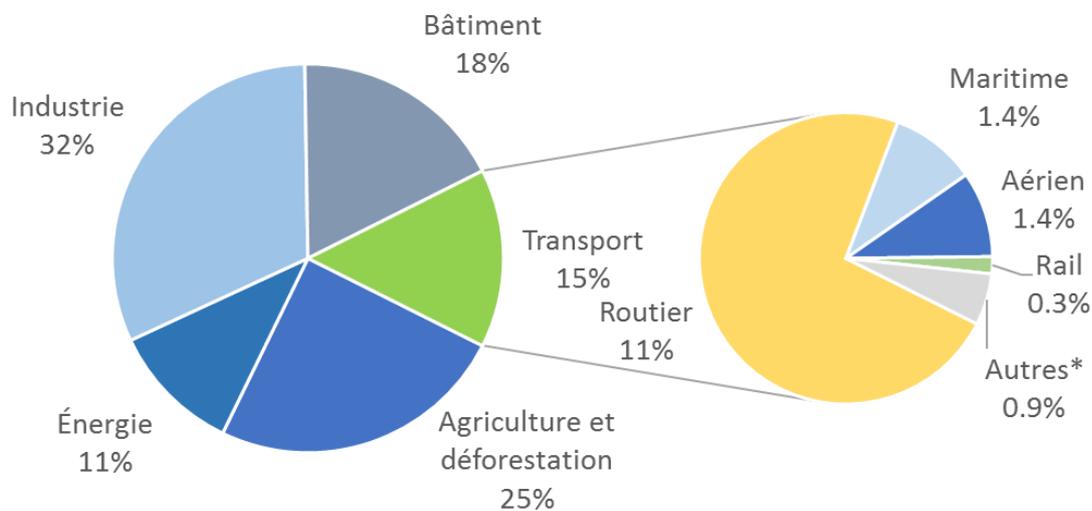
A. Transition climatique des transports

L'ELECTRIFICATION DE LA PROPULSION EST UNE NECESSITE

Le secteur des transports est à l'origine de 23 % des émissions de CO₂ liées à la combustion d'énergie dans le monde (IEA, 2017) et de 14 % des émissions de gaz à effet de serre mondiales (IPCC, 2014). De plus, ces proportions tendent à croître, considérant une progression annuelle de 2,5 % par an des émissions dues au transport entre 2010 et 2015 (IEA, 2017). La transition écologique des transports occupe ainsi une place centrale dans les scénarios de transition énergétique en ligne avec les ambitions de l'accord de Paris (Commission Européenne, 2015).

La contribution de certains sous-secteurs est par ailleurs sous-estimée, à l'instar de celle du transport aérien dont les conséquences des traînées de condensation peuvent jusqu'à doubler son impact climatique.

Figure 3 : Contribution des transports dans les émissions de gaz à effet de serre directes et indirectes (2010)



* génération d'électricité, transport par pipeline, émissions de N₂O et HFC

Sources : Mirova / (IPCC, 2014) / (IPCC, 2014) / (ICCT, 2018).

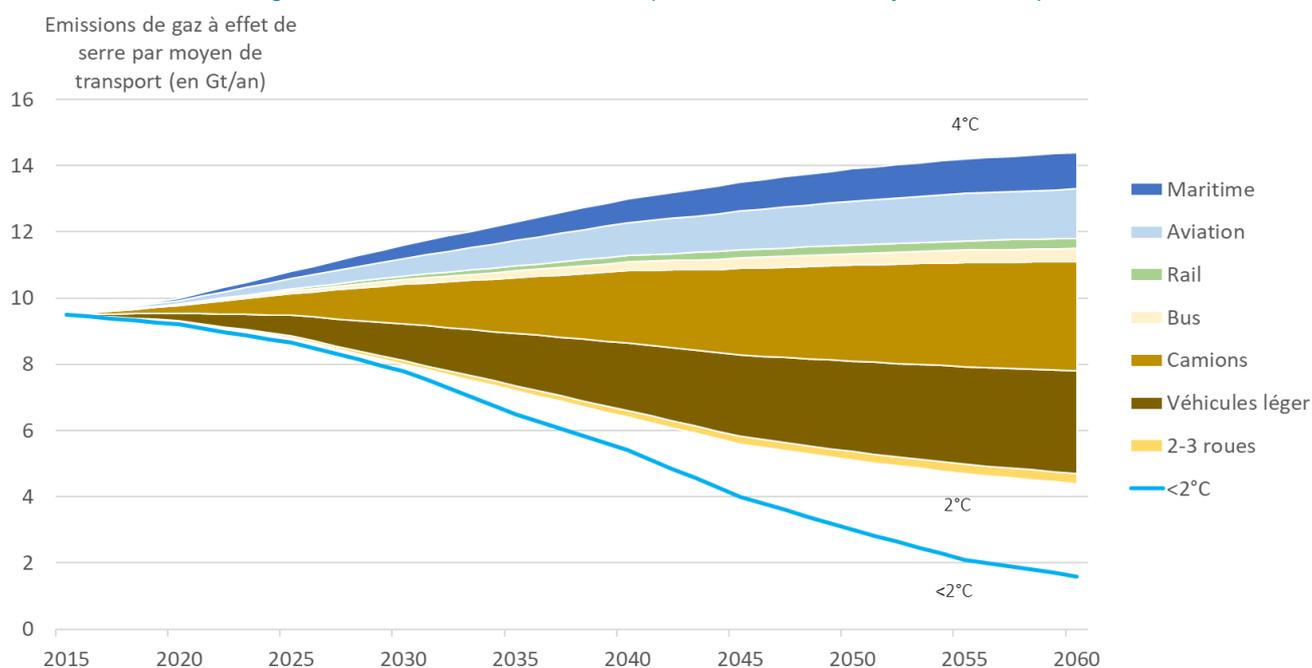
Électrification des transports Une solution de transition écologique

L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) publie trois scénarios climatiques :

- Le scénario RTS (Reference Technology Scenario), nommé scénario de référence, qui reste toutefois ambitieux, en ligne avec les avancées technologiques actuelles et les engagements déjà pris par les États, qui correspondrait à une hausse de température de 4°C ;
- Le scénario 2°C (2DS) permettant de limiter la hausse des températures à 2°C en 2100 grâce à une baisse du niveau des émissions annuelles de 70 % en 2060, et l'atteinte d'une neutralité carbone du système énergétique avant 2100 ;
- Le scénario Beyond 2°C (B2DS), encore plus ambitieux permettant de limiter la hausse des températures à 1,75°C en 2100 grâce à une baisse du niveau des émissions annuelles de 70 % d'ici 2060, et l'atteinte d'une neutralité carbone du système énergétique avant 2100 ;

Limiter le réchauffement des températures moyennes à 2°C en 2100 implique de réduire les émissions du transport de 60 % entre 2015 et 2060. Le graphique ci-dessous montre les efforts attendus pour les différents modes de transport.

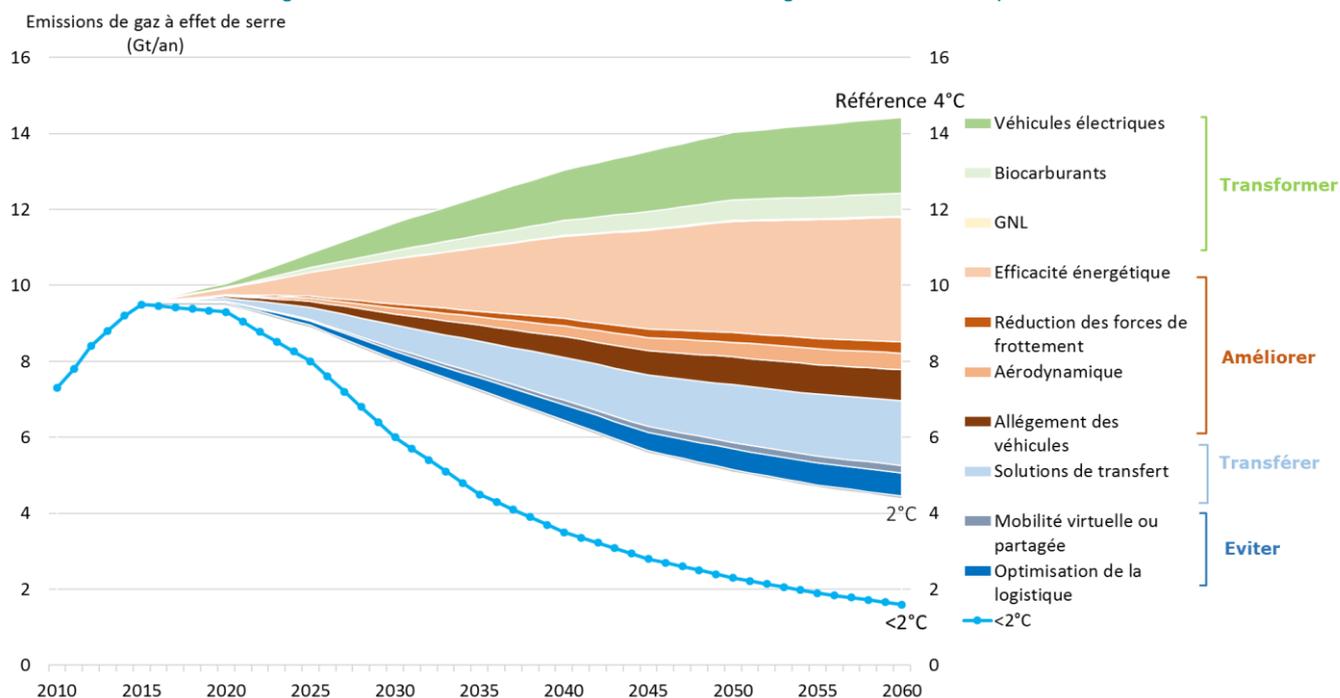
Figure 4 : Potentiel d'abattement comparé des différents moyens de transport



Sources : Mirova/ (IEA, 2017)

Pour atteindre cette réduction des émissions de gaz à effet de serre dues au transport, les solutions peuvent se répartir en quatre angles d'approche.

Figure 5 : Potentiel d'abattement d'émissions de gaz à effet de serre par solution



Sources : Mirova/ (IEA, 2017)

Si les solutions d'amélioration et de transfert présentent un potentiel d'abattement encore important¹, notamment pour les transports routiers de marchandises ainsi que les secteurs aérien et maritime, la transformation vers la propulsion électrique figure en bonne place. Par ailleurs, les solutions d'amélioration se concentrent sur des progrès technologiques continus, tandis que les solutions de transformation présentent un changement technologique radical, ce qui explique que le sujet soit prioritaire. Bien que la transition vers la propulsion électrique concerne en premier lieu le transport routier, elle n'en demeure pas moins une source de solutions pour les autres modes de transport sur le plus long terme. En effet, le développement à grande échelle des technologies de la mobilité électrique (batterie, pile à combustible) pour les véhicules routiers peut permettre des progrès qui rendent ces technologies envisageables pour d'autres modes de transport (maritime, aérien). Il est ainsi nécessaire d'envisager la transition concertée des différents moyens de transport (de passager, comme de marchandises) qui peuvent profiter de synergies technologiques et doivent participer à une réflexion globale sur la mobilité, comme peut l'illustrer l'importance des transferts modaux.

PENETRATION DE LA PROPULSION ELECTRIQUE PAR MODE DE TRANSPORT

Pour atteindre ses scénarios climatiques, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) propose des projections de pénétration de la propulsion électrique par secteur².

Le transport routier, en première ligne pour l'électrification

Aujourd'hui, les véhicules électrifiés en circulation, incluant les véhicules hybrides rechargeables, les véhicules électriques à batterie et les véhicules à pile à combustible,

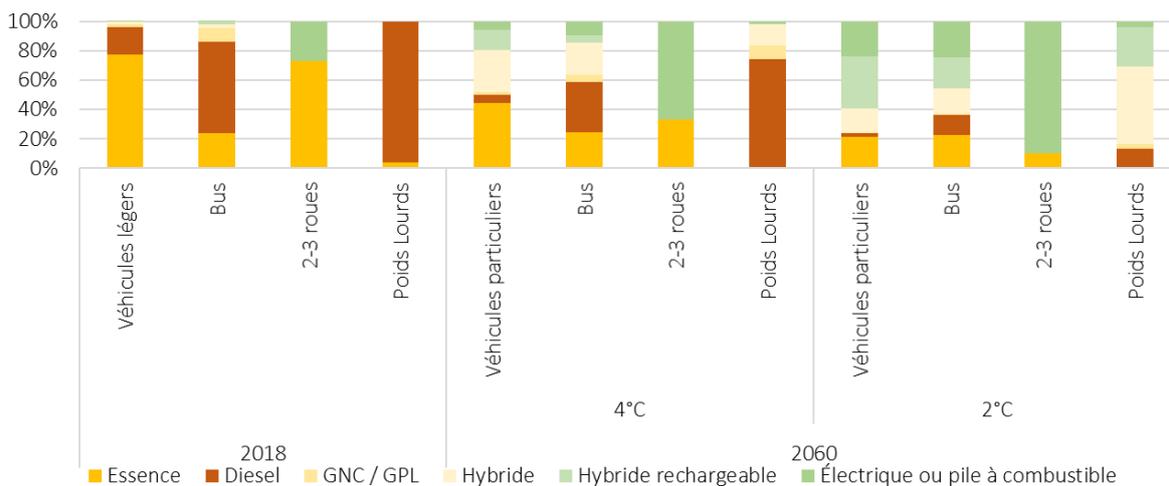
¹ (Mirova, 2013)

² Ces projections sont seulement relatives aux scénarios de l'IEA, les perspectives de croissance attendues sont présentées dans la partie « Perspectives »

représentent une faible proportion du parc mondial : 0,4 % pour les véhicules légers, 13 % du parc mondial de bus et des pénétrations presque nulles concernant les poids lourds et les 2-3 roues. Dans un scénario 2°C, une forte croissance est attendue sur ces segments avec, en 2060, une part de :

- 1 250 millions de véhicules légers, soit 60 % du parc mondial ;
- 24 millions de bus, soit 46 % du parc mondial ;
- 52 millions de poids lourds, soit 31 % du parc mondial ;
- 900 millions de 2-3 roues, soit 90 % du parc mondial.

Figure 6 : Pénétration de la propulsion électrique dans le transport routier d'ici 2060



Source : Mirova / (IEA, 2017)

Dans les scénarios de l'IEA, la pénétration de la propulsion électrique est très faible sur le segment poids lourds, considérant que la filière du véhicule à pile à combustible a encore trop de défis à relever, notamment économiques, pour être intégrée dans les projections (IEA, 2017). Sur ce segment précis du transport routier de marchandises, nous sommes plus optimistes, estimant que les qualités des véhicules à pile à combustible en termes d'autonomie répondent aux contraintes de ce type de transport.

L'électrification de la propulsion appliquée aux autres modes de transport

Les émissions de gaz à effet de serre imputables au transport aérien, maritime et ferroviaire représentent près du quart du total des émissions du transport, soit 2,2 GteCO₂ (ICCT, 2018). Il faut ici noter que cette quantification n'est que partielle, étant donné les conséquences non neutres des traînées de condensation qui pourraient doubler l'impact climatique de l'aviation.

Par ailleurs, les perspectives de croissance de trafic, associées aux réglementations encore faibles en comparaison à celles imposées au secteur automobile, laissent entrevoir des émissions de gaz à effet de serre de plus en plus importantes dans les années à venir. L'électrification de la propulsion serait également un enjeu majeur de la transition écologique pour ces modes de transport.

Toutefois, l'adoption de la propulsion électrique dans le transport maritime et aérien semble plus compliquée à court terme (cf. [Croissance du marché](#)). L'Agence Internationale de l'Energie prévoit uniquement des premiers développements de marché à partir de 2030, ce qui ne permet pas, à ce stade, d'établir de projections pour 2060.

Concernant le transport ferroviaire, l'électrification est maîtrisée depuis plusieurs décennies, notamment en Europe et au Japon. Au niveau mondial, 1/3 des lignes de chemin de fer sont déjà électrifiées dans le monde en 2015 (ICCT, 2018). Toutefois, les voies ayant bénéficié de

l'électrification sont les voies les plus rentables et ainsi les plus empruntées, ce qui signifie qu'en passager-kilomètre transporté, la part de trajet ferroviaire en électrique est près de 70%, tandis qu'en tonne-kilomètre transporté pour le fret, elle avoisine les 40%.

L'électrification du rail passe par 3 solutions : l'électrification des voies d'abord, mais aussi dans certains cas, l'utilisation de trains à batterie ou de stockage d'hydrogène. Dans un scénario 2°C, les émissions de gaz à effet de serre doivent être réduites de 87 %, ce qui suggère une électrification massive, voire totale, du transport ferroviaire.

Ainsi, les scénarios de transition intègrent l'électrification de la propulsion pour l'ensemble des modes de transports bien que dans des proportions et à des rythmes différenciés.

B. Transition énergétique des transports

SORTIR DE LA DEPENDANCE AU PETROLE

Le secteur des transports est à l'origine de 28 % de la consommation d'énergie primaire. Les sources d'énergie utilisées dans les transports sont par ailleurs très peu diversifiées puisque la quasi-totalité de la consommation finale (92 %) repose sur les dérivés du pétrole (IEA, 2017). Les véhicules électriques mettent fin à cette dépendance au pétrole en diversifiant les sources d'énergie utilisées :

- Un véhicule électrique à batterie est alimenté uniquement par l'électricité. Sa consommation en énergie primaire dépend donc du mix électrique du pays où le véhicule électrique est chargé ;
- Un véhicule hybride rechargeable est alimenté à la fois par de l'électricité et par du carburant fossile ;
- Un véhicule à pile à combustible est alimenté par de l'hydrogène, produit soit par électrolyse de l'eau, qui induit une consommation d'électricité, soit par reformage de méthane, utilisant du gaz.

Dans l'optique d'un scénario 2°C, en 2040, les transports ne reposent plus qu'à 60 % sur le pétrole. Par ailleurs, les véhicules électriques génèrent des gains d'efficacité énergétique (cf. [Rendement énergétique](#)).

CO-BENEFICES ENTRE LES SECTEURS DE L'ENERGIE ET DES TRANSPORTS

Au-delà de la réduction de la dépendance aux énergies fossiles, la mobilité électrique permet aussi d'accélérer la transition vers un mix électrique décarboné en investissant dans :

- De nouvelles capacités de stockage de l'énergie, que ce soit les batteries ou l'hydrogène, aptes à conserver l'électricité d'origine renouvelable, dont la production est souvent intermittente ;
- De l'intelligence informatique pour optimiser la consommation électrique sur l'ensemble du réseau.

C. Améliorer la qualité de vie en ville

Face aux projections de croissance de la population urbaine, les modes de circulation doivent s'adapter. Le nombre de citoyens devrait atteindre 66 % de la population mondiale d'ici 2050 (United Nations, 2014), soit près de 6,5 milliards de personnes (United Nations, 2017). Face à cette perspective, les villes de demain doivent relever de nombreux défis au niveau de l'environnement et l'aménagement du territoire, le partage et l'accès aux ressources, la pollution urbaine ou encore la sécurité. La propulsion électrique et tous les nouveaux services de mobilité qui en résultent (autopartage, livraison en véhicule électrique, vélos et trottinettes électriques) ont un rôle à jouer dans ce contexte.

La propulsion électrique ne produit pas d'émissions d'échappement, et la réaction d'électrolyse inverse qui a lieu dans la pile à combustible produit seulement des molécules d'eau. *A contrario*, le véhicule thermique produit, malgré des normes d'émission de plus en plus strictes, plusieurs polluants aux conséquences sanitaires et environnementales importantes.

Les oxydes d'azote (NO et NO₂) contribuent à l'acidification et l'eutrophisation des écosystèmes et participent, tout comme le dioxyde de soufre (SO₂), à la création d'ozone troposphérique, sous l'effet du rayonnement solaire avec les composés organiques volatiles (COV) et le monoxyde de carbone (CO), qui sont aussi des rejets de la propulsion thermique.

Ces gaz sont responsables, entre autres, de l'irritation des voies respiratoires et des yeux, et la pollution de l'air dans son ensemble est à l'origine de 7 millions de décès par an (infarctus, pneumonies, AVC, cancers...) (OMS, 2018). La mobilité électrique est également associée à une amélioration de la qualité de vie en ville du fait de la réduction des nuisances sanitaires, olfactives et sonores, engendrées par les véhicules thermiques.

Les véhicules électriques apparaissent comme une solution incontournable dans la transition écologique, tant du point de vue du climat que de l'énergie ou de la pollution locale. Ce constat étant établi, il convient de comprendre quels sont les défis à relever et les nouvelles externalités à maîtriser tout au long de la chaîne de valeur des véhicules électrifiés.

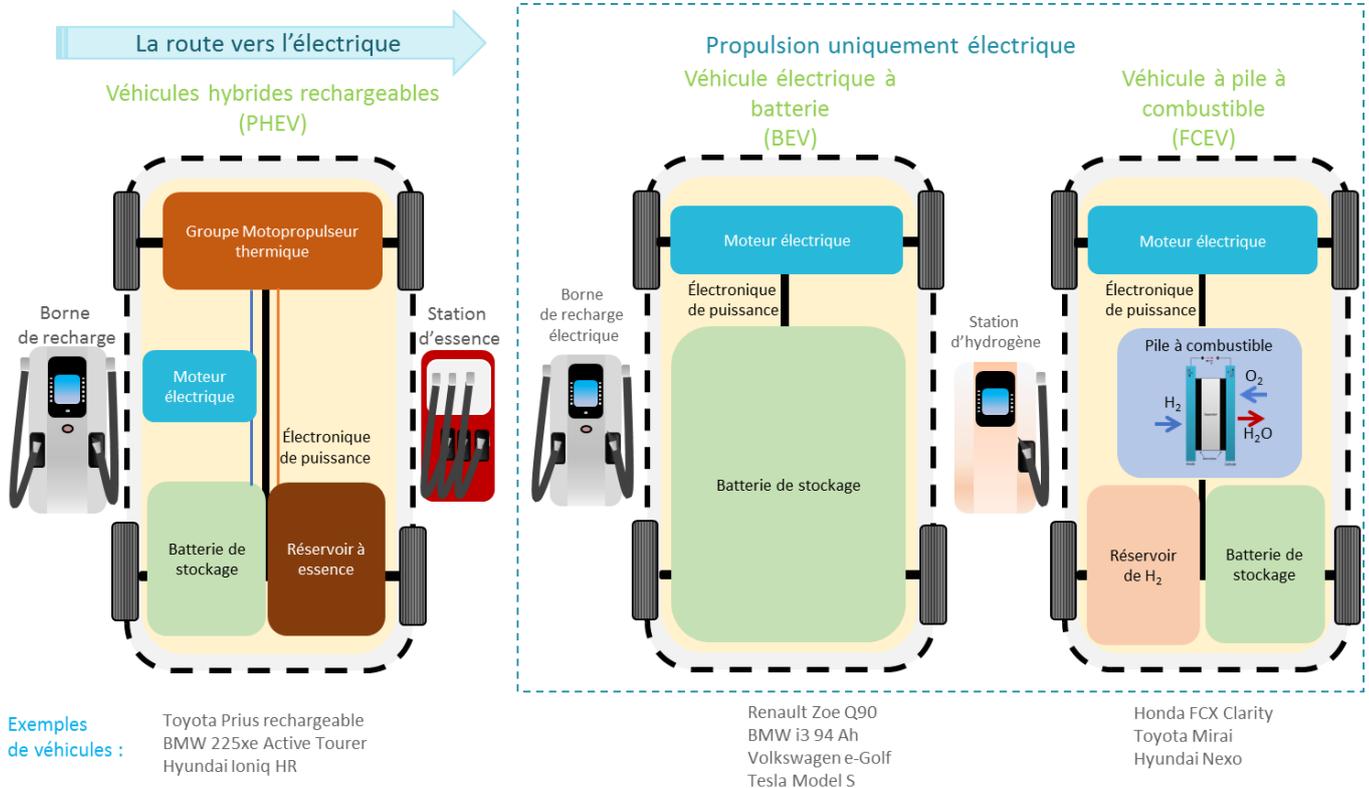
II. Technologies

Dans la chaîne de valeur des véhicules électrifiés, la clé de voute, en termes de coûts et de défi technologique, est le stockage de l'énergie, que ce soit par batteries ou par transformation en hydrogène. Au-delà de cet élément central lié au stockage, la composition des véhicules est relativement simple.

A. Composition des véhicules

Un véhicule électrique à batterie a une architecture radicalement différente de celle d'un véhicule thermique.

Figure 7 : Architecture des véhicules électriques



Sources : Mirova

Contenant bien moins de composants, en particulier en raison de l'absence d'un groupe motopropulseur thermique complexe, le fonctionnement d'un véhicule à batterie est beaucoup plus simple que celui d'un véhicule thermique, et repose sur trois éléments clés :

- La batterie de stockage qui permet de stocker l'électricité nécessaire à bord du véhicule,
- Le groupe motopropulseur électrique, comprenant principalement le moteur électrique qui propulse le véhicule et le réducteur assurant la transmission,
- L'électronique de puissance, active à plusieurs endroits dans le véhicule, qui à l'aide de semi-conducteurs, assure un fonctionnement optimisé du véhicule.

Dans le cas d'un véhicule à pile à combustible, aux éléments du véhicule électrique à batterie viennent s'ajouter deux composants essentiels pour stocker l'énergie sous forme d'hydrogène :

- La pile à combustible permettant de transformer l'hydrogène en électricité,
- Le réservoir d'hydrogène capable de stocker l'hydrogène à une pression de 700 bars.

Dans le cas du véhicule électrique « de transition », le véhicule hybride rechargeable, sont présents les composants d'un véhicule thermique couplés à ceux d'un véhicule électrique à batterie.

B. Stockage de l'énergie

L'électricité dans un véhicule électrique peut être stockée dans un dispositif appelé batterie de stockage, ou sous forme d'hydrogène. L'électricité ou l'hydrogène n'existent pas à l'état naturel sur Terre mais sont le résultat d'une transformation d'énergies primaires. Ce sont des vecteurs énergétiques permettant de transporter l'énergie de la source primaire au moteur électrique.

Le stockage et la distribution de l'énergie sont les éléments clefs de la traction électrique, ce qui signifie que la valeur ajoutée technologique maîtrisée auparavant par le secteur automobile est remplacée par des technologies naissantes et des innovations provenant des secteurs de la chimie, de la gestion de l'énergie et des semi-conducteurs. Aujourd'hui, le développement de la filière du véhicule électrique se heurte à des freins, inhérents à tous les nouveaux marchés en développement, que sont le coût, la performance et la fiabilité. Concernant les véhicules électriques à batterie, les ruptures technologiques se succèdent, en particulier sur les batteries de stockage, pour favoriser l'adoption de la technologie et proposer à l'utilisateur final un service rendu équivalent à celui offert par le véhicule thermique, en réduisant le coût, augmentant l'autonomie, facilitant la charge de son véhicule et allongeant la durée de vie.

Concernant les véhicules à pile à combustible, le développement s'établit sur une échelle de temps plus longue et l'adoption devrait être plus forte à court terme pour les véhicules lourds destinés à des trajets longs. Dans tous les cas, pour être adopté et considéré comme solution de transition écologique des transports, ce type de véhicule doit répondre à des défis sur l'hydrogène en termes de coûts pour produire l'hydrogène, le stocker et le transformer en électricité, de performance carbone et de fiabilité, *i.e.* sécurité, et de possibilité de chargement.

BATTERIES DE STOCKAGE

Un véhicule électrique nécessite de stocker l'énergie électrique produite en amont.

Description du système

Une batterie de stockage est l'assemblage de centaines d'unités élémentaires, les cellules électrochimiques dans des modules, eux-mêmes contenus dans un pack de batterie. Un système de refroidissement (tuyaux en aluminium, liquide de refroidissement et pompe) ainsi qu'un système BMS (Battery Management System), constitué d'une partie électronique et de capteurs, permettent le fonctionnement optimal de la batterie.

Illustration 1 : Architecture d'un modèle électrique (Tesla model S 85)

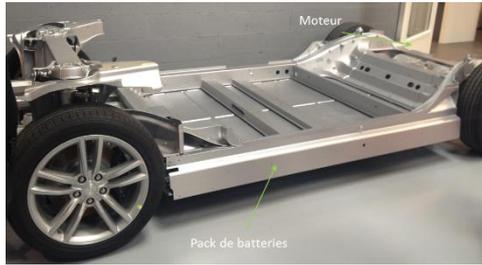


Figure 8 : Architecture d'un modèle électrique (Tesla model S 100)

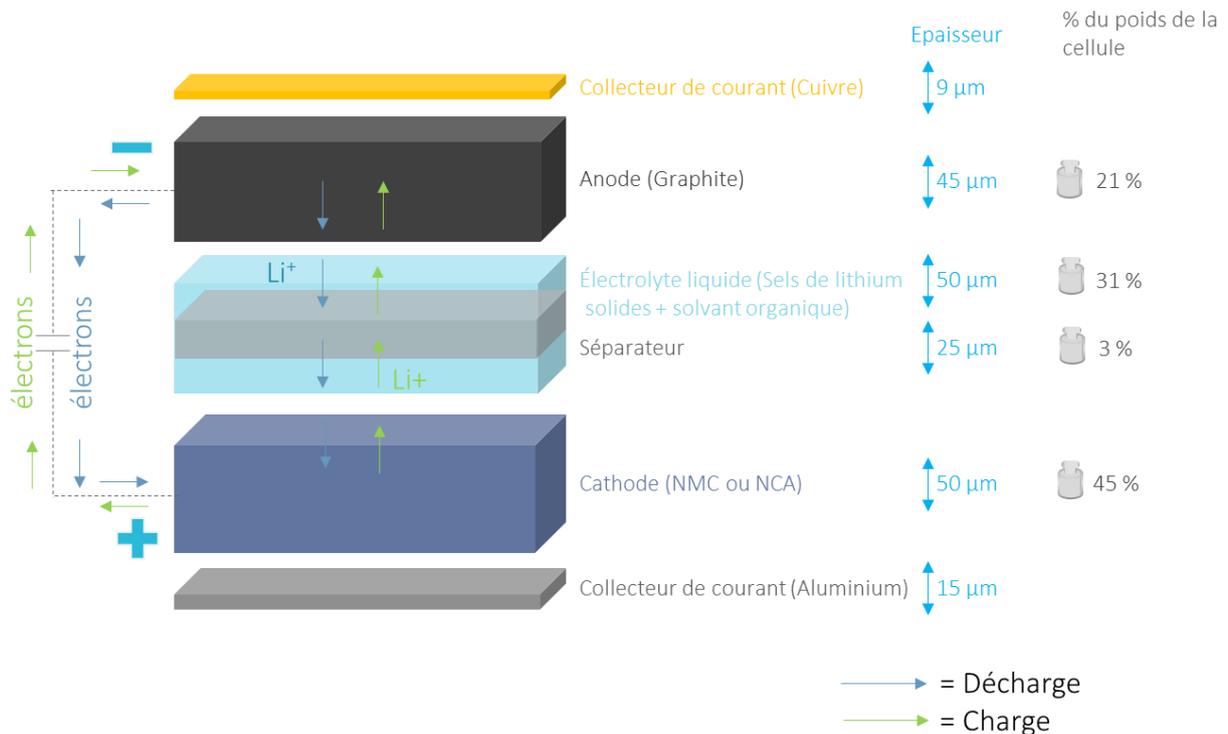


Sources : Mirova

Une cellule comprend :

- Deux électrodes : la cathode, qui est le matériel actif positif, et l'anode, qui est le matériel actif négatif ;
- Une solution d'électrolyte liquide ;
- Un séparateur et des feuilles de cuivre.

Figure 9 : Schéma d'une cellule de batterie lithium ion



Sources : Mirova / (Ulvestad, 2018)

Pendant la décharge, les ions lithium (Li+) passent de l'électrode positive, la cathode, à l'électrode négative, l'anode, générant un courant électrique qui va alimenter le moteur. Le processus inverse a lieu lors de la charge (phase de décélération ou rechargement).

Batteries de stockage actuelles

Aux premières batteries au plomb du XIXe siècle, ont succédé de nombreuses technologies qui ont connu des développements très rapides dans les dernières décennies (Mirova, 2012). Les batteries lithium-ion qui apparaissent dans l'électronique dans les années 90 se sont aujourd'hui imposées comme la technologie de référence capable de proposer des caractéristiques propres à l'essor de la mobilité électrique. Aujourd'hui, quatre grands types

de batteries lithium-ion coexistent dans les véhicules électriques commercialisés, dont le nom s'explique par la composition de la cathode :

- La batterie de type NMC (Lithium-Nickel-Manganèse-Cobalt), la plus fréquente, qui comprend en réalité plusieurs sous catégories - NMC111, NMC 532, NMC622 – offrant, selon la proportion détenue de nickel dans la cathode, des densités énergétiques plus ou moins importantes ; la NMC 111 étaient utilisées massivement dans les années 2010, tandis que les NMC 532 et NMC 622 équipent un grand nombre de modèles mis sur le marché en 2018 ;
- La batterie de type NCA (Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxyde), principalement utilisée par Tesla et présentant des performances proches de celles des batteries NMC 622 ;
- La batterie de type LFP (Lithium-Fer-Phosphate) principalement utilisée en Chine et offrant une énergie spécifique plus faible, elle répond parfaitement aux contraintes des bus qui peuvent se recharger à chaque station, mais est limitée dans les véhicules particuliers ;
- La batterie de type LMO (Lithium-Manganèse), qui substitue le cobalt par du manganèse, offre un coût plus faible, mais est pénalisée par sa faible énergie spécifique (voir focus 1) et par son vieillissement précoce à hautes températures ; ce type de batterie a été couplé aux batteries NMC 111 et a équipé les premières générations de véhicules électriques.

Un autre type de batteries a été utilisé dans le cadre de l'autopartage : la batterie de type LMP (Lithium-Métal-Polymère) commercialisée par Bolloré. Cette technologie offre des qualités fortes sur la durée de vie (de 200 000 à 400 000 km) et l'autonomie (d'environ 200 km), mais est contrainte d'être constamment soit utilisée soit branchée pour conserver une température constante de 80°C et ne pas se décharger. Ce handicap rend l'usage de la batterie LMP exclusivement limité à l'autopartage ou au fonctionnement de flotte de véhicules utilitaires.

Focus 1: Énergie spécifique et autonomie

L'énergie spécifique est devenue un indicateur clef de performance car elle définit en grande partie l'autonomie d'un véhicule, qui correspond à la quantité d'énergie stockée à bord du véhicule divisée par la consommation nécessaire à un véhicule pour fonctionner.

Pour déterminer la quantité d'énergie, il faut considérer la densité énergétique massique ou l'énergie spécifique, soit la quantité d'énergie contenue dans une masse donnée. Quelle que soit la propulsion, un véhicule a une énergie spécifique qui dépendra, pour les véhicules thermiques de la capacité du réservoir, pour les véhicules électriques à batterie de la capacité des batteries de stockage, et pour les véhicules à pile à combustible du volume d'hydrogène embarqué.

Pour les véhicules électriques à batterie, l'énergie spécifique d'une cellule est de l'ordre de 200 à 250 Wh/kg. En augmentant le nombre de cellules et la taille des batteries, les capacités de stockage des véhicules électriques à batterie peuvent atteindre aujourd'hui jusqu'à 100 kWh permettant une autonomie supérieure à 600 kilomètres dans le cas de la Tesla Model S 100. La plupart des véhicules de nouvelle génération proposent aujourd'hui une capacité de ~40 kWh permettant une autonomie de ~300 kilomètres.

Pour les véhicules à pile à combustible, les modèles commercialisés actuellement ont un réservoir de ~140 litres d'hydrogène sous forme gazeuse offrant ~200 kWh de capacité d'énergie, ce qui correspond à une autonomie de l'ordre de 600 kilomètres.

Dans les premiers modèles, l'anode était constituée de graphite naturel provenant le plus souvent des mines à charbon. Ce graphite est aujourd'hui de plus en plus synthétique, issu

de coke³, pour améliorer l'énergie spécifique. Une exception existe cependant sur le marché : la technologie lithium-titanate-oxyde (LTO), batterie lithium-ion développée par Toshiba, qui, associée à une cathode LMO ou NMC, intègre dans l'anode du lithium-titanate en remplacement du graphite. Elle présente une énergie spécifique plus faible (~100Wh/kg) mais possède une plus grande stabilité thermique qui permet des temps de recharge très courts et une durée de vie longue (plus de 10 000 cycles). Ces caractéristiques en font une solution privilégiée pour les 2 roues et les bus.

