

LE VÉHICULE ÉLECTRIFIÉ, UNE SOLUTION D'AVENIR POUR L'AUTOMOBILE ?

FABRICE LE BERR⁽¹⁾, ANTHONY JUTON⁽²⁾

⁽¹⁾ Chef du département Systèmes électrifiés, IFPEN, fabrice.le-berr@ifpen.fr

⁽²⁾ professeur agrégé de physique appliquée, ENS Paris Saclay, anthony.juton@ens-paris-saclay.fr

Résumé : Fin 2018, plus de 5% des véhicules vendus dans le monde étaient électrifiés (véhicules électriques ou hybrides) et l'électrification des véhicules particuliers, ainsi que les fonctions d'autonomie partielle ou complète, sont l'objet de la majorité des nombreuses innovations des constructeurs automobiles. Rarement l'histoire aura vu une filière industrielle effectuer une mutation aussi rapide, d'une prédominance mécanique et thermique à une importance majeure donnée au génie électrique et à l'informatique embarquée. Quelques jours avant que la capitalisation boursière de Tesla ne dépasse celle de Volkswagen, le journal *Le Monde* titrait *Il ne faudrait pas que Tesla soit à Volkswagen ce qu'Apple a été à Nokia* **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** un article sur les transformations en cours dans l'automobile.

Accompagnant cette mutation des compétences nécessaires dans l'industrie automobile, la revue 3EI propose un dossier sur 2 numéros pour faire un état de l'art des technologies des véhicules électrifiés et des innovations à venir. Y seront approfondis ce trimestre les motorisations, les batteries, les chargeurs puis le trimestre prochain les impacts sur le réseau électrique, la connexion véhicule-réseau (V2G : Véhicules To Grid), la recharge sans contact, les perspectives de l'hydrogène, de nouvelles architectures de machines pour finir par quelques applications pédagogiques.

Ce premier article vise à introduire le sujet en l'ancrant dans une perspective économique et écologique s'appuyant sur des études scientifiques solides, pour montrer la pertinence de la filière électrique pour contribuer à répondre à l'enjeu environnemental de la décennie qui s'ouvre. L'aspect social (possession/location du véhicule, auto-partage, rejet urbain de l'automobile au profit des mobilités douces), bien qu'intéressant n'est pas traité ici.

1. Le marché du véhicule électrique en 2019

En France, en Europe, comme en Chine ou aux Etats-Unis, plusieurs facteurs influencent le marché des véhicules électriques :

- La réglementation dans le centre des grandes agglomérations. Parmi de nombreux exemples notons « Copenhague zéro émission en 2030 » ou Paris « interdite au diesel en 2024 » et dès aujourd'hui autorisée sans condition d'immatriculation uniquement aux véhicules zéro émission les jours de forte pollution.
- Les aides publiques à l'achat de véhicules mais aussi à l'installation de bornes de recharge.
- La possibilité de disposer d'une prise pour les recharges quotidiennes (Installation d'un chargeur dans les habitats collectifs ou dans les entreprises, présence de chargeurs urbains pour les personnes ne disposant pas de parking...)
- L'évolution de l'image associée à la voiture. Les critères conventionnels de puissance, vitesse, taille et poids sont antagonistes au développement durable.
- L'acceptation d'une évolution de l'usage : temps de charge augmenté pour les longs trajets

exceptionnels et adaptation du moment de la charge à la disponibilité du réseau.

- Les normes anti-pollution sur les constructeurs automobiles, (moins de 95g CO₂/km en moyenne sur les véhicules en Europe et interdiction prévue de la vente de véhicules à moteur thermique en 2040 en France). D'autres pays (Chine, Etats-Unis) sont sur des trajectoires similaires.
- Les évolutions techniques (capacité et coût des batteries notamment, durée de la charge) et logistiques (densité de chargeurs rapides sur le territoire),
- L'offre proposée (véhicules attractifs, adaptés aux usages et abordables).

En 2018, dans le monde, le marché des véhicules particuliers était réparti de la manière suivante [1] :

- véhicules hybrides non rechargeable (HEV) 2,5 %
- véhicules à batterie électrique (BEV) 2,1 %
- véhicules hybrides rechargeable (PHEV) 0,7 %
- véhicules à pile à combustible (anecdotique, 3500 véhicules vendus en 2018)
- véhicules thermiques 84,7 %

On compte actuellement environ cinq millions de véhicules électriques (VE) en circulation dans le monde, soit environ 0,5 % du parc total de véhicules légers. Plus des deux tiers des VE sont 100 % électriques (BEV). La Chine est de loin le premier marché du VE avec plus de 2 millions de véhicules en circulation, soit le double de l'Europe ou des États-Unis.

En Chine, les constructeurs (Geely, Chery, BAIC,...) proposent de nombreux modèles. 40 % des

modèles vendus en 2018 étaient chinois. 3,7 % des ventes sont des véhicules électriques à batterie, grâce à un fort soutien de l'état (subventions, barrières douanière) qui voit dans la jeune filière électrique une possibilité pour l'industrie chinoise de faire jeu égal avec les constructeurs européens.

En Europe, la Norvège se distingue avec 40 % des ventes concernant les véhicules à batterie. Sur l'ensemble du continent, les 360 000 BEV représentent 2,5 % du marché, en hausse de 33 %. La France est le 4^{ème} marché avec 61000 véhicules BEV vendus.

Aux Etats-Unis, la filière BEV (2,1% des ventes) est essentiellement tirée par Tesla.

Tous les scénarios montrent une croissance des ventes de véhicules électriques. Ils envisagent une pénétration de 10 % à 30 % de BEV dans le parc automobile en 2030. Voici les projections pour 2020 et 2035 de la plateforme de la filière automobile (association rassemblant les acteurs français de l'industrie automobile) :

	2020	2035
Véhicules hybrides	10,9	28,9
Véhicules hybrides rechargeables	6	20,4
Véhicules électriques	7,2	30,5
Véhicules essence	34,3	14,7
Véhicules diesel	41,7	5,6

Figure 1 : Répartition des ventes de véhicules légers neufs par mode de chaîne de traction en France. Source : Plateforme de la filière automobile

Notons qu'un développement important du parc électrique est coûteux pour l'état, d'une part sur les premières années à cause des subventions à l'achat de véhicules et au déploiement de l'infrastructure de charge mais aussi, plus durablement, parce qu'il diminue la consommation de carburant à l'origine de 5 % de ses revenus (35 Mds d'euros en 2018 de recettes fiscales sur les produits pétroliers).

Notons également qu'un marché de l'occasion commence à apparaître, porté par les longues garanties constructeurs sur les batteries (jusqu'à 160 000 km).

2. L'impact environnemental du véhicule électrique est-il réellement positif ?

Aspect majeur du développement des véhicules électriques, l'impact environnemental de ces voitures électrifiées fait débat. Tentons d'apporter quelques éléments scientifiques à ce débat. Cette partie, comme la suivante, s'appuie essentiellement sur l'« Étude Économique, Énergétique et Environnementale pour les technologies du Transport routier français » (E4T) [2] réalisée par l'IFPEN en partenariat avec l'ADEME.

