

LA FRANCE AMORCE LE VIRAGE VERS LE VÉHICULE ÉLECTRIQUE

ET SI NOUS ÉTIIONS SUR LA BONNE VOIE ?

Pratique mobilité
Septembre 2018

Stéphane Amant
Leader Pratique Mobilité

Hughes-Marie Aulanier
Co-leader Pratique Stratégie

Clément Ramos
Co-leader Pratique Stratégie

Aurélien Schuller
Consultant Sénior Pratique Mobilité

Sébastien Timsit
Leader Pratique Energie

Contact :
mobilite@carbone4.com

Le véhicule électrique à batteries est-il aussi bénéfique pour le climat que ce que l'on suppose ?

Notre réseau électrique tiendra-t-il le choc face à un afflux massif de véhicules électriques sur les routes ?

Le développement du véhicule électrique à batteries n'est-il pas une utopie compte-tenu de la disponibilité des ressources minérales nécessaires ?

Longtemps considéré comme un serpent de mer, le développement soutenu du véhicule électrique en France est sur le point de devenir une réalité.

Cependant, face à ses vertus affichées et revendiquées, certaines voix se font entendre pour exprimer de nombreuses préoccupations et fustiger une « fausse bonne idée ».

Dans cette note de synthèse, Carbone 4 répond à ces préoccupations pour donner sa vision de la place à accorder au véhicule électrique à batteries dans la mobilité de demain en se focalisant plus précisément sur l'automobile.

Carbone 4
54 rue de Clichy 75009 PARIS
contact@carbone4.com
+33 (0)1 76 21 10 00
www.carbone4.com

SOMMAIRE



| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| RÉSUMÉ | 3 |
| INTRODUCTION | 5 |
| 1 En logique de cycle de vie, le véhicule électrique n'est-il pas plus dommageable pour le climat que son homologue thermique, étant donné l'impact de la fabrication des batteries ? | 6 |
| 2 Notre réseau électrique tiendra-t-il le choc face à un afflux massif de véhicules électriques sur les routes ? | 9 |
| 3 Les objectifs de développement de l'électro-mobilité sont-ils cohérents avec les annonces des industriels ? | 11 |
| 4 Est-ce que la mobilité électrique nous permettra de conserver nos pratiques de mobilité actuelles ? | 13 |
| 5 Les citoyens doivent-ils s'attendre à dépenser plus pour leur mobilité individuelle si elle devient électrique ? | 15 |
| 6 Le développement du véhicule électrique n'est-il pas une utopie compte-tenu de la disponibilité des ressources minérales nécessaires ? | 16 |
| 7 Et pourquoi pas l'hydrogène ou le biogaz plutôt que les batteries ? | 19 |

RÉSUMÉ

La décarbonation de la mobilité des personnes en France à des niveaux compatibles avec l'objectif national de neutralité carbone 2050 ne peut s'imaginer sans toucher à l'automobile. Le report modal seul vers les transports collectifs, bien que plus efficaces et moins carbonés, ne suffirait pas.

Parce qu'il présente un certain nombre de caractéristiques différentes de ce à quoi les automobilistes ont été habitués au cours des décennies, **le véhicule électrique à batteries (BEV)** incarne en premier lieu la remise en cause de notre rapport à la mobilité du toujours plus (plus puissant, plus rapide, plus loin, ...). Ses atouts font de lui une solution de mobilité individuelle très pertinente à moyen-terme (à l'horizon 2030) pour permettre une décarbonation à plus grande échelle encore en 2050.

Nos diverses analyses ont montré que la plupart des objections faites à l'égard du BEV sont en général inexactes :

- Si la substitution des véhicules thermiques conventionnels par les BEV n'est pas pertinente du point de vue de la lutte contre le changement climatique dans certains pays où l'électricité est trop carbonée (comme la Chine par exemple), en revanche elle l'est parfaitement dans de très nombreux pays (comme la France), dès que le **facteur d'émissions (FE)** moyen de l'électricité se situe en-dessous de 500 gCO₂/kWh environ. Ce constat se base bien entendu sur une analyse en cycle de vie des émissions de **gaz à effet de serre (GES)**, en intégrant la production des batteries électriques. Par ailleurs, la tendance allant dans le sens d'une décarbonation progressive des mix électriques au cours du temps, l'avantage comparatif du BEV devrait s'accroître vis-à-vis du **véhicule thermique (VT)** conventionnel, même si ce dernier connaîtra des progrès bien entendus. Un point d'attention

réside cependant dans la course à l'accroissement de taille des packs batteries qui tend à affaiblir l'avantage CO₂ du BEV.