Enfin, les électrolytes évoluent également passant de sels lithium-fer-phosphates (LiPF6) dissous dans des solvants organiques à des électrolytes fluorés pour améliorer l'énergie spécifique, le voltage et la durée de vie tout en régulant la stabilité thermique. A terme, les électrolytes devraient devenir solides (cf. [Innovations attendues](#)) ; en attendant, les séparateurs ont un rôle essentiel dans la solution électrolyte pour garantir la stabilité thermique entre la cathode et l'anode, tout en étant assez fins pour ne pas nuire à l'énergie spécifique des cellules.

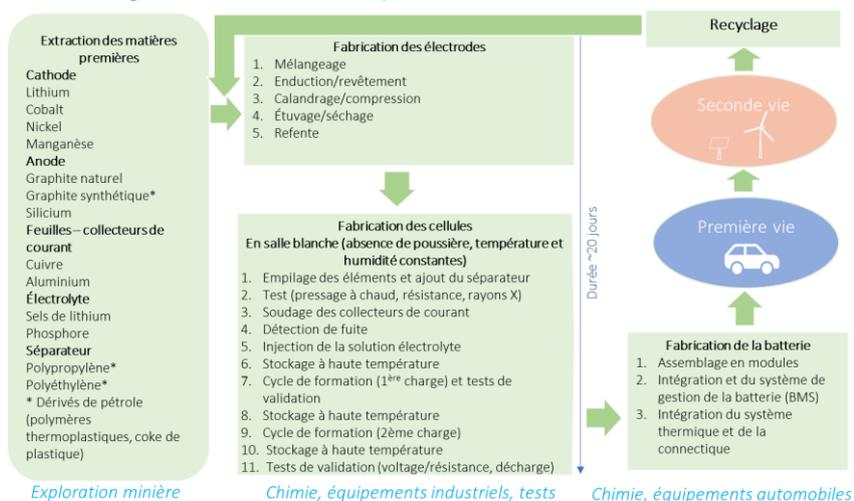
Malgré des progrès technologiques considérables en dix ans, ces types de batteries présentent aujourd'hui encore des faiblesses, notamment sur le coût, l'énergie spécifique et le temps de charge. Les industriels améliorent les processus de fabrication, tandis que les chimistes s'essayent à des nouvelles compositions chimiques des cellules afin d'atteindre un meilleur compromis coût-performance-fiabilité permettant d'offrir un service rendu égal ou supérieur à celui du véhicule thermique.

Processus de fabrication

Quel que soit le type de batterie lithium-ion, le processus de fabrication est sensiblement similaire et comprend :

- L'extraction des matières premières,
- La fabrication des électrodes (cathodes et anodes),
- La formation des cellules,
- L'assemblage des cellules,
- Et enfin l'assemblage final en intégrant le système électronique BMS qui contrôle la charge et la décharge de la batterie, ainsi que le système de gestion thermique.

Figure 10 : Processus de production d'une batterie lithium-ion



Sources : Mirova / (Dougher, 2018), (Berckmans, Vanhaverbeke, Messagie, Smekens, & Omar, 2017), (Patry, 2015), (Nussbaumer, 2014)

³ Le coke est un combustible obtenu par pyrolyse de la houille - roche spécifique du charbon - dans un four.

Les matières premières nécessaires à la fabrication des batteries sont extraites des minerais à la suite d'une série de traitement ou récupérées des filières de recyclage. Celles destinées aux électrodes subissent ensuite plusieurs traitements exigeants et longs pour former des rouleaux d'électrodes qui, une fois découpés, aboutiront à des anodes et des cathodes. S'en suivent des opérations également complexes dans des conditions optimales en salles blanches limitant les contaminations, les changements de températures et d'humidité, et incorporant plusieurs phases de test, de charge et de vieillissement pour obtenir les cellules. Ce processus de fabrication utilisant la compression rouleau à rouleau, n'a pas beaucoup évolué depuis les premières batteries lithium-ion commercialisés par Sony en 1991 ; il s'avère :

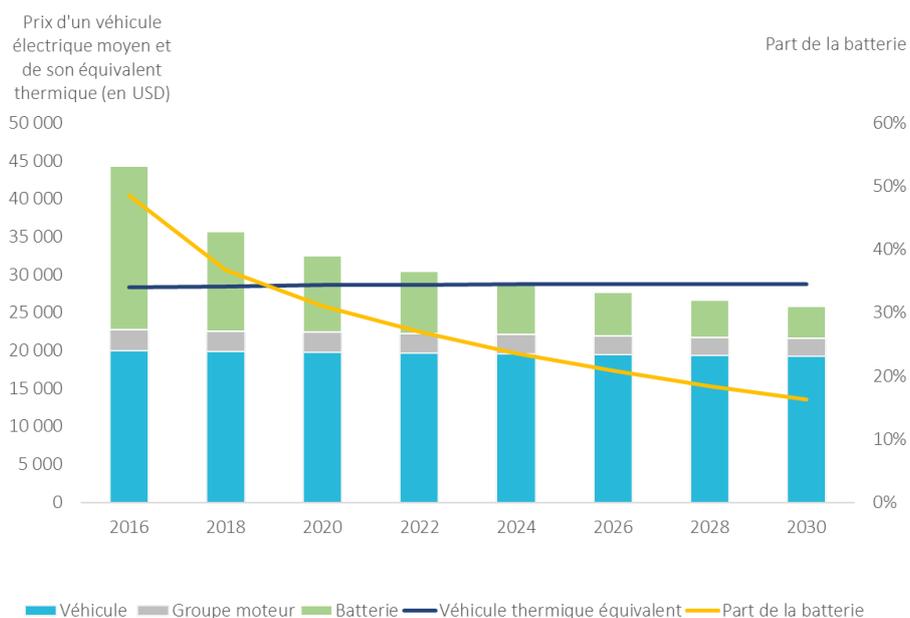
- Long, ce qui complexifie son adaptation à la cadence de production automobile ;
- Coûteux et consommateur d'énergie au kWh de cellule produit, en raison de l'utilisation de salles blanches pour fabriquer des quantités encore faibles de batteries, ce qui va évoluer au rythme de la croissance des volumes de production ;
- Consommateur de ressources minières plus ou moins critiques (cf. [Enjeux de ressources](#)).

La fabrication des batteries implique plusieurs acteurs dans les secteurs minier, de la métallurgie, de la chimie et dans la construction automobile. Pour réduire les inconvénients de la fabrication, les facteurs d'innovation dépendent des avancées en chimie dans la composition des électrodes et l'assemblage des différents composants, de la performance de l'équipement industriel utilisé à chaque étape de fabrication, et de la pertinence des tests réalisés.

Coût

En 2018, le coût d'un véhicule électrique moyen (segment C) est encore supérieur à celui d'un véhicule thermique équivalent (cf. [Coût total de possession](#)). Toutefois, la décomposition de la valeur est complètement différente : dans un véhicule thermique, environ 30 % du prix est lié à la motorisation, tandis que dans un véhicule électrique, le moteur coûte près de 10 fois moins que la batterie de stockage qui représente ~50 % de la valeur du véhicule. Ces données économiques expliquent en partie que l'innovation et la valeur ajoutée soient liées aux batteries.

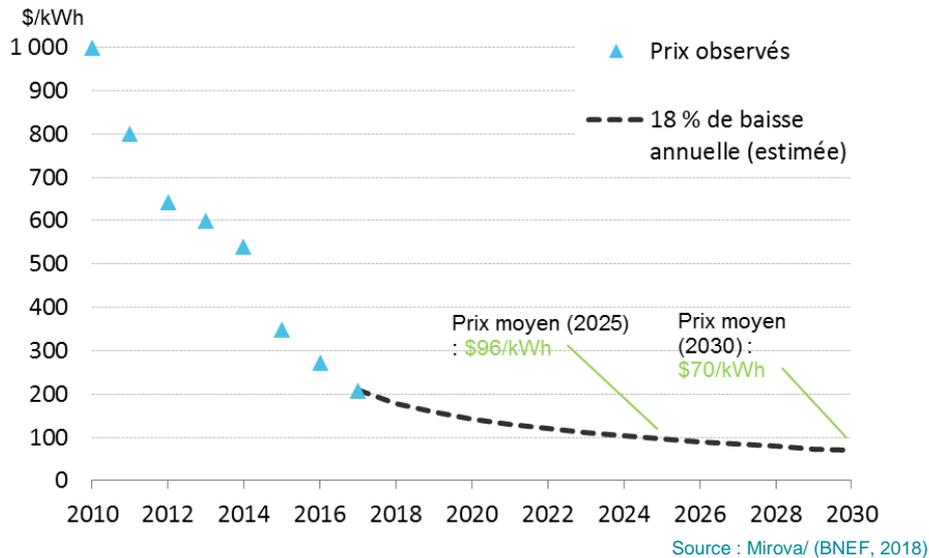
Figure 11 : Prix actuel et estimé d'un véhicule électrique moyen



Source : Mirova/ (BNEF, 2018)

Le coût des batteries lithium-ion a baissé de près de 80 % en 8 ans, passant de ~1000 USD/kWh à ~200 USD/kWh en 2018. Cette tendance devrait se poursuivre dans les années à venir, bénéficiant d'une hausse des capacités de production et de l'arrivée de nouvelles technologies de batteries.

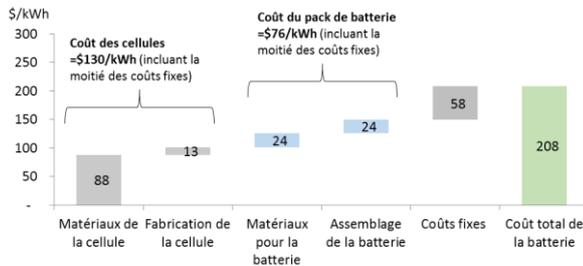
Figure 12 : Évolution du coût de la batterie lithium-ion



Les deux batteries offrant aujourd'hui la plus grande énergie spécifique et les plus grandes possibilités sont les batteries NCA et NMC 622. Dans les deux cas, la batterie coûte environ 200 USD/kWh. L'essentiel de ce coût est porté par la cellule, et plus particulièrement par la cathode qui représente environ la moitié du coût de la cellule.

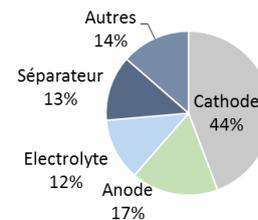
Coût d'une batterie NCA

Figure 13 : Décomposition du coût d'une batterie NCA – au niveau de la batterie



Source : Mirova/ (Argonne National Laboratory, 2018)/ (Berenberg, 2018)

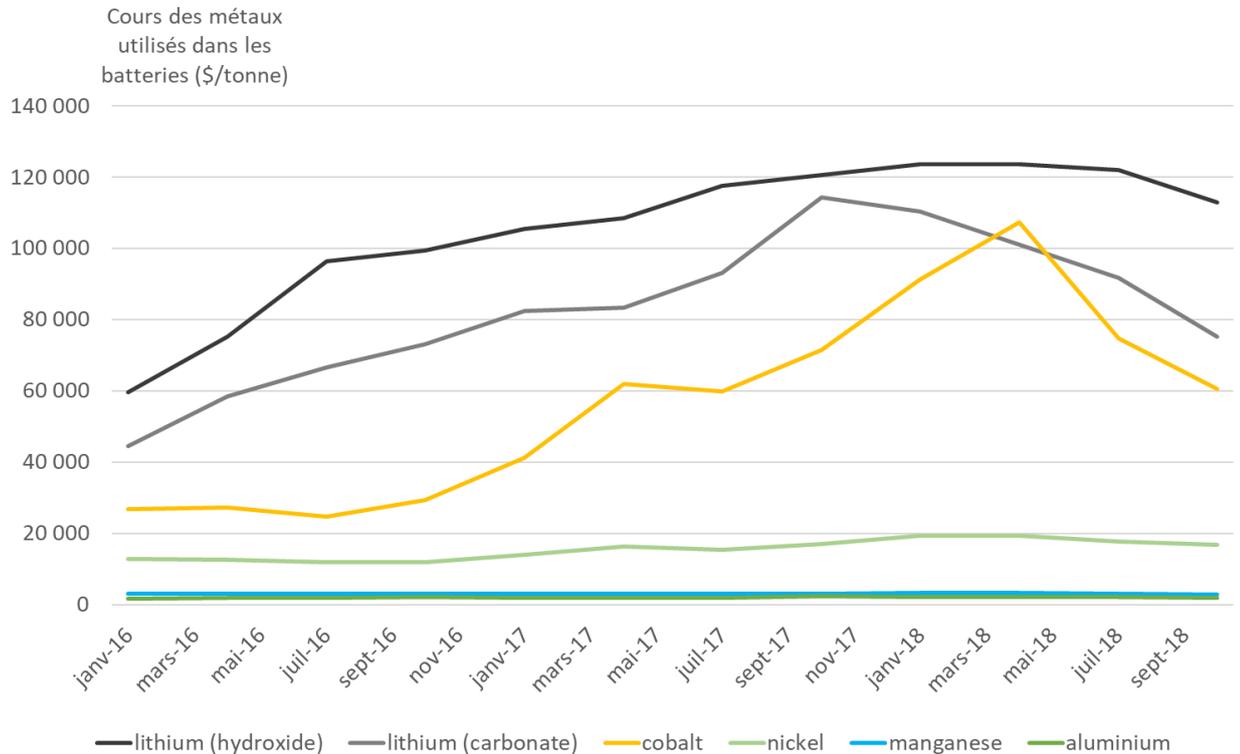
Figure 14 : Décomposition du coût d'une batterie NCA – au niveau de la cellule



Ce constat explique en partie l'évolution dans la composition chimique des électrodes, et, en premier lieu, dans celle de la cathode. Les cathodes commercialisées ou envisagées contiennent dans des proportions différentes du lithium, du manganèse, du nickel, du cobalt et de l'aluminium dans le cas de la technologie NCA.

Tandis que l'aluminium et le nickel ont des prix relativement faibles et stables, variant respectivement entre 1,5 USD/kg et 2,2 USD/kg et entre 12 USD/kg et 20 USD/kg, les prix du lithium et du cobalt sont plus fluctuants et significativement plus élevés, de 26 USD/kg à 115 USD/kg sur une période de janvier 2016 à décembre 2018.

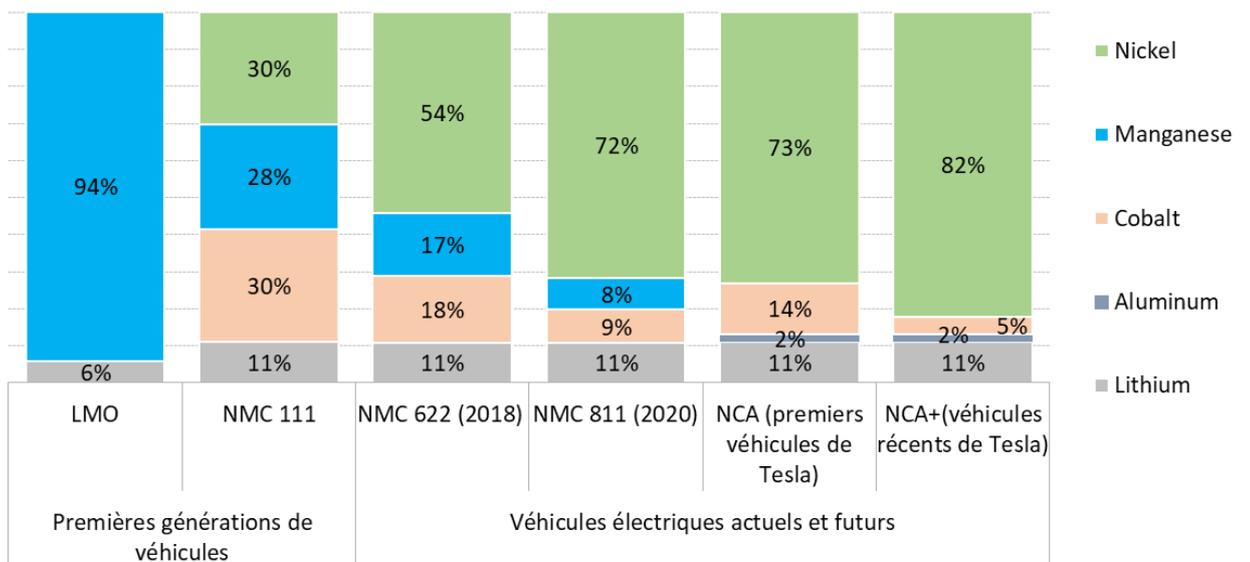
Figure 15 : Évolution du prix des matières premières utilisées dans les cathodes



Sources : Mirova/BNEF

Pour réduire les risques de coûts liés aux matières premières, l'objectif est d'augmenter à court terme la part de nickel et d'aluminium et de réduire celle du cobalt. A plus long terme, il s'agit de diminuer la part des métaux lourds pour atteindre la parité coût avec le véhicule thermique sans craindre que les effets de baisse liés à la hausse des volumes de production ne soient annulés par une hausse du prix des matières premières.

Figure 16 : Composition des technologies de batteries (kWh)



Source : Mirova/BNEF

De génération en génération, les batteries de type NMC réduisent la présence des matériaux les plus chers et les plus volatiles. Dans les appellations NMC (par exemple, NMC 811), le premier chiffre fait référence au nickel, le deuxième au manganèse et le troisième au cobalt.

Le lithium, élément compact qui permet de stocker beaucoup de charge sous forme d'ion lithium, représente ~10 % de la cathode, puis les 90 % restant se répartissent approximativement selon le nom de la technologie. Ainsi, la technologie NMC 811 a approximativement 8 fois plus de nickel que de manganèse et de cobalt.

Le coût n'est pas le seul paramètre étudié dans les axes d'amélioration. La performance est également à la source du développement des véhicules électriques. Celle-ci comprend l'autonomie du véhicule, la durée de vie et la stabilité thermique.

Performances actuelles

Au-delà de la dimension coûts, en variant la composition de la cathode, mais également celle de l'anode et de l'électrolyte dans un futur proche, l'industrie de la chimie permet des progrès en termes de densité énergétique (autonomie), de recyclabilité (durée de vie), de stabilité thermique (sécurité) et de temps de charge.

AUTONOMIE

Grâce aux progrès réalisés dans la composition chimique des batteries et à la taille croissante des batteries embarqués dans les véhicules, l'autonomie a doublé entre les premières générations qui affichaient une autonomie de l'ordre de ~100/150 km et celles qui sont mises sur le marché aujourd'hui et permettent de parcourir ~300 km entre deux charges.

Toutefois, augmenter la taille des packs de batteries n'est qu'une solution superficielle qui répond à la recherche d'une autonomie prolongée, mais pose des problématiques de coûts avec des kWh embarqués supérieurs (la parité-coût avec le véhicule thermique est atteinte à 100 USD/kWh pour un pack de 30 kWh, mais 60 USD/kWh pour un pack de 60 kWh) et d'impact environnemental étant donné que le poste le plus important d'émissions de CO₂ et de consommation d'énergie est liée à la production des batteries (cf. [Impact carbone en cycle de vie](#)).

DUREE DE VIE

La durée de vie d'une batterie correspond à la période au bout de laquelle elle a perdu 20 % de sa capacité initiale. La vitesse de dégradation est fonction de la technologie, des conditions de charge et de l'usage qui en est fait, notamment sur la profondeur de décharge. En général, les batteries récentes (NMC 622, NCA) offrent 1 000 à 1 500 cycles de recharge en conditions optimales, ce qui correspond à 200 000 km environ. En réalité, la vitesse de dégradation est très variable d'une technologie à l'autre et d'un véhicule à l'autre, notamment selon le système de refroidissement installé. Elle varie aujourd'hui entre 5 et 8 ans. La généralisation des cathodes riches en nickel, le développement du chargement ultra rapide et l'augmentation de la profondeur de décharge devraient limiter à court terme l'augmentation de la durée de vie. Pourtant, cette caractéristique est un facteur crucial dans la mesure où la batterie représente la majeure partie de la valeur d'un véhicule électrique et une part importante de l'impact environnemental du véhicule. Ainsi cette durée de vie plus ou moins longue est clef dans le développement des usages de seconde vie (stockage stationnaire d'énergie) ou des capacités de recyclage pour récupérer les batteries utilisées, les recycler et réduire ainsi de près de 50 % le coût de la nouvelle batterie.

CAPACITE A SUPPORTER LA CHARGE

L'innovation dans l'infrastructure de recharge est essentielle dans l'atteinte d'une durée courte de charge (cf. [Infrastructure](#)). Toutefois, ce n'est pas le seul paramètre. Les batteries ont encore ici un rôle à jouer pour assurer que l'anode résiste à une charge rapide. Aujourd'hui l'anode en graphite supporte mal un chargement trop soudain où les ions Li⁺ arrivent massivement.

STABILITE THERMIQUE

L'emballement thermique d'une batterie définit la vitesse d'échauffement lors de la charge et décharge. Le système de refroidissement permet de contrôler cet emballage et les risques d'embrasement de l'électrolyte. Les premières technologies NMC111, mais surtout LFP et LTO, présentent une meilleure stabilité thermique, ce qui les rend plus sécurisées et mieux adaptées aux applications pour lesquelles ce critère est important, comme les bus. La tendance à l'augmentation de la quantité de nickel réduit la stabilité thermique et représente un défi technique pour garantir une sécurité optimale. Par ailleurs, une meilleure stabilité thermique permet à la batterie de supporter des courants plus élevés et donc une charge plus rapide. La maîtrise des batteries solides, dans lesquelles l'électrolyte liquide est remplacé par une membrane polymère, sera déterminante pour garantir une meilleure stabilité thermique, et permettre ainsi des temps de recharge comparables aux véhicules thermiques. Plus largement, la plage de fonctionnement optimale des batteries devrait augmenter dans les années à venir et réduire les baisses de performance actuellement observées en conditions hivernales (températures négatives).

Innovations attendues

Les progrès en termes de coût et d'autonomie dépendent de l'innovation dans les batteries de stockage. Toutefois, les meilleurs compromis coût/autonomie ne peuvent se trouver aux dépens de la durée de vie (nombre de cycles) ou de la stabilité thermique.

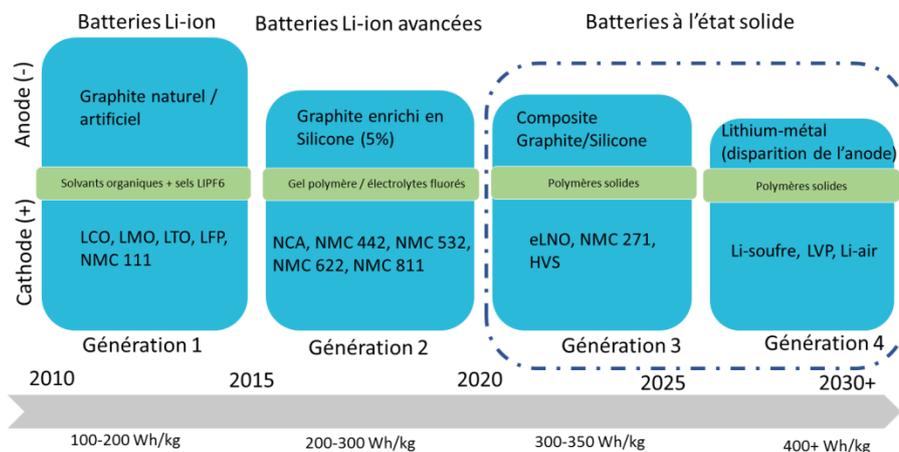
Le cobalt améliore l'énergie spécifique, mais a un coût élevé, ce qui pose des problématiques d'approvisionnement et comporte des risques liés à l'emballage thermique⁴. Il s'agit donc de réduire sa présence. L'oxyde de nickel, qui tend à le remplacer progressivement, présente une excellente énergie spécifique (cf. Focus 1) mais n'est pas stable, tandis que le manganèse, moins onéreux et stable thermiquement, possède généralement une énergie spécifique plus faible et un vieillissement plus précoce. Pour avoir une stabilité appropriée tout en conservant de bonnes propriétés énergétiques et un coût acceptable, les cathodes sont ainsi constituées d'oxydes mixtes.

Les batteries peuvent se classer en 4 générations :

- Génération 1 (2010-2015) : faible densité énergétique et coût élevé ;
- Génération 2 (2015-2020) : NCA et NMC avec des proportions de nickel de plus en plus élevées pour remplacer le cobalt afin de réduire les coûts et d'améliorer l'énergie spécifique ;
- Génération 3 (2020-2030) : variations des compositions de cathode, proportion grandissante du silicium dans l'anode et arrivée des polymères solides pour l'électrolyte ;
- Génération 4 (à partir de 2030) : batteries à l'état solide avec une anode solide, un électrolyte solide et trois alternatives (à ce stade) concernant la cathode.

⁴ L'oxyde de cobalt est réactif. En cas de défaillance, l'élévation de température engendrera une décomposition de l'oxyde. Cette décomposition libérera de l'oxygène qui réagira avec les autres matériaux qui sont combustibles.

Figure 17 : Évolutions des technologies de batteries



Sources : Mirova / (IEA, 2018)

Dans un premier temps, la priorité industrielle est de réduire les proportions de cobalt, coûteux et qui soulève des problématiques liées à l'approvisionnement, en augmentant la part de nickel qui améliore l'énergie spécifique, c'est à dire l'autonomie. Toutefois, le nickel dégrade le nombre de cycles et reste un peu plus cher que le manganèse et l'aluminium. L'industrie s'oriente donc également vers une baisse de nickel.

Jusqu'en 2030, les principales innovations attendues sont :

- **eLNO** (lithium-oxyde de nickel amélioré) qui devrait contenir 90 % de nickel, 5 % de manganèse et 5 % de cobalt, développée par Johnson Matthey et dont la production devrait débuter en 2021. Cette technologie permettrait d'améliorer l'énergie spécifique (+15 % par rapport à la technologie NCA), de diviser le coût en réduisant encore le recours au cobalt et d'améliorer le nombre de cycles ;
- **NMC 271**, développée par BASF et dont la production devrait également débuter en 2021, qui prévoit de remplacer une proportion importante du nickel par du manganèse (un peu moins coûteuse), mais qui est sujette à des questionnements sur la capacité de l'oxyde de manganèse à délivrer une haute énergie spécifique étant donné l'énergie spécifique limitée de la technologie LMO (Lithium-Manganèse Oxyde) ;
- **Cathode HVS (LNMO)**, avec uniquement du lithium, du nickel et du manganèse, sans cobalt. Cette technologie est en phase préliminaire de recherche expérimentale ;
- Intégration croissante d'électrolytes fluorés offrant des plus grandes capacités de voltage pour la charge et allongeant la durée de vie ;
- Incorporation de silicium dans le graphite synthétique constituant l'anode. Aujourd'hui le silicium représente moins de 5 % de l'anode, mais cette proportion devrait augmenter considérant les perspectives significatives d'amélioration de l'énergie spécifique.

Après 2030, les batteries devraient entrer dans l'ère des batteries « tout solide ». Pour cela, plusieurs innovations sont requises :

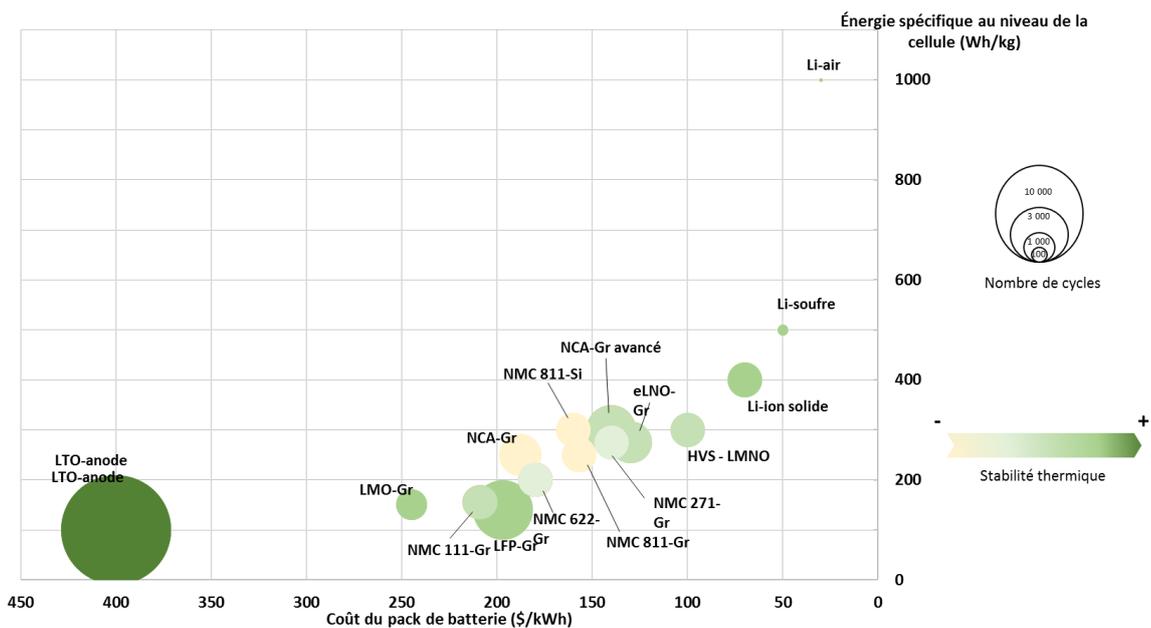
- Des **électrolytes solides** en remplacement des électrolytes liquides. Ces électrolytes solides, plaques de verre ou de céramique, apportent une meilleure sécurité et une grande durée de vie (~1 200 cycles), mais aussi une énergie

spécifique de 800 à 1 000 Wh/kg⁵, avec un temps de recharge réduit à quelques minutes, permettant de rivaliser avec l'autonomie offerte par les véhicules thermiques ;

- Des **anodes** constituées d'une couche ultra fine de **lithium métal** ou des **anodes en silicium pur**. En théorie, une anode pleinement constituée de silicium permettrait de multiplier par 10 l'énergie spécifique, mais son coût de production est aujourd'hui trop élevé. Toutefois, une anode en lithium métal coûte également encore plus cher et crée une dépendance au lithium dont le prix est également volatile ;
- Des **cathodes Lithium-Soufre** ou **Lithium-Air** offrant respectivement une énergie spécifique de 500 Wh/kg et 750 à 1 500 Wh/kg. Les deux technologies font l'objet d'efforts de recherche importants, mais ont encore beaucoup de défis techniques à surmonter : stabilité défaillante et cycle de vie faible pour la Lithium-Soufre, impossibilité de décharge pour la Lithium-Air.

Dans les technologies de batteries solides, il n'y a plus de séparateur au centre de l'électrolyte. Les dates sont indiquées à titre théorique et peuvent évoluer en fonction des efforts de recherche en cours pour atteindre des progrès en électrochimie. La batterie « tout-solide », attendue pour 2030, pourrait être commercialisée bien plus tôt (2025), avec des annonces de plus en plus précises de la part des industriels.

Figure 18 : Synthèse des technologies de batteries existantes et futures



Sources : Mirova

L'industrie automobile assiste depuis dix ans à une rupture technologique qui, après s'être fait connaître timidement, devient de plus en plus rapide et drastique pour les constructeurs et équipementiers automobiles traditionnels qui ne détiennent plus l'avantage technologique.

⁵ Énergie spécifique de 13 138 Wh/kg pour l'essence

HYDROGENE

Dans les véhicules à pile à combustible, l'énergie électrique est stockée sous forme d'hydrogène qui sert de vecteur, ce qui implique plusieurs étapes entre la source d'énergie primaire et la consommation effective du véhicule.

Un véhicule à pile à combustible offre une autonomie équivalente à celle d'un véhicule thermique, de l'ordre de 600 km. Plus globalement, si on ne tient pas compte de l'absence de station de recharge, le service rendu à l'utilisateur est similaire à celui offert par le véhicule thermique, notamment en termes de temps de charge. Ainsi, le premier défi du véhicule à pile à combustible est de proposer un intérêt écologique à un coût équivalent à celui d'un véhicule thermique. Ces deux paramètres - coût et bénéfice environnemental – reposent sur le cycle de vie de l'hydrogène, de sa production à sa transformation en électricité dans le véhicule. Or, aujourd'hui, l'hydrogène dépend en majeure partie des ressources fossiles, ce qui implique un bilan carbone mitigé (cf. [L'hydrogène](#)) et rend les véhicules à pile à combustible très coûteux.

Description de la filière hydrogène

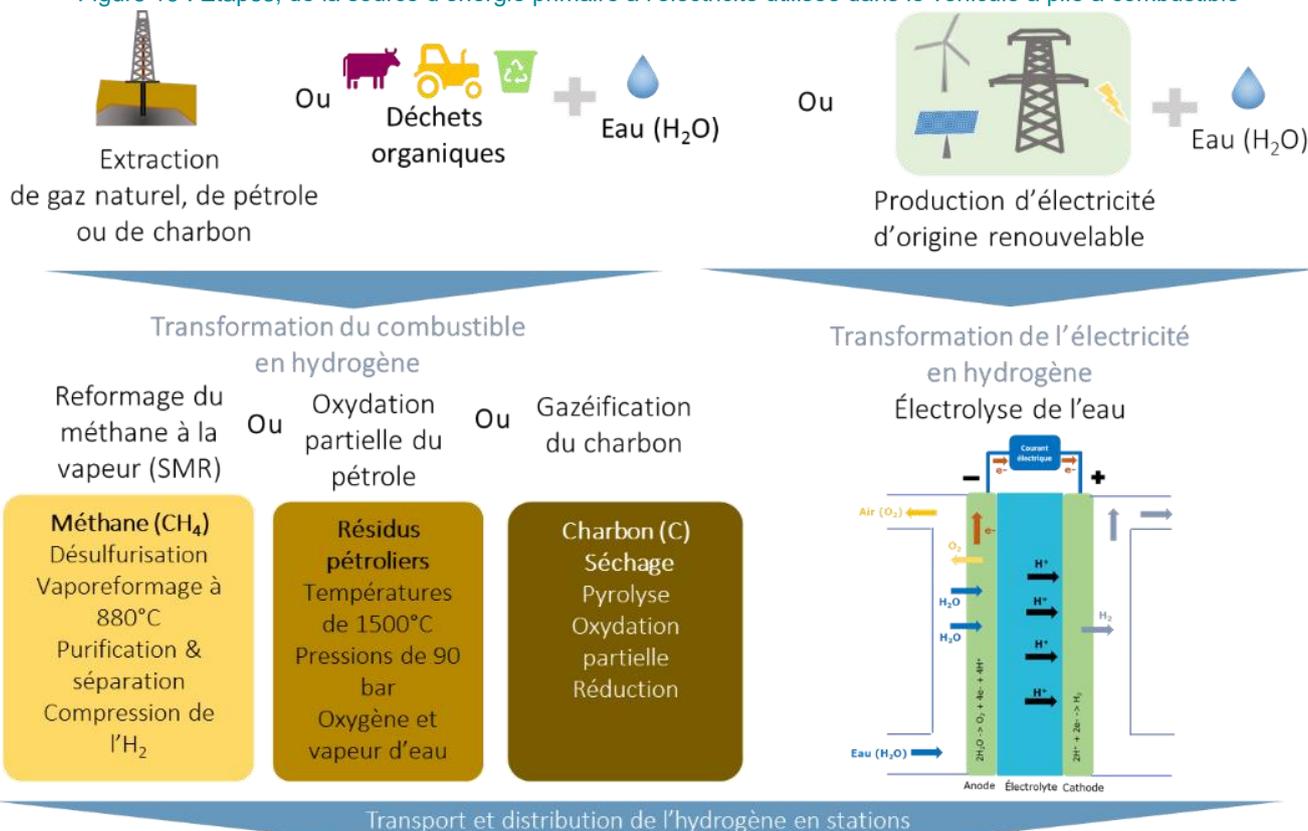
Au-delà des applications dans les transports, le marché de l'hydrogène est déjà conséquent, avec environ 70 millions de tonnes produites par an pour des applications diverses : récupération de pétrole et raffinage (46 %), production d'ammoniac (44 %), production de méthanol (4 %), production et fabrication de métaux (2 %), électronique (1 %), industrie alimentaire (1 %). Pour l'ensemble de ces usages, l'hydrogène est déjà produit et distribué.