La COP21 a fixé des objectifs ambitieux en termes de réduction des gaz à effet de serre. L'Europe s'engage actuellement vers la neutralité carbone pour 2050. En Europe, les transports sont avec 27 % le premier poste d'émissions de gaz à effet de serre et les voitures particulières représentent 30 % de ce total, les véhicules utilitaires 15 %, les bus 2 %.

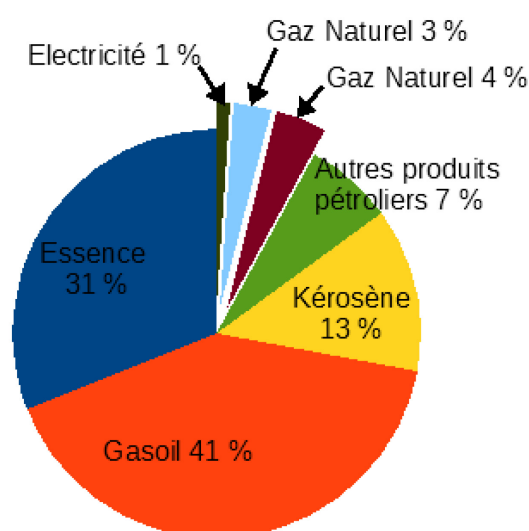


Figure 2: Mix énergétique mondial du secteur des transports en 2012

En France, la production de l'électricité est massivement décarbonée. En Europe la production d'électricité suit cette voie, doucement, par l'introduction d'énergie renouvelable (35 % de la production d'électricité en Allemagne en 2018, 33 % en Espagne) et la fermeture de centrale à charbon.

Ajoutons à cet impact sur le climat, l'aspiration des citoyens pour une meilleure qualité de l'air en ville (limitation des émissions de polluants atmosphériques comme les NOx et les particules fines) et la nécessaire diminution de la dépendance de la France aux pays exportateurs de pétrole (tarissement de la ressource, instabilité des cours, indépendance géopolitique face à des états producteurs peu démocratiques).

L'approche d'analyse de cycle de vie (ACV) retenue par l'étude E4T intègre, dans ses bilans, la production de l'énergie (approche « du puits au réservoir ») mais aussi la fabrication du véhicule (approche « du berceau à la tombe »), ce qui permet d'obtenir des bilans ACV complets et consistants. La démarche est minutieusement détaillée dans l'étude.

Deux années sont considérées, 2018 et 2030. Dans cet intervalle temporel, l'étude prend en compte les améliorations prévues sur les rendements des moteurs et les densités de puissance des batteries notamment.

Plusieurs catégories de véhicules ont été prises en compte. Un usage représentatif de chaque catégorie de véhicule a été retenu, par exemple :

- 10 ans de durée de vie et 12 000 km/an pour les véhicules urbains, avec des parcours types. Les usages exceptionnels, comme les longs trajets de vacances ont été exclus de cette étude,
- 12 ans de durée de vie et 40 000 km/an pour les bus, essentiellement en ville.

Concernant le mix énergétique, l'étude se focalise sur la France et son mix spécifique, très fortement décarboné.

L'étude traite 3 types de véhicules particuliers : les petits véhicules urbains (catégorie A), les véhicules

cœur de gamme (catégorie C) et les véhicules haut de gamme (catégorie D).

2.1. Véhicules urbains

Pour les véhicules urbains, 4 véhicules sont comparés :

- véhicule à essence (4L/100km en cycle normalisé en 2030)
- véhicule à hybridation légère (« mild hybrid » : hybridation 48V permettant un soutien du moteur thermique pour les phases d'accélération mais aussi la récupération d'une partie de l'énergie au freinage, 3L/100km en cycle normalisé en 2030)
- véhicule hybride rechargeable (50 km d'autonomie en électrique).
- véhicule à batterie seule (200 km d'autonomie ; 10kWh/100km en 2030)

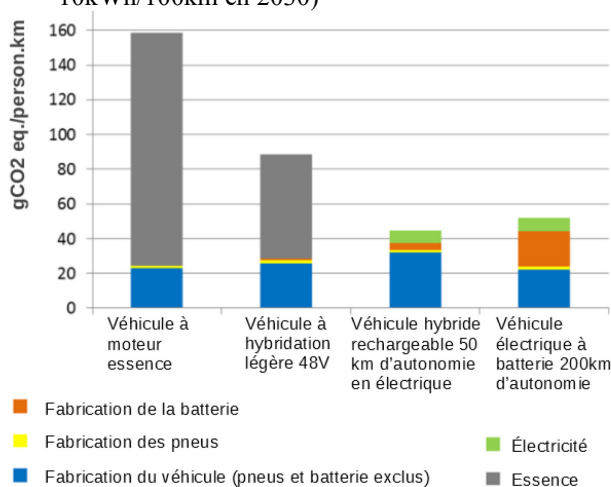


Figure 3: Impact sur le changement climatique d'une personne utilisant son véhicule de segment A en 2030 en usage urbain [2]

Le bilan ressort comme favorable aux véhicules électrifiés à batterie, d'autant plus si on prend en compte une autonomie limitée.

Finalement, et compte tenu des évolutions attendues sur le fonctionnement des centres villes (péages ou interdiction aux véhicules polluants, facilités de stationnement pour le véhicule électrique), il semble que l'avenir du petit véhicule urbain soit promis au véhicule électrifié.

Notons que la tendance actuelle à accroître la taille de la batterie pour accroître l'autonomie du véhicule électrique, pour quelques longs trajets annuels, détériore nettement le bilan carbone du véhicule.

2.2. Véhicules cœur de gamme et haut de gamme

Pour les véhicules de cœur de gamme familiaux et les véhicules haut de gamme, 9 types de véhicules ont été étudiés. Notons qu'à partir de 2021, les véhicules de taille moyenne ou grosses non électrifiés sont bien au-delà de la norme moyenne (pour l'ensemble de la gamme) des 95g CO₂/km.

De plus, pour ce type de véhicules se pose le problème de l'autonomie pour des trajets plus

importants qui demandent une batterie plus grosse ou un prolongateur d'autonomie.