- Avec un rendement énergétique 3 à 4 fois supérieur à celui d'un VT classique, le BEV, même avec plusieurs millions d'exemplaires sur les routes françaises, pèsera peu sur la demande électrique (24 TWh pour 8 millions de BEV et **PHEV**¹, soit 5% de la production nationale d'électricité). S'agissant de l'équilibre du réseau électrique, les systèmes de régulation envisagés pour la charge (soit par incitation tarifaire, soit par optimisation plus poussée²) peuvent contenir le supplément de puissance appelée dans des proportions très raisonnables (de l'ordre de 3,5 GW pour 8 millions de BEV-PHEV, soit 3% de la capacité électrique de la France). Un blackout national causé par les BEV est une crainte pour le moins infondée.

- L'appel de matières premières métalliques (lithium, nickel, cobalt, etc.) qui est nécessaire pour accompagner le développement du BEV est réaliste au regard des ressources connues et mobilisables dans les délais considérés, surtout si le recyclage est davantage encouragé. Des points de tension, notamment sur le cobalt, sont attendus cependant, surtout si la taille des packs batteries augmente. Par contre, les impacts sociétaux liés à l'extraction sont plus délicats à évaluer à ce stade³. Ils devront faire l'objet d'une attention très soutenue de la part des industriels, consommateurs et pouvoirs publics. Se traduisant par exemple par la création de normes, chartes et labels qui apporteront des garanties de traçabilité des métaux extraits et du recyclage de toutes ces matières en fin de vie ?

- Pour autant, le chemin vers

¹ PHEV pour Plug-In Hybrid Electric Vehicle, soit « Véhicule Hybride Rechargeable » en français.

² L'utilisation des smart grids, en fait.

³ On remarquera cependant que l'histoire du pétrole n'a pas donné lieu qu'à des géopolitiques harmonieuses, pour employer un euphémisme. Il serait donc malvenu de jeter l'opprobre sur le véhicule électrique sur cette problématique précise ... Même s'il n'est pas question de nier la pertinence de la question soulevée.

une mobilité individuelle plus électrique n'est pas tapissée de roses. Il ne s'agit pas d'adopter une posture béate face aux défis que cela représente. Ainsi, les autorités et la filière automobile ont récemment pris un engagement mutuel dans le cadre d'un contrat de filière, prévoyant notamment 1 000 000 de VE sur les routes françaises en 2022. Mais pour concrétiser cette feuille de route, les parties prenantes devront traiter un certain nombre de sujets, comme par exemple questionner le devenir de la fiscalité sur l'électricité au regard des réductions drastiques de rentrées fiscales induites par la baisse des ventes de carburants fossiles. Est-ce que cela sera contrebalancé par une réduction du déficit de la balance commerciale française ? est-ce que les effets sanitaires liés à l'amélioration de la qualité de l'air bénéficieront rapidement à l'équilibre financier de notre système de santé ? Comment accompagner la transition de la filière en termes d'évolution des emplois (nombre et compétences) et de l'appareil industriel ? Autant de questions supplémentaires qui doivent aussi être prises en considération pour mesurer l'impact sociétal réel de la conversion à l'électro-mobilité.

En outre, la vision de Carbone 4 concernant la mobilité électrique peut se décliner autour des éléments suivants :

- L'électro-mobilité peut aussi s'envisager avec des **véhicules à piles à combustible (FCEV)**, par l'intermédiaire du vecteur hydrogène. Compte-tenu de l'équation économique actuelle, ces véhicules sont cependant favorables seulement pour quelques cas d'usage très spécifiques. A plus long-terme, les FCEV pourront répondre à des situations plus nombreuses à des coûts compétitifs, là où le BEV affichera toujours ses limites : temps d'immobilisation plus longs, disponibilité foncière réduite pour la recharge, puissance et autonomie insuffisantes pour les véhicules lourds, distances à franchir en temps contraint.

À ce titre, le vecteur hydrogène apparaît davantage comme un concurrent du **Gaz Naturel Véhicule (GNV)** pour la mobilité puisqu'il en reprend les mêmes avantages comparatifs par rapport aux BEV... Il ne faut donc pas opposer les deux types de technologie BEV et FCEV, mais les imaginer davantage comme des briques complémentaires d'une mobilité 100% électrique⁴.