PRODUCTION DE L'HYDROGENE

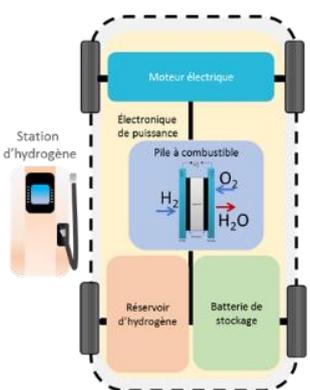
L'hydrogène n'existe pas à l'état naturel sur Terre. Pour stocker l'énergie sous forme d'hydrogène, il faut ainsi produire de l'hydrogène au préalable. Par ordre d'utilisation, quatre procédés de production coexistent :

- Le vaporeformage ou reformage du méthane (SMR) à partir de gaz naturel ou de biogaz, qui consiste à faire réagir le méthane avec de la vapeur d'eau chauffée à haute température ;
- L'oxydation partielle des coupes pétrolières, qui s'applique aux résidus pétroliers lourds ainsi qu'au charbon et met en œuvre des températures très élevées, des pressions fortes, de l'oxygène et de la vapeur d'eau ;
- La gazéification à partir de charbon ou de biomasse, qui repose sur la pyrolyse du charbon qui, à haute température et forte pression, se décompose en monoxyde de carbone, en hydrogène et en résidus ;
- L'électrolyse de l'eau, qui consiste à passer un courant électrique dans un électrolyte aqueux au moyen de deux électrodes pour rompre les liaisons entre les atomes d'hydrogène et d'oxygène qui composent la molécule d'eau.

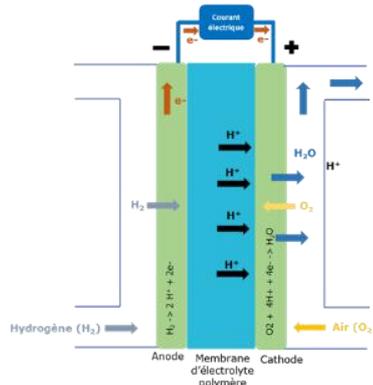
Figure 19 : Étapes, de la source d'énergie primaire à l'électricité utilisée dans le véhicule à pile à combustible



Chargement dans le réservoir à hydrogène du véhicule



Transformation de l'hydrogène en électricité dans la pile à combustible



Source : Mirova

Aujourd'hui, 96 % de l'hydrogène est obtenu à partir de ressources fossiles : 49 % par vaporeformage du méthane, 29 % par oxydation partielle de résidus pétroliers et 18 % par gazéification du charbon. Les 5 % restants proviennent de l'électrolyse de l'eau (OECD/IEA, 2015).

Le reformage du méthane est le processus de production le plus répandu à l'échelle industrielle. Ce processus est maîtrisé et peu coûteux (<2€/kg d'hydrogène contre ~3 € à partir du biogaz), mais ne permet pas d'avoir un hydrogène bas-carbone, (~10 kg de CO₂ par kilo d'H₂ produit), ni de rompre la dépendance aux énergies fossiles. L'oxydation partielle du



Électrification des transports Une solution de transition écologique

pétrole est pratiquée principalement en raison d'un faible coût des coupes pétrolières, et, enfin, la gazéification du charbon, uniquement utilisée en Chine et en Afrique du Sud, est limitée car le bilan carbone est très élevé à partir de la gazéification du charbon, et la compétitivité compliquée à partir de biomasse en l'absence de filière à proximité des unités de gazéification. Toutefois, le Japon a annoncé en 2018 avoir le projet de s'approvisionner en hydrogène liquide issu du lignite d'Australie. Après Fukushima, un pays comme le Japon, qui ne dispose pas d'énergies fossiles dans ses sols, a comme recours soit de développer des énergies renouvelables, soit d'importer son énergie. Ce projet permet au Japon d'avoir une énergie fiable et continue, mais transfère les émissions de CO₂ en Australie. Ce type de projet annule le bénéfice écologique de l'hydrogène, sauf s'il s'accompagne d'installations de captage et de stockage du carbone, ce qui n'aurait pas de sens d'un point de vue économique (>10 €/kg d'hydrogène produit).

Enfin, bien que maîtrisée depuis près d'un siècle et présentant un bilan carbone favorable lorsque l'électricité utilisée est bas-carbone, l'électrolyse de l'eau reste, à ce stade, marginale dans la production d'hydrogène en raison de son coût élevé, de 4 à 10 €/kg, résultant des prix de l'électricité et des électrolyseurs.

Le tableau 1 décrit les avantages et les limites des procédés de production les plus utilisés aujourd'hui.

Tableau 1: Comparaison des deux principaux procédés de production de l'hydrogène

	Vaporeformage	Électrolyse de l'eau à partir d'énergies renouvelables
Prix (€/kg d'H ₂)	1,5-2	4-10
Bilan carbone (kgCO ₂ /kg d'H ₂) du puits au réservoir	13.8	0.5
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Technologie mature - Prix 	<ul style="list-style-type: none"> - Bilan carbone quasi nul - Indépendance vis-à-vis des ressources fossiles
Défis	<ul style="list-style-type: none"> - Dépendance aux ressources gaz, hydrocarbures liquides ou charbon - Intérêt carbone limité en cycle de vie (~20 % de réduction par rapport à des véhicules Diesel) 	<ul style="list-style-type: none"> - Processus énergivore qui n'a d'intérêt carbone que si l'électricité est issue d'énergies renouvelables ou du nucléaire - Rendement plus faible que le reformage du méthane (en considérant l'électricité utilisée pour casser les molécules d'eau) - Production coûteuse en raison du coût de l'électrolyseur et d'un processus énergivore - Nécessité d'avoir de grandes quantités d'énergie tout au long de l'année (problématique de la discontinuité des énergies renouvelables)
Solutions	<ul style="list-style-type: none"> - Développement des filières de biogaz ce qui permet également de capter le méthane - Installation de dispositifs de capture et stockage du carbone (CCS) près des usines de méthanisation et de reformage du méthane pour capter le CO₂, ce qui réduirait l'avantage coût 	<ul style="list-style-type: none"> - Développement d'électrolyse à haute température pour améliorer le rendement et réduire les coûts - Bien que le rendement soit moyen (~50%), si l'énergie est renouvelable, l'impact est faible - En utilisant de l'énergie hydraulique et du nucléaire, le bilan carbone est faible, le prix reste abordable et les problèmes d'intermittence des énergies renouvelables sont jugulés dans les petites unités d'électrolyse décentralisées

Sources : Mirova

A ce stade, l'hydrogène dans sa globalité est dépendant des ressources fossiles et représente un vecteur d'énergie carbonée. Pour justifier son intérêt écologique comme solution de transition écologique pour les transports, la production d'hydrogène doit devenir bas-carbone, tout en restant économiquement compétitive.

TRANSPORT ET DISTRIBUTION DE L'HYDROGENE

Les infrastructures de logistique et de distribution de l'hydrogène peuvent davantage se comparer aux infrastructures de ravitaillement des véhicules thermiques (cf. [Ravitaillement des véhicules à pile à combustible](#)). Il ne semble pas résider de défis majeurs sur cet aspect.

En revanche, le stockage embarqué de l'hydrogène dans les véhicules, une fois approvisionnés, est complexe et coûteux ; les réservoirs d'hydrogène doivent satisfaire à davantage de contraintes pour contenir de l'hydrogène gazeux que les réservoirs d'essence

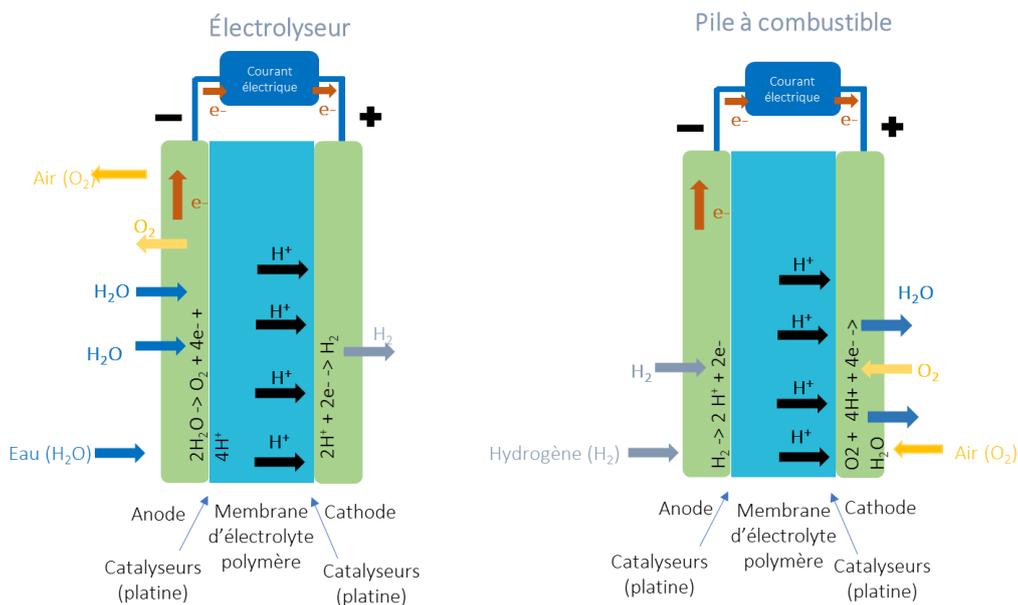
ou de gazole traditionnels. L'hydrogène est le plus souvent stocké dans des réservoirs de type IV, fabriqués à partir de polymères de fibre de carbone renforcée, capables de supporter une pression interne de 700 bar, ce qui permet d'embarquer entre 5 et 6,5 kg de d'hydrogène. Toutefois, une compression à 700 bar nuit au rendement énergétique de l'hydrogène d'environ 15 %. Ainsi la compression à 350 bar est préférée dans les bus où l'espace de stockage est plus important.

TRANSFORMATION DE L'HYDROGENE EN ELECTRICITE

Pour être utilisé comme vecteur d'énergie dans les transports, l'hydrogène est ensuite transformé en électricité par la pile à combustible embarquée à bord des véhicules.

La pile à combustible en électricité réalise l'opération inverse de l'électrolyse, transformant l'hydrogène et l'oxygène en électricité et en eau.

Figure 20 : Schéma des cellules d'un électrolyseur et d'une pile à combustible



Sources : Mirova

La pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC) est la technologie utilisée aujourd'hui dans les applications mobiles. Un système de pile à combustible est composé d'une pile à combustible et de composants auxiliaires nécessaires à accompagner les réactions chimiques qui s'opèrent au sein de la cellule. Ces composants auxiliaires comportent notamment le compresseur d'air alimentant la pile en oxygène, un circuit de refroidissement et des humidificateurs. Dans la cellule, l'anode et la cathode sont séparées par une membrane d'électrolyte polymère, entourée de deux couches catalytiques qui accélèrent les réactions (ces couches sont généralement en platine car ce métal accélère fortement les réactions).

Ces réactions d'oxydation de l'hydrogène (à l'anode), qui produisent des protons H⁺, et de réduction de l'oxygène (à la cathode), s'effectuent à l'interface électrolyte, électrode en présence d'un catalyseur, le plus souvent le platine.

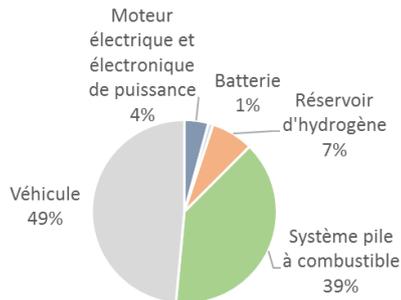
Ainsi, l'usage de l'hydrogène dans la mobilité implique de nombreuses étapes et recourt également à des expertises de chimistes. Ces étapes engendrent aujourd'hui des coûts, de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂, ainsi que des questionnements sur la sécurité qui complexifient son intégration dans les transports.

Coûts économiques et écologiques

La donnée économique liée aux véhicules à pile à combustible repose sur l'intégration des coûts de l'ensemble des composants nécessaires pour utiliser l'hydrogène en tant que vecteur énergétique dans les transports, tels que :

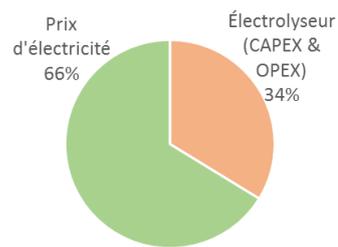
- Les systèmes de pile à combustible et les réservoirs pour la fabrication du véhicule,
- Les électrolyseurs nécessaires à la production d'hydrogène bas-carbone.

Figure 21 : Décomposition des coûts d'un véhicule à pile à combustible type berline



Hypothèses : Capex initial de 2 600 USD/kW, Opex égal à 6 % du Capex, durée de vie de 15 ans à raison de 5 000 heures de fonctionnement annuel, puissance de 500 kW, prix d'électricité médian de 7 €/MWh
Source : Mirova / (OECD / IEA, 2015) / (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2015)

Figure 22 : Décomposition des coûts de production d'un kg d'hydrogène issu de l'électrolyse de l'eau



Pour être acceptée en tant que solution écologique viable, il faut que la production de l'hydrogène devienne bas-carbone et accessible, grâce aux solutions sur les étapes clés en termes de coûts et de bilan écologique : la production de l'hydrogène, le stockage embarqué et la transformation de l'hydrogène en électricité.

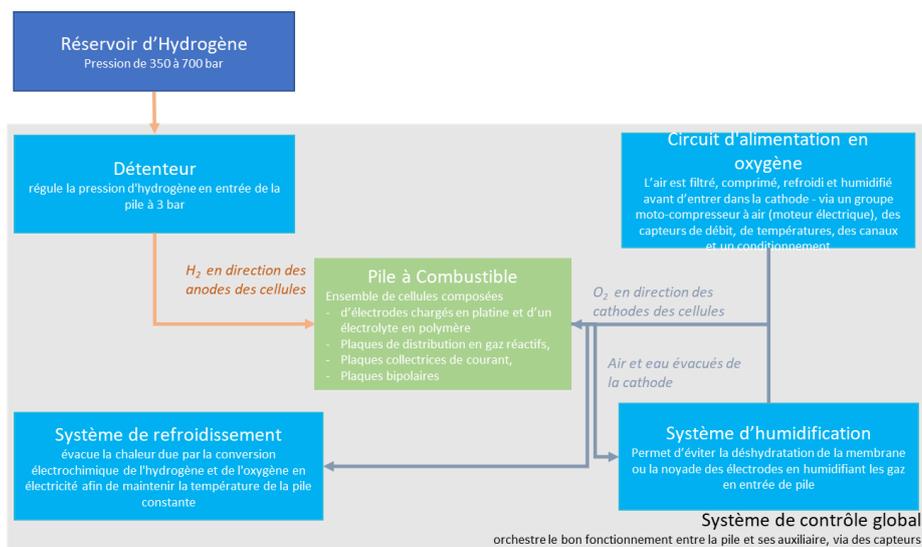
COÛT DE FABRICATION DU VÉHICULE

Le système pile à combustible, représente près de 40 % du coût d'un véhicule de type berline, qui reste actuellement largement plus cher que son homologue thermique. Le stockage embarqué représente à lui seul ~7 % du coût

(a) Les systèmes de pile à combustible

La transformation de l'hydrogène en électricité est réalisée au travers d'un système à pile à combustible couplant la pile à combustible à ses auxiliaires. Les auxiliaires assurent l'approvisionnement des réactifs (hydrogène et air), leur conditionnement (pression, débit) et la gestion des produits issus de la réaction (eau, chaleur, électricité). La compression de l'air est réalisée par un moteur électrique.

Figure 23 : Schéma simplifié d'un système de pile à combustible

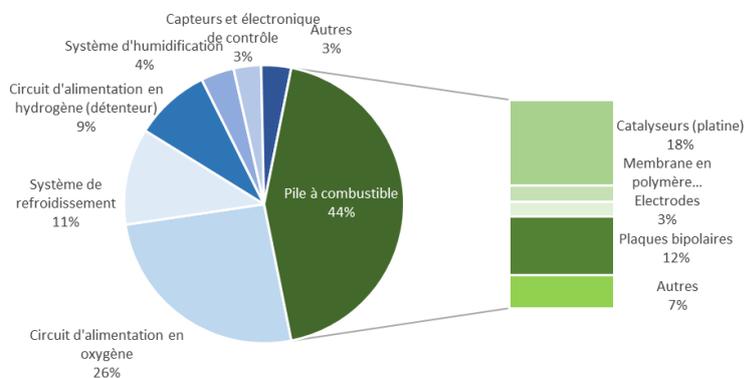


Sources : Mirova/ (Thompson, et al., 2018)

En 2018, les systèmes de pile à combustible installés dans les véhicules proposent une puissance de 80 kW à un coût de 230 USD/kW hors réservoir d'hydrogène. En moins de cinq ans, le coût a été divisé par deux grâce à des investissements massifs, notamment de la part de Toyota.

La parité coût estimée avec le véhicule thermique se situe autour de 30 USD/kW et pourrait être atteinte après 2030 grâce à une production à plus grande échelle et aux progrès électrochimiques.

Figure 24 : Décomposition du coût d'un système de pile à combustible hors réservoir



Sources : Mirova/ (Thompson, et al., 2018)

Les principaux postes de coûts sont liés aux :

- Circuit de diffusion de l'oxygène, et plus particulièrement au moto-compresseur d'oxygène (moteur électrique, synchrone à aimants permanents),
- Catalyseurs, en général en platine qui offre les meilleures performances, mais dont le coût est élevé et volatile,
- Plaques bipolaires, en aluminium ou matériaux composites, qui assurent le maintien mécanique de l'ensemble et servent aussi à l'alimentation en gaz ainsi qu'au refroidissement de la cellule.

A l'instar des électrolyseurs, les systèmes de pile à combustible mobiles sont encore au stade expérimental et produits en très petites quantités, ce qui explique leurs coûts élevés. Des évolutions de technologie sont donc à prévoir dans les années à venir pour réduire les pertes d'énergie et les coûts. Le Département de l'Énergie américain estime que l'augmentation de

Électrification des transports Une solution de transition écologique

la production à 500 000 unités pourrait d'ores et déjà faire baisser le coût du système à 50 USD/kW, et vise 40 USD/kW à 2025 puis 30 USD/kWh à terme (US Department of Energy, 2018), ce qui est considéré comme la parité coût.

A noter également que des travaux expérimentaux sont aussi en cours sur les piles à combustibles SOFC, à électrolyte oxyde solide, qui fonctionnent à haute température, de 650 à 1000°C, mais se dispensent de catalyseurs.

Tableau 2 : Caractéristiques des piles à combustible mobiles

Piles à combustible	PC alcaline	Membrane échangeuse de protons (PEM)	Pile à combustible à oxyde solide
Maturité	Commercialisée	Premier marchés	Développement
Température de fonctionnement	80-90°C	<120°C	~500-1 000°C
Rendement de la pile (et du système)	60-70 % (62%)	50-70 % (45 %)	60-65 % (55 %)
Puissance	10-100 kW	0.1 à 500 kW	1kW – 2MW
Durabilité	5 000-8 000 heures	<8 000 heures (Ballard)	Jusqu'à 90 000 heures
Avantages	+Coût réduit des composants +Température basse: démarre rapidement	+ Densité énergie importante + Température basse ~80°C : démarre rapidement + Électrolyte solide permet une plus grande durabilité	+Haut rendement +Plusieurs carburants +Electrolyte solide
Inconvénients	-Sensibilité au CO2 -Électrolyte	- Coût des catalyseurs (platine) - Sensibilité à la pureté de l'hydrogène	-Haute température de fonctionnement - Temps de mise en route - Nombre de redémarrage limité
Applications	Portable, Transport, Militaire, Aérospatiale	Portable, Transport (90%), stationnaire, véhicules utilitaire	Stockage stationnaire
Maturité	Commercialisée	Premier marchés	Développement
Coût (2015)	~200-700 USD/kW	~300 USD/kW	3 000-6 000 USD /kW
Entreprises exposées	AFC Energy GenCell	Toyota, Hyundai, Honda Toshiba	Bloom Energy Aisin

Sources : Mirova / (OECD/IEA, 2015)/ (U.S. Department of Energy, 2016)

(b) Réservoirs d'hydrogène

Les caractéristiques de l'hydrogène – faible densité volumique (0,089 kg/m³), légèreté, dispersion facile – rendent le stockage embarqué délicat.

Pour stocker 1 kg d'hydrogène dans des conditions normales de températures et de pression, il faudrait environ 11 m³, sachant qu'une voiture de type berline familiale ne représente que ~0,4 m³. Ces ordres de grandeurs expliquent qu'il faille compresser l'hydrogène et trouver des solutions de conditionnement à la fois dimensionnées, pour être contenues dans des véhicules, et sécurisées.

La forme de stockage la plus répandue aujourd'hui est le stockage gazeux sous pression. Pour des applications embarquées dans des véhicules, les compressions sont de l'ordre de 700 bars (densité de 42 kg/m³) pour les voitures et 350 bars pour les bus. Cette compression mobilise une certaine quantité d'énergie, ce qui nuit au rendement énergétique de l'hydrogène, mais elle n'en reste pas moins indispensable pour les applications dans les transports. Avec 6 kg d'hydrogène compressé à 700 bars, l'autonomie est de 600 kilomètres, comparable à celle d'un véhicule thermique. Le temps de recharge est également comparable de l'ordre de 1,5 et 2 kg H₂/ min.

Toutefois, ce stockage nécessite un réservoir à la fois léger et résistant, rendu possible grâce aux caractéristiques des matériaux composites renforcés en fibre de carbone. Ces réservoirs existent et répondent aux exigences en matière d'étanchéité et de résistance à la pression et aux chocs, mais restent très coûteux à développer.

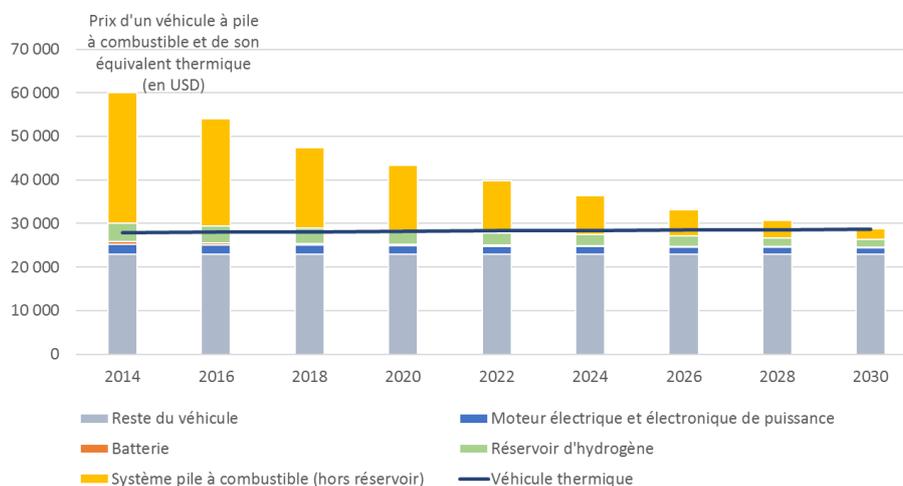
Le coût actuel d'un réservoir de 6 kg est d'environ 3 000USD pour (US DOE, 2018) (Azzaro-Pantel, 2018). Ce coût est en grande partie porté par les matériaux composites. L'objectif du Département américain de l'Énergie est de réduire le coût à 333 USD/kg en 2020 et de diviser

le prix actuel par deux à terme, en tablant sur les effets d'échelle et la baisse des coûts des matériaux composites (Mirova, 2013).

Le stockage sous forme solide est aussi à l'étude, via des métaux (alliages à base de magnésium) agissant comme des éponges absorbant l'hydrogène à une certaine température et le restituant à un autre seuil de température. Ce procédé permettrait d'atteindre d'importants volumes de stockage (densité de 106 kg/m³) en éliminant la contrainte de la pression (perte énergétique et coûts), mais reste limité par une densité massique rédhibitoire pour les applications mobiles.

La filière du véhicule à pile à combustible souffre donc du nombre d'étapes coûteuses et énergivores entre la source primaire d'énergie et l'utilisation en électricité dans le véhicule. Des technologies existent ou sont à l'étude, pour améliorer les performances et réduire les coûts. A horizon 2030, les progrès technologiques devraient permettre d'atteindre la parité-coût avec le véhicule thermique, dans le cas des véhicules particuliers.

Figure 25 : Prix actuel et estimé d'un véhicule à pile à combustible de type berline familiale



Sources : Mirova/ (IEA, 2015) (Thompson, et al., 2018) (US DOE, 2018)

Seulement les progrès semblent un peu moins avancés que dans la filière des véhicules électriques pure ; les principaux postes de coûts – électrolyseur/pile à combustible et réservoir embarqué – sont produits à faible échelle et restent expérimentaux. Ce constat suggère qu'il n'y a pas de barrière technique pour obtenir/produire des véhicules à pile à combustible abordables, mais que ce type de véhicules nécessite encore des investissements importants et s'intégrera dans le secteur des transports sur une échelle de temps plus longue. Toutefois, au regard des performances en matière d'autonomie et de vitesse de chargement, les véhicules à pile à combustible restent une solution assez logique pour les véhicules lourds – qui ne peuvent pas se charger davantage avec des batteries lourdes - destinés à parcourir des distances longues.

PRODUCTION DE L'HYDROGENE BAS-CARBONE

Trois grandes solutions de production bas-carbone dominant dans les projections :

- L'électrolyse de l'eau à partir d'électricité renouvelable,
- Le reformage du méthane à partir du biogaz ou la gazéification à partir de la biomasse,
- Le développement du captage et stockage du carbone.

En théorie, ces trois solutions sont envisageables, mais coûteuses. Pour être développées, le coût doit approcher celui de l'hydrogène produit par reformage du méthane, soit ~400 USD/kWh (OECD/IEA, 2015).

(c) Électrolyse de l'eau

Le coût de l'électrolyse de l'eau est fortement dépendant des coûts de l'électricité (il faut aujourd'hui ~50-60 kWh pour produire 1 kg H₂) et du type d'électrolyseurs utilisés. Ainsi, la fabrication de l'électrolyseur résulte d'un arbitrage entre rendement énergétique et coût du capital. La [figure 22](#) montre que le coût d'investissement et de maintenance de l'électrolyseur représente plus d'un tiers du coût de production d'un 1 kilogramme d'hydrogène. Toutefois, cette proportion peut augmenter dans des grandes proportions selon les hypothèses retenues sur la durée de vie de l'électrolyseur et le rendement énergétique obtenu.

Effectuant l'opération inverse l'une de l'autre, les électrolyseurs et les piles à combustible sont similaires sur le principe, la composition et les expertises. Deux technologies d'électrolyseurs et de piles à combustible existent en fonction du taux de PH de l'électrolyte :

- Les électrolyseurs ou piles à combustibles alcalin(e)s (basiques) qui utilisent des électrolytes d'hydroxyde de sodium (NaOH) ou d'hydroxyde de potassium (KOH) ;
- Les électrolyseurs, acides, à membrane à électrolyte polymère (PEM).

A ce jour, les électrolyseurs alcalins sont les plus utilisés. Toutefois, la filière PEM est retenue par la quasi-totalité des acteurs de programmes automobiles dans le monde en raison de leur compacité, leur simplicité de fabrication et de fonctionnement, leur corrosion faible et leurs performances (rendement théorique supérieur, meilleure adaptation aux énergies renouvelables intermittentes en raison d'une bonne capacité à supporter des variations de puissance électrique). Néanmoins, le coût d'un électrolyseur PEM est de l'ordre de 2 600 USD/kW contre 1 150 USD/kW pour un électrolyseur alcalin, notamment en raison du coût de la membrane polymère, de l'utilisation d'électro-catalyseurs à base de métaux et d'une durée de vie plus courte de l'ordre de 40 000 heures contre 75 000 heures pour les électrolyseurs alcalins (OECD/IEA, 2015).

Aujourd'hui, la production d'électrolyseur est limitée à des volumes très faibles. L'essentiel de l'assemblage se fait encore manuellement. Les faibles volumes de production offrent également un faible pouvoir de négociation aux fabricants vis-à-vis de leurs fournisseurs et notamment pour les matières premières. La fabrication de systèmes qui sont très spécialisés et complexes, nécessite leur simplification et une industrialisation de la production pour abaisser leurs coûts. Ainsi, deux facteurs vont se coupler pour réduire les prix :

- L'économie d'échelle lorsque les capacités de production vont augmenter ;
- Les synergies technologiques avec la pile à combustible PEM qui bénéficie d'importants investissements pour réduire les coûts et améliorer la technologie.

Selon l'Agence internationale de l'Energie, les électrolyseurs PEM devraient permettre d'atteindre un rendement de 82 %, une durée de vie de 75 000 heures à un coût de 800 USD/kW à horizon 2030. Le coût du kW installé serait de 640 USD/kW d'ici 2050 (OECD/IEA, 2015).

Par ailleurs, parallèlement aux évolutions rencontrées dans les batteries de stockage, des investissements sont aussi réalisés pour rendre l'électrolyte solide, que ce soit dans les piles à combustible ou dans les électrolyseurs. Des électrolyseurs à électrolyte solide (SO) permettraient d'augmenter le rendement à 90 % contre 75 % pour les électrolyseurs à électrolyte polymère (PEM).

(d) Reformage du méthane à partir du biogaz ou la gazéification à partir de la biomasse

La biomasse peut permettre de réduire le bilan carbone des processus de reformage de méthane et de gazéification.

Le reformage du méthane peut en effet se baser sur le biométhane issu du biogaz produit par des déchets organiques, comme les déchets agricoles, agroindustriels municipaux ou littoraux (algues vertes).

La gazéification, consistant à décomposer par la chaleur un solide combustible carboné pour obtenir un mélange gazeux, peut également être réalisée à partir de charbon ou de biomasse.

La production d'hydrogène à partir de la biomasse n'est pratiquement pas exploitée : la technologie chimique ou biochimique à mettre en œuvre est relativement complexe et exige des investissements conséquents, de l'ordre de 1 250 USD/KW (OECD/IEA, 2015), et une exploitation coûteuse, alors que la production d'hydrogène à partir du reformage de méthane issu du gaz naturel est mature et peu coûteuse.

(e) Développement du captage et stockage du carbone

Le captage et stockage du carbone est également une solution pour récupérer les émissions de CO₂ issues des usines de reformage du méthane. Ce procédé consiste à piéger les molécules de CO₂ afin d'éviter leur libération. Le CO₂ est ensuite transporté, soit par pipeline, soit par bateau, soit encore par camion, pour être enfin stocké dans des formations géologiques du sous-sol permettant sa séquestration sur le long terme. Cette solution est coûteuse, augmentant le coût d'investissement initial d'une usine de reformage de méthane de 550 à 1 370 USD/KW, et ne peut économiquement avoir de sens que dans le cas d'usines de taille importante.

(f) Autres solutions

D'autres ressources et modes de production sont également à l'étude, comme produire de l'hydrogène à partir d'algues dans des bioréacteurs. Les algues dissocient l'eau en hydrogène et oxygène au cours de la photosynthèse, en utilisant uniquement le rayonnement solaire et l'eau. Toutefois, à ce stade les rendements sont trop faibles pour justifier les investissements nécessaires pour le développement des bioréacteurs.

Outre les progrès à venir dans les filières de biogaz/biomasse et le développement du captage et stockage du carbone, produire de l'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau en utilisant des énergies renouvelables présente un atout majeur pour positionner l'hydrogène comme stockeur d'énergie et catalyseur dans le développement des énergies renouvelables intermittentes. Au-delà de son utilisation dans la mobilité, l'hydrogène peut aussi devenir un outil pour stocker l'énergie et répondre aux défis des énergies renouvelables intermittentes, comme le solaire et l'éolien, d'autant plus que la production d'hydrogène peut être centralisée ou décentralisée. Décentralisée, elle s'implante à proximité d'un site de production d'énergie renouvelable ou près d'un site de consommation. La flexibilité des catalyseurs permet d'ajuster la consommation électrique pour lisser la production d'énergies renouvelables ou la demande d'un site. Ce lien entre hydrogène et énergies renouvelables est déterminant pour les progrès à venir dans la filière.

Sécurité

L'hydrogène est un gaz hautement inflammable, et sa conservation sous haute pression représente des risques importants. Mais la faible densité et la grande volatilité du carburant rendent en pratique sa manipulation sécurisée assez aisée, d'autant plus que sa température d'auto-inflammation est relativement élevée par rapport aux autres carburants utilisés.

Par ailleurs, l'hydrogène, comme les résidus de sa combustion, n'est pas toxique, une fuite ne pose donc pas de problème sanitaire ou environnemental.

Enfin, la certification des technologies de stockage pressurisé et des piles à combustible garantit la fiabilité de l'hydrogène, qui n'est pas plus dangereux que d'autres carburants.

C. Le moteur électrique

Le moteur électrique convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il est accompagné dans le groupe motopropulseur d'un réducteur, qui assure la transmission, et d'électronique de puissance (onduleur et convertisseur), qui transforme le courant électrique entre la batterie et le moteur.

Les moteurs électriques sont moins complexes et moins coûteux que les moteurs à combustion interne. Dans tous les moteurs électriques, le couple est produit par l'interaction électromagnétique entre une partie statique, le stator, et une partie mobile, le rotor. Il existe trois grands types de moteurs électriques à courant alternatif sur le marché automobile aujourd'hui :

- Le moteur synchrone à aimants permanents qui offre des gains d'entretien, de performance et de poids, en ayant recours à des aimants pour générer le champ magnétique. L'inconvénient est que ces aimants contiennent des terres rares telles que le néodyme, le praséodyme et le samarium (cf. [Enjeux de ressources](#)). Ces moteurs sont les plus communs sur le marché aujourd'hui. Chevrolet Volt, Nissan Leaf, BMW i3 ou encore VW e-Golf en sont équipés ;
- Le moteur synchrone à rotor bobiné, considéré comme plus volumineux et souvent plus instable, ce qui requiert davantage de maintenance. Il est présent dans les Renault Zoé, Fluence et Kangoo et la Smart electric drive Mehari ;
- Le moteur asynchrone (ou à induction), adapté de l'industrie lourde où il est très répandu. Considéré comme robuste, compact et fiable, il souffre cependant d'un rendement limité. Il est bien adapté aux véhicules hybrides, en raison de son coût et de sa fiabilité, et également utilisé dans la Renault Twizy, ainsi que dans les Tesla Model S et X.

Le processus de production ne comporte pas de problématiques particulières, en termes de coût ou de durée. Le défi est surtout d'atteindre une technologie ayant un rendement efficace et nécessitant une maintenance limitée, sans dépendance aux terres rares.

Dans l'ensemble, la production des moteurs est internalisée par le secteur automobile, équipementiers et constructeurs, ou peut être proposée par des industriels présents sur la motorisation électrique pour différentes applications.

D. L'électronique de puissance

L'électronique de puissance repose sur les technologies de semi-conducteurs. Nécessaires pour assurer une gestion optimisée de l'énergie électrique embarquée, ils sont de plus en plus présents dans le marché automobile. Les semi-conducteurs dédiés aux véhicules électriques sont dispersés dans l'ensemble du véhicule et assurent :

- L'alimentation de la batterie avec les redresseurs AC-DC qui convertissent le courant alternatif du réseau en courant continu, lui-même compatible avec la batterie ;
- La gestion du moteur électrique avec les onduleurs DC/AC qui réduisent les pertes de commutation et maximisent le rendement ;
- La récupération de l'énergie libérée par le freinage avec l'onduleur principal ;
- La diffusion de l'énergie de la batterie de stockage vers la batterie basse tension de 12V utilisée pour l'alimentation des phares et des calculateurs, via des convertisseurs DC/DC ;
- Et enfin, le système électronique BMS qui contrôle la charge et la décharge de la batterie.

Les semi-conducteurs présents dans les véhicules électriques doivent supporter des tensions élevées. Ils sont généralement basés sur des diodes en silicium et des transistors bipolaires à grille isolée IGBT. L'innovation dans les semi-conducteurs à destination des véhicules électriques a pour but d'améliorer le rendement électrique, synonyme d'un accroissement de l'autonomie, et d'accélérer la vitesse de recharge. Deux technologies à large bande⁶ sont à l'étude, les technologies de semi-conducteurs utilisant du nitrure de gallium (GaN) et celles utilisant du carbure de silicium (SiC), en remplacement du silicium standard. Le carbure de silicium (SiC) est une technologie à large structure de bande, qui permet de réaliser des composants de taille plus réduite, capables de fonctionner nettement au-dessus de la plage de tension de 400 V. Les composants SiC réagissent plus rapidement que les circuits intégrés en silicium, ce qui permet de minimiser les pertes d'énergie et de réduire les dimensions des composants associés. La seconde technologie de semi-conducteurs contribuant à la performance des véhicules est celle en nitrure de gallium (GaN), performante, robuste et résistante aux fortes chaleurs.

E. Infrastructure

Pour qu'une technologie automobile soit fiable, il faut que le véhicule puisse être rechargé facilement et rapidement par l'utilisateur. Le changement de propulsion des véhicules engendre un changement de vecteur énergétique et d'infrastructure de recharge. Le développement du véhicule électrique nécessite ainsi le déploiement d'un maillage électrique et connecté efficace.