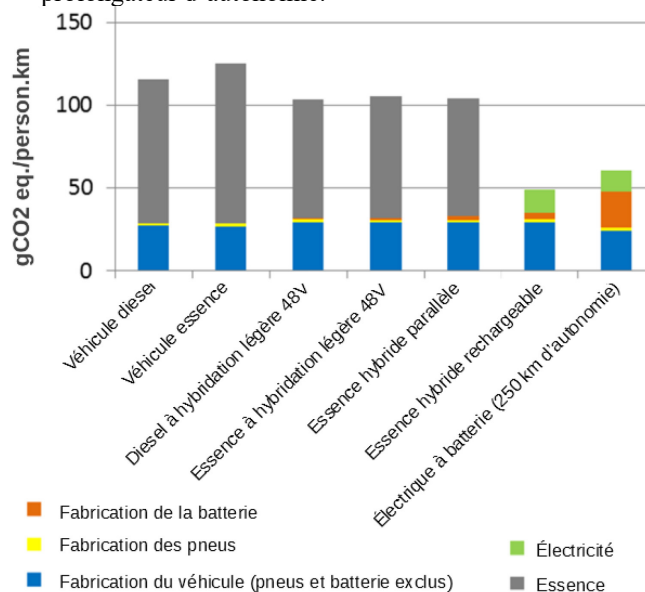


Figure 4: Impact sur le changement climatique d'une personne utilisant son véhicule de segment C en 2030 sur le cycle WLTC [2]

2 solutions ressortent de l'étude (pour les véhicules cœur de gamme comme haut de gamme) comme étant les plus écologiques et permettant de plus de longs trajets tout en gardant une batterie de taille raisonnable :

- L'hybride rechargeable PHEV avec un moteur thermique, un petit moteur électrique et une batterie d'autonomie 50 km (qui correspond aux 10 kWh de batterie installés sur ce type de véhicule),
- Le véhicule électrique à batterie moyenne (30 kWh, autonomie 250 km) avec un petit groupe thermique prolongateur d'autonomie.

Notons que la tendance actuelle à l'augmentation de la taille des batteries des véhicules électriques (50 kWh sur les citadines, 80 kWh sur les haut-de-gamme) ne correspond pas à ce que préconiserait l'étude, et ceci afin de limiter l'impact environnemental et économique des véhicules électrifiés. Le prolongateur d'autonomie interne (Opel Ampera, BMW i3) est pour l'instant abandonné au profit des véhicules hybrides rechargeables moyenne gamme. Se développe par ailleurs une solution originale de prolongateurs d'autonomie remorque EP Tender à louer. [13]

2.3. Bus

Le cycle de roulage des citadines est particulièrement favorable au véhicule électrique. Les bus est donc pressenti comme un candidat à l'électrification, d'autant plus qu'un bus zéro émission contribue à l'image de la ville et que les entreprises propriétaires sont plus susceptibles d'investir massivement pour un retour sur investissement sur 5 ou 10 ans que les particuliers.

L'impact sur les émissions de gaz à effet de serre des solutions électriques est particulièrement intéressant. En effet, l'impact de la batterie est très rapidement amorti

par le nombre de kilomètres conséquents réalisés par ce type de véhicule. De plus, les parcours réalisés par les bus, présentant de nombreux arrêts / redémarrages sont particulièrement favorables aux véhicules électriques.

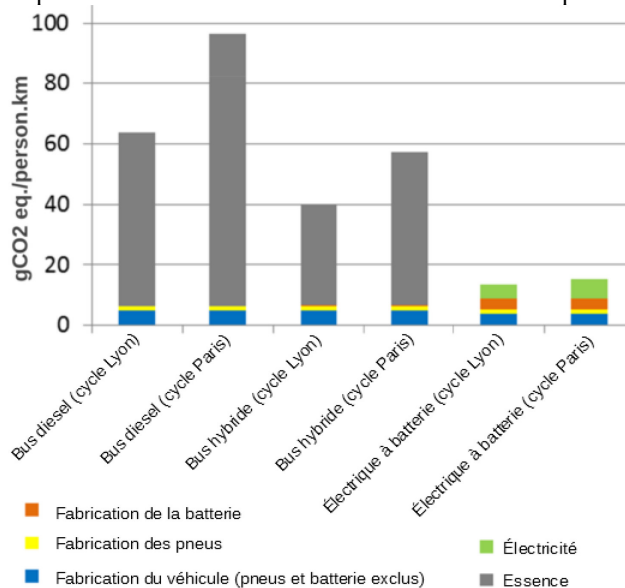


Figure 5: Impacts sur le changement climatique d'une personne prenant le bus pour différentes technologies et différents cycles. Horizon temporel 2030 [2]

2.4. Utilitaires - Camions

L'étude E4T a mis en avant l'adéquation nécessaire entre usage et niveau d'électrification (dimensionnement des batteries). Un usage urbain bénéficie du bon rendement du moteur électrique à tous les régimes et de sa capacité à récupérer l'énergie au freinage, alors que sur un fonctionnement sur autoroute, la forte consommation liée à la prise au vent du véhicule limite rapidement l'autonomie de la batterie. Impossible dans ces conditions de tirer une conclusion sur les utilitaires ou camions en général. 2 réflexions simplement :

L'usage urbain tire profit d'un moteur zéro émission pour un accès non limité au centre-ville. Un camion de livraison pourrait tirer bénéfice d'un moteur électrique dans ces conditions. C'est en ce sens que le camion électrique proposé par Volvo est un camion urbain (ramassage d'ordure, livraison).

Pour les véhicules fonctionnant essentiellement sur autoroute (poids lourds par exemple), l'étude souligne l'intérêt du GNV (Gaz Naturel pour Véhicules) ou GNL (Gaz Naturel Liquéfié), permettant une longue autonomie et un remplissage rapide. Volvo pour le transport longue distance a pour l'instant abandonné l'électrique et propose un camion GNL, le camion tout électrique Tesla Semi (1000 kWh de batteries...) n'a pas de date de commercialisation annoncée et a disparu du site web de Tesla.

La rentabilité économique est le reproche souvent fait aux véhicules électriques. Les économies sur le carburant permettent-elles d'amortir le surcoût de la batterie ? L'étude E4T [2] a également étudié minutieusement le **coût global de possession (TCO, pour Total cost of ownership) sur les catégories de véhicules citées dans la partie précédentes**. Cet indicateur prend en compte l'ensemble des coûts liés à l'achat et l'utilisation (énergie, maintenance, assurance, etc.) du véhicule sur toute sa durée de vie y compris sa valeur résiduelle.

Un fort usage du véhicule dans le cas des bus par exemple accélère le retour sur investissement.

Tant que la rentabilité n'est pas assurée, les aides gouvernementales doivent compenser le surcoût pour assurer le démarrage de la filière.

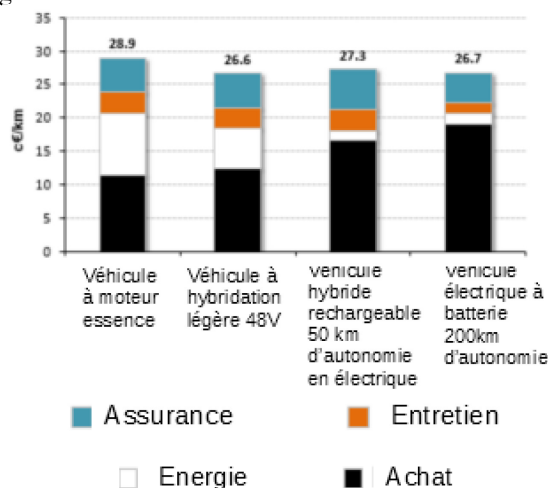
L'étude E4T a ainsi conservé les aides étatiques pour l'étude du coût total de possession en 2018 et supprimé toute aide pour l'étude du coût total de possession en 2030.