- Par nature, le BEV est moins bien adapté que le VT conventionnel à certains cas d'usages certes peu nombreux, mais auxquels les automobilistes sont très attachés (par exemple, les parcours supérieurs à 500 km). Pour l'ensemble des bénéfices socio-environnementaux qu'il apporte, le BEV doit être favorisé et devenir aussi un prétexte pour reconsidérer le rapport à la mobilité individuelle. La course à l'autonomie (à travers des packs batteries de plus en plus lourds), la frénésie vers des installations de recharge rapides voire ultra-rapides (au coût prohibitif) apparaissent finalement comme des contresens dans la décarbonation de la mobilité. Car à vouloir reproduire coûte que coûte les schémas de fonctionnement tels qu'ils sont ancrés dans les pratiques aujourd'hui, c'est renchérir fortement l'alternative électrique, dégrader son intérêt environnemental et donc se tirer une balle dans le pied.

- Le développement de l'électromobilité est une opportunité unique pour repenser notre rapport à la mobilité : raisonner par rapport aux usages les plus fréquents et non les plus dimensionnants, renforcer la multi-modalité avec les transports collectifs, développer la mobilité partagée. Avec à la clé sans doute moins de véhicules sur les routes, mais pas moins de mobilité pour les personnes ... C'est à une réflexion plus globale et systémique de la mobilité de demain que la mutation vers l'électromobilité nous invite. Surtout dans une France qui se veut neutre en carbone à l'horizon 2050.

⁴ L'hybridation des deux technologies est en ce sens un concept à creuser : un véhicule avec un pack de batteries, une pile à combustible et un réservoir d'hydrogène (solution déjà proposée par certaines entreprises comme Symbio en France par exemple).

INTRODUCTION

Longtemps considéré comme un serpent de mer, le développement soutenu du véhicule électrique en France est sur le point de devenir une réalité. C'est en tous cas ce à quoi veut aboutir le contrat stratégique de la filière automobile, annoncé le 23 mai dernier, en présence de trois ministres et de toutes les instances représentant la filière automobile française.

Cette stratégie française s'inscrit non seulement dans un contexte national qui prévoit la fin des ventes de véhicules thermiques en 2040, mais aussi dans un contexte international lui aussi en faveur du véhicule électrique. Que ce soit comme moyen de lutter contre la pollution de l'air, de renforcer son indépendance énergétique, de réduire les émissions de GES, de prendre un avantage compétitif sur un nouveau marché en croissance, de nombreuses réglementations en Asie, en Europe, en Amérique du Nord favorisent directement et indirectement son avènement. Ainsi, près de 2 millions de véhicules électriques à batteries vont être vendus en 2018, contre quelques centaines de milliers seulement il y a à peine 4 ans. D'ores-et-déjà, plusieurs centaines de milliers

d'autobus électriques circulent en Chine. Par ailleurs, l'Europe vient d'annoncer un plan d'action stratégique sur les batteries. Bref, l'actualité fourmille de signaux qui montrent que s'ouvre réellement l'ère de l'électro-mobilité.

Pour autant, face à ses vertus affichées et revendiquées, certaines voix se font entendre en fustigeant une « fausse bonne idée ». De nombreuses raisons sont invoquées, allant de l'impact climatique réel à la pression sur les ressources minérales, en passant par l'inadaptation des infrastructures (notamment du réseau électrique), la non-remise en question de la mobilité individuelle ou encore l'inadéquation vis-à-vis des usages habituels des automobilistes.

Fort de son expertise sur l'électro-mobilité construite tout au long des différentes études réalisées pour ses clients, Carbone 4 répond à ces préoccupations pour donner sa vision de la place à accorder au véhicule électrique à batteries dans la mobilité de demain en se focalisant plus précisément dans ce papier sur l'automobile.



1

EN LOGIQUE DE CYCLE DE VIE, LE VÉHICULE ÉLECTRIQUE N'EST-IL PAS PLUS DOMMAGEABLE POUR LE CLIMAT QUE SON HOMOLOGUE THERMIQUE, ÉTANT DONNÉ L'IMPACT DE LA FABRICATION DES BATTERIES ?