RAVITAILLEMENT DES VEHICULES ELECTRIQUES A BATTERIE

Dans le cas des véhicules électriques à batterie, le segment des infrastructures de charge est confronté à deux défis majeurs :

- Réduire le temps de charge à celui nécessaire pour faire le plein d'essence, de l'ordre de ~2 minutes ;
- Former un réseau de points de charge répondant aux besoins des utilisateurs en implantant des points de charge "lent", "accélééré", "rapide" et "ultra"rapide" en fonction de la situation géographique et de la demande attendue.

Temps de charge

La durée d'une charge dépend à la fois des caractéristiques de la batterie embarquée dans le véhicule (taille et charge supportée par l'anode) et de la puissance délivrée par la borne de recharge.

Aujourd'hui, pour recharger un véhicule électrique à batterie de type compacte (50 kWh), il faut une quinzaine d'heures avec une charge standard (3 kW) ou environ une heure avec une charge rapide (43 kW). Le rythme de la charge n'est pas linéaire, ce qui signifie qu'en un peu plus de 30 minutes, cette batterie sera rechargée à 80 %. Cette durée de chargement, encore longue, amène deux constats :

- La durée n'est pas vouée à se réduire car les capacités embarquées en kWh sont de plus en plus élevées dans les véhicules pour répondre à la demande du consommateur sur l'autonomie, il faut donc encore innover au niveau des bornes de

⁶ Un semi-conducteur à large bande est un semi-conducteur dont la largeur de la bande interdite, entre la bande de valence et la bande de conduction, est significativement plus importante que celle du silicium, ce qui permet de dépasser les limites fonctionnelles du silicium et d'apporter une plus grande puissance.

recharge pour réduire le temps de charge (tout en s'assurant que les batteries puissent recevoir des puissances aussi élevées) ;

- Il n'y a pas un mode de charge unique, mais plusieurs modes de charge à conjuguer par le consommateur selon ses usages (recharge standard lente de nuit le plus fréquemment, recharge ultra-rapide occasionnellement sur des longs trajets) et selon la charge supportée par son véhicule électrique.

Maillage d'un réseau de charges

A la différence des stations d'essence pour les véhicules thermiques, il n'y a pas de standardisation sur les points de charge. Plusieurs points de charge, plus ou moins rapides, plus ou moins chers, coexistent et doivent trouver leur place sur le territoire pour répondre à la demande des usagers.

TYPES DE CHARGE

Différents types de chargement sont envisagés :

- Le chargement par câble, qui est la seule option disponible à ce stade pour les véhicules particuliers,
- Le chargement par induction grâce à un champ électromagnétique généré sous le véhicule est une autre option de chargement associée à une meilleure praticité, mais d'une plus faible efficacité. Au stade des premières expérimentations, la commercialisation de cette technologie en dehors des flottes partagées ou autonomes devrait attendre au moins une dizaine d'années, pour des raisons de standardisation et de sécurité notamment. De plus, le chargement dynamique dans lequel la route elle-même permet la recharge est une solution de plus long terme.
- L'échange de batterie qui, après avoir été considéré comme une option intéressante pour réduire le temps de recharge, semble dépassé par l'absence de standardisation et l'évolution rapide des technologies de batteries.

Dans le cas des bus électriques, les solutions diffèrent selon qu'il s'agisse d'une recharge au terminus ou d'une recharge en cours de parcours. Un bus équipé pour avoir une grande autonomie peut se recharger la nuit avec une borne située au terminus. Pour un bus à plus faible autonomie, les systèmes de recharge peuvent être :

- Un bras télescopique, fixé sur le toit du bus, qui se connecte à un accumulateur d'énergie présent dans l'abribus ;
- Un pantographe, fixé directement sur l'abribus et qui se déploie sur le bus quand celui-ci arrive en station ;
- Un système de recharge à induction, enfoui sous terre au niveau de l'arrêt de bus.

De nombreuses innovations sont en cours pour proposer des solutions aux exigences de cet usage urbain du bus. Toutefois, pour répondre à la problématique des véhicules particuliers, le chargement par câble semble l'option privilégiée. Parmi les charges par câble, on distingue :

- Les infrastructures privées correspondant aux chargeurs à domicile, sur les lieux de travail pour les employés ou les flottes d'entreprises, ou encore possédés par les restaurants, centres commerciaux, hôtels, commerces et industries tertiaires ;
- Les infrastructures publiques, accessibles aux usagers de la route (autoroutes, aéroports, voiries, parkings, gares).

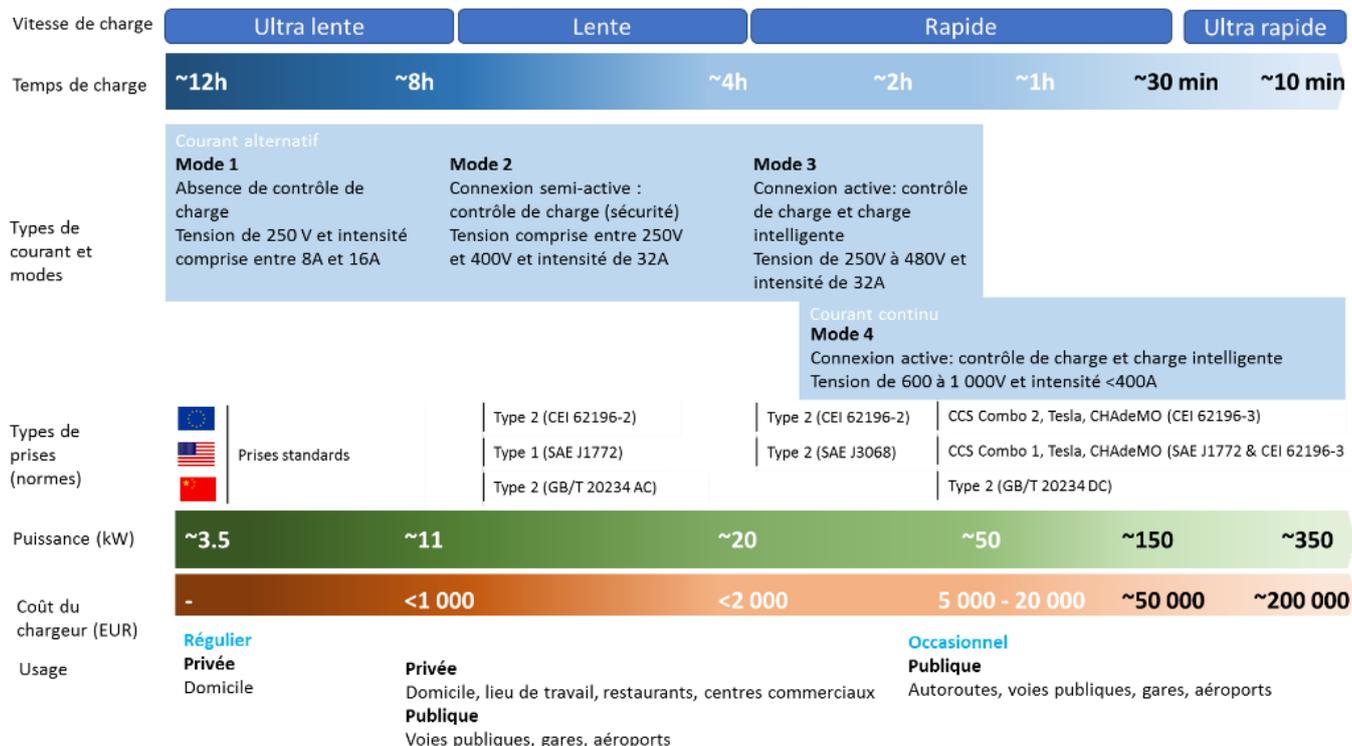
Plusieurs technologies coexistent, opérant soit en courant alternatif plutôt pour les charges lentes, ou en courant continu pour les charges rapides à ultra-rapide. Ces différentes charges se déclinent en :

- 4 modes définissant la vitesse de chargement, la puissance, la tension et le degré de connexion ;

Électrification des transports Une solution de transition écologique

- Plusieurs types de connecteurs (prises) adaptés au type de courant (alternatif ou continu), aux vitesses de chargement et aux zones géographiques où elles sont utilisées. Ces connecteurs doivent être conformes à des normes locales pour être mis sur le marché.

Figure 26: Solutions de chargement



Sources : Mirova / (Spöttle, 2018) (IEA, 2018)

Une charge privée peut être une simple prise dans un garage. Toutefois, bien souvent le dispositif de charge est constitué également d'un chargeur fourni par le constructeur au moment de l'achat du véhicule. Ce chargeur peut également être complété par un équipement électrique pour sécuriser et accélérer la charge. Pour atteindre une puissance de 22 kW, (~2h30 de temps de recharge pour une batterie embarquée de 60 kWh), des raccordements et investissements supplémentaires sont nécessaires. Dans les entreprises, la rapidité de charge disponible dépend de l'utilisateur final visé : salarié ou client.

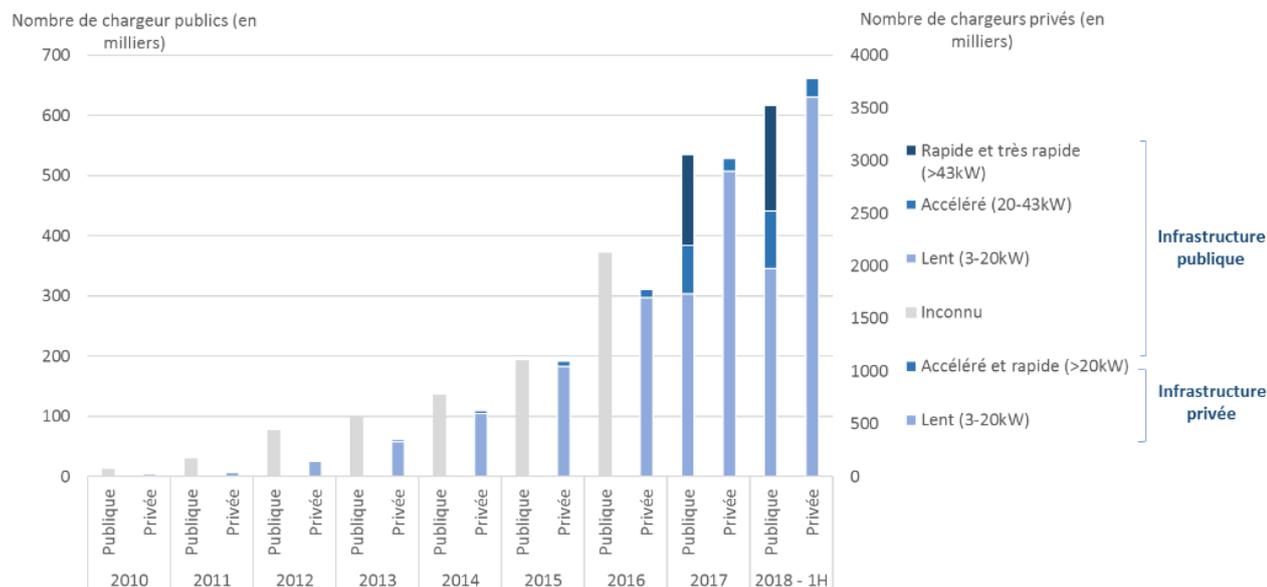
Enfin, concernant l'infrastructure publique, il est également nécessaire de réfléchir à l'usage visé afin de réserver les points de charge rapides et ultra-rapides, plus coûteux, aux endroits où la demande sera forte (autoroutes). Quelques chargeurs ultra-rapides sont déjà installés toutefois, la plupart des véhicules électriques n'ont pas encore la capacité technique de supporter une telle charge. Ainsi, aujourd'hui, ces chargeurs calibrent la vitesse de charge pour trouver le meilleur compromis entre vitesse de charge et plafond de charge supporté pour chaque véhicule électrique.

DEPLOIEMENT ACTUEL DES BORNES DE CHARGES

Une prise électrique dans un garage suffit à constituer un point de charge. Toutefois, lorsque le nombre de charges privées est comptabilisé, seules les prises équipées d'un dispositif particulier pour véhicule électrique sont prises en considération. Au niveau mondial, à l'exception de la Chine et du Japon, il y a approximativement une infrastructure de charge privée, à domicile ou sur le lieu de travail, par véhicule électrique. En Chine et au Japon, cette proportion est réduite à 0.8 chargeur par véhicule (IEA, 2018). Cette relativement forte proportion de chargeur par véhicule s'explique par le fait que la décision d'achat d'un véhicule électrique a jusqu'ici été fortement conditionnée par la possibilité de recharger son véhicule facilement au quotidien. Rappelons cependant que ces données ne sont que des estimations,

compte-tenu du manque de disponibilité d'informations sur le nombre de points de charge privés (absence de collecte de données, marché encore restreint).

Figure 27 : Nombre de points de charges installés au niveau mondial



Sources : Mirova/ (IEA, 2018)/ (BNEF, 2018)

En 2018, plus de 600 000 points de charge publics sont accessibles au niveau mondial (en plus de ~3,5 millions de chargeurs privés), 50 % en charge lente (3-20kW), 15 % en charge accélérée (20-43kW) et 30 % en charge rapide (>43kW). La Chine détient plus de la moitié de ces points de recharge.

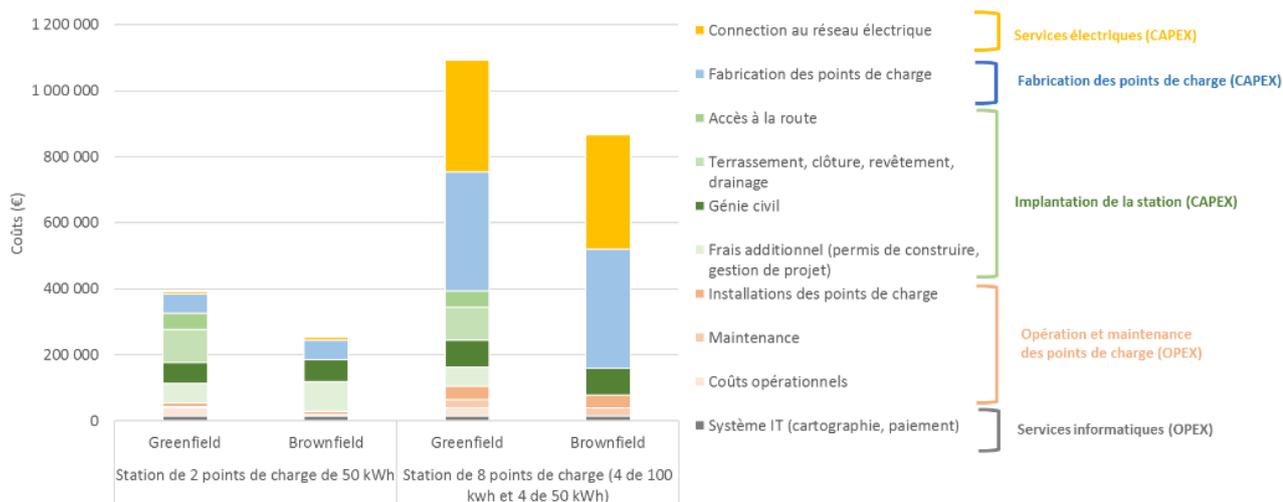
Il existe aujourd'hui ~1 point de recharge public pour 5 véhicules dans le monde, et cette répartition varie selon les pays, entre 3,5 (Pays-Bas) et 15 (Norvège) véhicules par point de recharge. L'Agence Internationale de l'Energie estime qu'un ratio de 8 véhicules par point de charge permettrait de soutenir le développement du véhicule électrique. La disponibilité de l'infrastructure de recharge concourt à l'acceptation des véhicules électriques par les utilisateurs au même titre que d'autres éléments, comme le nombre de modèles disponibles, les incitations fiscales ou encore la densité urbaine.

En s'appuyant sur les projections de Bloomberg New Energy Finance (cf. [Applications et Croissance de marché](#)), les véhicules électriques devraient représenter un tiers des véhicules en circulation en 2040, soit ~500 millions de véhicules électriques, ce qui correspondrait à plus de 60 millions de points publics de charge. Ainsi pour soutenir le développement des véhicules électriques, les infrastructures de charge doivent croître de près de 25 % chaque année.

FINANCEMENT

La plupart des opérateurs/propriétaires d'infrastructures de charge publiques concèdent des investissements non rentables à ce stade dans l'espoir de constituer un positionnement stratégique, et monétisable ultérieurement. Les autres segments : fourniture d'équipement, génie civil et électrique, ou maintenance, peuvent être rentables dans certains cas. La faible rentabilité des infrastructures s'explique principalement par les faibles taux d'utilisation et le bon calibrage du prix de l'électricité offert à l'utilisateur en intégrant les coûts de financement. En Europe, ces infrastructures sont financées pour moitié par des financements publics. Les coûts les plus importants sont liés au raccordement au réseau, aux travaux de renforcement du réseau électrique, au génie civil, ainsi qu'à la fabrication des points de charge.

Figure 28 : coûts de stations de recharge dans l'Union Européenne



Sources : Mirova/ (Commission européenne, 2018)

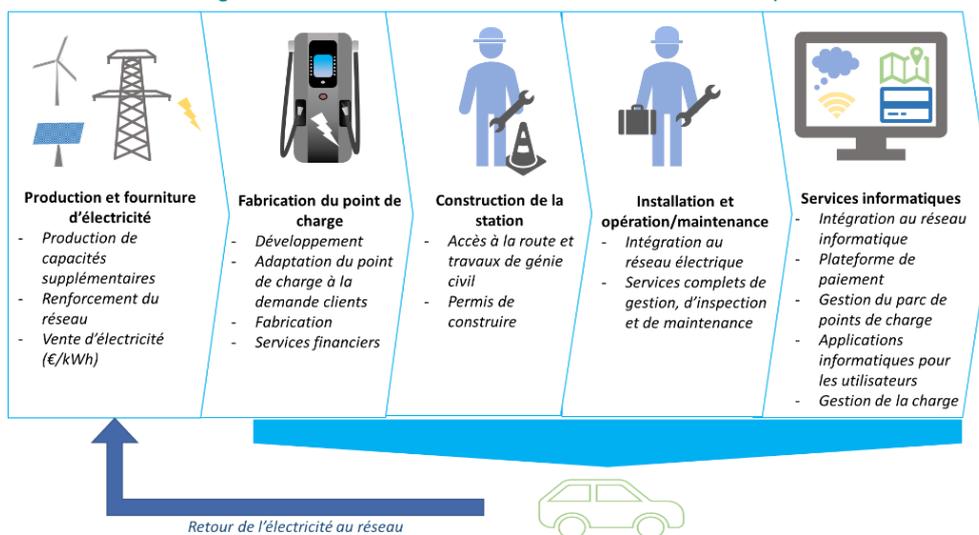
Les coûts des stations de charge varient selon qu'il s'agisse d'un projet se localisant sur une station existante (brownfield) ou sur un nouveau site (greenfield), et selon les capacités de charge disponibles. Ces coûts ne comprennent pas la production de capacités électriques supplémentaires, nécessaire au déploiement du véhicule électrique.

La chaîne de valeur de l'infrastructure mêlant industrie (fournisseurs d'électricité, fabricants de bornes, opérateurs, BTP et systèmes informatiques) et investisseurs, ainsi que la nécessité d'obtenir des financements publics dans un premier temps, s'adapte assez bien aux modèles des partenariats public-privé. La plupart des réseaux opérants aujourd'hui ont démarré grâce à des financements publics. D'abord gratuits, ces services sont devenus payants avec le développement du véhicule électrique. Cette démarche permet d'intégrer des zones qui auraient été délaissées par les investisseurs privés. Le défi pour les collectivités est de justifier ces investissements par des critères non économiques. La réduction des coûts d'investissement permet d'atteindre une rentabilité plus rapidement.

CHAÎNE DE VALEUR DE L'INFRASTRUCTURE ELECTRIQUE

Pour assurer un rythme de croissance soutenable avec le développement des véhicules électriques, quatre grands segments sont mis à contribution : la production et la fourniture d'électricité (lignes et transformateurs), la fabrication de points de charges, la construction/opération et maintenance des points de charge et, enfin, le support logiciel facilitant l'usage et le paiement par l'utilisateur.

Figure 29 : Chaîne de valeur de l'infrastructure électrique



Sources : Mirova

(a) Production et fourniture d'électricité

Les fournisseurs d'électricité doivent adapter les capacités d'électricité produite à la croissance de la demande liée aux véhicules électriques. Cette dernière peut s'évaluer :

- Au niveau d'un ménage, en considérant une distance moyenne de 15 000 km/an et une consommation moyenne de 0,2 kWh/km, la consommation d'électricité est approximativement doublée avec une consommation annuelle de 3000 kWh ; la consommation annuelle d'électricité par ménage en 2014 est en moyenne de 3 000 kWh (OECD/IEA, 2017) ;
- Plus globalement, en considérant les véhicules particuliers, les bus et les deux roues électriques, la demande en électricité était évaluée à 54 TWh en 2017 (IEA, 2018) ; provenant de la Chine à 90 %. Selon Bloomberg New Energy Finance, cette demande en électricité atteindra 2 000 TWh en 2040, ce qui correspondra seulement à 5 %-10 % de la demande en électricité globale en 2040 (OECD/IEA, 2017). Cela suppose la génération de capacités additionnelles, mais ne semble pas constituer une difficulté majeure.

Le réel défi réside sur la gestion de la demande pour éviter des charges simultanées d'un grand nombre de véhicules électriques qui engendreraient des surcharges locales et des risques de chute de tension. En optimisant les temps de charge et en ajustant les tarifs pour augmenter le nombre de charges aux heures creuses (de nuit ou à la mi-journée), qui correspondent également aux pics de production de certaines énergies renouvelables, les fournisseurs d'électricité ont un rôle à jouer.

Les véhicules électriques, et surtout les batteries de stockage, peuvent aussi contribuer à améliorer la gestion de l'énergie et l'intégration des énergies renouvelables intermittentes grâce au concept de *vehicle-to-grid* (V2G), porté par la capacité des batteries à récupérer, stocker et restituer l'électricité au réseau. Ce concept complète le pilotage de charge en répartissant les charges via un signal tarifaire pour limiter les pics de demande. La charge peut ainsi être optimisée tant sur le plan économique que sur le plan du bilan carbone. Par ailleurs, le V2G permet de restituer de l'énergie dans le réseau pour lisser les pics de consommation et de constituer une source d'énergie utile pour les consommations d'un foyer. Pour le déployer, le V2G nécessite la mise en place d'un système de rémunération du service de stockage qui pourrait également à terme réduire les coûts liés aux infrastructures de charge.

(b) Fabrication des points de charge

Les points de charge rapide à ultra-rapide, de 50 kW à 350 kW, à répartir sur les territoires en fonction de la demande locale prévisible des utilisateurs, ne semblent pas poser de difficultés techniques majeures. En effet, la plupart des principaux fabricants commencent déjà à commercialiser des charges ultra-rapides. Ici, la priorité est de remporter des appels d'offres auprès de grands opérateurs pour être propulsé sur des projets de grande ampleur.

(c) Opérateurs des points de charge

L'analyse économique des infrastructures de charge souligne l'existence de coûts conséquents se traduisant en opportunités de développement pour des opérateurs privés, principalement au niveau des services énergétiques et de la fabrication des points de charge. Par ailleurs, la chaîne de valeur montre que des segments différents sont intégrés dans les projets d'installation de points de charge. Ces deux facteurs expliquent la multiplicité des entreprises souhaitant se positionner dans l'implantation et l'opérations d'infrastructure de charge. Les opérateurs peuvent être :

- Des entreprises uniquement spécialisées sur ce segment, comme Chargepoint, Allego, FLO, Blink, Fastned, EVGo, etc., qui fonctionnent principalement grâce aux frais payés pour accéder à leurs stations et potentiellement en diversifiant les sources de revenus grâce à des partenariats avec les fabricants de points de charge et les fournisseurs d'électricité. Ces entreprises attirent beaucoup les plus grands Groupes investisseurs, comme en témoignent des récentes acquisitions (Shell dans Newmotion, Meridiam dans Allego). Certaines de ces entreprises, à l'image d'Allego, lancent des initiatives de grande ampleur, comme le projet Mega-E (Metropolitan Greater Areas Electrified) subventionné par la Commission Européenne, qui vise à déployer plus de 320 points de charge ultra-rapides et environ 40 stations de charge multimodales en zones urbaines en Europe ;
- Des constructeurs automobiles, à l'image de
 - o Tesla, qui a développé son propre réseau de charge ultra-rapide, ce qui a renforcé son image de marque, fait progresser ses ventes, mais n'a pas constitué une activité rémunératrice ;
 - o Porsche, qui souhaite déployer 500 stations de charge ultra-rapide pour la fin 2019 aux Etats-Unis ;
 - o Ionity, initiative européenne qui rassemble les constructeurs allemands, Ford, Shell, OMV, Tank & Rast et Circle K, et vise à proposer un réseau de 400 chargeurs ultra-rapides (350 kW) tous les 120 km en Europe d'ici 2020. Cette collaboration permet d'obtenir des aides publiques qui réduisent les investissements initiaux, estimés à ~3 milliards d'euros, et augmente la rentabilité ;
- Des producteurs et fournisseurs d'électricité pour qui le principal défi réside dans la gestion de la charge sur le réseau électrique. Ici nous pouvons citer Sodetrel (filiale d'EDF), EVBox (Engie), Incharge (Vattenfall), E.On, Charge & Drive (Fortum), Innogy, Enel ;
- Des opérateurs d'autoroutes comme Tank&Rast en Allemagne et pétroliers qui profitent des stations essence déjà implantées en s'alliant à des opérateurs spécialisés tels que NewMotion (Shell), Chargemaster (BP).

Certains profils hybrides émergent comme Ubitricity, qui permet grâce à un chargeur portable intelligent de brancher son véhicule au réseau public, ou encore le partenariat entre BYD et China Southern Power, qui permet de mêler des points clés de la chaîne de valeur de l'infrastructure et d'accélérer ainsi la pénétration du véhicule électrique en Chine. Pour l'achat d'un véhicule électrique, 2 points de charges (domicile et travail) sont financés et installés par le partenariat. Le développement suit celui des ventes de véhicules, ce qui limite les problèmes de rentabilité. Ce mécanisme est soutenu par des fonds publics.

Ces opérateurs s'appuient sur les compétences des fabricants de points de charges, des acteurs du BTP et enfin des entreprises du numérique, pour proposer un projet complet.

(d) Services informatiques

Concernant le support numérique, les systèmes de communication permettent à l'utilisateur de se brancher au point de recharge, de l'utiliser et de payer. A ce stade, au regard du faible volume de véhicules électriques en circulation, il n'existe pas d'uniformisation sur le paiement, ni au niveau du système (abonnements, à la charge, par carte) ni au niveau de la tarification. Différentes méthodes de tarification coexistent, au kWh, à la minute, à l'heure ou une combinaison de ces indicateurs. Ainsi, de nombreuses options sont disponibles, ce qui complique l'expérience des usagers qui doivent souvent s'engager séparément auprès de plusieurs opérateurs pour avoir une accessibilité suffisante (cartes, applications, abonnements). Par ailleurs, ces différents systèmes soulèvent également des questions relatives à la sécurité des données qui font partie des enjeux de la standardisation. L'interopérabilité apparaît donc comme un enjeu majeur sur ce point. Open Clearing House Protocol a été retenu par plusieurs opérateurs de stations et pourrait devenir le standard en Europe.

Ainsi, à ce stade, l'infrastructure de recharge fait face à :

- Des investissements initiaux élevés et dissuasifs ;
- L'absence de véhicules et infrastructures de charge capables de supporter une charge en moins de 10 minutes ;
- De potentielles difficultés de surcharge sur le réseau électrique ;
- Un manque d'interopérabilité sur les systèmes de paiement et d'homogénéité sur la tarification.

Tous ces enjeux semblent solutionnables avec des technologies et des initiatives déjà mentionnées ou lancées aujourd'hui telles que :

- Le concept V2G qui donne des outils aux fournisseurs d'électricité pour gérer la charge des véhicules électriques sur l'ensemble du réseau, facilite l'intégration des énergies renouvelables intermittentes dans le réseau et permet de réduire les coûts à terme, en utilisant la capacité des batteries à rendre l'électricité au réseau pour lisser les pics de consommation ;
- Des points de charge ultra-rapide (350 kW) couplés au développement de technologies d'anode (usage du graphène, oxyde de titane-niobium, batteries solides) pouvant supporter ce niveau de charge ultra-rapide ;
- L'initiative Ionity, MEGA-E, ou toute autre approche à grande échelle, qui suppose une harmonisation des tarifs, des économies d'échelles, des coûts partagés entre plusieurs acteurs, la mise en place d'un système informatique unique de géolocalisation et de paiement simple.

RAVITAILLEMENT DES VEHICULES A PILE A COMBUSTIBLE

Il n'y a pas de chaîne de logistique standard dans la mesure où la distribution de l'hydrogène dépend de :

- La situation de la production, centralisée ou sur site grâce à un électrolyseur alimenté par des énergies renouvelables ;
- L'application visée (quantité d'hydrogène à stocker et compresser sur site).

Lorsqu'il n'est pas produit sur place, le transport de l'hydrogène peut être réalisé par :

- Pipelines, dans lesquels l'hydrogène peut être transporté seul ou avec d'autres gaz, principalement développés/implantés en Europe et aux Etats-Unis,
- Transport routier et ferroviaire, sous forme de gaz sous pression ou sous forme liquide avec refroidissement
- Transport maritime, sous forme liquide comme souhaite le développer le Japon.

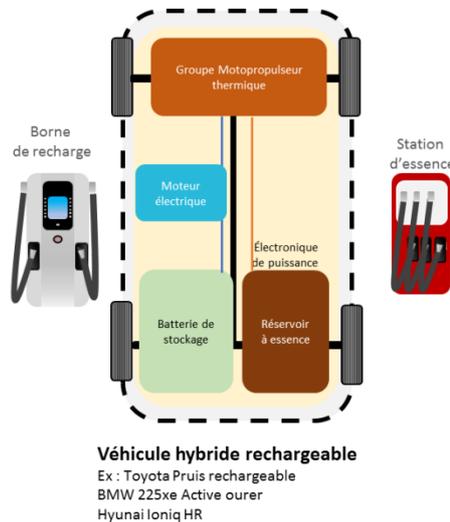
En transport, l'hydrogène gazeux est stocké sous forme de cadres, contenant plusieurs bouteilles reliées entre elles, déchargés et déposés à la station-service, ou sous forme de tubes, sur une remorque contenant jusqu'à 500 kilos d'hydrogène. L'hydrogène est ensuite distribué dans des stations avant d'alimenter des réservoirs d'hydrogène embarqués à bord des véhicules. Plusieurs stations à hydrogène ont déjà été implantées, principalement en Allemagne et au Japon.

La réduction des coûts de la chaîne logistique proviendra donc d'une meilleure adéquation des modes de distributions et stations aux besoins finaux, ainsi que des progrès réalisés sur la compression de l'hydrogène sur site. En revanche, la distribution, plus proche de celle des carburants thermiques que de celle des points de charge électrique, ne semble pas poser de problématique technique particulière ni sur les réseaux ni sur les stations.

F. Véhicules hybrides rechargeables

Les véhicules hybrides rechargeables sont considérés comme des véhicules électrifiés en offrant la possibilité d'être propulsés uniquement par le moteur électrique avec une autonomie de l'ordre de 50 km.

Figure 30 : Structure d'un véhicule hybride rechargeable



Sources : Mirova

Dans ces véhicules, le moteur électrique sert soit à propulser le véhicule, soit à aider le moteur thermique, ce qui permet de réduire la consommation de carburant. Les véhicules hybrides traditionnels, qui se limitent au freinage génératif et à l'assistance au moteur thermique, ne sont pas considérés comme des véhicules électriques, mais seulement comme des solutions d'amélioration des propulsions thermiques.

L'avantage écologique permis par le véhicule hybride rechargeable varie selon les habitudes de son utilisateur. Un conducteur qui parcourt essentiellement des trajets courts et recharge ses batteries quotidiennement aura des avantages similaires à la conduite d'un véhicule électrique à batterie, tandis qu'une personne qui parcourt surtout des trajets longs s'approchera davantage des bénéfices environnementaux d'un véhicule hybride classique. Les batteries de stockage dans les véhicules hybrides rechargeables ont généralement une capacité inférieure à 10 kWh, ce qui est quatre fois inférieur à la capacité d'un véhicule compact électrique et dix fois plus faible qu'un véhicule Tesla Model S. Cette plus faible capacité influe sur plusieurs paramètres :

- Le poids ajouté par les batteries n'est pas comparable à celui induit par les batteries des véhicules électriques purs, et ne compense pas le bénéfice apporté par la motorisation électrique. En d'autres termes, bien que le véhicule hybride rechargeable soit un peu plus lourd que son équivalent thermique, il reste plus gourmand en énergie en consommation mixte ;
- Le bilan carbone dû à la production des batteries est atténué (cf. [Impact carbone en cycle de vie](#)) ;
- L'autonomie en mode électrique est limitée.

D'un point de vue technique, un véhicule hybride rechargeable rassemble à la fois les composants d'un véhicule thermique et ceux d'un véhicule électrique, ce qui signifie que la complexité des deux propulsions est contenue en un seul véhicule.

Ainsi, bien que le véhicule hybride rechargeable permette une transition douce vers l'électrification totale de l'automobile pour le consommateur, qui peut selon son gré parcourir

Électrification des transports Une solution de transition écologique

des trajets courts en électrique pur, et des plus longs en mode hybride, la complexité de sa structure, qui impose de conserver deux modes de propulsion différents avec ce que cela implique en termes de composants, semble à terme limiter les opportunités de déploiement. Lorsque les véhicules électriques à batterie constitueront une filière mature en termes de coûts, performances et fiabilité, ce qui devrait être atteint dans un horizon de 10 ans, les véhicules hybrides rechargeables deviendront une solution coûteuse pour le constructeur comme pour l'utilisateur avec la hausse des coûts de l'essence et des normes environnementales sur les motorisations thermiques, complexe à produire et à entretenir et d'un intérêt limité sur le plan écologique.

Cependant, à court terme, les véhicules hybrides rechargeables représentent une part significative des ventes de véhicules électriques, avec plus d'un tiers des ventes en 2018.

III. Défis pour les utilisateurs

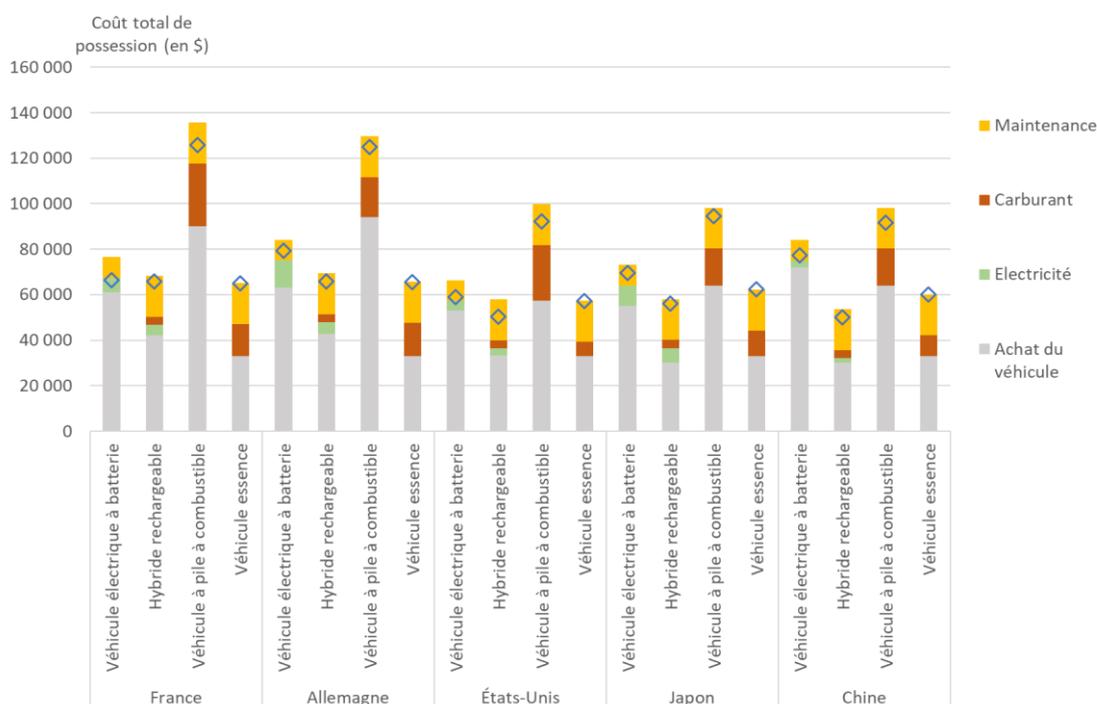
Bien qu'une grande partie de l'écart entre véhicule électrique et thermique ait pu être comblée ces dernières années, la convergence tant sur les plans technique qu'économique n'a pas conduit à une adoption massive du véhicule électrique, et de nombreux automobilistes ne semblent pas être prêts à franchir le pas. Trois facteurs principaux expliquent ce constat : le coût, la disponibilité des options de chargement et la nouveauté de la technologie.