Les conclusions de l'étude E4T sont proches de celles de l'étude « Le véhicule électrique dans la transition écologique en France », coordonnée par la Fondation pour la Nature et l'Homme et l'European Climate Foundation en 2017 [3]. C'est pourquoi ses résultats ne sont pas reportés ici. Le lecteur assidu pourra s'y reporter pour confirmation.

3.1. Véhicules urbains

Pour une petite citadine (segment A), parcourant 8 000 km par an, en 2030, l'écart de compétitivité est de 6 % avec le véhicule essence.

On note le positionnement intéressant de la solution hybridation douce 48V, qui pour un investissement initial relativement limité (proche de celui d'un véhicule thermique) permet des gains de consommation significatifs.



3. Le véhicule électrique est-il économiquement viable ?

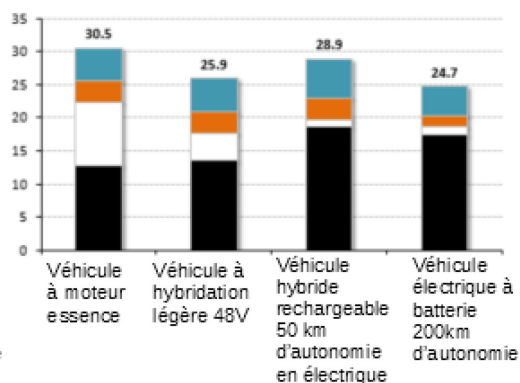


Figure 6 : TCO de véhicules de segment A en 2015 (en haut) et 2030 (en bas) sur le cycle urbain [2]

L'écart de compétitivité entre le VE et le véhicule thermique augmente si l'on considère uniquement des déplacements urbains à condition de ne pas surdimensionner la batterie électrique. De même l'avantage économique du VE augmente avec le nombre de km parcourus.

3.2. Véhicules cœur de gamme et haut de gamme

Pour les véhicules cœur de gamme, on remarque que le véhicule électrique reste compétitif, même en comptant un changement de batterie une fois dans les 10 ans considérés, à la condition d'avoir une batterie limitée à 30 kWh environ, suffisante pour les déplacements pendulaires quotidiens.

Le problème pour ces véhicules est l'autonomie réduite. Les utilisateurs accepteront-ils d'ajouter un prolongateur d'autonomie (surcoût, perte d'une partie du coffre) ou de patienter chaque 200 km les 30 mn de charge (ou moins en 2030 ?) du véhicule, pour les déplacements exceptionnels (WE, vacances) ?

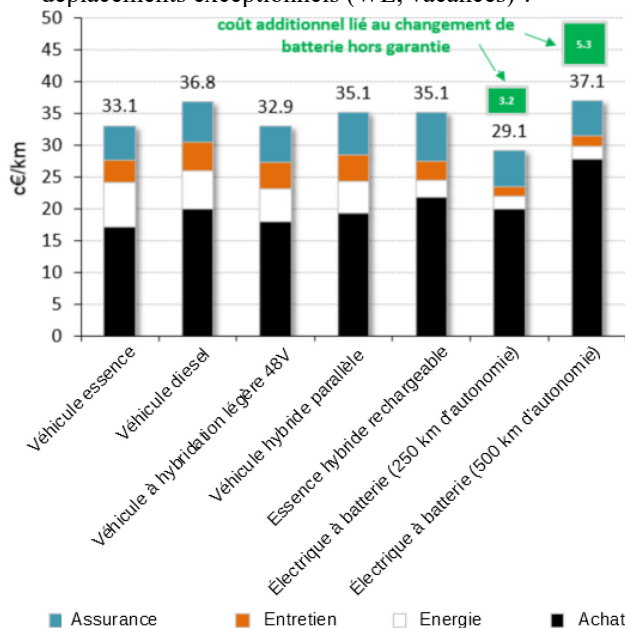


Figure 7: Comparaison des TCO de véhicules de segment C en 2030 sur le cycle WLTC [2]

Le véhicule hybride rechargeable, intéressant écologiquement, est peu compétitif actuellement du fait du coût des deux motorisations et de la batterie. Arrivent

sur le marché des hybrides rechargeables moyenne gamme (Renault Captur, Kia Niro) avec des moteurs thermiques plus petits (90 ch pour le Captur) et des tarifs pour l'instant encore supérieurs à 30 000 euros.

La course à l'augmentation de l'autonomie pour les véhicules à batterie est un point souligné par l'étude, du point de vue des émissions de GES qu'elle engendre mais aussi du point de vue de la rentabilité de la solution.

3.3. Bus

Compte tenu des profils de sollicitation (nombreux arrêts et redémarrages), l'hybridation apporte des gains en consommation substantiels par rapport à une motorisation conventionnelle, de l'ordre de 40%.

Le bus avec une batterie de taille limitée, en considérant un changement de batterie pendant la vie du véhicule, sera compétitif en 2030. Actuellement, les bus électriques sont plus des outils de validation pour les constructeurs et de communication pour les mairies.

Le TCO ci-dessous des bus électriques intègre l'installation d'une prise de charge.

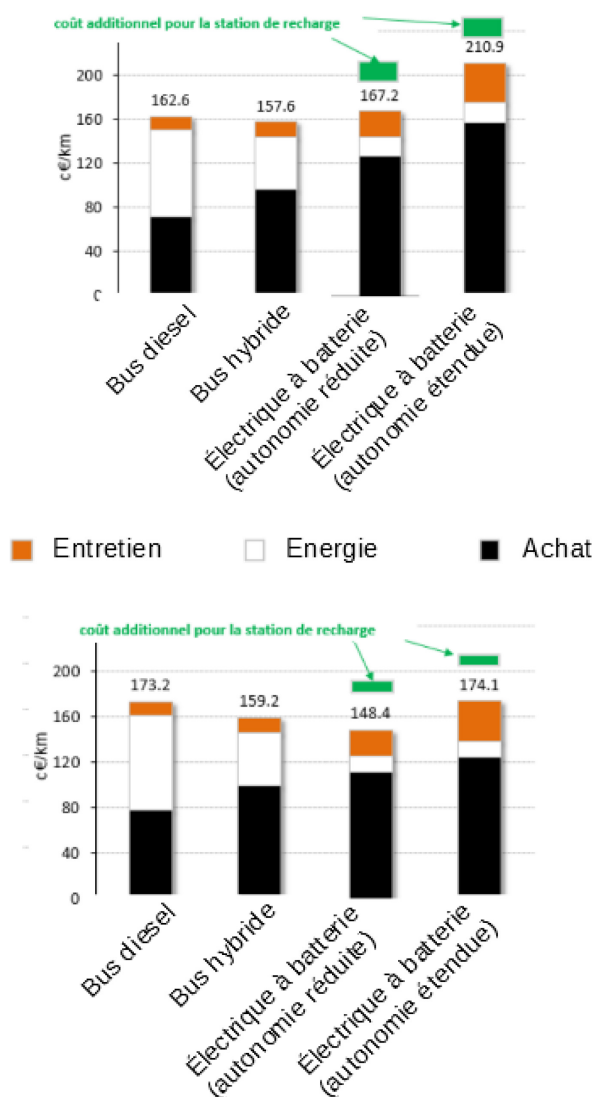


Figure 8: Comparaison des TCO de bus en 2015 (en haut) et 2030 (en bas) sur le cycle parisien [2]

3.4. Utilitaires – Camions

Comme évoqué dans la partie précédente, seuls les camions de livraison urbaine peuvent bénéficier d'avantages liés à l'électrification. Le profil d'usage étant très différent entre un camion de collecte des ordures ménagères, au profil similaire à celui d'un bus, et un camion roulant principalement sur autoroute. Ajoutons simplement 2 remarques :

- Le fort coût de la batterie et des frottements aérodynamiques importants à haute vitesse font que le retour sur investissement est très difficile actuellement mais pourrait devenir intéressant à partir de 2030.
- Le temps de « charge rapide » de plusieurs heures d'un tel véhicule avec les technologies actuelles, en dehors de la nuit, serait inacceptable économiquement avec les technologies actuelles. Cela reste une perspective à long terme.

4. Le réseau électrique est-il dimensionné pour la charge de millions de véhicules électriques ?

La forte progression annoncée du véhicule électrique dans le parc automobile pose la question de la possibilité pour le réseau électrique de fournir la puissance et l'énergie nécessaire pour la charge de ces véhicules.

Cette partie s'appuie principalement sur le rapport « Impact du développement des mobilités propres sur le mix énergétique » de la commission de régulation de l'énergie (CRE). [4]

RTE (Réseau de transport de l'électricité) élabore des scénarios avec 3,5 à 5,6 M de véhicules électriques (BEV, PHEV) en 2035.

4.1. Quel impact sur la consommation d'énergie électrique ?

5 Millions de véhicules effectuant un trajet moyen de 50 km à 10 kWh/100km demandent donc quotidiennement 5 kWh chacun, soit 25 GWh. Cela correspond à moins de 2 % de l'énergie électrique produite par jour en France en hiver, période la plus tendue. Les évolutions du logement et le réchauffement climatique permettent au réseau (à énergie installée) équivalente d'appréhender sereinement cette surconsommation en énergie.

L'étude de la CRE montre qu'un développement rapide du nombre des véhicules électriques amène à une stabilisation de la demande annuelle en énergie.

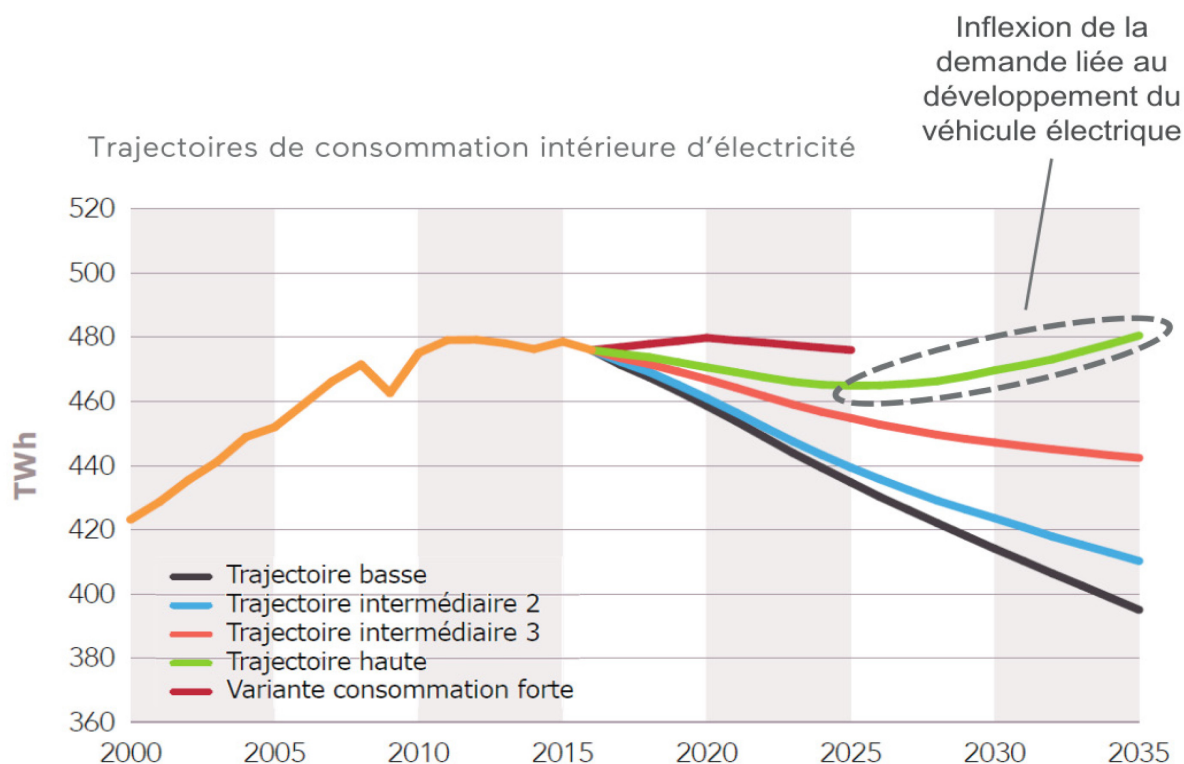


Figure 9: Évolution prévisionnelle de la trajectoire de consommation annuelle d'électricité [4]

4.2. Quel impact sur les pics de consommation ?

Si la quantité d'énergie à fournir par le réseau électrique est envisageable, le moment où fournir cette énergie est plus problématique. Les modèles montrent que la majeure partie de la charge des véhicules est prévue au domicile des particuliers. Hors, le retour à domicile des particuliers entre 18h et 20h est déjà le moment du pic de consommation problématique pour EDF/RTE (maximum historique à 19h le 8/2/2012 : 102 GW pour environ 100 GW de puissance pilotable installée).

5 Millions de véhicules en charge lente sur une Wallbox au domicile (7kW) cela représente 35 GW, puissance que le réseau ne peut fournir aux heures de pointe.

Le véhicule électrique deviendra « le premier appareil électroménager du foyer », jouant un rôle important dans la structuration de la demande. L'essor massif du nombre de véhicules électriques passera donc obligatoirement par des dispositifs de report de la charge des véhicules vers les heures creuses (nuit ou milieu de matinée). Ces dispositifs peuvent être des incitations financières ou des dispositifs techniques de communication entre le véhicule et le réseau (Véhicule To Grid V2G) qui seront détaillés le trimestre prochain.