A. Coût total de possession

Le coût total de possession d'un véhicule rend compte de l'ensemble des coûts supportés par l'automobiliste pour son véhicule et inclut donc en plus du prix d'achat, les frais récurrents liés à la maintenance, au carburant (ou l'électricité), à l'assurance. Il prend également en compte la valeur résiduelle à l'issue de la période considérée et les avantages comme les subventions.

Pour les véhicules électriques à batterie, la parité-coût avec le véhicule thermique est attendue entre 2021 et 2024 selon les segments et les technologies, et est généralement associée à un coût de la batterie inférieur à ~100 USD/kWh (selon la taille de la batterie). En considérant le coût de possession total du véhicule, la parité avec le véhicule thermique est déjà atteinte dans certains marchés, grâce notamment aux subventions.

Figure 31 : Coût total de possession actuel des véhicules électriques et thermiques de type berline sur 180 000 km



Source : Mirova

Si les véhicules électriques sont globalement plus chers à l'achat (hors subventions), les coûts liés à l'usage sont globalement plus faibles. La propulsion électrique nécessite moins de composants, ce qui réduit les coûts d'entretien du véhicule (jusqu'à un facteur 2). L'électricité



est, malgré des différences d'un pays à l'autre, 2 ou 3 fois moins chère que l'essence au kilomètre, surtout pour les charges à domicile qui représentent 90 % des profils de chargement. Les coûts d'assurance et de financement (intérêts) sont généralement identiques.

Pour les véhicules hybrides rechargeables, l'équation est différente puisque leur coût initial est plus proche du véhicule thermique, mais les dépenses de carburant sont plus élevées, et les subventions plus faibles, ce qui atténue cet avantage. Les coûts d'entretien des deux motorisations sont également plus importants.

Pour les véhicules à pile à combustible la parité-coût n'est pas attendue avant 10 ans, et cette technologie reste plus chère en l'absence d'incitations sur l'ensemble des marchés. Les gains attendus sur les plans technologiques, industriels et sur la production de l'hydrogène, devraient rendre cette technologie compétitive d'ici 10 ans sur certains segments (gros véhicules et utilitaires).

En attendant, le rôle des mesures incitatives et réglementaires est essentiel pour permettre l'essor de la voiture électrique. Les marchés leaders (Norvège, Chine, Californie...) se caractérisent par des objectifs ambitieux de développement soutenus par de nombreux mécanismes de soutien à la mobilité électrique tant au niveau municipal, régional que national : qu'il s'agisse de mesures incitatives directes (subventions à l'achat, à l'immatriculation, accès au stationnement, exemption des droits de péage, accès aux voies prioritaires) ou via le développement des flottes électriques d'autopartage ou des véhicules publics. Les politiques publiques en faveur de la mobilité électrique ciblent également le développement de l'infrastructure.

B. Disponibilité du chargement

Un autre frein majeur à l'adoption du véhicule électrique est lié au changement de pratique qu'implique le passage à cette technologie.

Pour les véhicules électriques à batterie, la disponibilité de l'infrastructure est mise en avant par les automobilistes comme un frein majeur à l'achat d'un véhicule électrique. Ici, signalons que pour tous les utilisateurs bénéficiant d'une place privée, ce frein est davantage psychologique car l'essentiel du temps, un conducteur de véhicule électrique recharge son véhicule à domicile et ne se sert des points de charge publics qu'occasionnellement. Cette conception différente de l'approvisionnement en énergie signifie qu'il faut changer ses habitudes, ce qui n'est pas forcément évident et apprécié par tous. D'un point de vue opérateur de charge, le déploiement de points de charges rapides n'a pas été évident jusqu'ici compte tenu du manque de véhicules électriques en circulation et ainsi de l'absence de rentabilité des points de charge. Aujourd'hui la situation évolue à la suite des annonces en faveur du véhicule électrique de la plupart des grands constructeurs automobiles. Industriels et pouvoirs publics se mobilisent pour lancer des plans de déploiements de charge rapides et ultra-rapides à grande échelle (cf. [Maillage d'un réseau de charges](#)). Ainsi, bien que disproportionnée par rapport aux besoins observés, cette crainte devrait se dissiper rapidement grâce aux points de charges rapides qui offriront un filet de sécurité aux usagers.

L'infrastructure nécessaire au développement des véhicules à pile à combustible n'a pas non plus été suffisamment déployée étant donné que ces véhicules restent aujourd'hui marginaux dans l'offre de véhicules. Toutefois, des stations d'hydrogène peuvent plus facilement être déployées pour répondre à des demandes de flottes d'entreprises, de fret routier ou de transports publics.

Si le véhicule hybride rechargeable apporte une réponse à ce problème en permettant la démocratisation de la propulsion électrique sans crainte sur l'autonomie, il peut aussi s'avérer contreproductif quand son potentiel électrique n'est pas utilisé à plein et que le véhicule n'est pas branché.

C. Confiance dans la technologie

L'adoption du véhicule électrique est également ralentie à cause de l'innovation continue rencontrée dans la filière. Les progrès dans les véhicules électriques à batterie sont si rapides que sur une période de 2 ou 3 ans une nouvelle génération peut être deux fois moins chère et offrir deux fois plus d'autonomie que la génération précédente. Or, la durée de détention moyenne d'un véhicule est d'environ 5 ans, ce qui induit que les automobilistes intéressés par l'achat d'un véhicule électrique peuvent être tentés d'attendre quelques mois ou années supplémentaires pour passer le cap afin d'être sûr que la technologie achetée ne sera pas rendue obsolète en quelques années. En considérant que la technologie devient de plus en plus mature, ce phénomène devrait également se réguler dans les 5 ans à venir.

IV. Maîtrise des impacts environnementaux et sociaux

Bien que l'électrification des transports apparaisse comme une solution efficace pour réduire l'impact des transports sur l'environnement, il reste essentiel de veiller à ce que son déploiement n'engendre pas d'autres externalités négatives sur les écosystèmes ou sur l'humain. Le premier point est son bénéfice pour le climat, puis dans une vision cycle de vie, il s'agit de questionner son impact sur les ressources.

A. Impact carbone en cycle de vie

Les technologies de l'électro-mobilité permettent de réduire significativement (véhicules hybrides rechargeables), sinon totalement (véhicules électriques à batterie et véhicules à pile à combustible), les émissions d'échappement. Cependant, pour déterminer l'empreinte carbone d'un véhicule électrique, il faut prendre en considération les émissions de gaz à effet de serre liées :

- Au cycle de vie du véhicule, de la fabrication à la fin de vie du véhicule, en passant par sa phase d'utilisation ;
- Au cycle de vie du vecteur énergétique, de la source primaire d'énergie (du puits) à l'énergie mécanique, force motrice dans le véhicule (à la roue).

L'ensemble des données exposées sur l'impact carbone des véhicules est lié aux rendements énergétiques des véhicules (cf. [Annexe III](#))

CYCLE DE VIE DU VEHICULE

Actuellement l'impact carbone de la production des véhicules électrifiés est plus conséquent que celui des véhicules thermiques. Bien que ces derniers contiennent plus de composants que les véhicules électriques pour assurer leur fonctionnement, les composants sont produits à la chaîne et maîtrisés par l'industrie automobile, tandis que les véhicules électrifiés intègrent des nouveaux composants dont la production à l'échelle industrielle et aux cadences rythmées de l'industrie automobile reste encore naissante.

Pour une berline familiale, l'ordre de grandeur sera de 20 tonnes de CO₂ pour un véhicule électrique à batterie, de 17 tonnes pour un véhicule à pile à combustible, de 12 tonnes pour un véhicule hybride rechargeable, comparés à 11 tonnes pour un véhicule thermique. Ces chiffres ne sont que des ordres de grandeur. En effet, il n'y a pas suffisamment de véhicules électriques en circulation pour avoir une base de données fiable sur les analyses en cycle de vie relatives à la production des véhicules. L'impact carbone de la fabrication du véhicule électrique est en grande partie généré par la fabrication des batteries. La revue bibliographique sur ce sujet montre que les résultats diffèrent significativement selon l'approche et les hypothèses retenues telle que la quantité d'énergie requise pour produire un kWh de batterie, la part d'électricité utilisée, les lieux de fabrication des différents composants de la batterie, la durée de vie de la batterie ou encore la prise en compte ou non des apports générés par la seconde vie des batteries (cf. [Annexe II](#)).

Les véhicules hybrides rechargeables sont des véhicules thermiques possédant un moteur électrique et suffisamment de capacité de batterie pour parcourir une cinquantaine de kilomètres en mode électrique pur. Cette capacité de batterie est bien moindre que celle des batteries des véhicules à propulsion uniquement électrique. Ainsi, l'impact carbone lié à la production est plus faible.

Pour la fabrication du véhicule à pile à combustible, il y a d'autres éléments à considérer. La puissance de la batterie est très faible comparativement aux véhicules électriques à batterie, et dans le cas de la Toyota Mirai, qui est l'un des modèles les plus connus actuellement, ce n'est pas une batterie lithium-ion mais une batterie de type Ni-mh, utilisée généralement pour les véhicules hybrides, qui n'a pas du tout la même complexité. Ainsi, dans le cas des véhicules à pile à combustible, le bilan carbone est porté par :

- La fabrication de la pile à combustible, contenant notamment du platine,
- Le stockage embarqué de l'hydrogène, réalisé dans des réservoirs en matériaux composites utilisant de la fibre de carbone dont le processus de production a un impact carbone significatif (Mirova, 2013).

A plus fortes raisons que pour les véhicules électriques à batterie (seulement 3 modèles en circulation en 2018⁷), le manque de maturité du marché et l'échelle expérimentale de la production pèsent sur la qualité de ces données et alourdissent le bilan carbone. Par exemple, si la pile à combustible pour une application mobile était fabriquée à plus grande échelle, le bilan carbone serait bien plus bas avec une meilleure utilisation des chaînes de production.

CYCLE DE VIE DU VECTEUR ENERGETIQUE

Les véhicules électriques et les véhicules à pile à combustible n'émettent pas de CO₂ en phase d'utilisation (du réservoir à la roue). Toutefois, des émissions de CO₂ sont générées du puits à la prise :

- Pour produire l'électricité des véhicules électriques à batterie ;
- Pour produire l'hydrogène des véhicules à pile à combustible.

L'impact carbone de la production d'électricité diffère d'un pays à l'autre selon le mix électrique. Ainsi, en France, où le nucléaire représente 77 % du mix électrique, le facteur carbone est de 55 gCO₂/kWh, tandis qu'en Chine, où le charbon représente 70 % du mix, le facteur carbone atteint 717 gCO₂/kWh (IEA, 2015)/ (IPCC). Ainsi, d'un pays à l'autre, le véhicule électrique n'a pas la même contribution sur les aspects liés au climat.

Pour les véhicules thermiques, deux phases du bilan carbone peuvent être distinguées :

- Du puits au réservoir : extraction de l'hydrocarbure, raffinage du pétrole, stockage, transport, distribution
- Du réservoir à la roue : émissions de CO₂ dues à la combustion⁸.

Enfin, les véhicules hybrides rechargeables peuvent être alimentés par de l'électricité, par de l'essence et de l'électricité, ou uniquement par de l'essence, selon si le conducteur utilise son véhicule :

- En électrique pur sur des parcours courts (consommation électrique avec des émissions de CO₂ uniquement sur la phase du puits à la prise),
- En mixte combiné essence/électrique avec une batterie chargée sur des parcours longs (consommation d'énergie bien inférieure à celle d'un véhicule thermique),
- En électrique pur puis en essence pur avec une batterie vide sur des parcours longs (consommation d'énergie proche de celle d'un véhicule thermique de même catégorie).

⁷ Toyota Mirai, Honda FCX Clarity et Hyundai Nexa

⁸ Pour déterminer la consommation d'énergie de chaque véhicule, les performances en consommation mixte proviennent des normes WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure) ou EPA (Environmental Protection Agency), considérées comme plus réalistes que les normes NEDC (New European Driving Cycle).

Sur un cycle de vie de 180 000 km, il faut alors déterminer en moyenne la part des kilomètres parcourus dans chacun de ces modes. Cette répartition varie évidemment significativement selon les utilisateurs. Toutefois, pour déterminer une consommation type pour cette catégorie de véhicule, un coefficient nommé Utility factor, qui est fonction de l'autonomie électrique, a été déterminé par les normes européennes NEDC et maintenant WLTP. Bien que perfectible et voué à être amélioré d'ici 2020 avec des enquêtes statistiques des utilisateurs sur les usages réels en Europe (EU WLTP, 2014), ce coefficient permet d'approximer les émissions de CO₂ sur l'ensemble du cycle de vie du carburant pour un type d'usage donné.

Enfin, pour les véhicules à pile à combustible, l'impact carbone dépend très fortement du processus choisi pour la production de l'hydrogène : électrolyse de l'eau à partir d'énergies renouvelables ou par reformage du méthane (SMR).

SYNTHESE DU BILAN CARBONE SUR L'ENSEMBLE DU CYCLE DE VIE

Quels que soient les segments automobiles, nous estimons que les véhicules électrifiés émettent moins de CO₂ sur l'ensemble du cycle de vie, du véhicule et du carburant, que les véhicules thermiques. D'autres études viennent corroborer nos résultats, notamment comme celle de Carbone 4 (Carbone 4, 2018).

Pour satisfaire à une autonomie suffisante pour les consommateurs, l'industrie a jusqu'à récemment augmenté la capacité des batteries en l'absence d'énergie spécifique suffisante par cellule. Les progrès électrochimiques en cours devraient rapidement freiner cette hausse dans la taille des batteries, qui est coûteuse économiquement et écologiquement. Par ailleurs, plus un véhicule est lourd, plus il nécessite des capacités de batteries importantes pour le déplacer sur une longue durée. Et enfin, plus la gamme de véhicules est onéreuse, plus l'exigence du client final est forte. L'ensemble de ces facteurs explique que le bilan carbone des véhicules électriques à batterie souffre davantage de la production des batteries pour les gammes supérieures de véhicules.

Dans certaines zones géographiques où le mix électrique est très carboné, le bilan carbone des véhicules électriques de segment berlines et luxe peut être équivalent ou supérieur à son équivalent diesel. Ce constat mérite néanmoins d'être nuancé par deux éléments :

- Le développement et le maintien des véhicules diesel sont handicapés par d'autres aspects tels que la pollution en ville ;
- Les mix électriques tendent à se décarboner grâce aux accords au niveau des pays ;
- Les progrès réalisés sur la fabrication des batteries de stockage, tant sur les cadences de production que sur la chimie contenue dans les batteries, laissent entrevoir une division par deux des émissions de CO₂.

Électrification des transports
Une solution de transition écologique

Figure 32 : Bilan carbone d'une citadine par type de propulsion sur l'ensemble du cycle de vie (180 000 km)

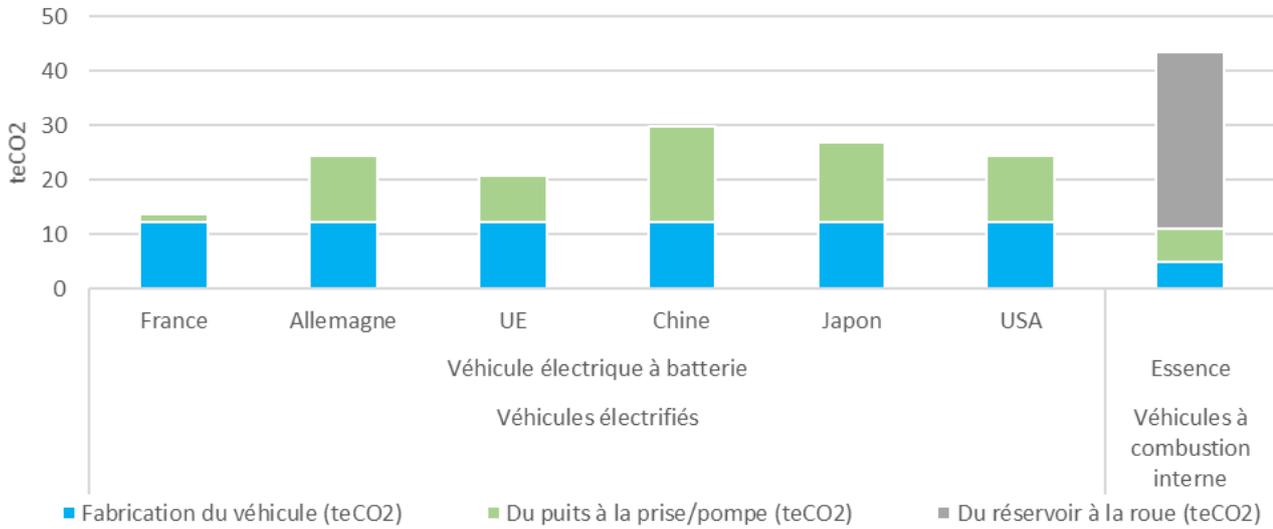
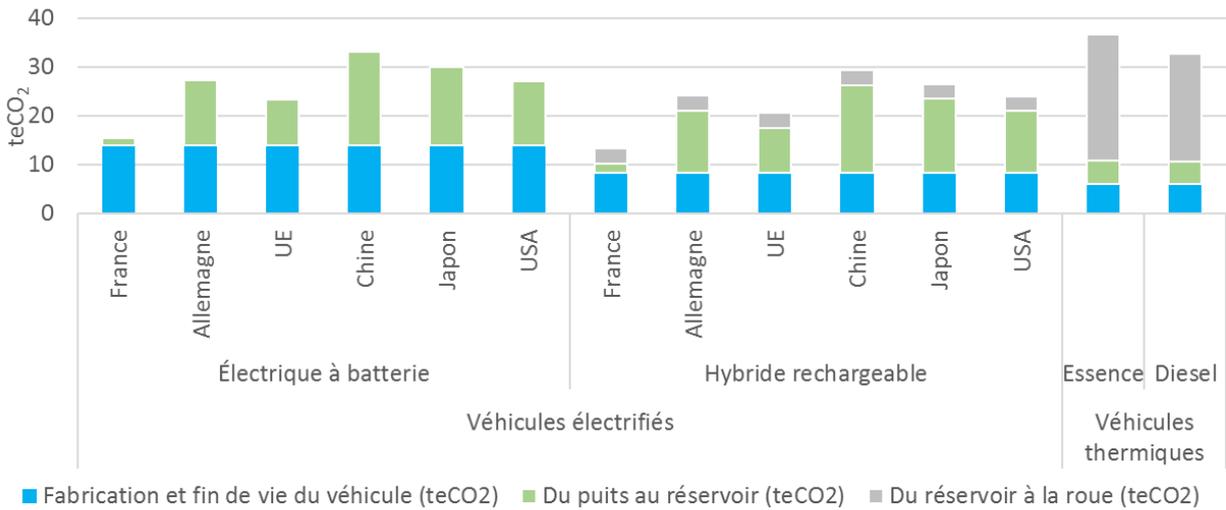


Figure 33 : Bilan carbone d'un véhicule compact par type de propulsion sur l'ensemble du cycle de vie (180 000 km)



Électrification des transports
Une solution de transition écologique

Figure 34 : Bilan carbone d'une berline par type de propulsion sur l'ensemble du cycle de vie (180 000 km)

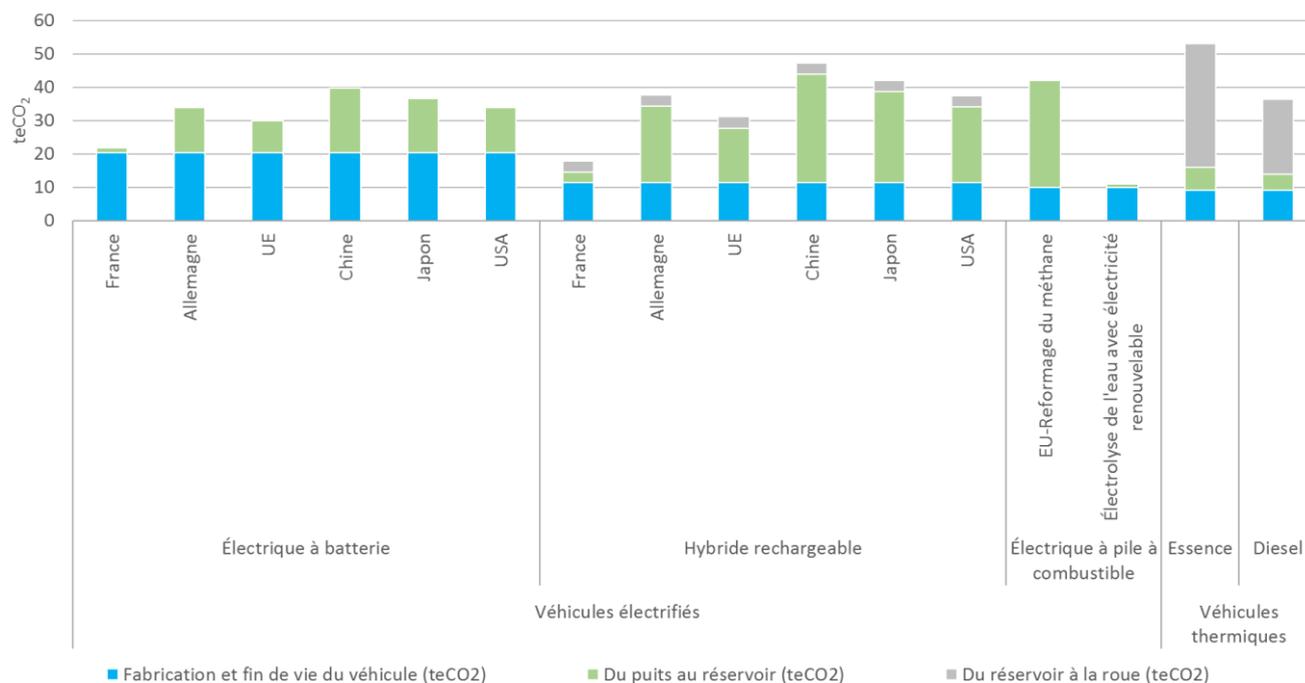
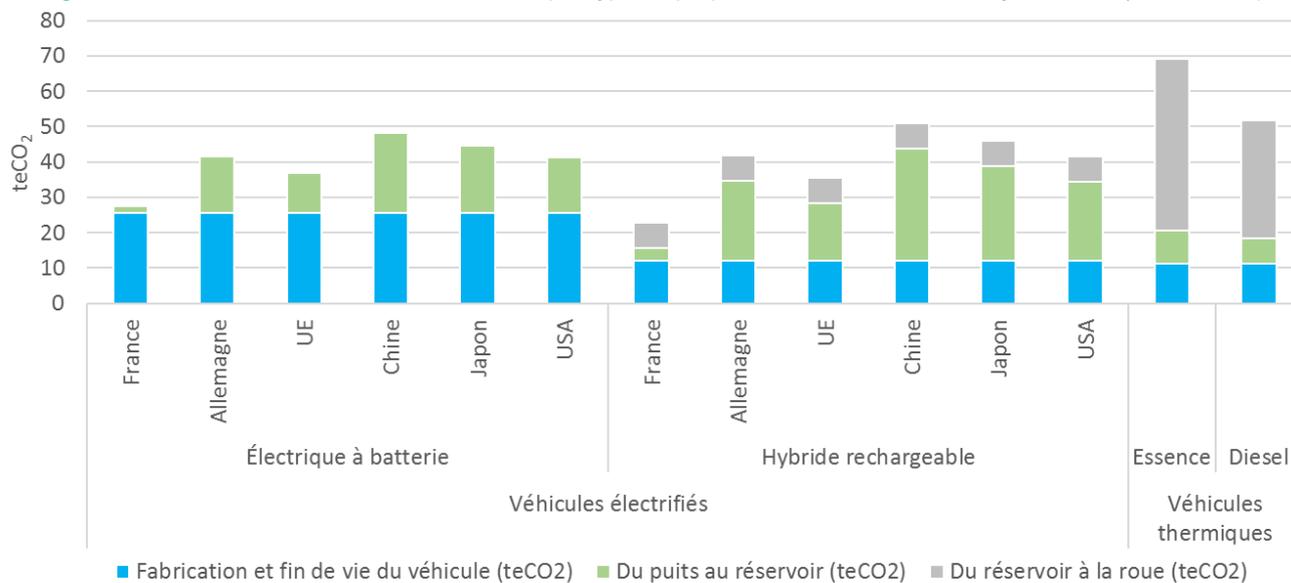


Figure 35 : Bilan carbone d'un véhicule de luxe par type de propulsion sur l'ensemble du cycle de vie (180 000 km)



Sources : Mirova/ (Zubi, Carvalho, Dufo-Lopez, & Pasaoglu, 2018) et (Ager-Wick Ellingsen, Singh, & Hammer Strømman, 2016) pour la fabrication du véhicule électrique et thermique, (GREET, 2017) pour la fabrication du véhicule à pile à combustible/ (OECD/IEA, 2015) pour les facteurs carbone électriques des pays/ (JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration, 2014) pour les émissions du puits à la roue et du réservoir à la roue des véhicules thermiques et des véhicules à pile à combustible/ (US DOE, 2018) pour les consommations EPA des modèles en circulation en 2018

Bien que l'impact carbone lié à la production des véhicules est voué à être significativement réduit et que le bénéfice climat est déjà aujourd'hui réel, le déploiement à grande échelle du véhicule électrique comme solution n'a de sens que s'il s'accompagne du développement des énergies bas-carbone. Ainsi, le bénéfice en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre à attendre de l'électrification du parc automobile mondial est conditionné à la bonne mise en œuvre de la transition énergétique au niveau global. L'ensemble des données utilisées sont présentes dans [Annexe I : Données clés et ordres de grandeur](#).

B. Enjeux de ressources

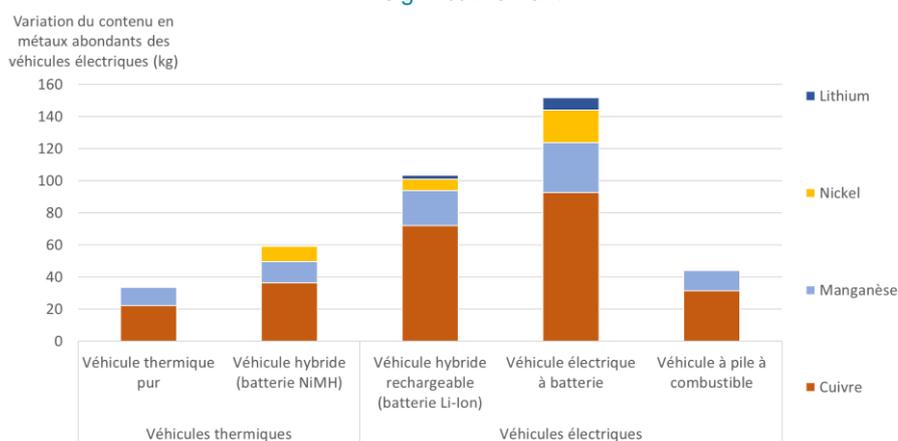
Les véhicules électriques à batterie ou les véhicules à pile à combustible transforment radicalement la structure et la composition d'un véhicule, des composants : des matériaux disparaissent et d'autres deviennent indispensables.

Dans la composition des véhicules, deux types de métaux sont présents : les métaux abondants et les métaux critiques, définis par la Commission Européenne comme présentant un risque élevé de pénurie d'approvisionnement et une grande importance économique pour les technologies vertes et nouvelles technologies (Commission Européenne, 2017). Les véhicules électriques augmentent dans une certaine mesure le recours aux métaux critiques. Toutefois, les progrès dans les compositions chimiques des batteries, moteurs et piles à combustible, permettent de relativiser et nuancer ce constat actuel.

LES METAUX ABONDANTS

Le contenu en fer, aluminium, zinc, plomb, caoutchouc, plastiques, chrome et verre varie relativement faiblement au passage du véhicule thermique aux véhicules électriques. Il y a environ 1 tonne de fer, 100 kg d'aluminium et 100 grammes de zinc et 300 grammes de plomb dans un véhicule moyen de 1 200 kg. Trois métaux abondants se distinguent dans les véhicules électriques à batterie : le cuivre dont les proportions sont multipliées par 4 (~90 kg par véhicule électrique à batterie), le manganèse, le nickel et le lithium qui font leur apparition et représentent respectivement ~30 kg, ~20 kg et ~8 kg. Les véhicules à pile à combustible ne se différencient pas beaucoup des véhicules thermiques dans leur proportion en métaux abondants.

Figure 36 : Variation du contenu en métaux abondants des véhicules électriques par rapport aux véhicules thermiques – pour les métaux dont les proportions évoluent significativement



Sources : Mirova/ (Fishman, Myers, Rios, & Graedel, 2018)/ (Yano, Muroi, & Sakai, 2015)/ (Hawkins, Singh, Majeau-Bettez, & Stromman, Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles, 2013)/ (Hawkins, Singh, Majeau-Bettez, & Stromman, Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles, 2012)

Le cuivre

Le cuivre est présent dans beaucoup de composants du véhicule électrique à batterie, des batteries au moteur en passant par les câbles. A cela s'ajoute le cuivre nécessaire au développement des installations de bornes de charge. La croissance des véhicules électriques aura ainsi des répercussions sur la demande en cuivre.

Les réserves en cuivre sont réparties dans le monde entier, avec une forte proportion en Amérique Latine (21 % au Chili, 10 % au Pérou) et en Australie (11 %), et atteignent ~790 millions de tonnes. La production annuelle est de ~20 millions de tonnes (USGS, 2018) ce qui signifie que les réserves représentent environ 40 ans au rythme actuel de production. Bien que ce métal soit dit « abondant », notre économie en est déjà très dépendante (alliages de cuivre, électricité et électronique, santé, agriculture). La hausse de la demande va générer une tension sur l'équilibre production/demande, une volatilité sur le prix et à terme un risque sur les réserves. Difficilement substituable dans son usage dans l'électrique, le cuivre est en revanche recyclable et réutilisable à l'infini, ainsi, des solutions de recyclage existent et peuvent être plus massivement déployées. Aujourd'hui, ~15 % du cuivre utilisé dans le monde est issu du recyclage.

Le manganèse

Le manganèse est notamment présent dans les batteries lithium-ion de type NMC.

Les réserves en manganèse s'élèvent à ~680 millions de tonnes avec une production annuelle de ~16 millions de tonnes, ce qui correspond à des réserves de plus de 40 ans au rythme actuel de production. L'Afrique du Sud assure 33 % de la production, l'Australie, 16 % et la Chine, 14 %. Il n'y a pas de problématique particulière sur ce métal si ce n'est qu'une grande partie des réserves se trouvent en Afrique du Sud. Par ailleurs, le recyclage de ce métal ne pose pas de difficulté majeure.

Le nickel

Le nickel est présent dans les cathodes des batteries de stockage.

Un quart des réserves de nickel est en Australie, le reste est assez bien réparti. Ces réserves atteignent ~74 millions de tonnes. La production annuelle est de ~2 millions de tonnes ce qui signifie que les réserves représentent environ 35 ans au rythme actuel de production (USGS, 2018). Les réserves de nickel ne semblent pas être un défi. Néanmoins, le nickel utilisé dans les batteries est un nickel très pur, dit de classe 1. Sa production s'élève à la moitié de la production totale, soit ~1 million de tonnes. Par ailleurs, au-delà de la pureté du nickel, les batteries requièrent également des formes particulières (granulés, briquettes, poudre), ce qui réduit encore le périmètre de production de moitié ; soit ~500 000 tonnes. Ainsi, bien que la part de nickel utilisée dans les véhicules électriques soit relativement faible, le resserrement de la production sur des types de nickel très spécifiques pourrait créer des tensions sur le prix.

Les technologies récentes de batteries ont augmenté la proportion de nickel pour améliorer l'énergie spécifique. Toutefois, à plus long terme, le nickel pourrait disparaître des batteries avec les technologies de batteries solides. Par ailleurs, le nickel est également recyclable. Aujourd'hui, ~40 % du nickel utilisé dans le monde est issu du recyclage.

Le lithium

Le lithium est également présent dans les cathodes des batteries de stockage. Les ressources en lithium sont très abondantes, environ 53 millions de tonnes réparties dans les déserts de sel en Amérique Latine, Chine, États-Unis, Canada et Australie, dans différents minéraux comme silicate d'aluminium ou pegmatites, dans une variété d'argile (l'hectorite), dans les champs pétrolifères ou encore dans les dépôts de sel géothermales. Les réserves prouvées atteignent ~16 millions de tonnes (47 % au Chili, 20 % en Chine, 17 % en Australie et 13 %

en Argentine) et sont exploitées en grande partie en Australie (43 % de la production) et au Chili (33 %). La production annuelle est de ~43 000 tonnes ce qui signifie que les réserves représentent environ 372 ans au rythme actuel de production (USGS, 2018). Comme pour le nickel, le lithium utilisé dans les batteries est très pur, ce qui représente encore 80 % de la production. L'enjeu lié au lithium est davantage un enjeu de production responsable pour réduire les consommations d'eau et les potentielles inégalités sociales dans les pays subissant un stress hydrique. Le processus d'obtention du lithium est en effet très consommateur en eau, de l'ordre de 2 000 m³ pour produire une tonne de lithium, ce qui constitue un sujet de tension entre entreprises minières et communautés locales, notamment en Argentine et au Chili. Pour limiter les impacts de l'extraction et du raffinage du lithium, des actions peuvent être déployées pour améliorer les processus de production, et le recyclage peut être utilisé pour satisfaire une partie de la demande.

Tableau 3 : Caractéristiques des métaux abondants présents dans les véhicules électriques

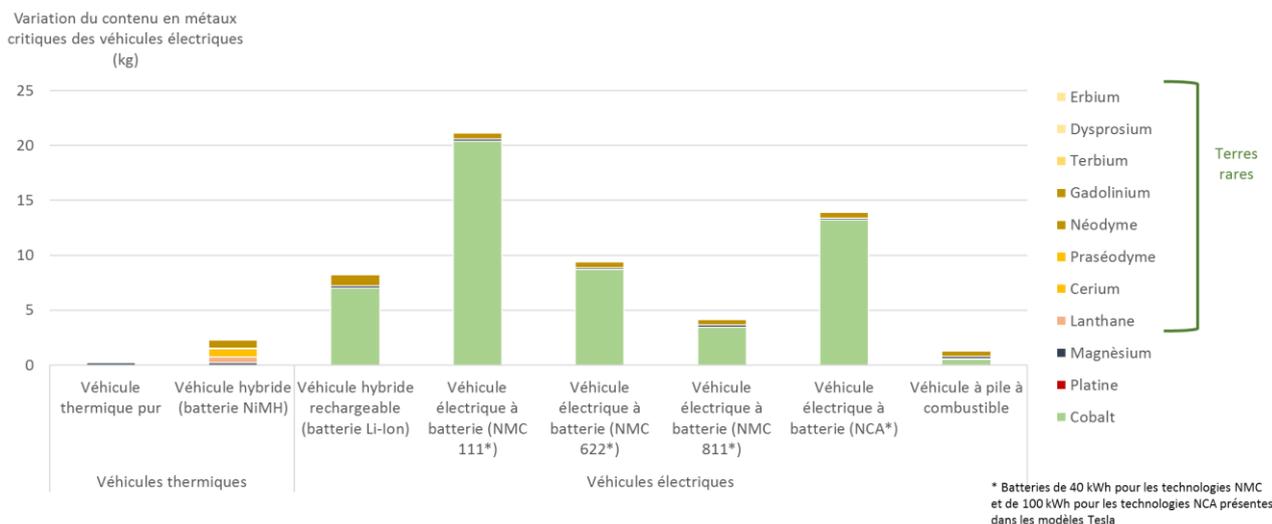
	Contenu dans un véhicule électrique à batterie (kg)	Contenu dans un véhicule à pile à combustible (kg)	Réserves en volume (millions de tonnes)	Production annuelle (millions de tonnes)	Réserves au rythme actuel de production (ans)	Problématiques	Solutions
Cuivre	90	30	790	20	40	- Tension sur l'équilibre production/demande - Réserves à terme	Recyclage
Manganèse	30	10	680	16	43	- Réserves importantes en Afrique du Sud	Recyclage
Nickel	20	1	74	2	35	- Tension sur la production du nickel spécifiquement utilisé dans les batteries	Recyclage / substitution
Lithium	8	<1	16	0	372	- Processus de production très consommateur d'eau dans des zones de stress hydrique	Amélioration des processus / Recyclage

Sources : Mirova / (USGS, 2018)

LES METAUX CRITIQUES

La définition des métaux critiques a été donnée par la Commission Européenne (Commission Européenne, 2017), comme présentant des problématiques d'approvisionnement dans l'essor des technologies de transition énergétique (véhicules électriques, énergies renouvelables) et du numérique (semi-conducteurs notamment). Parmi les métaux critiques utilisés dans les véhicules électriques, sont présents notamment le cobalt, le platine et les terres rares.