Allant plus loin dans l'interaction Véhicule To Grid, l'étude « Le véhicule électrique dans la transition écologique en France », [3] consacre une partie complète à l'intérêt des véhicules électriques, comme systèmes de stockage, pour fournir de l'électricité au réseau pendant les pointes de consommation et ainsi faciliter l'intégration des énergies renouvelables.

Enedis a modélisé un fonctionnement acceptable à 1,5 GW de sur-consommation en jouant sur un report de 3h de la charge et a étudié la question des pics de consommation au moment des départs en vacances. Ce sera l'objet d'un article au trimestre prochain.

4.3. L'infrastructure est-elle géographiquement adaptée ?

En 2019, on recensait

- 63500 points de charge chez les particuliers,
- 85400 dans les entreprises.
- 27800 points de charge publics (dont 85 % en 22 kVA, qui correspond à un chargeur rapide). Sur les autoroutes, on comptait 600 points de charge 120 kVA, 1100 50 kVA et 550 43 kVA (source Enedis). Le réseau allemand Ionity a actuellement 30 stations de 4 chargeurs 350 kW sur des stations d'autoroute en France.

Pour la recharge quotidienne, les plus intéressés par les véhicules électriques (les habitants des villes) sont souvent les moins bien lotis pour installer un chargeur au domicile. En effet, le plus simple est de charger dans son garage... quand on en a un.

La loi tente de faciliter l'équipement des parkings collectifs : tous les immeubles nouvellement construits à partir du 01 juillet 2012 ont l'obligation de pré-équiper

au moins 10% de leurs places de stationnement et pour les immeubles plus anciens, un « droit à la prise » permet au locataire ou propriétaire d'installer un chargeur à ses frais dans les locaux collectifs.

Reste le cas des habitants n'ayant pas de parking privé, individuel ou collectif. Il faut alors compter sur le parking de l'entreprise si l'on s'y rend quotidiennement ou sur les bornes de recharges publiques en ville, encore peu nombreuses (200 bornes ex-autolib à Paris).

Hors usage domicile-travail, l'achat d'un véhicule électrique passe aussi par l'assurance de pouvoir le charger en un temps raisonnable (temps d'attente et temps de charge) sur les longs trajets :

- L'état joue ici un rôle majeur par les obligations et les aides financières à l'installation de chargeurs,
- La technologie apporte des solutions à ce besoin avec des chargeurs plus rapides et normalisés (voir article sur les chargeurs).
- Le réseau de distribution doit lui aussi s'adapter à ces demandes localisées de fortes puissances. (un article d'Enedis doit faire le point sur le sujet dans le numéro suivant).
- Précédant le besoin d'un foisonnement de chargeurs, de nouveaux acteurs apparaissent sur le marché. Wattpark (<http://www.wattpark.eu/>) propose aux particuliers d'installer un chargeur accessible au public devant chez eux, Air Bnb de la recharge comme ils se définissent.

Le nombre de chargeurs rapides sur les routes principales lors des départs en vacances est un point pour l'instant non résolu qui cantonne l'horizon du véhicule à batterie essentiellement aux trajets quotidiens bornés (voitures, bus, camions-poubelle), d'autant plus si l'on recommande des batteries de taille limitée. La solution pour les véhicules familiaux et les camions de livraison reste alors pour un temps encore l'hybride rechargeable.

5. Les ressources en matières premières sont-elles suffisantes pour un développement massif des véhicules électrifiés ?

Cuivre, lithium, cobalt, néodyme, dysprosium sont des matériaux en quantité beaucoup plus importantes sur un véhicule électrique que sur un véhicule thermique. La disponibilité des ressources et productions de la planète est régulièrement avancée comme un frein possible à l'essor du véhicule électrique.

Le BRGM, service géologique national, fournit une étude détaillée de la disponibilité de chacun de ces minerais classés d'importance stratégique forte à très forte.

5.1. Le cuivre

Un véhicule électrique contient 3 à 9 fois plus de cuivre qu'un véhicule thermique. Outre la croissance des immatriculations électriques, on observe l'essor des principaux moyens de production d'électricité à base d'énergies renouvelables (solaire et éolienne) qui, à puissance installée équivalente, nécessitent plus de

cuivre que les moyens de production carbonés (charbon et gaz). [6][8]

Près de la moitié des réserves mondiales sont situées en Amérique Centrale et en Amérique du Sud, principalement au Chili et au Pérou. Au Chili, le coût d'extraction augmente en raison de la nécessité d'utiliser l'eau de mer dans les mines Chiliennes pour préserver les réserves d'eau douces.

C'est pourquoi, d'après l'étude IFPEN (projet Generate), la marge de sécurité de l'approvisionnement en cuivre se situe ainsi à 17,3 % pour le scénario de référence (4°C de réchauffement climatique en 2100), et à moins de 4 % pour le 2nd scénario (2°C de réchauffement climatique en 2100 par un développement massif des énergies renouvelables) à horizon 2050. Des ressources supplémentaires sont identifiées, mais pour un coût économique et écologique d'extraction plus important. Le cuivre est ainsi classé en risque d'approvisionnement moyen par le BRGM.

5.2. Le lithium

Le lithium est avec le cobalt le matériau essentiel à la fabrication des batteries des véhicules électriques modernes. Plus de la moitié des réserves répertoriées sont situées en Amérique du Sud et la Bolivie, attachée à développer seule sa propre filière lithium, n'a pas commencé son extraction. Les salars contenant ce matériau sont de plus des zones très touristiques et désertiques alors que l'eau est nécessaire à l'extraction ; ceci freine le développement des mines. [5][9]

Répartition des ressources mondiales de lithium

Sources : BGS 2016, Roskill 2016, SNL 2017

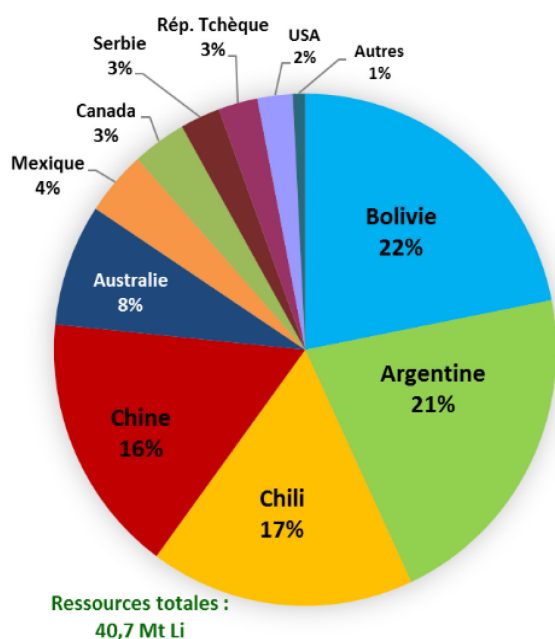


Figure 10: Répartition des ressources mondiales de lithium. [9]