Figure 37 : Variation du contenu en métaux critiques des véhicules électriques par rapport à un véhicule thermique



Sources : Mirova/ (Fishman, Myers, Rios, & Graedel, 2018)/ (Yano, Muroi, & Sakai, 2015)/ (Hawkins, Singh, Majeau-Bettez, & Stromman, Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles, 2013)/ (Hawkins, Singh, Majeau-Bettez, & Stromman, Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles, 2012)

Ces métaux ont des caractéristiques communes :

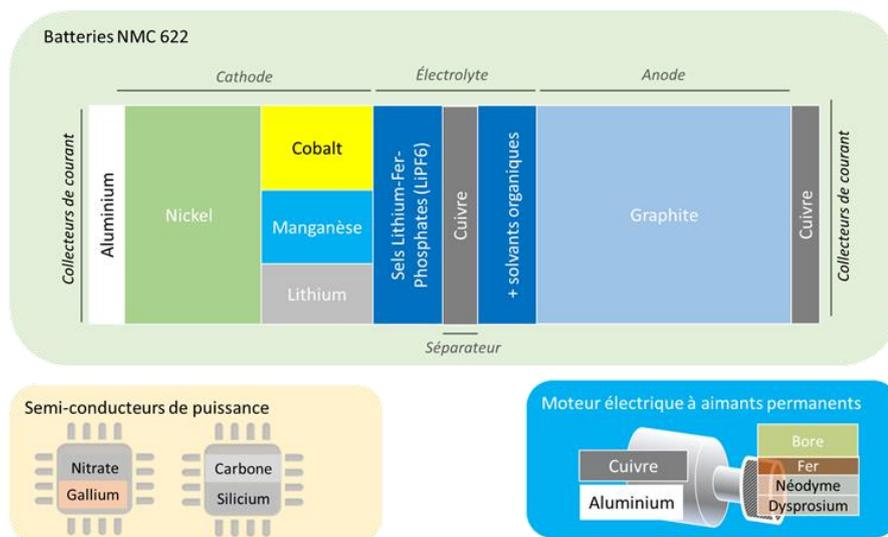
- Coproduits de métaux abondants, leur production dépend ainsi de la production du métal abondant ;
- Présence dans des faibles proportions dans le minerai, ce qui signifie qu'il faut extraire beaucoup pour en recueillir peu ;
- Difficulté d'extraction et de transformation, étant donné qu'ils sont dans des quantités très faibles dissimulés dans des grandes quantités de minerais abondants ;
- Production très concentrée, notamment en Chine.

Ces caractéristiques expliquent des problématiques de coût et d'enjeux géopolitiques. Par ailleurs, dans la plupart des cas des métaux critiques présents dans les véhicules électriques, les conditions d'extractions posent des défis environnementaux et/ou sociaux.

Pour les véhicules électriques, les matériaux critiques se trouvent dans :

- Les batteries de stockage pour les véhicules électriques à batteries (cobalt),
- Le moteur électrique (néodyme, dysprosium et praséodyme),
- Les semi-conducteurs de puissance dont la pénétration dans les véhicules électriques va croître pour augmenter les performances des véhicules électriques (notamment avec la technologie GAN qui nécessite du gallium),
- La pile à combustible pour les véhicules à pile à combustible (platine).

Figure 38 : Présence des métaux critiques dans un véhicule électrique à batterie



Sources : Mirova

Le cobalt

Le cobalt est présent dans la plupart des batteries lithium-ion, envisagées dans le développement des véhicules électriques (NMC et NCA). Les batteries lithium-ion, tous usages confondus, représentent ~40 % de la consommation de cobalt.

Le cobalt est principalement un sous-produit de l'extraction de nickel (48 %) et de cuivre (37 %), et dans une moindre mesure du plomb et du zinc. La proportion de cobalt détenue évolue d'un minerai à l'autre. Les réserves atteignent ~7 millions de tonnes, et la production annuelle, ~110 000 tonnes, ce qui représente environ 65 ans de réserves au rythme actuel de production. Bien que la notion de réserve exploitable soit floue pour un coproduit de métaux abondants, la problématique du cobalt ne concerne pas les réserves, mais la production. Premièrement, la production du cobalt dépend de celle de ses métaux abondants. Deuxièmement, près de 60 % de la production provient de la République Démocratique du Congo (RDC), le reste de la production est réparti entre l'Australie, la Russie, le Canada, Cuba et les Philippines, dans un ordre de grandeur inférieur à 5 % de la production totale.

Aujourd'hui, l'approvisionnement de cobalt en provenance de la RDC engendre des violations des dispositifs de l'Organisation Internationale du Travail (OIT) sur le travail des enfants et la santé et la sécurité, ainsi que génère potentiellement un soutien aux conflits armés dans le pays. Enfin, l'activité minière dans ce pays est source d'entraves aux droits des communautés locales non consultées et de perte de biodiversité. Les violations de l'OIT concernent en premier lieu les exploitations minières artisanales (exploitation réalisée à la main), non régies par le code minier du Congo. Dans un contexte de pauvreté, de conflits et de faible gouvernance de l'Etat, ces mines artisanales fournissent un moyen de subsistance à un grand nombre de personnes, adultes ou enfants. A l'inverse de l'exploitation industrielle impliquant des machines, les mineurs dans les exploitations artisanales travaillent avec des outils rudimentaires pour creuser et excaver la roche. Par la suite, les mineurs artisanaux négocient avec des intermédiaires pour que le cobalt soit repris par des plus gros exploitants, en charge de traiter le minerai et de le revendre à des fabricants de cathode. La complexité des chaînes d'approvisionnement et le nombre d'intermédiaires rendent difficile la responsabilisation des fabricants de batteries. Bien que soulevé par de nombreuses études (Amnesty International, 2017), l'enjeu du cobalt est maintenant de plus en plus intégré par les constructeurs automobiles, qui ont pris conscience du risque fort pesant sur la filière électrique. En termes de mesures, les constructeurs investiguent de plus en plus en amont de la chaîne, mènent des audits de traçabilité ou essaient de trouver d'autres zones de production.

Par ailleurs, compte-tenu de ces difficultés sur la production, le cobalt est cher et son prix est volatile, ce qui explique aussi l'accélération technologique pour réduire son contenu dans les véhicules électriques. Les nouvelles générations de batteries NMC et NCA, à capacité de batterie comparable, ont presque divisé par 10 le contenu en cobalt des véhicules électriques à batterie, ce qui signifie que dans les nouvelles générations de véhicules NMC 811, le cobalt représente ~3 kg sur un véhicule de plus d'une tonne. Par ailleurs, la substitution totale est envisageable avec l'émergence des batteries solides à horizon 2030. Enfin, le cobalt est recyclable ; son taux de recyclage est de ~70 % en fin de vie (UNEP, 2011), toutefois, sa réutilisation dans de nouvelles batteries suppose beaucoup de nouveaux traitements pour améliorer la qualité du métal (Battery University, 2018).

Les terres rares

Trois grandes familles de moteurs électriques existent : le moteur asynchrone (ou à induction), le moteur synchrone à rotor bobiné et le moteur synchrone à aimants permanents (cf. [Le moteur électrique](#)). Ce dernier est le plus répandu car il offre le meilleur compromis performances / taille réduite / faible maintenance. Toutefois, il nécessite des aimants permanents de haute performance, obtenus grâce à 3 éléments des terres rares : le néodyme, le dysprosium et le praséodyme, qui offrent des propriétés mécaniques remarquables. La performance des aimants à terres rares est liée à leur composition, alliant une terre rare (néodyme ou praséodyme) et un métal de transition (fer ou cobalt), qui permet d'obtenir une structure anisotrope⁹, capable de garder ses propriétés magnétiques de manière permanente grâce au métal de transition et de concentrer une force d'aimantation extrêmement puissante dans un très faible volume, grâce à la terre rare (BRGM, 2015). L'ajout de dysprosium permet de renforcer la résistance à la démagnétisation de l'aimant aux hautes températures. Ces aimants, à la rencontre d'une charge électrique, pivotent l'un par rapport à l'autre et transforment ainsi l'énergie électrique en énergie mécanique capable de faire avancer le véhicule.

Ainsi la plupart des véhicules électriques ont recours à des terres rares pour la propulsion. Toutefois, les terres rares sont aussi utilisées dans les véhicules traditionnels et hybrides : depuis une cinquantaine d'années, les terres rares se sont imposées dans énormément de composants grâce à leurs propriétés électroniques, magnétiques, optiques et catalytiques. Ainsi, à l'échelle d'une voiture, l'électrification des fonctions auxiliaires et du mécanisme global a impliqué la croissance du contenu en terres rares (lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, gadolinium, terbium, dysprosium et erbium) pour assurer le fonctionnement des vitres, de l'essuie-glace ou des capteurs. Par ailleurs, les pots catalytiques utilisent du cérium. Il est par exemple intéressant de constater qu'un véhicule hybride équipé d'une batterie NiMh comporte plus de terres rares qu'un véhicule électrique en incluant le pot catalytique, les micromoteurs électriques (lève-vitres, essuie-glace, sièges, etc.), la batterie NiMh qui contient du lanthane dans l'anode ou encore l'additif pour carburant¹⁰ (Fishman, Myers, Rios, & Graedel, 2018) / (Pitron, 2018).

Les terres rares regroupent 17 métaux qui, contrairement à ce que leur nom indique, sont plus présents sur la croûte terrestre que l'or et l'argent. L'enjeu de cette famille de métaux n'est donc pas lié à la rareté des réserves, mais aux conditions d'extraction et de raffinage et à la concentration de la production en Chine. La très faible proportion de terres rares dans le minerai qui s'est agrégé sur des milliards d'années explique les difficultés d'extraction et de raffinage.

Découvertes à la fin du XIX^{ème} siècle, le néodyme et le praséodyme sont des terres rares cériques, dites légères - plus abondantes et en surface du minerai - tandis que le dysprosium

⁹ Dépendant de la direction

¹⁰ L'ajout au carburant diesel d'un additif contenant du cérium permet d'améliorer la combustion des composés polyaromatiques condensés.

est une terre rare yttrique, dite lourde - moins abondante et plus en retrait. Jamais à l'état pur, les terres rares sont essentiellement disséminées dans des minerais de bastnaésite et de monazite et dans les argiles ioniques du sud de la Chine.

La bastnaésite, à forte teneur en terres cériques, est exploitée en Chine, dans le gisement de Bayan Obo, et aux États-Unis, à Mountain Pass. La monazite est également présente en Chine, dans le gisement de Bayan Obo, et dans les minéraux lourds des sables de plage exploités pour le titane et le zircon, en Inde, au Brésil, en Malaisie, et auparavant en Australie.

Le processus de production inclut :

- L'extraction minière (ciel ouvert, souterraine, lixiviation *in situ*) ;
- La minéralurgie (flottation, magnétisme, gravimétrie) ;
- Le traitement chimique (attaque acide, attaque basique) ;
- La séparation (extraction par solvant, échanges d'ions) ;
- La réduction et le raffinage.

Le raffinage requiert de broyer le minerai, d'utiliser une dizaine d'opérations employant des réactifs chimiques polluants (d'acides sulfuriques et nitriques notamment), de consommer de grandes quantités d'eau (~200 m³ pour 1 tonne de terres rares) qui, au passage se chargent en polluants, afin d'obtenir une faible proportion de terres rares. Le processus de raffinage est ainsi long, coûteux et très polluant. Par ailleurs, certains gisements de terres rares, comme la monazite et la bastnaésite, peuvent conduire à des pollutions radioactives.

Les inconvénients de ce processus de raffinage expliquent que, bien que les terres rares puissent être trouvées dans beaucoup de zones géographiques, la plupart des anciennes exploitations de gisements, notamment aux États-Unis et en France, aient été abandonnées. La Chine détient aujourd'hui plus de 80 % de la production mondiale, car c'est le seul pays ayant accepté de réaliser ce processus complexe et polluant pour son environnement à un bas coût. Remettre en exploitation des anciens gisements ou développer de nouveaux gisements en respectant des contraintes sociales et environnementales prend entre 15 et 20 ans et se traduira inéluctablement par une augmentation des coûts. Jusqu'ici, en maintenant des prix relativement bas, la Chine a écarté toute tentative de développement extérieur.

Les terres rares sont également recyclables bien que le procédé soit, à l'instar de celui du raffinage, complexe pour dissocier des quantités de terres rares, souvent très faibles, mélangées à des impuretés dans les produits finaux. Le recyclage est ainsi aujourd'hui plus cher que l'extraction en Chine, mais techniquement réalisable. En 2015, le recyclage représente 1 % de la consommation.

Au-delà de cette possibilité de déployer ou redéployer des extractions dans d'autres zones et de développer le recyclage, il existe des moyens de substitution au recours aux terres rares dans le véhicule électrique. Aujourd'hui, la quantité de terres rares dans un véhicule électrique est de ~500 grammes. Sur les trois moteurs électriques existants, deux d'entre eux ne comportent pas de terres rares et sont utilisés notamment dans la Renault Zoé (moteur synchrone à rotor bobiné) ou dans la Tesla Model S (moteur asynchrone). Par ailleurs, d'autres moteurs électriques, comme le moteur synchrone à reluctance variable, pourraient être commercialisés pour des applications automobiles, si les équipementiers parviennent à freiner les vibrations et à rendre sa production moins délicate. Ce moteur permet par exemple d'allier robustesse, faible coût, performances et absence de terres rares. Ainsi, comme pour la plupart des technologies liées à la filière électrique, l'innovation peut encore parvenir à rendre dépassés tous les constats actuels.

Le platine

Au global, le platine est utilisé à 50 % dans les pots catalytiques, 25 % dans la joaillerie, 6 % dans l'électronique, 5 % dans la chimie, 5 % dans le verre et 9 % autres. Dans un véhicule à

pile à combustible, le platine est utilisé en tant que catalyseur dans la pile à combustible (~20 grammes/véhicule). Il est également utilisé dans les pots catalytiques des véhicules thermiques et hybrides (~2 grammes/véhicule).

Le platine est soit la ressource principale (Afrique du Sud, Zimbabwe), soit un coproduit du cuivre, nickel et palladium (Russie, Canada). Une fois extrait, le minerai est concassé, plongé dans l'eau avec des réactifs, décantés, séchés, fondus et purifiés. Les réserves en platine et palladium, qui atteignent ~69 millions de tonnes et 345 ans au rythme actuel de production, sont concentrées en Afrique du Sud (91 %), ce qui se reflète sur les pays de production : 70 % en Afrique du Sud, 10 % en Russie, 8 % au Zimbabwe et 6 % au Canada pour les zones principales (USGS, 2018). Il y a donc un risque géopolitique lié au platine, ainsi qu'un risque de tension sur les prix dû à une production limitée, avec un déséquilibre offre/demande en cas de multiplication des véhicules à pile à combustible.

Ces problématiques sont, à ce stade, relativement contournables grâce à de potentielles substitutions, le rôle de catalyseur dans une pile à combustible peut être joué par d'autres métaux, et grâce au recyclage, déjà bien développé via notamment la récupération orchestrée des pots catalytiques.

Le gallium

Le Gallium est encore peu présent dans les véhicules électriques, mais pourrait progressivement être intégré avec l'arrivée des semi-conducteurs de puissance, via les technologies en nitrure de gallium (GaN) capables d'améliorer l'efficacité énergétique du véhicule électrique et la capacité à supporter des puissances de charge plus importantes.

Le gallium est un métal très rare, coproduit de l'aluminium. La quantité de gallium estimée dans le monde est de 1 million de tonnes. Le gallium destiné à des applications électroniques nécessite une purification poussée, afin d'obtenir une pureté de 99,999999 %. Le recyclage est par ailleurs coûteux et complexe du fait de la difficulté de récupérer de très petites quantités, utilisées sous forme d'alliages, dispersées dans une multitude d'équipements électroniques. Toutefois, à ce stade, le gallium n'est pas un réel sujet pour le véhicule électrique.

Tableau 4 : Caractéristiques des métaux critiques présents dans les véhicules électriques

	Contenu dans un véhicule électrique à batterie (kg)	Contenu dans un véhicule à pile à combustible (kg)	Co-produit	Réserves en volume (millions de tonnes)	Production annuelle (millions de tonnes)	Réserves au rythme actuel de production (ans)	Problématiques	Solutions
Cobalt	3-20 selon les technologies	<1	Cuivre Nickel Zinc Plomb	7	0.11	64	- Concentration de la production en RDC - Prix élevé	Recyclage
Terres rares	1	1	Fer Cuivre Or	120	0.13	923	- Raffinage complexe, cher et polluant - Concentration de la production en Chine	- Développement de nouveaux gisements ou réhabilitation d'anciens en respectant des contraintes sociales et environnementales - Déploiement du recyclage - Utilisation de technologies de moteurs sans terres rares
Platine	20	1	Substance principale ou coproduit du cuivre, du nickel ou du palladium	69	0.20	345	- Concentration de la production en Afrique du Sud et en Russie - Production limitée	Recyclage / substitution

Sources : Mirova / (USGS, 2018)

En énumérant l'ensemble des métaux principaux abondants et critiques nécessaires aux véhicules électriques ainsi que leurs problématiques, il n'apparaît pas, à ce stade, de barrière technique, environnementale, sociale ou économique majeure, capable de remettre en cause le développement de ces filières. Dans la plupart des cas, la substitution est possible, d'autant plus que les véhicules électriques reposent encore aujourd'hui sur des technologies naissantes en perpétuelle évolution. Enfin, le recyclage offre un autre horizon lorsque la substitution n'est pas envisageable.

SECONDE VIE ET RECYCLAGE

La seconde vie et le recyclage sont des sujets discutés lorsque la durée de vie des batteries est évoquée. Jusqu'ici, les batteries se dégradent au fil des cycles de charge et décharge et atteignent la fin de leur première vie après 20 % de dégradation, ce qui peut correspondre à ~7/8 ans selon l'usage.

Toutefois, cette vitesse de dégradation pourrait s'accroître, compte tenu :

- Du développement de points de charge ultra-rapide multipliant par deux le rythme de charge, mais dégradant par 4 les batteries ;
- Du développement de cathodes riches en nickel, ce qui améliore l'énergie spécifique, mais dégrade la durée de vie (NMC 811 se dégrade 3 fois plus vite que LFP) ;
- De la diminution de la taille des batteries et de l'augmentation de la profondeur de décharge.

Après la première vie, deux options sont généralement envisagées : utiliser la batterie dans une seconde vie pour du stockage stationnaire durant ~8/10 ans ou recycler les éléments sans attendre la fin de la seconde vie. La seconde vie permet d'atténuer le coût environnemental et économique des batteries lithium-ion, en stockant des énergies renouvelables.

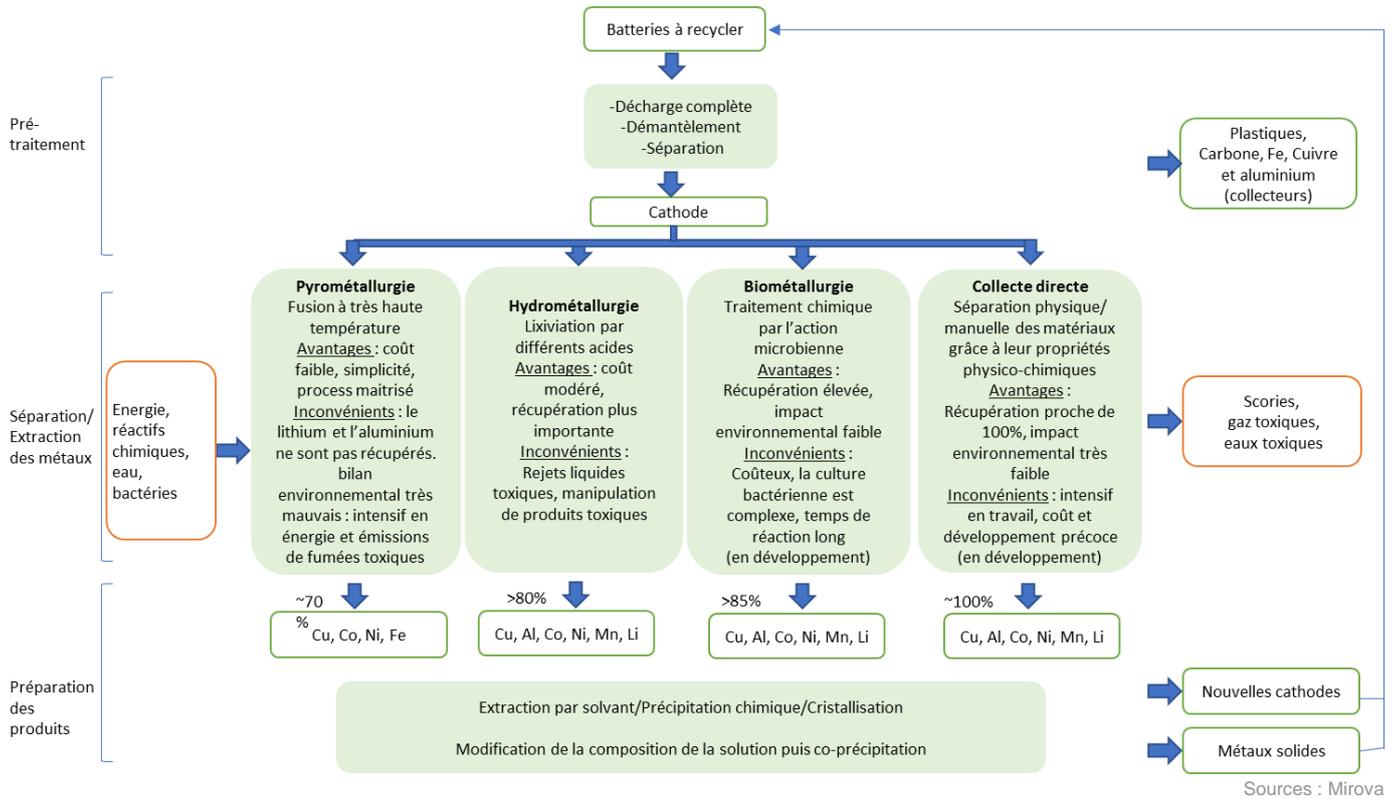
Quoi qu'il en soit, au regard des métaux présents dans les batteries et d'une durée de vie qui peut se réduire pour améliorer la performance et le coût, un essor rapide du recyclage semble être indispensable pour répondre aux enjeux sur les ressources, maîtriser l'impact carbone lié à la production du véhicule, mais également améliorer l'équation économique du véhicule électrique.

En 2018, environ 40 % des batteries lithium-ion arrivant en fin de vie sont recyclées. Sur les 60 % restants, une proportion importante est stockée, principalement en Chine, en attendant des conditions économiques plus favorables au recyclage.

Différentes méthodes de recyclage existent, pouvant être mises en œuvre conjointement ou successivement pour augmenter le taux de collecte :

- La pyrométallurgie, processus maîtrisé et à faible coût, qui reste très énergivore, polluant et offre un résultat limité ;
- L'hydrométallurgie, plus coûteuse, cette méthode apporte un meilleur résultat bien que des toxiques soient également utilisés ;
- La biométallurgie et la collecte directe, à des coûts très élevés, mais offrant un taux de réussite très élevé et un faible impact environnemental.

Figure 39 : Processus de recyclage



La pyrométallurgie est traditionnellement utilisée par les spécialistes du recyclage. Toutefois, la diversification vers l'hydrométallurgie a commencé. Les segments présents sur le recyclage sont également le secteur minier, les fabricants de cathodes et de batteries et, dans une moindre mesure, des constructeurs automobiles.

Le recyclage des batteries lithium-ion n'est pas encore rentable à ce stade, et le manque de standardisation, l'évolution rapide des chimies, ainsi que l'absence d'infrastructure de collecte et de visibilité sur l'évolution des volumes, rendent difficile et limitée la mise en place de capacités de recyclage. Pour autant, le renforcement des réglementations, le développement des systèmes de crédits recyclage, la pression sur les ressources ou encore les politiques de sécurisation des approvisionnements des entreprises sont autant de facteurs qui devraient permettre un développement très rapide des filières de recyclage à mesure que les batteries arriveront en fin de vie.

V. Perspectives

A. Applications et Croissance de marché

TRANSPORT ROUTIER

Dans le transport routier, la pénétration du véhicule électrique est portée par un certain nombre d'instruments fiscaux, réglementaires et d'investissements publics. En plus des mesures portées au niveau national, les métropoles s'affirment comme les premiers défenseurs de la mobilité bas-carbone. En 2018, 25 métropoles¹¹ concentrent ainsi 44 % des véhicules électrique en circulation (contre 12 % des véhicules vendus et 4 % de la population mondiale) (ICCT 2018). Les différentes mesures prises par les pouvoirs publics aux niveaux nationaux, régionaux et municipaux peuvent être regroupées en 4 catégories :

- Soutien direct via
 - o Des subventions à l'achat (crédit d'impôt, exemption de TVA, prime à la casse, subventions directes, aide à l'immatriculation). Ces subventions atteignent jusqu'à 12 000 USD en Corée du Sud et 16 000 USD au niveau local à Séoul ;
 - o Aides à l'usage (accès au stationnement payant, aux voies prioritaires, exemptions des droits de péage, accès aux zones zéro-émissions, frais d'assurance réduits, crédits V2G, prix d'électricité préférentiels) ;
- Déploiement d'infrastructure de charge (objectifs de développement en coopération avec des fournisseurs d'électricité, construction directe de stations, mécanismes d'incitations financières, mise en place de standards de construction imposant des points de charge dans l'habitat collectif) ;
- Flottes électriques et nouvelles mobilités (mesures pour amorcer la transition des taxis et VTC, électrification des bus et des flottes publiques, mise en place de flottes de véhicules en autopartage et zones zéro-émission, interdiction pure et simple des ventes de véhicules thermiques à partir de 2030 dans certains pays) ;
- Stratégies et communication (normes d'émissions contraignantes pour les constructeurs, financements publics R&D, partenariats publics-privés, pédagogie, promotion et salons).

Ces mécanismes sont amenés à évoluer pour accompagner l'augmentation des ventes de véhicules électriques. Quoi qu'il en soit, ces choix de politiques publiques orientent, avec les évolutions technologiques, les perspectives de croissance des différents véhicules sur les différents marchés et segments.

Véhicules particuliers

En 2017, plus d'un million de véhicules électriques ont été vendus. Le décollage du véhicule électrique est observé sur un petit nombre de marchés leaders :

- En Chine, qui a réalisé près de la moitié des ventes mondiales de véhicules électriques ces deux dernières années,

¹¹ Pékin, Changsha, , Chongqing, Guangzhou, Hangzhou, Qingdao, Shanghai, Shenzhen, Tianjin, Wuhan et Zhengzhou en Chine, Londres en Angleterre, Paris en France, Tokyo et Kyoto au Japon; Amsterdam aux Pays-Bas; Bergen et Oslo en Norvège, Stockholm en Suède et Los Angeles, New York, San Diego, San Francisco, San José et Seattle aux États-Unis.

- En Scandinavie, où la part de marché des véhicules électriques est devenue significative (respectivement 6 % et 39 % des ventes en Suède et en Norvège) ;
- En Allemagne et au Japon, où les plus importantes croissances de ventes ont été enregistrées en 2017

Les véhicules électriques et hybrides rechargeables, bien que reposant sur des technologies récentes, semblent suffisamment matures pour un développement à grande échelle dans les véhicules particuliers dans les années à venir, tant sur le plan des infrastructures de recharge que sur celui des technologies de batteries qui ont passé le cap important des premières générations. Ce constat n'est pas réaliste pour les véhicules à pile à combustible, qui restent encore trop onéreux et non suffisamment matures pour s'intégrer dans le paysage des véhicules particuliers à court terme.

Bloomberg New Energy Finance estime que les ventes annuelles de véhicules électriques et des véhicules hybrides rechargeables pourraient atteindre respectivement près de 53 millions et 7,3 millions de véhicules, soit 34 % du parc de véhicules en circulation, ce qui signifie que plus de 50 % des ventes de véhicules particuliers porteraient sur des véhicules électriques ou hybrides rechargeables.

Figure 40 : Évolution des ventes annuelles de véhicules particuliers

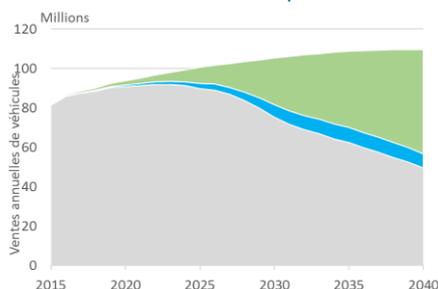
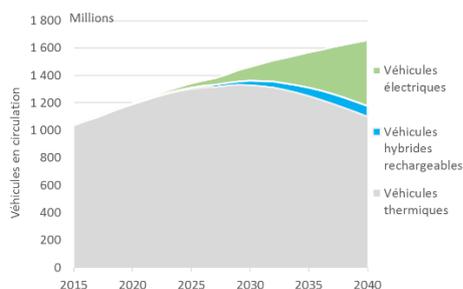


Figure 41 : Évolution du parc de véhicules en circulation



Sources : Mirova / (BNEF, 2018)

Également dans le cadre de ces projections, les véhicules électriques et hybrides rechargeables représenteraient 34 % du parc de véhicules en circulation.

Deux roues et véhicules électriques lents

Les deux roues représentent un segment déjà bien engagé dans l'électrification. Ils présentent des caractéristiques techniques (faible poids et besoins énergétiques) et d'usage (majoritairement urbain, courte distance) qui les rends propices à la conversion à l'électrique à batterie. A cela s'ajoute la possibilité de changer la batterie ou de la recharger en quelques heures seulement sur une prise domestique.

Incité par des taux de pollution urbaines importants, la Chine représente la quasi-totalité de ce marché, avec près de 300 millions de 2 et 3 roues électriques en circulation et ~30 millions vendus chaque année (IEA 2018). Dans les autres pays asiatiques, qui comptent ~900 millions de deux roues au total, l'électrification est encore marginale. En Europe, les deux roues électriques représentent près de 4 % des ventes de deux roues à mi-2018, mais sont en croissance de +49 % par rapport à l'année précédente (ACEM, 2018).

En Europe ou aux Etats-Unis, les deux roues électriques sont concurrencés, d'une part, par les vélos électriques, qui ne nécessitent ni permis de conduire, ni assurance, et par les véhicules électriques lents (LSEV) constituent une catégorie intermédiaire entre les deux roues et les voitures, qui apporte une réponse aux impératifs de la mobilité durable. Ils sont soumis à des régulations différentes des véhicules classiques, leur poids et leur vitesse sont limités, et ils sont particulièrement adaptés en zone urbaine. Ils connaissent une croissance rapide en Chine où les ventes dépassent 1,75 millions de véhicules en 2017, et représentent ~5 millions de ces véhicules en circulation en 2018 (IEA, 2018) (The Wall Street Journal 2018).

Bus

Le transport collectif routier, du minibus au car, connaît aussi un essor des solutions bas-carbone. En 2017, près de 400 000 bus électriques et hybrides rechargeables sont déjà en circulation en Chine, ~4 000 dans les pays de l'OCDE. Cela représente 12 % du parc mondial, et cette part devrait s'élever à 40 % en 2025 (1,2 millions en Chine et 120 000 dans le reste du monde).

Après 2025, l'électrique devrait devenir moins cher que ses équivalents thermiques et s'imposer dans la plupart des pays pour près de 90 % des ventes entre 2030 et 2035.

Par ailleurs ~250 bus à pile à combustible sont en service en 2017 (IEA, 2017). Les bus urbains, mais surtout interurbains, présentent des caractéristiques favorables à cette technologie : taille critique, routes fixes, moins de contraintes sur leur poids. Le Conseil de l'Hydrogène¹² estime que 35% à 40% des bus pourraient fonctionner à l'hydrogène en 2050.

Globalement, l'électrification de ce segment, qui peut s'adapter à l'hydrogène comme aux batteries, est portée dans un premier temps par les pouvoirs publics.

Véhicules commerciaux et poids lourds

Pour les poids lourds, le véhicule à pile à combustible est a priori plus adapté que le véhicule électrique à batterie, compte tenu de la puissance et de l'autonomie nécessaires. Le Conseil de l'Hydrogène estime à 20 % la pénétration de l'hydrogène en 2050, soit 15 à 20 millions de véhicules.

Les premiers modèles de poids lourds électriques à batteries arrivent sur le marché (Daimler, Volkswagen et Tesla), mais cette technologie devrait davantage se généraliser pour le fret léger et les véhicules utilitaires.

C'est, dans l'ensemble, le segment qui devrait connaître l'électrification la plus lente et les solutions hybrides et hybrides rechargeables devraient représenter la majorité des ventes.

TRANSPORT AERIEN

Le transport aérien présente des freins importants à l'électrification de la propulsion. A ce stade, les technologies de stockage ne permettent pas d'envisager une telle transition. L'hybridation de certains appareils, notamment court-courrier, pourrait intervenir d'ici à 2030, et l'électrification pourrait se développer pour les vols court-courriers dans la décennie suivante. Les premiers projets d'appareils à batterie sont à des stades de développement très précoces (Easyjet développe, par exemple, avec Wright Electric un appareil qui aurait 500 km d'autonomie pour 2030). Pour les véhicules à piles à combustible, le problème est surtout lié aux conditions actuelles de stockage de l'hydrogène. Il faut ainsi attendre des progrès technologiques sur le stockage solide de l'hydrogène pour envisager un déploiement concernant la propulsion de l'avion.

TRANSPORT MARITIME

Le transport maritime présente aussi des freins importants à l'électrification, notamment du fait de l'autonomie nécessaire. Des ferries électriques à batteries ainsi qu'à pile à combustible sont déjà en service en Europe et présentent d'ores et déjà une réelle opportunité. Pour la navigation fluviale et le transport maritime sur de courtes distances, ces technologies

¹² Le Conseil de l'Hydrogène est une initiative globale des industries de l'énergie et des transports, lancée durant le World Energy Forum 2017 à Davos, pour définir les axes de développement de la filière hydrogène. L'initiative regroupe 39 entreprises (<http://hydrogencouncil.com/>).

pourraient également offrir des gains substantiels en termes d'émissions et de qualité de l'air, mais leur développement nécessiterait un soutien réglementaire, financier et des infrastructures en l'absence de compétitivité-coût à moyen terme. Pour ce qui est des porte-containers et du transport transocéanique, la transition vers des propulsions alternatives paraît plus incertaine en raison des distances parcourues et devrait, là aussi, constituer une solution de plus long terme en l'absence de rupture technologique.

TRANSPORT FERROVIAIRE

L'électrification des chemins de fer est généralisée depuis plusieurs décennies en Europe et au Japon et représente 30 % des lignes dans le monde en 2015. Dans la mesure où l'électrification des rails représente des coûts d'investissements importants, la mise en place de trains électrifiés à batterie apparaît comme une alternative pour les lignes les moins fréquentées. Deux premiers trains à pile à combustible ont aussi été conçus par Alstom pour entrer en service en Allemagne en 2018.

B. Acteurs clés

Le véhicule électrique induit une évolution majeure de la répartition de la valeur ajoutée : tandis que les constructeurs et équipementiers automobiles traditionnels peinent à se positionner dans la chaîne de valeur, des opportunités considérables sont créées dans d'autres secteurs, en particulier dans l'électrochimie, la fourniture d'électricité et le traitement des métaux.

Pour rationaliser le nombre d'entreprises citées, seuls les segments les plus évidents dans la chaîne de valeur sont mentionnés dans cette étude. Toutefois, beaucoup d'autres sous-secteurs dans la chaîne sont porteurs de valeur, comme les entreprises de test dans la production industrielle des batteries, qui ont un rôle clef pour améliorer l'efficacité de la production, les acteurs positionnés sur les systèmes de packs de batteries qui peuvent optimiser l'organisation des cellules, les porteurs de solutions sur les différents segments de la pile à combustible, les sociétés très spécialisées sur les polymères, etc. La liste pourrait être très longue et complexe à réaliser compte tenu de l'émulation rencontrée dans l'ensemble des activités servant de près ou de loin au développement des véhicules électriques.

Pour soutenir cette solution de transition écologique, la recherche de nouvelles idées d'investissement est permanente et repose sur la rencontre de partenaires industriels spécialisés pour identifier tous les maillons de la chaîne.

VEHICULES ELECTRIQUES A BATTERIE

Fabrication des batteries

CELLULES

La fabrication de batterie est une industrie peu concentrée ; aux côtés des fabricants historiques coréens, une multitude de petits fabricants se sont développés en Chine. Le durcissement des conditions d'attribution des subventions en 2018 et la complexité croissante des technologies devraient accélérer la concentration du marché, alors que les premiers fabricants européens se positionnent.

Mis à part Tesla, BYD et Daimler (dans une moindre mesure), les constructeurs automobiles n'ont pas annoncé de volonté d'intégrer la fabrication des cellules. Les expertises d'électrochimie requises constituent une barrière à l'entrée conséquente pour les constructeurs automobiles, d'autant plus que la technologie est appelée à potentiellement être remplacée par des technologies de batteries solides dans la future décennie.

Électrification des transports Une solution de transition écologique

Quelques acteurs sont présents aussi bien sur les cellules que sur la chimie des cathodes, notamment BYD, Panasonic, Samsung SDI et LG Chem Ltd, mais la plupart des fabricants de cellules s'appuient sur d'autres acteurs spécialisés sur les cathodes.

Les entreprises impliquées sur les batteries solides sont également présentes sur plusieurs sous-segments de la chaîne de valeur, en particulier l'anode et l'électrolyte.

Tableau 5 : Fabrication des batteries

Entreprises	Pays	Public / privé	Cellules & packs de batteries	Cathode	Anode	Électrolyte	Séparateur
Tesla Inc., Panasonic Corp	États-Unis	Public	- NCA, NMC : 105 000 MWh (USA) d'ici 2023 - 7 % du marché en 2017	NCA, NMC			
Contemporary Amperex Technology Co Ltd	Chine	Privé	- Fabrication de batteries : 100 % des revenus sur les batteries de stockage, 16 % du marché mondial 2017 dans les batteries ; capacités : 17 000 MWh disponibles, 53 260 MWh en construction, 104 260 MWh annoncés ; expertise sur les cathodes NMC et LFP ; clients majeurs (hors Chine) : Volkswagen - Recyclage : via sa filiale Brunp ; capacité de 6 kt en 2017				
BYD Co Ltd	Chine	Public	- Fabrication de batteries : Batteries NMC pour automobiles (53 % des revenus 2017) et batteries pour stockage de l'énergie solaire (8 %) ; 10 % du marché mondial 2017 dans les batteries ; expertise sur les cathodes NMC ; capacités : 26 000 MWh disponibles, 34 000 en construction - Recyclage : usine de recyclage à Shenzhen - Constructeur automobile à 100% de véhicules électriques	NMC			
LG Chem Ltd.	Corée du Sud	Public	- Fabrication de batteries : 6 % des revenus 2017 ; 7% du marché mondial 2017 dans les batteries ; expertise sur les cathodes NMC et LMO ; capacités : 23 400 MWh disponibles ; clients majeurs : Volkswagen, PSA	NMC			
NorthVolt AB	Suède	Privé	- NMC : 32 125 MWh (Suède) d'ici 2023 - Objectif : concevoir une gigafactory en Europe en partenariat avec ABB				
SK Innovation Co Ltd	Corée du Sud	Public	- Fabrication de batteries : 0,3% des revenus 2017 liés aux batteries de stockage pour véhicules électriques ; expertise sur les cathodes NMC ; capacités : 1 200 MWh disponibles, 17 800 MWh en construction, 800 MWh annoncés ; clients majeurs : Volkswagen				6% du marché en 2017
Microvast Inc	États-Unis	Privé	- NMC, LTO : 15 000 MWh (Chine) d'ici 2023 - 6 % du marché en 2017				
Samsung SDI	Corée du Sud	Public	- NMC : 8 650 MWh (Corée du Sud, Chine, Hongrie) d'ici 2023 - 11% du marché en 2017 - R&D sur les batteries solides - Partenariat(s) : Volkswagen	NMC			
Beijing Pride Power Battery Technology Co. Ltd.	Chine	Privé	- Batteries LFP - Partenariat(s) : BAIC				
Tianjin Lishen Battery Joint-Stock Co Ltd	Chine	Privé	- Batteries LFP pour véhicules électriques légers et bus				
Guoxuan High-Tech Co., Ltd	Chine	Public	- Batteries LFP - Partenariat(s) : JAC, Zoyte	LFP			
Deutsche Accumotive GmbH & Co.	Allemagne	Privé	Filiale de Daimler AG sur NMC				
Blue solutions	France	Public	- Batteries LMP pour l'autopartage et des solutions de stockage			Électrolyte polymère	
Front Edge Technology Inc	Etats-Unis	Privé	- R&D sur les batteries solides - Partenariat(s)/Investisseur(s) : STMicroelectronics			Électrolyte polymère	
Iluka PLC	Royaume-Uni	Public	- R&D sur les batteries solides - Partenariat(s)/Investisseur(s) : Toyota		Silicium	Électrolyte polymère	
Prieto Battery Inc	Etats-Unis	Privé	- R&D sur les batteries solides - Partenariat(s) : Intel/Stanley, Black & Decker			Électrolyte polymère	
QuantumScape Corp	Etats-Unis	Privé	- R&D sur les batteries solides - Partenariat(s) : Volkswagen			Électrolyte polymère	
Solid Power Inc	Etats-Unis	Privé	- R&D sur les batteries solides - Partenariat(s)/Investisseur(s) : Solvay		Li-metal	Électrolyte polymère	
SolidEnergy Systems Corp	Etats-Unis	Privé	- R&D sur les batteries solides - Partenariat(s)/Investisseur(s) : GM		Li-metal	Électrolyte polymère	
Fisker Inc	Etats-Unis	Privé	- R&D sur les batteries solides - Partenariat(s)/Investisseur(s) : Caterpillar			Électrolyte polymère	
Ionic Materials Inc	Etats-Unis	Privé	- R&D sur les batteries solides - Partenariat(s)/Investisseur(s) : Hyundai, Renault, Nissan			Électrolyte polymère	
Sakti3 Inc	Etats-Unis	Privé	- R&D sur les batteries solides - Partenariat(s)/Investisseur(s) : Dyson			Électrolyte polymère	
Seeo Inc	Etats-Unis	Privé	- R&D sur les batteries solides - Partenariat(s)/Investisseur(s) : Bosch			Électrolyte polymère	

Sources : Mirova/ BNEF/ (BMO Capital Markets, 2018)

CATHODES

L'innovation dans la chimie des cathodes est permanente pour optimiser l'énergie spécifique et réduire les coûts. La concentration de l'industrie est faible mais les barrières à l'entrée sont importantes du fait de la complexité croissante des technologies. Les technologies NMC et

Électrification des transports Une solution de transition écologique

NCA devraient rester dominantes dans la prochaine décennie avant un potentiel remplacement par des batteries solides.

Tableau 6: Fabricants de cathodes

Entreprises	Pays	Public / privé	Cathode	Anode	Électrolyte
Shanghai Shanshan Tech Co., Ltd.	Chine	Privé	LCO/NMC/LFP avec 11 % du marché NMC en 2017	Graphite (50 kt annoncées) avec 5 % du marché en 2017	LiPF6 (5% du marché en 2017)
Umicore SA	Belgique	Public	LCO/NMC : 8 kt en 2016 (120 kt annoncées) avec 15 % du marché NMC en 2017		
Nichia Corporation	Japon	Privé	LCO/NMC/LMO/LFP : 13 kt en 2016 (32 kt annoncées) avec 9 % du marché NMC en 2017		
Ningbo Jinhua New Materials Co Ltd	Chine	Privé	LCO/NMC : 15 kt annoncées avec 9 % du marché NMC en 2017		
L&F Co Ltd	Corée du Sud	Public	NMC : 9 kt en 2016 (18 kt annoncées) avec 11 % du marché NMC en 2017		
Sumitomo Corporation	Japon	Public	- Cathodes : NCA ; capacité de 43 kt en 2017 ; fournisseur de Tesla/Panasonic Inc - Recyclage : partenariat avec Nissan		
Toda Kogyo Corp	Japon	Public	NMC/NCA : 22 kt avec 16 % du marché NCA en 2017		
BASF SE	Allemagne	Public	- Cathodes NMC : <10 % des revenus 2017 de BASF ; capacité de 54 kt en 2017 ; partenariat avec TODA Battery Materials LLC - Électrolytes fluorés		
Nihon Kagaku Sangyo Co., Ltd.	Japon	Privé			
Ecopro Co Ltd	Corée du Sud	Public	NCA : 9 kt en 2016 avec 5 % du marché NCA en 2017		
Pulead Technology Industry Co Ltd	Chine	Privé	LFP : 10 kt en 2016 avec 9 % du marché LFP en 2017		
Johnson Matthey	Royaume-Uni	Public	- LFP : 5 kt en 2016 avec 8 % du marché LFP en 2017 - Innovation cathodes eLNO		
Beijing Easpring Material Technology Co., Ltd	Chine	Privé	LCO/NMC/NCA : 4 kt en 2016 avec 4 % du marché NMC en 2017		
Xiamen Tungsten Co., Ltd. (XTC)	Chine	Public	NMC : 3 kt en 2016 (27 kt annoncées)		

Sources : Mirova/ BNEF/ (BMO Capital Markets, 2018)

ANODES

Le marché des anodes est plus concentré que celui des cathodes. Il s'agit aujourd'hui essentiellement de graphite, naturel ou synthétique. L'enrichissement progressif, puis le remplacement par du silicium pur, et, à terme, par les anodes en lithium-métal, pourraient bouleverser ce marché et mobiliser de nouveaux acteurs.

Tableau 7: Fabricants d'anodes

Entreprises	Pays	Public / privé	Cellules & packs de batteries	Cathode	Anode	Électrolyte
Shanghai Shanshan Tech Co., Ltd.	Chine	Privé		LCO/NMC/LFP avec 11 % du marché NMC en 2017	Graphite : 50 kt annoncées avec 5 % des parts de marché en 2017	LiPF6 (5% du marché en 2017)
Mitsubishi Chemical Corporation	Japon	Public			Graphite : 15 kt annoncées	LiPF6 (17% du marché en 2017)
BTR New Energy Materials Inc	Chine	Privé			Graphite : 57 kt annoncées	
Jiangxi Zichen Technology Co Ltd	Chine	Privé			Graphite : 40 kt annoncées	
Pyrotek Inc	Etats-Unis	Privé			Graphite : 40 kt annoncées	
Shenzhen Sinuo Industrial Development Co Ltd	Chine	Privé			Graphite : 34 kt annoncées	
Hitachi Chemical Company, Ltd.	Japon	Public			Graphite : 28 kt annoncées	
JFE Chemical Corp	Japon	Privé			Graphite : 28 kt annoncées	
Huzhou Chuangya Power Battery Materials Co Ltd	Chine	Privé			Graphite : 15 kt annoncées	
Hunan Shinzoom Technology Co Ltd	Chine	Privé			Graphite : 15 kt annoncées	
Jiangxi Zhengtuo New Energy Technology Co Ltd	Chine	Privé			Graphite : 13 kt annoncées	
Altair Nanotechnologies Inc	Etats-Unis	Privé			Anode LTO	
Hunan Shinzoom Technology Co Ltd	Chine	Privé			Graphite : 15 kt annoncées	
Toyo Tanso	Japon	Public			Graphite	
Eneate	Etats-Unis	Privé			Silicium	
Ilika (Toyota)	Royaume Uni	Public			Silicium	
Paraclete	Etats-Unis	Privé			Silicium	
Solid Power Inc	Etats-Unis	Privé	- R&D sur les batteries solides - Partenariat(s)/Investisseur(s) : Solvay		Li-métal	Électrolyte polymère
SolidEnergy Systems	Etats-Unis	Privé	- R&D sur les batteries solides - Partenariat(s)/Investisseur(s) : GM		Li-métal	Électrolyte polymère
Hitachi Chemical Co Ltd	Japon	Public			Anode en graphite (5% des revenus 2017)	
Mitsubishi Chemical Holdings Corp	Japon	Public			Anode en graphite ; LiPF6 électrolyte ; nitrure de gallium (GaN) pour semi-conducteurs de puissance. Le segment lié aux batteries lithium-ion est inclut dans MC Ionic Solutions US, Inc.	

Sources : Mirova/ BNEF/ (BMO Capital Markets, 2018)

La plupart des acteurs se spécialisent sur un segment, mais quelques entreprises arrivent à être présentes à la fois sur les marchés de l'anode, de la cathode et de l'électrolyte, à l'image de Shanshan Technology Group Co, Ltd.



ÉLECTROLYTES

La fabrication d'électrolyte n'est pas très complexe d'un point de vue industriel, mais ce marché présente de nombreuses barrières à l'entrée. L'évolution vers les électrolytes fluorés, qui permettent d'atteindre des voltages plus élevés, puis vers les électrolytes solides et semi-solides plus complexes, à base de polymères ou céramiques, mobiliseront probablement d'autres acteurs.

Tableau 8: Fabricants d'électrolytes

Entreprises	Pays	Public / privé	Cathode	Anode	Électrolyte
Mitsubishi Chemical Corp	Japon	Public		Graphite	LiPF6 (17% du marché en 2017)
Tinci Materials Technology Co., Ltd.	Chine	Privé			LiPF6 (15% du marché en 2017)
Shenzhen Capchem Technology Co Ltd	Chine	Public			LiPF6 (10% du marché en 2017)
Panax E-tec Co., Ltd	Corée du Sud	Privé			LiPF6 (8% du marché en 2017)
Guotai-Huarong Chemical New Material Co., Ltd	Chine	Privé			LiPF6 (6% du marché en 2017)
Ube Industries, Ltd.	Japon	Public			LiPF6 (5% du marché en 2017)
Shanghai Shanshan Tech Co., Ltd.	Chine	Privé	LCO/NMC/LFP	Graphite	LiPF6 (5% du marché en 2017)
Solvay SA	Belgique	Public			Electrolytes fluorés
Daikin Industries Ltd.	Chine	Public			Electrolytes fluorés
Arkema	France	Public			Electrolytes fluorés
BASF SE	Allemagne	Public			Electrolytes fluorés

Source : Mirova/ BNEF/ (BMO Capital Markets, 2018)

SEPARATEURS

Le marché des séparateurs est en voie de concentration. Si les barrières techniques sont limitées à ce stade, elles sont davantage financières. Par ailleurs, le passage aux batteries solides, qui n'intègrent pas de séparateurs, devrait se faire au détriment de ces acteurs. Toutefois, l'innovation à court terme réside dans la recherche du meilleur compromis sécurité thermique et énergie spécifique en trouvant l'épaisseur la plus fine possible.

Tableau 9: Fabricants d'électrolytes

Entreprises	Pays	Secteur	Cellules & packs de batteries	Séparateur
Celgard, LLC	États-Unis	Chimie		15% du marché en 2017 (acquisition de Asahi Kasei Corporation)
Shanghai Energy New Materials Technology Co., Ltd.	Chine	Chimie		12% du marché en 2017
Toray Battery Separator Film Co., Ltd	Japon	Chimie		7% du marché en 2017 (acquisition des activités de séparateur de LG Chem)
Hunan Zhongli	Chine	Chimie		7% du marché en 2017
SK Innovation Co Ltd	Corée du Sud	Chimie	- NMC : 104 260 MWh(USA, Chine, Hongrie, Corée du Sud) d'ici 2023 - Partenariat : Volkswagen	6% du marché en 2017

Sources: Mirova/ BNEF/ (BMO Capital Markets, 2018)

Constructeurs et équipementiers automobiles

Dans le segment automobile, certaines entreprises se démarquent historiquement plus que d'autres sur la filière électrique, comme Tesla ou BYD. Aujourd'hui, la majorité des constructeurs automobiles investissent et se fixent des objectifs élevés sur les segments des véhicules électrifiés, électriques à batterie ou hybrides rechargeables.

Tableau 10: Constructeurs sur la filière électrique

Entreprises	Pays	Public / privé	Indicateurs économiques / commentaires
Tesla	Etats-Unis	Public	100% véhicules électriques
BYD	Chine	Public	100% véhicules électriques
BMW	Allemagne	Public	Objectif : Proposer 25 modèles électrifiés (12 électriques à batterie) en 2025
Renault	France	Public	Objectif : Proposer 12 modèles électriques en 2022
Nissan	Japon	Public	Objectif : vendre 1 million de véhicules électrifiés par an à partir de 2022
Daimler	Allemagne	Public	Acquisitions et investissements dans le chargement des véhicules électriques et le développement de batteries
Volkswagen	Allemagne	Public	- Objectif : Proposer 80 modèles électrifiés (50 électriques à batterie) en 2025 - Investissement de 50 milliards d'euros dans l'approvisionnement en batteries
PSA	France	Public	Objectif : Proposer une version électrifiée (EV, PHEV) de tous les modèles phares en 2025
GM	Etats-Unis	Public	Objectif : Proposer 20 modèles électrifiés en 2023
Ford	Etats-Unis	Public	Objectif : Proposer 40 modèles électrifiés en 2025
Toyota	Japon	Public	Investissement dans les batteries solides, pionnier sur l'hybride et l'hybride rechargeable

Source : Mirova

Les équipementiers automobiles investissent également pour apporter des solutions dans la propulsion électrique (motorisation, semi-conducteurs, optimisation de l'efficacité). Toutefois, la concurrence et l'avance technologique acquise sur les véhicules traditionnels ne constituent plus un avantage.

La motorisation électrique est souvent internalisée par les équipementiers et constructeurs automobiles, et pose moins de défis techniques. Toutefois, des acteurs se positionnent pour capter de nouveaux marchés. Quelques acteurs industriels, non familiers avec le secteur automobile jusqu'ici, tissent des partenariats pour créer des opportunités de développement, à l'instar de Nidec Motor qui s'est associé à PSA, Toshiba à Ford ou Hitachi à Honda. Dans l'ensemble des transports, d'autres partenariats se sont formés, comme Siemens avec Airbus et Rolls-Royce, pour travailler sur la propulsion électrique dans l'aviation commerciale.

Les technologies de semi-conducteurs de puissance concourent également au développement du véhicule électrique. Les principaux acteurs attendus sont ceux présents dans les filières du Silicon Carbide et du nitrure de gallium. Le segment des semi-conducteurs comprend également plusieurs sous-segments avec des spécificités et des valeurs ajoutées différentes : apport du substrat, conception du produit, processeur, packaging du semi-conducteur et intégration du système d'exploitation. Beaucoup d'entreprises sont présentes à différents niveaux de cette chaîne de valeur, parmi lesquelles peuvent être citées : Infineon, Bosch, Denso, STMicroelectronics, Wolfspeed ou ON Semiconducteurs.

La chaîne des métaux

Les métaux nécessaires à la fabrication des batteries et des véhicules électriques incluent le lithium, le cobalt, le nickel ou encore le cuivre. Le marché du lithium est principalement concentré sur cinq acteurs. Pour les autres métaux, l'extraction et le raffinage est plus distribué, avec pour chacun d'entre eux des grands acteurs dominants.

Tableau 11: Producteurs de métaux

Entreprises	Pays	Public / privé	Indicateurs économiques / commentaires
Lithium			
Albemarle	Etats-Unis	Public	18 % des réserves mondiales en lithium
Jiangxi Ganfeng	Chine	Privé	17 % des réserves mondiales en lithium
SQM	Chili	Public	14 % des réserves mondiales en lithium
Tianqi	Chine	Public	12 % des réserves mondiales en lithium
FMC	Etats-Unis	Public	5 % des réserves mondiales en lithium
Galaxy Resources	Australie	Public	Réserves de ressources plus faibles
Mineral Resources	Australie	Public	Réserves de ressources plus faibles
Neometals	Australie	Public	Réserves de ressources plus faibles
Orocobre	Australie	Public	Réserves de ressources plus faibles
Cobalt			
Glencore	Etats-Unis	Public	Production en 2017 : 27 400 tonnes de cobalt
Freeport Cobalt	Chine	Privé	Production en 2017 : 25 000 tonnes de cobalt
Vale SA	Brésil	Public	Production en 2017 : 5 811 tonnes de cobalt
Jinchuan Group Int. Resources Co. Ltd.	Chine	Public	Production en 2017 : 5 500 tonnes de cobalt
Nornickel	Russie	Public	Production en 2017 : 4 800 tonnes de cobalt
Sumitomo MM	Japon	Public	Production en 2017 : 4 800 tonnes de cobalt
Nickel			
Vale SA	Brésil	Public	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 13%
Norilsk Nickel	Russie	Public	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 10%
Tsingshan Group	Chine	Privé	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 9%
Jinchuan	Chine	Privé	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 7%
Glencore	Suisse	Public	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 7%
Sumitomo MM	Japon	Public	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 5%
Cuivre			
Coldeco	Chili	Privé	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 9%
Freeport-Mcmoran	Etats-Unis	Public	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 9%
BHP Billiton	Australie	Public	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 7%
Glencore	Suisse	Public	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 6%
Southern Copper	Etats-Unis	Public	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 4%
Terres rares			
Molycorp	Pologne	Privé	Terres rares
Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth Hi-Tech Co.	Chine	Privé	Terres rares
Lynas Corporation Limited	Malaisie	Public	Terres rares
China Rare Earth Holdings	Chine	Public	Terres rares
Great Western Mineral Group	Canada	Public	Terres rares
Indian Rare Earths Ltd	Inde	Privé	Terres rares
Chinalco Yunnan Copper Resources Ltd.	Australie	Public	Terres rares
Alkane Resources	Australie	Public	Terres rares
Platine			
Anglo Platinum	Afrique du Sud	Public	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 40%
Impala Platinum	Afrique du Sud	Public	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 25%
Lonmin	Royaume-Uni	Public	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 11%
Norilsk Nickel	Russie	Public	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 11%
Northam Platinum	Afrique du Sud	Public	Part de la production mondiale raffinée (2017) : 4%

Sources : Mirova / (Cobalt Institute, 2017) (5 Top Cobalt-mining Companies, 2018)/ (Norilsk Nickel, 2017) / (BRGM, 2015)

Concernant les véhicules à pile à combustible, il faut ajouter à ces acteurs, les entreprises présentes sur le segment du platine, servant de catalyseur dans les piles à combustible. Au-delà de l'extraction et du traitement, la filière de recyclage est amenée à se développer.

Tableau 12: Entreprises de recyclage des métaux

Entreprises	Pays	Public / privé	Indicateurs économiques / commentaires
Retriev Technologies Inc	Etats-Unis	Privé	Hydrométallurgie : capacité de 4,5 tonnes en 2017 (9 t annoncées)
Accurec	Allemagne	Privé	Pyrométallurgie, hydrométallurgie, collecte : 4 t en 2017 (15 tonnes annoncées)
AkkuSer	Finlande	Privé	Pyrométallurgie, hydrométallurgie, collecte : 1 t en 2017
American Manganese Inc	Canada	Public	Hydrométallurgie : 1 t annoncée
Guangdong Brunp recycling Technology Co., Ltd	Chine	Public	Hydrométallurgie, collecte : 6 t en 2017 (100 annoncées)
BYD	China	Public	Usine de recyclage à Shenzhen
Glencore	Suisse	Public	Pyrométallurgie, hydrométallurgie : 7 t en 2017
Jx Nippon Mining	Japon	Public	Pyrométallurgie : 5 t en 2017
Li-cycle	Canada	Privé	Hydrométallurgie, collecte : 5 t annoncées
Neometals Inc.	Australie	Public	Hydrométallurgie : 4 t annoncées
Redux	Allemagne	Privé	Collecte : 10 t en 2017
Umicore	Belgique	Public	Pyrométallurgie, hydrométallurgie : 7 t en 2017
Valdi/Eramet	France	Public	Pyrométallurgie : 20 t en 2017
Recupyl SAS	France	Privé	Hydrométallurgie : 0,11 t annoncées
Aurubis AG	Allemagne	Public	Recyclage de cuivre
Boliden AB.	Suède	Public	Recyclage de cuivre

Source : Mirova

Infrastructures de charge

Jusqu'à récemment, l'installation d'infrastructures de points de charge était peu rentable compte tenu de la faible proportion de véhicules électriques sur les routes. Aujourd'hui, l'impulsion du secteur automobile vers la filière entraîne un développement de marché conséquent où des acteurs très différents se positionnent : pétroliers, fournisseurs d'électricité, spécialistes de l'infrastructure de charge, investisseurs (cf. [Opérateurs des points de charge](#)).

Tableau 13: Points de charge de véhicules électriques

Entreprises	Pays	Public / privé	Indicateurs économiques / commentaires
Fabrications des points de charge			
Alfen Beheer BV	Pays-Bas	public	Borne de charge domicile / publique
WiTricity Corp	Etats-Unis	privé	Chargement sans fil
QUALCOMM Inc	Etats-Unis	public	Chargement sans fil
Clippercreek Inc	Etats-Unis	privé	Borne de charge domicile / publique
Infineon Technologies AG	Allemagne	public	Microcontrôleur AURIX/ XMC pour charge rapide
Denso Corp	Japon	public	Bornes de charge
Toshiba	Japon	public	Chargement sans fil
Sensata Technologies Holding PLC	Royaume-Uni	public	Composants de bornes
Webasto AG	Allemagne	privé	Borne de charge domicile / publique
Siemens	Allemagne	public	Borne de charge domicile / publique
EVBox (Engie)	Pays-Bas	privé	Borne de charge domicile / publique
Electric Motor Werks Inc	Allemagne	privé	Borne de charge domicile / publique
Broadband TelCom Power Inc	Etats-Unis	privé	Borne de charge domicile / publique
ZTE Corp	Chine	public	Composants borne de charge
DBT SACA	France	public	Borne de charge domicile / publique
ABB Ltd	Suisse	public	Borne de charge domicile / publique
Elix Wireless Inc	Canada	privé	Chargement sans fil
Leviton Manufacturing Co Inc	Etats-Unis	privé	Borne de charge domestique / publique
Hella GmbH & Co KGaA	Allemagne	public	Chargement sans fil
Schneider Electric SE	France	public	Borne de charge domicile / publique
Opération & maintenance des points de charge			
Qingdao TGOOD Electric Co Ltd	Chine	public	Nombre de points de charge : 168 100
State Grid Corp of China	Chine	privé	Nombre de points de charge : 84 900
Star Charge	Chine	privé	Nombre de points de charge : 66 100
New Motion Ltd	Europe	privé	Nombre de points de charge : 64 000 ; acquis par Shell
Xcharge Inc.	Chine	privé	Nombre de points de charge : 45 000
ChargePoint Inc	États-Unis	privé	Nombre de points de charge : 26 000
Shanghai Potevio Co Ltd	Chine	privé	Nombre de points de charge : 21 700
EVBox	Pays-Bas	privé	Nombre de points de charge : 20 000 ; acquis par Engie
Tesla	Etats-Unis	public	Nombre de points de charge : 12 200
Incharge	Suède	privé	Nombre de points de charge : 9 000 ; acquis par Vattenfall AB
Allego BV	Pays-bas	privé	Nombre de points de charge : 8 000 ; acquis par Meridiam
Chargemaster PLC	Royaume-Uni	privé	Nombre de points de charge : 6 500 ; acquis par BP
E.ON SE	Allemagne	Public	Nombre de points de charge : 6 000
Charge & Drive	Finlande	Public	Nombre de points de charge : 4 612 ; acquis par Fortum
Innogy SE	Allemagne	Public	Nombre de points de charge : 4600
Blink Charging Co	États-Unis	Public	Nombre de points de charge : 3 500
EVgo Services LLC	États-Unis	Public	Nombre de points de charge : 2 400
Electric Circuit	États-Unis	Public	Nombre de points de charge : 2 200
Enel SpA	Italie	Public	Nombre de points de charge : 2 000
Tellus Power Inc	États-Unis	Privé	Nombre de points de charge : 1 800
Greenlots Global	Singapour	Privé	Nombre de points de charge : 1 100
Fastned BV	Pays-Bas	Privé	Nombre de points de charge : 500
Izivia (ex Sodetrel)	France	Privé	Nombre de points de charge : 5 000
Systèmes informatiques			
PlugSurfing GmbH	Finlande	Privé	Carte et logiciels de points de charge
Trialog	France	Privé	Carte et logiciels de points de charge
Pod Point Ltd	Royaume-Uni	privé	Carte et logiciels de points de charge
Recargo Inc	États-Unis	Privé	Carte et logiciels de points de charge

Sources : Mirova/ BNEF

VEHICULES A PILE A COMBUSTIBLE

La filière des véhicules à pile à combustible est naissante. Des acteurs sont présents dans la production et distribution de l'hydrogène, mais l'application de l'hydrogène dans les transports est quasi inexistante à ce stade.

Production de l'hydrogène

L'hydrogène est en grande partie produit à partir du reformage de méthane. Dans ce procédé industriel, les grands acteurs sont Air Liquide et Linde. Ce sont ces acteurs qui peuvent développer les filières de biogaz et de capture et stockage de CO₂, nécessaires pour rendre l'hydrogène issu du reformage du méthane plus vertueux pour l'environnement et le climat. Ce sont également sur ces acteurs, ainsi que sur des pétroliers, que reposent les efforts d'investissement requis pour développer les stations d'hydrogène.

La production de l'hydrogène issue de l'électrolyse de l'eau dépend des entreprises proposant des électrolyseurs.

Tableau 14: Fabricants d'électrolyseurs

Entreprises	Pays	Privé Public	Technologie
Electrolyseurs			
AccaGen SA	Suisse	Privé	Alcalin
Acta Spa	Italie	Privé	Alcalin
ELB Elektrolyse Technik	Allemagne	Privé	Alcalin
ErreDue	Italie	Privé	Alcalin
Asahi Kasei Europe	Allemagne	Privé	Alcalin
Hydrogen Pro	Norvège	Privé	Alcalin
Nel	Norvège	Public	Alcalin
Tianjin Mainland Hydrogen Equipment	Chine	Privé	Alcalin
AVL List	Autriche	Privé	Oxyde Solide
Enapter	Allemagne	Privé	Membrane d'échange de proton
Giner Inc	Etats-Unis	Privé	Membrane d'échange de proton
GreenHydrogen.dk ApS	Danemark	Privé	Membrane d'échange de proton
H2 Nitidor	Italie	Privé	Membrane d'échange de proton
H2BZ Wasserstoff und Brennstoffzellen-Initiative	Allemagne	Privé	Membrane d'échange de proton
H2Gen Innovations Inc	France	Public	Membrane d'échange de proton
H-TEC Systems	Allemagne	Privé	Membrane d'échange de proton
Hydrogenics	Canada	Public	Membrane d'échange de proton
iGas Energy	Allemagne	Privé	Membrane d'échange de proton
IHT	Suisse	Privé	Membrane d'échange de proton
ITM Power PLC	Royaume-Uni	Public	Membrane d'échange de proton
McPhy Energy SA	France	Public	Membrane d'échange de proton
Nilsson Energy	Suède	Privé	Membrane d'échange de proton
Rouge H2 Engineering	Autriche	Privé	Membrane d'échange de proton
Siemens	Allemagne	Public	Membrane d'échange de proton

Sources : Mirova/ BNEF

Stockage embarqué de l'hydrogène

Le sous-secteur du stockage embarqué d'hydrogène comprend un nombre limité d'entreprises à ce stade.

Tableau 15: Réservoirs de stockage

Entreprises	Pays	Privé / Public	Segment
Faber	Italie	Privé	Système de stockage pressurisé
Hexagon Composites	Norvège	Public	Système de stockage pressurisé
Hydrogen Power Storage and Solutions	Allemagne	Privé	Système de stockage pressurisé
Hydrogenious Technologies	Allemagne	Privé	Système de stockage pressurisé
NPROXXX Jülich	Allemagne	Privé	Système de stockage pressurisé
Steelhead Composites	Etats-Unis	Privé	Système de stockage pressurisé
Vopak	Pays-bas	Public	Système de stockage pressurisé
Kawazaki	Japon	Public	Système de stockage pressurisé
Faurecia	France	Public	Système de stockage pressurisé
Plastic Omnium	France	Public	Système de stockage pressurisé

Sources : Mirova/ BNEF

Transformation de l'hydrogène en électricité

Ici encore, les expertises sollicitées se trouvent dans le domaine de l'électrochimie. A l'instar des batteries, le secteur de la pile à combustible pourrait connaître des bouleversements technologiques similaires pour rendre la technologie plus mature.

Tableau 16: Fabricants de piles à combustible

Entreprises	Pays	Privé Public	Technologie
Composants pour piles à combustibles			
HyPlat	South Africa	Privé	Assemblage membrane électrodes
WL Gore & Associates Inc	Etats-Unis	Privé	Assemblage membrane électrodes
Borit	Belgium	Privé	Plaques bipolaires
IHI Hauzer Techno Coating	Pays-bas	Privé	Plaques bipolaires
Impact Coatings	Suède	Privé	Plaques bipolaires
Celeroton	Suisse	Privé	Compresseurs d'hydrogène
Howden	Pays-bas	Privé	Compresseurs d'hydrogène
Mehrer Compression	Allemagne	Privé	Compresseurs d'hydrogène
Ventos Compressors	Italie	Privé	Compresseurs d'hydrogène
Takaiski Industry Co	Japon	Privé	Compresseurs d'hydrogène
Johnson Matthey	Royaume-Uni	Public	Catalyseurs
Pressure Tech	Royaume-Uni	Privé	Systèmes de diffusion des gaz
Vairex air systems	Etats-Unis	Privé	Systèmes de diffusion des gaz
Piles à combustibles			
Palcan Power Systems Inc	Canada	Privé	PEM mobile
Plastic Omnium	France	Public	PEM mobile
Plug Power Inc	Etats-Unis	Public	PEM mobile
PowerCell Sweden AB	Suède	Privé	PEM mobile
Refire	Chine	Privé	PEM mobile
Cummins	Etats-Unis	Public	PEM mobile
Efoy Investing AS	Allemagne	Privé	PEM mobile
First Element Fuel	Etats-Unis	Privé	PEM mobile
Proton Motor Fuel Cell	Allemagne	Privé	PEM mobile
Faurecia	France	Public	PEM mobile
Mcpfy	France	Public	PEM
Hydrogenics	Canada	Public	PEM
Horizon	Singapore	Privé	PEM
Ceramic Fuel Cells Ltd	Australie	Privé	PEM
FuelCell Energy Inc	Etats-Unis	Public	PEM
Intelligent Energy Ltd	Royaume-Uni	Privé	PEM
Ballard	Canada	Public	PEM
Nel	Norvège	Public	PEM
N2telligence GmbH	Allemagne	Privé	PEM / Alcalin
AFC Energy	Royaume-Uni	Public	Alcalin
Bloom Energy Corp	Etats-Unis	Privé	SOFC
Bosch	Allemagne	Public	SOFC
Watt Fuel Cell	Etats-Unis	Privé	SOFC

Sources : Mirova/ BNEF

Constructeurs automobiles

Quelques constructeurs sont historiquement présents dans la filière des véhicules à pile à combustible comme Toyota, Honda et Hyundai.

Des équipementiers cherchent également à se positionner, comme Michelin qui s'est associé à Symbio, pour proposer des systèmes de piles à combustible, Faurecia et Plastic Omnium impliqués dans les composants de piles à combustible et réservoirs embarqués. Au-delà de l'automobile, on peut également citer Alstom qui investit en Allemagne sur des locomotives propulsées à l'hydrogène ou encore Safran qui cherche à utiliser cette source d'énergie pour réduire l'impact carbone du secteur aérien.

Conclusion

Le tournant vers l'électrification des transports semble aujourd'hui incontournable. Des innovations sont encore attendues sur le stockage de l'énergie, que ce soit dans les batteries ou sous forme d'hydrogène, pour rendre les filières des véhicules électriques matures. Toutefois, les premières briques semblent bien implantées.

En tant qu'investisseur responsable et étant convaincu que le développement durable est source de performance économique sur le long terme, Mirova souhaite accompagner cette rupture technologique en supportant les acteurs capables de relever les défis technologiques liés à cette transition.

Ce support n'exclut pas l'investissement vers d'autres solutions de transition écologique de transport, comme l'efficacité des véhicules thermiques, qui devraient perdurer durant les cinquante prochaines années, le transfert vers des modes de transport respectueux de l'environnement, mais également les nouvelles solutions de mobilité qui peuvent permettre de réduire la consommation d'énergie du secteur, comme l'autopartage.