Production minière de lithium en 2016

Sources : Roskill, USGS, Sociétés

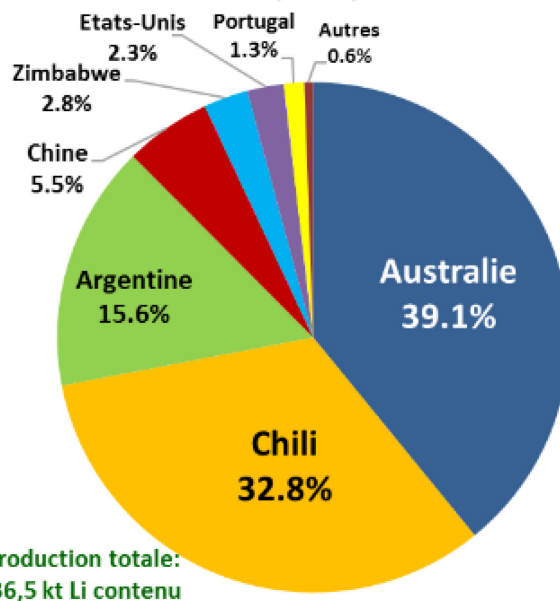


Figure 11: Production minière de lithium en 2016. [9]

Témoin des tensions sur la disponibilité du lithium, le prix est passé de 7 \$/kg en 2014 à 20 \$/kg en 2018.

La Chine, qui fournit à l'heure actuelle plus de 50 % de la demande mondiale en cathodes au lithium, représente aujourd'hui plus de 40% de la consommation mondiale.

Une hausse du coût du lithium permettrait de démarrer une filière de recyclage de ce minéral, filière aujourd'hui non rentable, ce qui atténuerait la pression sur la demande. Ainsi le lithium est classé par le BRGM en risque d'approvisionnement moyen.

5.3. Le cobalt

Deuxième matériau critique pour les batteries, la production de cobalt est régulièrement déficitaire face à la demande.

50 % de la production de cobalt est à destination du secteur des batteries. Actuellement plus de 65 % de la production est localisée en République Démocratique du Congo, pays dont la situation économique et politique est durablement instable. Le secteur minier fait de plus l'objet de dénonciations d'ONG sur le niveau de corruption, le travail des enfants et les conditions de sécurité. [10]

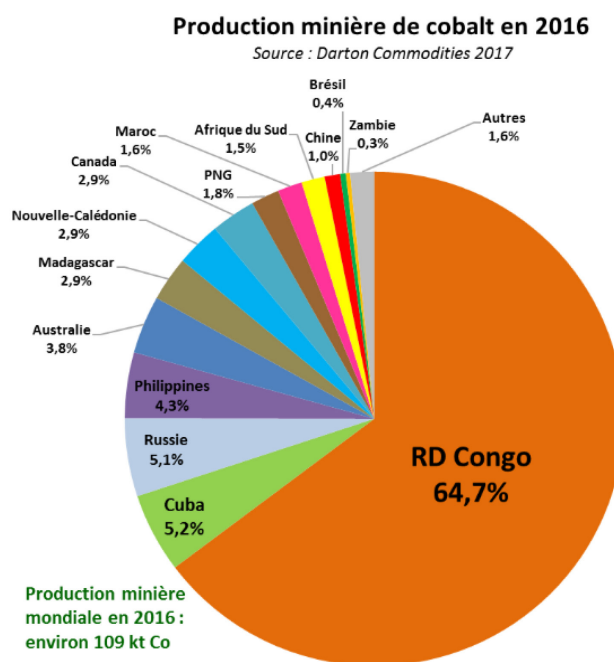


Figure 12: Production minière de cobalt en 2016 [10]

L'instabilité politique crée une instabilité sur les prix : 3 chiffres montrent l'envergure de la volatilité du cours : 21 k\$/t début 2016, 90 k\$/t en 2018 et 30 k\$/t actuellement

Accentuant la concentration des acteurs, 51 % du cobalt mondial est raffiné par la Chine.

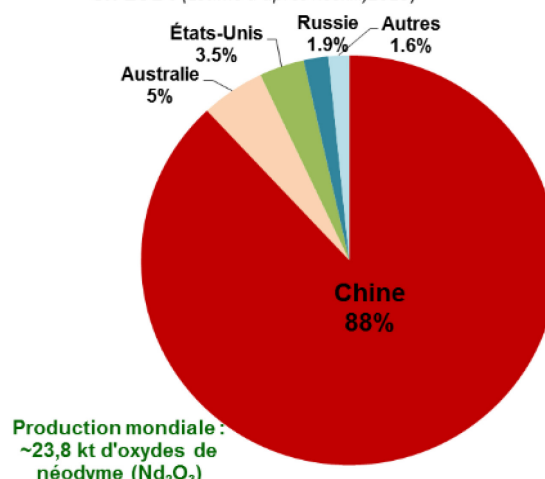
Le cobalt est ainsi classé en risque d'approvisionnement moyen à fort par le BRGM. Des recherches sont menées pour diminuer la quantité de cobalt dans les batteries.

5.4. Les terres rares

Les terres rares sont des éléments nécessaires à la fabrication d'aimants permanents performants, composants clés pour des moteurs et alternateurs à forte densité de puissance. Les aimants Néodyme-Fer-Bore nécessitent comme leur nom l'indique du Néodyme (Nd) mais aussi du Dysprosium (Dy) en faible quantité pour améliorer la tenue en température des aimants. Les gros consommateurs d'aimants permanents sont l'éolien en mer pour limiter le poids des nacelles et ainsi la taille des mats et les véhicules électriques pour faciliter l'intégration du moteur, qui plus est sur un hybride rechargeable où le moteur électrique partage l'espace avec le moteur thermique, et limiter son poids.

Les terres rares ne sont pas rares, les réserves recensées donnant une visibilité de 50 à 500 ans suivant la croissance de la demande. La problématique est liée à la concentration des gisements exploitables à un coût raisonnable quasi exclusivement en Chine, pour le Néodyme comme pour le Dysprosium. [11][12]

Répartition de la production minière de néodyme en 2014 (Estimé d'après Roskill, 2015)



Répartition des réserves de néodyme (Estimé d'après Roskill, 2015)

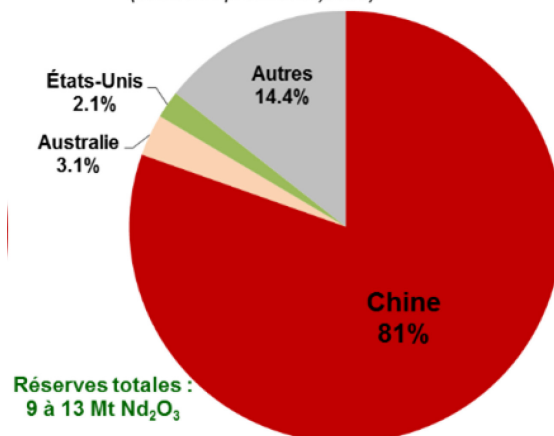
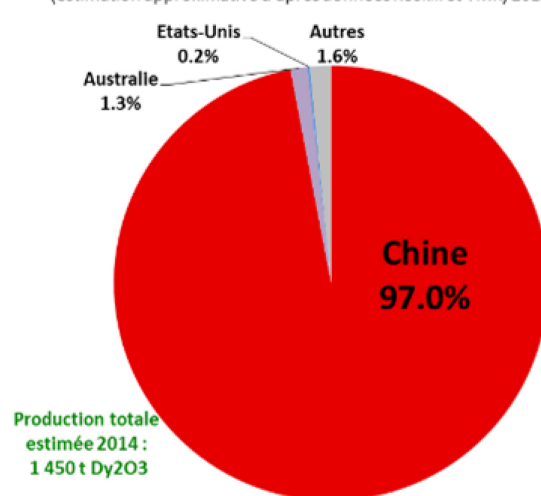