Annexes

Annexe I : Données clés et ordres de grandeur

	Véhicule à combustion interne (ICEV)	Véhicule hybride rechargeable (PHEV)	Véhicule électrique à batterie (BEV)	Véhicule à pile à combustible (FCEV)
Bilan carbone sur 180 000 km (incluant le cycle du carburant du puits à la roue et l'ACV du véhicule)	De 43 et 70 teCO₂ o Fabrication du véhicule compris entre 8 et 12 10 teCO ₂ selon les segments o Consommation : en électrique pur, de 19 à 48 kWh aux 100 km selon les modèles et en hybride (batterie vide), de 41 à 80 kWh aux 100 km.	De 19 et 57 teCO₂ o Fabrication du véhicule compris entre 8 et 12 10 teCO ₂ selon les segments o Consommation : en électrique pur, de 19 à 48 kWh aux 100 km selon les modèles et en hybride (batterie vide), de 41 à 80 kWh aux 100 km.	De 13 et 48 teCO₂ o Fabrication du véhicule : compris entre 12 et 19 teCO ₂ selon le segment du véhicule. Ce bilan carbone est conséquent, en grande partie en raison de l'impact carbone de la batterie. La donnée retenue dans cette étude est 170 kgCO ₂ e/kWh de batterie. o Consommation : De 13.5 à 18 kWh aux 100 km selon les modèles	De 17 (électrolyse de l'eau) et 42 teCO₂ (SMR) o Fabrication du véhicule : ~16 teCO ₂ pour un segment D, en grande partie due à la fabrication de la pile à combustible et du réservoir d'hydrogène en PRFC ¹³ o Consommation : ~1kg aux 100 km, ce qui équivaut à 33,33 kWh aux 100 km Le calcul est uniquement fait avec un véhicule de segment D.
Rendement énergétique	~21 % o Production du pétrole : 83 % Valeurs moyennes de pertes de ~7 % et de 8 % liées respectivement à l'extraction de l'hydrocarbure et au raffinage du pétrole o Rendement du véhicule : ~26 % o Rendement moyen du moteur à 30 %	~30 % o Facteur d'utilisation= 0.005*AER+0.4 Selon WLTP avec AER (All Electric Range) : autonomie du véhicule en électrique pur. Pour le calcul du rendement énergétique, nous avons considéré un coefficient à 60 %. o Production de l'énergie (essence et électricité) : 54 % o Rendement du véhicule : 55 % (72 % en mode électrique et 25 % en mode hybride avec un rendement moteur optimisé grâce à la récupération d'énergie permise par l'hybride)	~25 %. o Fabrication de l'électricité : 34 % incluant ~5 % de pertes dues à l'extraction de l'uranium ou à la fabrication des équipements (panneaux solaires, éoliennes, etc.), un rendement moyen de centrales électriques de 38 % et une valeur moyenne de ~5 % de pertes dues à la distribution sur le réseau o Rendement du véhicule : ~72 % incluant un rendement de charge/décharge des batteries de ~90 % et un rendement du moteur électrique compris entre 80 % et 85 %	Entre ~10 % (électrolyse de l'eau) et ~16 % (SMR) o Fabrication de l'hydrogène : de 20 % (électrolyse) à 33 % (SMR) A partir de l'électrolyse de l'eau, il faut 1 L d'eau et 5 kWh d'électricité pour obtenir 1000 L d'H ₂ . L'électrolyse de l'eau a un rendement de 70 %. o Pour le stockage et la compression à 700 bars, le rendement est de ~80 % avec des pertes de l'ordre de 15 % durant la compression. o Rendement du véhicule : ~50 % incluant un rendement du véhicule compris entre 43 % et 60 % avec un rendement de la pile à combustible PEMFC (~60 %) et rendement du moteur électrique (~85 %)
Bilan économique sur 180 000 km d'une berline moyenne	De 57 000 à 66 000 \$ o Coût du véhicule : 35 000 – 45 000 \$ o Coût de la maintenance : 5-15 \$/100 km o Dépréciation : 50 % en 3 ans o Coût moyen de l'essence mondial: 1,09 USD/litre	De 54 000 à 69 000 \$ o Coût du véhicule : 40 000-51 000 \$ o Coût de la maintenance : 5-20 \$/100 km o Dépréciation : 50 % en 3 ans o Coût du carburant : 3 à 6 \$/100 km	De 65 000 à 85 000 \$ o Coût du véhicule : 45 000 – 57 000 \$ o Coût de la maintenance : 3-10 \$/100 km o Dépréciation : 50 % e 3 ans o Coût du carburant : 1,5 à 6,5 \$/100 km	De 98 000 à 136 000 \$ o Coût du véhicule : 68 000-102 000 \$ o Coût de la maintenance : 5-15\$/100 km o Dépréciation : 50 % en 3 ans o Coût du carburant : 9 à 15 \$/100 km.
Données techniques	Consommations et données des véhicules commercialisés en 2017 et 2018	o Capacité de batteries : de 8,8 à 11,6 kWh selon les modèles (technologies Li-Ion ou LiPo) o Autonomie en électrique pur : de 25 à 50 km selon les modèles o Principalement équipés de moteurs thermiques à cycle d'Atkinson ¹⁵	o Capacité de batteries : de 20 à 100 kWh selon les modèles o Autonomie en électrique pur : de 150 à 570 km selon les modèles	o Uniquement des segments D et SUV commercialisés o Compressions de l'hydrogène à 70 MPa o Réservoirs d'hydrogène embarqués : volume compris entre 122 et 156 litres ce qui équivaut à une masse comprise entre 5 à 6,5 kg et à une teneur en énergie comprise entre 171 et 219 kWh selon les modèles, avec une densité de l'hydrogène de 0,04 kg/litres et un pouvoir calorifique inférieur (PCI) de l'hydrogène de 120 MJ/kg

Sources : Mirova / (OECD/IEA, 2015) / (U.S. Department of Energy, 2018)/ (JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration, 2014)/ (GREET, 2017) pour le bilan carbone de la fabrication des véhicules à pile à combustible/ (BP, 2017)/ (IEA, 2015)/ (Zubi, Carvalho, Duflo-Lopez, & Pasaoglu, 2018)/ (Ager-Wick Ellingsen, Singh, & Hammer Strømman, The size and range effect: lifecycle greenhouse gas, 2016)/ (Globalpetrolprices.com, 2019)

¹³ PRFC : polymère renforcé de fibres de carbone

¹⁴ SMR : reformage de méthane

¹⁵ Le cycle d'Atkinson est une variante du cycle classique, appelé « cycle de Beau de Rochas ». Ce type de moteur permet des rendements supérieurs de ~10 %.

Annexe II : Impact carbone des véhicules électriques

L'impact carbone de la fabrication du véhicule électrique est en grande partie généré par la fabrication des batteries. La revue bibliographique sur ce sujet montre que les résultats diffèrent significativement selon l'approche et les hypothèses retenues telle que la quantité d'énergie requise pour produire un kWh de batterie, la part d'électricité utilisée, les lieux de fabrication des différents composants de la batterie, la durée de vie de la batterie ou encore la prise en compte ou non des apports générés par la seconde vie des batteries. Par ailleurs, les volumes de production s'accroissent et les processus de production progressent très rapidement pour soutenir le déploiement de la filière, ce qui permet une baisse rapide des coûts économiques et énergétiques liés à la fabrication des batteries. Ainsi, une donnée approximée aujourd'hui peut s'avérer inexacte dans les cinq prochaines années avec l'amélioration de la maturité technologique et des connaissances sur le sujet. Dans cette étude, l'impact carbone retenu est de 170 gCO₂/kWh, ce qui correspond à une valeur moyenne fréquemment acceptée dans les revues scientifiques et cohérentes avec les analyses en cycle de vie fournies par l'industrie. Ce chiffre peut paraître assez élevé au regard des progrès considérables cités auparavant, toutefois les divergences qui persistent sur cette donnée incitent à être plutôt prudent et conservateur. La production d'une seule batterie est considérée sur l'ensemble du cycle de vie alors qu'il en faudrait peut-être deux. Toutefois, la non-prise en compte des contributions liées au recyclage ou à la deuxième vie de la batterie permet, dans une certaine mesure, de contrebalancer le fait qu'une seule batterie soit considérée.

Annexe III : Rendement énergétique

Les moteurs électriques ont des rendements énergétiques maximaux de l'ordre de 85 %, bien supérieurs à ceux des véhicules à essence (36 %) ou des véhicules diesel (42 %).

Toutefois, pour obtenir des rendements réels, il faut considérer les rendements énergétiques moyens, en cycle mixte, et également intégrer les pertes dues :

- A la production de l'énergie (électricité pour les véhicules électriques à batterie, pétrole pour les véhicules thermiques et hydrogène pour les véhicules à pile à combustible)
- Au fonctionnement du véhicule.

Pour les véhicules électriques à batterie, les pertes dues à la production de l'électricité proviennent des rendements des centrales électriques et des pertes dues à la préparation de l'uranium dans le cas du nucléaire.

Pour les véhicules à pile à combustible, si l'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau, l'énergie primaire est transformée en électricité, puis en hydrogène par l'électrolyseur, puis retransformée en électricité par la pile à combustible. Ces transformations engendrent des pertes. Si l'hydrogène est produit par reformage du gaz, les pertes proviennent de l'extraction de l'hydrocarbure, puis du processus industriel du reformage.

Pour les véhicules thermiques et les véhicules à pile à combustible, propulsés par de l'hydrogène obtenu par reformage du méthane, les pertes dues à la production de l'essence, du diesel ou de l'hydrogène, sont liées à l'extraction de l'hydrocarbure et aux procédés de production (raffinage du pétrole ou reformage du méthane).

Pour les véhicules hybrides rechargeables, il faut déterminer quels sont les usages réels moyens de ce type de véhicule. Les réglementations européennes utilisent un coefficient nommé *utility factor* (cf. [Cycle de vie du vecteur énergétique](#)) définissant le pourcentage de

Électrification des transports Une solution de transition écologique

kilomètres parcourus en électrique pur sur l'ensemble de la durée de vie d'un véhicule. Ici, nous avons pris une valeur moyenne de 60 % pour ce coefficient, réaliste avec les performances des véhicules présents sur le marché en 2018.

S'ajoutent à ces chaînes énergétiques, les pertes dues au transport, au stockage et à la distribution de l'énergie.

Enfin, le fonctionnement du véhicule génère également de nouvelles pertes liées à l'utilisation des auxiliaires électriques à bord, à la transmission dans le cas des véhicules thermiques et à des pertes parasites.

Figure 42 : Chaîne énergétique du véhicule électrique

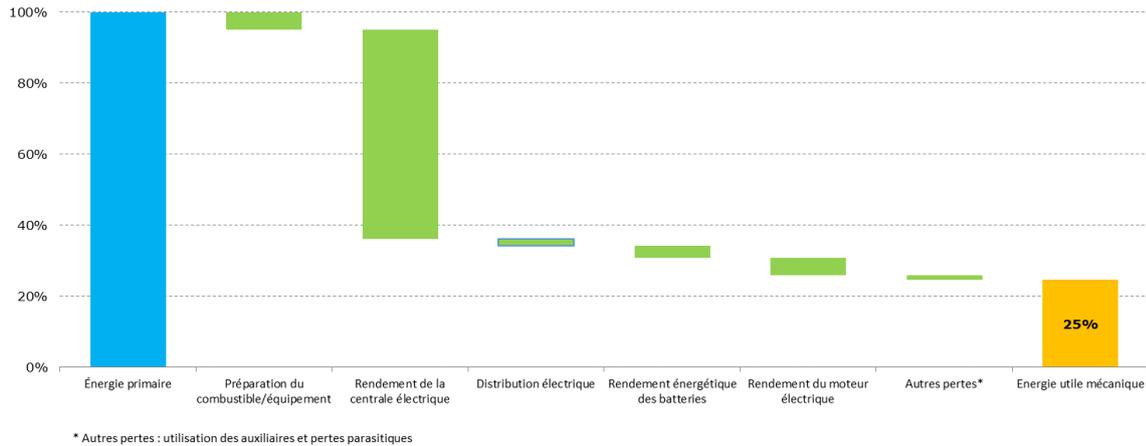


Figure 43 : Chaîne énergétique du véhicule thermique

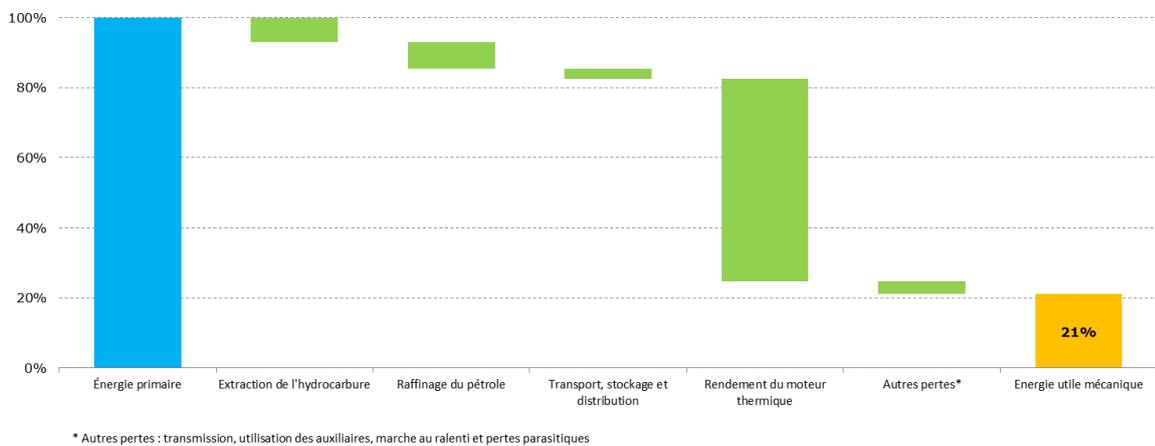


Figure 44 : Chaîne énergétique d'un véhicule hybride rechargeable

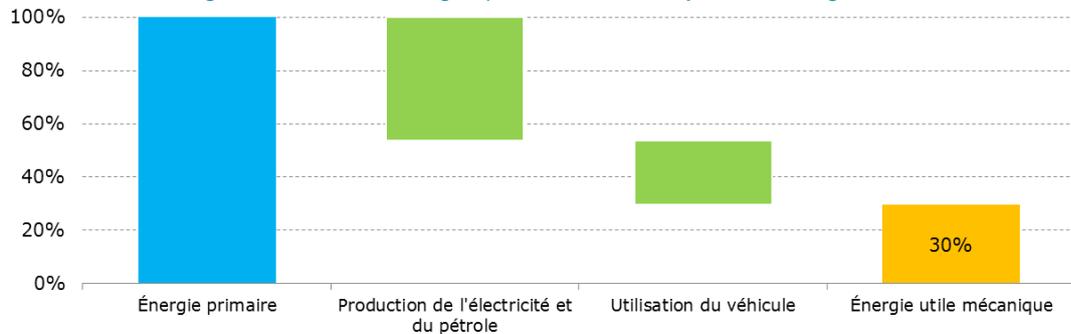


Figure 45 : Chaîne énergétique du véhicule à pile à combustible - production de l'hydrogène par électrolyse

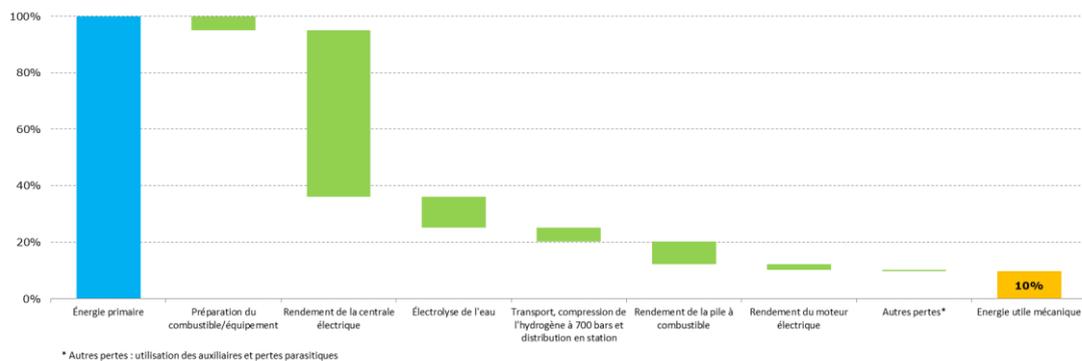
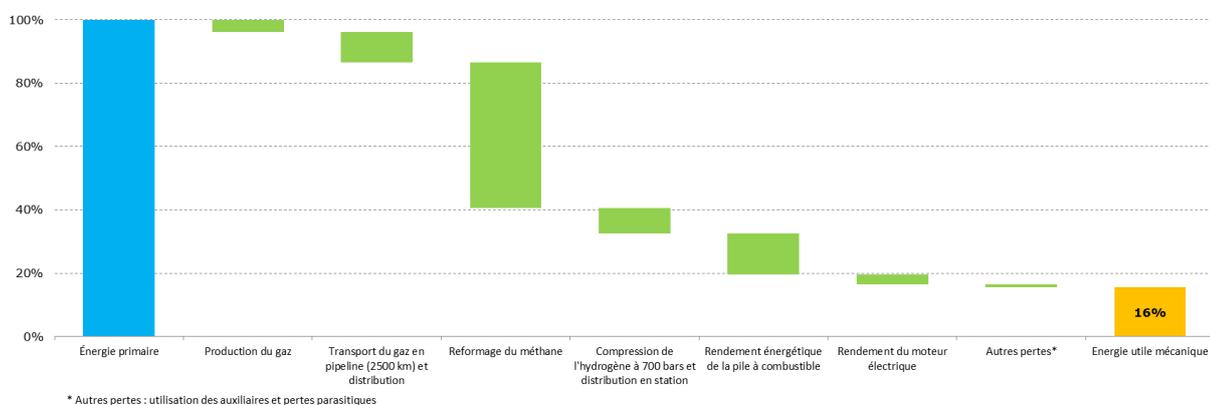


Figure 46 : Chaîne énergétique du véhicule à pile à combustible - production de l'hydrogène par reformage du méthane



Sources : Mirova / (JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration, 2014)/ (U.S. Department of Energy, 2018) pour les pertes énergétiques dus au fonctionnement des véhicules / (IFP Energies Nouvelles, 2018) pour les rendements énergétiques des moteurs / (BP, 2017), (IEA, 2015) et (OECD/IEA, 2015) pour les rendements énergétiques des centrales.

Le véhicule électrique à batterie conserve un rendement énergétique légèrement supérieur à celui des véhicules thermiques. Les véhicules à pile à combustible sont pénalisés en termes de rendement énergétique par la production de l'hydrogène qui implique une double transformation : production d'électricité, puis d'hydrogène dans le cas de l'hydrogène issu d'électrolyse de l'eau ; ou production de gaz, puis d'hydrogène dans le cas de l'hydrogène issu du reformage de gaz.

L'ensemble des données utilisées sont présentes dans [Annexe I : Données clés et ordres de grandeur.](#)

Table des illustrations

Figure 1 : Potentiel d'abattement d'émissions de gaz à effet de serre par solutions	3
Figure 2 : Comparaison du bilan carbone des véhicules électriques et des véhicules thermiques sur 180 000 km – segment berline	4
Figure 3 : Contribution des transports dans les émissions de gaz à effet de serre directes et indirectes (2010)	11
Figure 4 : Potentiel d'abattement comparé des différents moyens de transport	12
Figure 5 : Potentiel d'abattement d'émissions de gaz à effet de serre par solutions	13
Figure 6 : Pénétration de la propulsion électrique dans le transport routier d'ici 2060	14
Figure 7 : Architecture des véhicules électriques	17
Figure 8 : Architecture d'un modèle électrique (Tesla model S 100)	19
Figure 9 : Schéma d'une cellule de batterie lithium-ion	19
Figure 10 : Processus de production d'une batterie lithium-ion	21
Figure 11 : Prix actuel et estimé d'un véhicule électrique moyen	22
Figure 12 : Évolution du coût de la batterie lithium-ion	23
Figure 13 : Décomposition du coût d'une batterie NCA – au niveau de la batterie	23
Figure 14 : Décomposition du coût d'une batterie NCA – au niveau de la cellule	23
Figure 15 : Évolution du prix des matières premières utilisées dans les cathodes	24
Figure 16 : Composition des technologies de batteries (kWh)	24
Figure 17 : Évolutions des technologies de batteries	27
Figure 18 : Synthèse des technologies de batteries existantes et futures	28
Figure 19 : Étapes de la source d'énergie primaire à l'électricité utilisée dans le véhicule à pile à combustible	30
Figure 20 : Schéma des cellules d'un électrolyseur et d'une pile à combustible	32
Figure 21 : Décomposition des coûts d'un véhicule à pile à combustible – type berline	33
Figure 22 : Décomposition des coûts de production d'un kg d'hydrogène issu de l'électrolyse de l'eau	33
Figure 23 : Schéma simplifié d'un système de pile à combustible	34
Figure 24 : Décomposition du coût d'un système pile à combustible – hors réservoir	34
Figure 25 : Prix actuel et estimé d'un véhicule à pile à combustible de type berline familiale	36
Figure 26: Solutions de chargement	42
Figure 27 : Points de charge cumulés par type au niveau mondial	43
Figure 28 : Coûts de stations de recharge dans l'Union Européenne	44
Figure 29 : Chaîne de valeur de l'infrastructure électrique	45

Figure 30 : Structure d'un véhicule hybride rechargeable.....	49
Figure 31 : Coût total de possession actuel des véhicules électriques et thermiques de type berline sur 180 000 km	51
Figure 32 : Bilan carbone d'une citadine par type de propulsion sur l'ensemble du cycle de vie (180 000 km).....	57
Figure 33 : Bilan carbone d'un véhicule compact par type de propulsion sur l'ensemble du cycle de vie (180 000 km)	57
Figure 34 : Bilan carbone d'une berline par type de propulsion sur l'ensemble du cycle de vie (180 000 km).....	58
Figure 35 : Bilan carbone d'un véhicule de luxe par type de propulsion sur l'ensemble du cycle de vie (180 000 km)	58
Figure 36 : Variation du contenu en métaux abondants des véhicules électriques par rapport aux véhicules thermiques – pour les métaux dont les proportions évoluent significativement	59
Figure 37 : Variation du contenu en métaux critiques des véhicules électriques par rapport à un véhicule thermique.....	62
Figure 38 : Présence des métaux critiques dans un véhicule électrique à batterie	63
Figure 39 : Processus de recyclage.....	68
Figure 40 : Évolution des ventes annuelles de véhicules particuliers	70
Figure 41 : Évolution du parc de véhicules en circulation	70
Figure 42 : Chaîne énergétique du véhicule électrique.....	86
Figure 43 : Chaîne énergétique du véhicule thermique	86
Figure 44 : Chaîne énergétique d'un véhicule hybride rechargeable.....	86
Figure 45 : Chaîne énergétique du véhicule à pile à combustible - production de l'hydrogène par électrolyse	87
Figure 46 : Chaîne énergétique du véhicule à pile à combustible - production de l'hydrogène par reformage du méthane	87

Bibliographie

- Ager-Wick Ellingsen, L., Singh, B., & Hammer Strømman, A. (2016, mai 6). *The size and range effect: lifecycle greenhouse gas*. Retrieved from IOP Science: http://iopscience.iop.org/1748-9326/11/5/054010/media/erl054010_suppdata.pdf
- Ager-Wick Ellingsen, L., Singh, B., & Hammer Strømman, A. (2016, mai 6). *The size and range effect: lifecycle greenhouse gas*. Retrieved from IOP Science: http://iopscience.iop.org/1748-9326/11/5/054010/media/erl054010_suppdata.pdf
- 5 Top Cobalt-mining Companies. (2018, 07 18). Retrieved from Investingnews.com: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/battery-metals-investing/cobalt-investing/top-cobalt-producing-companies/>
- ACEM. (2018, 08 10). *Motorcycle registrations in the European Union were up 7.2% during the first half of 2018*. Retrieved from <https://acem.eu/item/541-motorcycle-registrations-in-the-eu-up-by-7-1-during-the-first-half-of-2018>
- Amnesty International. (2017). *Time to Recharge*. Retrieved from <https://www.amnesty.org/download/Documents/AFR6273952017ENGLISH.PDF>
- Azzaro-Pantel, C. (2018). *Hydrogen Supply Chain: Design, Deployment and Operation*. Academic Press.
- Battery University. (2018, mars 28). *How does cobalt work Li-ion?* Retrieved from https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_310_cobalt
- Berckmans, G., Vanhaverbeke, L., Messagie, M., Smekens, J., & Omar, N. (2017, septembre 1). *Cost projection of state of the art lithium-ion batteries for electric vehicles up to 2030*. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/9/1314/pdf>
- BMO Capital Markets. (2018, février 20). *The Lithium-Ion battery and EV market: The Science behind what you can't see*. Retrieved from [http://www.fullertreacymoney.com/system/data/files/PDFs/2018/February/22nd/BMO_Lithium_Ion_Battery_EV_Mkt_\(20_Feb_2018\).pdf](http://www.fullertreacymoney.com/system/data/files/PDFs/2018/February/22nd/BMO_Lithium_Ion_Battery_EV_Mkt_(20_Feb_2018).pdf)
- BNEF. (2018, 08 30). *Cumulative Global EV Sales Hit 4 Million*. Retrieved from BNEF: <https://about.bnef.com/blog/cumulative-global-ev-sales-hit-4-million/>
- BNEF. (2018). *Long-Term Electric Vehicle Outlook 2018*.
- BP . (2017). *BP Statistical Review of World Energy*. Retrieved from <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html>
- BRGM. (2015, novembre). *Panorama 2014 du marché des terres rares*. Retrieved from http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Panoramas_Metaux_Strateg/rp-65330-fr_labbe-final_160119.pdf
- BRGM. (2015). *Panorama 2014 du marché des Terres Rares*. Retrieved from http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Panoramas_Metaux_Strateg/rp-65330-fr_labbe-final_160119.pdf
- Carbone 4. (2018, Septembre 3). *La France amorce le virage vers le véhicule électrique : et si nous étions sur la bonne voie ?* . Retrieved from <http://www.carbone4.com/vehicule-electrique/>
- Cobalt Institute. (2017). *Cobalt Production Statistics*. Retrieved from <https://www.cobaltinstitute.org/statistics.html>

- Commission Européenne. (2015). *Accord de Paris*. Retrieved from Action pour le climat: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_fr
- Commission Européenne. (2017, Septembre 13). *Communication de la commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité Économique et Social Européen et au Comité des Régions relative à la liste 2017 des matières premières critiques pour l'UE*. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0490&from=EN>
- Commission européenne. (2018). *Clean Power for Transport Infrastructure Deployment, Final Report*.
- Dougher, C. (2018, avril 23). *Breaking down the lithium-ion cell manufacturing supply chain in the U.S. to identify key barriers to growth*. Retrieved from <https://dukespace.lib.duke.edu/dspace/bitstream/handle/10161/16600/US%20Lithium%20Ion%20Cell%20Manufacturing%20Supply%20Chain.pdf?sequence=1>
- EIA. (2013). *Today in Energy*. Retrieved from <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=13431>
- EU WLTP. (2014, 06 24). *Analysis of WLTP European utility factor for OVC-HEVs*. Retrieved from file:///C:/Users/eostiari/Downloads/WLTP-SG-EV-05-09_ACEA%20EUROPEAN%20UTILITY%20FACTOR.pdf
- Fishman, T., Myers, R., Rios, O., & Graedel, T. (2018, 01 25). *Implications of emerging vehicle technologies on critical materials supply and demand in the United States - Supporting Information*. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2079-9276/7/1/9/pdf>
- Globalpetrolprices.com. (2019, 01 14). *Prix de l'essence*. Retrieved from https://fr.globalpetrolprices.com/gasoline_prices/
- GREET. (2017). Retrieved from <http://www.lifecycleassociates.com/lca-tools/greet-model/>
- Hawkins, T., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Stromman, A. (2012, Octobre 4). Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, pp. 158-160. doi:10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x
- Hawkins, T., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Stromman, A. (2013, February). Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, pp. 53-64. doi:10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x
- ICCT. (2018). *Beyond Road Vehicles: Survey of zero-emission technology options across the transport sector*.
- ICCT. (2018). *Electric vehicle capitals: Accelerating the global transition to electric drive*. The International Council on Clean Transportation. Retrieved from https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/EV_Capitals_2018_final_20181029.pdf
- IEA. (2015). *Statistics*. Retrieved from <http://www.iea.org/statistics/?country=EU28&year=2015&category=Key%20indicators&indicator=ElecGenByFuel&mode=chart&categoryBrowse=false&dataTable=ELCTRICITYANDHEAT&showDataTable=true>
- IEA. (2015). *Technology Roadmap. Hydrogen and Fuel Cells*.
- IEA. (2017). *Energy Technology Perspectives 2017*.
- IEA. (2018). *Global Electric Vehicle Outlook 2018*. https://webstore.iea.org/download/direct/1045?fileName=Global_EV_Outlook_2018.pdf.

- IEA. (2018). *Global Electric Vehicle Outlook 2018*.
- IEA. (2018). *Global EV Outlook 2018*.
- IEA Energy Efficiency Series. (2011). *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*.
- IFP Energies Nouvelles. (2018). *Les moteurs conventionnels*. Retrieved from <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Les-cles-pour-comprendre/Automobile-et-carburants/Les-moteurs-conventionnels>
- IPCC. (2014). Retrieved from Climate Change Report: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014 - Synthesis Report*. Retrieved from http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
- IPCC. (2014). *Summary for policymakers*. Retrieved from http://report.mitigation2014.org/spm/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers_approved.pdf
- IPCC. (2014). *Transport*. Retrieved from http://report.mitigation2014.org/report/ipcc_wg3_ar5_chapter8.pdf
- IPCC. (2014). *Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf
- IPCC. (2018). *Special Report - Global Warming of 1.5 °C*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- IPCC. (n.d.). *Methodology*. Retrieved from http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Annex_II.pdf
- JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration. (2014). *"Well-to-Tank Report" Version 4.a*. Retrieved from <https://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/downloads>
- LobbyFacts. (2016, 12 31). *Statistics*. Retrieved 03 2017, 2017, from <https://lobbyfacts.eu/reports/lobby-costs/all/0/2/2/2/21/0/2016-12-31>
- Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. (2015, septembre). *Filière Hydrogène-énergie*. Retrieved from https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/Rapports/2016_05_03_Filiere_hydrogene_energie.pdf
- Mirova. (2012, novembre 22). *Le véhicule électrique : sur les rails ?* Retrieved from http://www.mirova.com/content/documents/mirova/publications/vehicules_electriques.pdf
- Mirova. (2013, 12 1). *Allègement : les acteurs, les enjeux et les clés pour dégager des gains potentiels*. Retrieved from http://www.mirova.com/Content/Documents/Mirova/publications/VF/CPSL/MirovaCambridge_Mobilit%C3%A9FR.pdf
- Mirova. (2013, Décembre 1). *Allègement : les acteurs, les enjeux et les clés pour dégager les gains potentiels*. Retrieved from http://www.mirova.com/Content/Documents/Mirova/publications/VF/CPSL/MirovaCambridge_Mobilit%C3%A9FR.pdf

- Mirova. (2018, mars). *Mobilité : constructeurs et équipementiers*. Retrieved from <http://www.mirova.com/Content/Documents/Mirova/publications/VF/DocRecherche/MobiliteConstructeursEtEquipementiers2018.pdf>
- Netherlands Environmental Assessment Agency - Hyde Database. (2016). *Basic Driving Factors > Population*. Retrieved from <https://themasites.pbl.nl/tridion/en/themasites/hyde/basicdrivingfactors/population/index-2.html>
- Norilsk Nickel. (2017). *Annual Report 2017*. Retrieved from <https://ar2017.nornickel.com/metals-market/copper>
- Nussbaumer, Y. (2014, décembre 22). *Exclusif – Les secrets de la fabrication d’une voiture électrique*. Retrieved from <https://www.automobile-propre.com/nissan-fabrication-voiture-electrique/>
- OECD / IEA. (2015). *Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells*. Retrieved from <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>
- OECD. (2011). *Water: The environmental outlook by 2050*. Retrieved from <https://www.oecd.org/env/resources/49006778.pdf>
- OECD/IEA. (2015). *Technology roadmap : Hydrogen and Fuel Cells*. Retrieved from <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>
- OECD/IEA. (2015). *Technology Roadmap, Hydrogen and Fuel Cells*. Retrieved from <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>
- OECD/IEA. (2017). *ETP 2017*. Retrieved from <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC>
- OECD/IEA. (2017). *World Energy Outlook*. Retrieved from <https://www.iea.org/weo2018/>
- OMS. (2018, 05 2). *La pollution de l'air tue 7 millions de personnes par an dans le monde*. Retrieved from who.int: <http://www.who.int/fr/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
- Our World in Data. (2017). *World Population Growth*. Retrieved from <https://ourworldindata.org/world-population-growth>
- Patry, G. (2015, mars 7). *Clés de progrès technico-économiques des batteries lithium-ion pour la traction automobile*. Retrieved from <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01127569/document>
- Pitron, G. (2018). *La guerre des métaux rares*. Paris: Les Liens qui Libèrent.
- Spöttle, M. J. (2018). *Research for TRAN Committee - Charging infrastructure for electric road vehicles*. European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels, Brussels. Retrieved from [http://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?reference=IPOL_STU\(2018\)617470](http://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?reference=IPOL_STU(2018)617470)
- The Wall Street Journal. (2018, Septembre 21). *China's Giant Market for Really Tiny Cars*. *The Wall Street Journal*. Retrieved from <https://www.wsj.com/articles/chinas-giant-market-for-tiny-cars-1537538585>
- Thompson, S., James, B. D., Huya-Kouadio, J., Houchins, C., DeSantis, D., Ahluwalia, R., . . . Papageorgopoulos, D. (2018, Septembre 30). *Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis*. Retrieved from

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775318308255?via%3Dihub>

- U.S. Department of Energy. (2016, Avril). *Comparison of Fuel Cell Technologies*. Retrieved from https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/fcto_fuel_cells_comparison_ch_art_apr2016.pdf
- U.S. Department of Energy. (2018). *Where the Energy Goes: Electric Cars*. Retrieved from <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv-ev.shtml>
- Ulvestad, A. (2018, 03 12). *A Brief Review of Current Lithium Ion Battery Technology and Potential Solid State Battery Technologies*. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1803.04317>
- UN. (2014). *World Urbanization Prospects*. Retrieved from <https://esa.un.org/unpd/wup/Publications/Files/WUP2014-Highlights.pdf>
- UN. (2015). *World Population Prospects*. Retrieved from https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/Key_Findings_WPP_2015.pdf
- UNDP. (2015). *Human Development Report*. Retrieved 2017, from <http://report.hdr.undp.org/>
- UNEP. (2008). *Vital Water Graphics*. Retrieved from <http://www.unep.org/dewa/vitalwater/index.html>
- UNEP. (2011). *Recycling rates of Metals*. Retrieved from http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8702/-Recycling%20rates%20of%20metals%3a%20A%20status%20report-2011Recycling_Rates.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- UNEP. (2016). *Emissions Gap Report*. Retrieved from <http://web.unep.org/emissionsgap/>
- United Nations - DESA / Population Division. (2017). *World Population Prospects 2017*. Retrieved from <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>
- United Nations. (2017). *Sustainable development goals 15: biodiversity*. Retrieved from <http://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/biodiversity/>
- US Department of Energy. (2018, Novembre 05). *Fuel Cell Technologies*. Retrieved from Fuel Cell Technologies Office, US Department of Energy: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/fcto_fuel_cells_comparison_ch_art_apr2016.pdf
- US DOE. (2018, Octobre 09). *DOE Technical Targets for Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Vehicles*. Retrieved from [energy.gov: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-onboard-hydrogen-storage-light-duty-vehicles](https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-onboard-hydrogen-storage-light-duty-vehicles)
- US DOE. (2018, Octobre 08). *Parts of a Fuel Cell*. Retrieved from [energy.gov: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/parts-fuel-cell](https://www.energy.gov/eere/fuelcells/parts-fuel-cell)
- USGS. (2018). *Mineral Commodities Summaries 2018*. Retrieved from <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2018/mcs2018.pdf>
- WID. (2018). *World Income Database*. Retrieved from <https://wid.world/>
- World Bank. (2018). *World Development Indicators*. Retrieved from <https://datacatalog.worldbank.org>
- World Economic Forum. (2016). *Global Risk Report*. Retrieved from http://www3.weforum.org/docs/GRR/WEF_GRR16.pdf

- WRI. (2005). *Navigating the Numbers*. Retrieved from http://pdf.wri.org/navigating_numbers.pdf
- Yano, J., Muroi, T., & Sakai, S.-i. (2015, février 19). *Rare earth element recovery potentials from end-of-life hybrid electric vehicle components in 2010–2030*. doi:<https://doi.org/10.1007/s10163-015-0360-4>
- Zubi, G., Carvalho, M., Dufo-Lopez, R., & Pasaoglu, G. (2018, Juin). *The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives*. Retrieved from Research Gate: https://www.researchgate.net/profile/Ghassan_Zubi/publication/325502592_The_lithium-ion_battery_State_of_the_art_and_future_perspectives/links/5b13eddf0f7e9b4981075e95/The-lithium-ion-battery-State-of-the-art-and-future-perspectives.pdf?origin=publication

Mentions légales