Figure 13: Répartition de la production et des réserves de Néodyme [11]

Production minière de dysprosium en 2014 (estimation approximative d'après données Roskill et TMR, 2015)



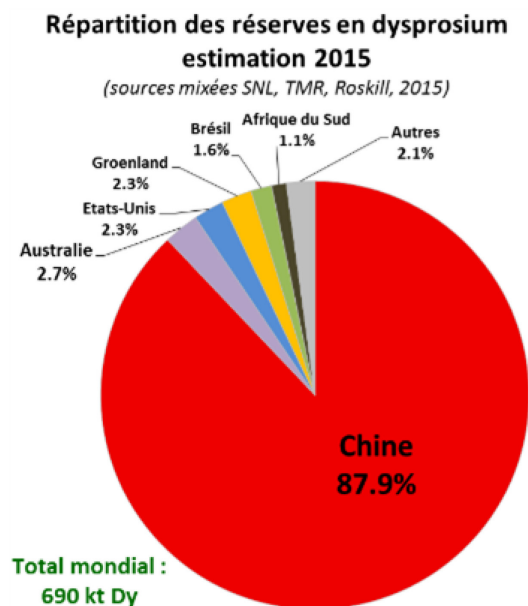


Figure 14: Répartition de la production et des réserves de dysprosium [12]

La Chine a en 2011 montré son monopole en jouant sur le cours des terres rares :

Néodyme : 25 \$/kg en 2010,
460\$/kg en 2011,
50\$/kg depuis 2016.

Dysprosium : 200 \$/kg en 2010,
3400 \$/kg en 2011,
250\$/kg depuis 2016.

Cette hausse subite des prix en 2011 a déstabilisé la filière des alternateurs comme des moteurs électriques. Renault a fait le choix de construire des moteurs plus lourds et plus complexes, sans aimants permanents et des recherches sont menées pour diminuer drastiquement la quantité de terres rares dans les moteurs à aimant permanent. (Voir article motorisations)

Le Néodyme comme le Dysprosium sont classés en risques d'approvisionnement fort par le BRGM.

6. Conclusion

Cette introduction a permis de montrer que le véhicule électrique en ville, le bus plus que la voiture, est une solution pertinente écologiquement et économiquement pour répondre en partie aux problèmes de réchauffement climatique et de pollution locale des agglomérations. Pour les véhicules extra-urbains, le coût, le poids et l'empreinte écologique des batteries ainsi que l'insuffisance du foisonnement des chargeurs rapides laissent présager pour plusieurs années encore un marché adapté aux véhicules hybrides, hybrides rechargeables ou au gaz pour les camions.

Les parts de marché des véhicules électriques et hybrides rechargeables, poussées par une

réglementation incitative, devraient donc continuer de grignoter voir dévorer celles des véhicules individuels thermiques si les infrastructures privées et publiques de charge répondent à la demande.

Les demandes des clients potentiels en termes de coût et d'usage (autonomie, temps de charge), et les contraintes d'infrastructure et d'approvisionnement en matériaux critiques vont continuer à orienter les innovations dans ce domaine.

Les constructeurs automobiles européens qui ont su rester leader pendant 100 ans sur ce marché extrêmement concurrentiels investissent massivement, incités par les pouvoirs publics et attisés par la concurrence de Tesla et des constructeurs asiatiques, pour proposer une offre pérenne, diversifiée, attractive et de qualité en véhicules électrifiés. Gageons que ces investissements vont continuer de faire progresser encore rapidement ces technologies.

Les articles suivants présenteront l'état de l'art et les perspectives nombreuses pour les années futures dans les domaines des motorisations, des batteries et des chargeurs ce trimestre et dans les domaines de l'infrastructure, des relations véhicules-réseau, de la charge sans contact, des architecture machines et de l'hydrogène le trimestre prochain.

Comme évoqué dans l'introduction, la technologie n'apporte qu'une solution partielle aux problèmes environnementaux qui devrait être complétée notamment par une réflexion sur la dimension sociale du véhicule : propriété individuelle du véhicule, occupation de l'espace urbain, transport en commun, mobilités douces,... ce qui sort de notre domaine de compétences.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] Véhicules électrifiés : état du marché français, européen et mondial en 2018 et tendances pour les prochaines années, IFPEN, 25.02.2019
- [2] IFP Energies Nouvelles. Bilan transversal de l'impact de l'électrification par segment : PROJET E4T. ADEME. Avril 2018.
Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque
- [3] Le véhicule électrique dans la transition écologique en France, étude coordonnée par Marie Chéron, Fondation pour la Nature et l'Homme et Abrial Gilbert-d'Halluin, European Climate Foundation, novembre 2017
- [4] L'impact du développement des mobilités propres sur le mix énergétique, Comité de prospective de la Commission de régulation de l'énergie, juillet 2018.
- [5] Hache Emmanuel, Simoën Marine, Seck Gondia Sokhna, (2018). Electrification du parc

automobile mondial et criticité du lithium à l'horizon 2050, 71p.
Cet ouvrage est disponible en ligne
www.ademe.fr/mediatheque

[6] Hache Emmanuel, Bonnet Clément, Simoën Marine, Seck Gondia Sokhna, Cuivre : quel avenir pour ce métal essentiel à la transition énergétique ? 2019

[7] Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergies, ADEME, novembre 2019

Les fiches de synthèse sur la criticité des métaux et matières minérales sont disponibles sur le site du BRGM :
<http://www.mineralinfo.fr/page/fiches-criticite>

[8] Fiche - Le cuivre - Janvier 2018 BRGM

[9] Fiche - Le lithium-décembre 2017, BRGM

[10] Fiche - Le cobalt - décembre 2017, BRGM

[11] Fiche - Le néodyme - Novembre 2015, BRGM

[12] Fiche - Le dysprosium - Août 2016, BRGM

[13] Prolongateur d'autonomie EP Tender :
<http://www.eptender.com/>

INFORMATION 3EI

La Journée 3EI 2020

JOURNÉE 3EI — 26 JUIN 2020

ENS PARIS-SACLAY

4, AVENUE DES SCIENCES
91190 GIF-SUR-YVETTE

Le comité de rédaction de la Revue 3EI propose une journée d'échanges sur le thème de la

**PÉDAGOGIE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
ET EN PHYSIQUE APPLIQUÉE**