Les BEV ont l'avantage de ne générer aucune émission à l'échappement du véhicule, ce qui évite les effets locaux de la pollution. Toutefois en termes d'empreinte carbone, qui est une pollution globale, il convient de tenir compte des émissions de GES en logique de cycle de vie. Carbone 4 propose ici quelques ordres de grandeur pour comparer deux véhicules neufs (l'un électrique, l'autre thermique) selon ce critère.

En premier lieu, considérons les émissions liées à l'utilisation des véhicules : pour le BEV, il s'agit des émissions pour la production et le transport de l'électricité, et pour le véhicule thermique de la combustion du carburant (en incluant aussi l'amont de la filière pétrolière). En France, l'électricité étant très peu carbonée, c'est un avantage très net pour les véhicules électriques sur cette phase de roulage seul. En effet, alors que les VT neufs émettent actuellement de 150 à 200 gCO₂ / km (en tenant compte à la fois des émissions à l'échappement et de l'amont pétrolier), les BEV affichent des émissions autour de 5 à 10 gCO₂ / km. Cette valeur, déjà faible, est appelée à diminuer à court et moyen terme, du fait de la sortie totale du charbon du mix électrique français. En-dehors de la France, pour que les émissions du roulage d'un BEV deviennent significatives, il faut des mix électriques fortement fossiles, comme ceux de l'Allemagne ou de la Pologne. Ainsi le seuil symbolique des 100 gCO₂ / km en roulage est atteint pour un mix autour de 600 gCO₂ / kWh, ce qui est au-dessus des valeurs moyennes pour l'Union Européenne (env. 320 gCO₂ / kWh⁵), l'OCDE (env. 420 gCO₂ / kWh) ou encore la moyenne mondiale (env. 520 gCO₂ / kWh).

Dans la logique de cycle de vie, il faut considérer les émissions liées à la fabrication au sens large : véhicules bien sûr, mais

aussi les centrales électriques, et surtout les batteries des véhicules électriques. D'abord l'amortissement du véhicule hors-batterie : il est de l'ordre de quelques dizaines de grammes de CO₂ / km (crédits de recyclage inclus), tant pour les véhicules thermiques qu'électriques ; la différence entre les deux empreintes carbone est faible, de l'ordre du gCO₂ / km, ce qui est négligeable à ce stade. Par ailleurs la prise en compte du cycle de vie des centrales électriques (construction comme démantèlement) double le facteur d'émissions du mix électrique français et porte donc les émissions de roulage des BEV à environ 15 gCO₂ / km. Ce poste n'est donc pas de nature à remettre en cause l'avantage de l'électrique face au thermique.

Pour la fabrication des batteries, considérons des chimies de batteries Lithium-ion, de type NMC. Ce sont elles qui équipent la majorité des véhicules électriques européens, et elles sont susceptibles de continuer à être utilisées en grande majorité à moyen terme⁶. Les évaluations d'empreinte carbone des batteries NMC sur leur cycle de vie sont très variables, entre 100 et 200 kgCO₂ / kWh selon les technologies et les pays de fabrication. Pour poursuivre notre évaluation, retenons une valeur de 170 kgCO₂ / kWh, ce qui est conservateur. En tenant compte du recyclage des matériaux de la batterie en fin de vie (ce qui est déjà une obligation en Europe, qui va probablement être renforcée à mesure que la filière se structure), environ 40% des impacts de fabrication peuvent être compensés par la récupération de métaux après recyclage (ce qui évite l'extraction de métaux vierges). Ainsi, l'impact total de la batterie sur sa durée de vie est d'environ 100 kgCO₂ / kWh de batterie. Donc sur une durée de vie de véhicule (~200 000 kms parcourus), c'est de l'ordre de 0,5 gCO₂ / km / kWh qu'il faut amortir simplement pour

⁵ Source : IEA, 2018

⁶ Les véhicules électriques chinois, les Autolib' ou encore les Tesla utilisent cependant d'autres chimies de batteries.

la batterie, ce qui est loin d'être négligeable étant données les capacités usuelles à bord des BEV, allant de 20 à 100 kWh⁷.

« Il y a un facteur 2,5 entre l'impact carbone d'une citadine thermique et son équivalent électrique. »

Avec cette logique d'**analyse en cycle de vie (ACV)**, comparons l'empreinte carbone des VT et BEV neufs sur deux segments distincts en France, à l'heure actuelle :

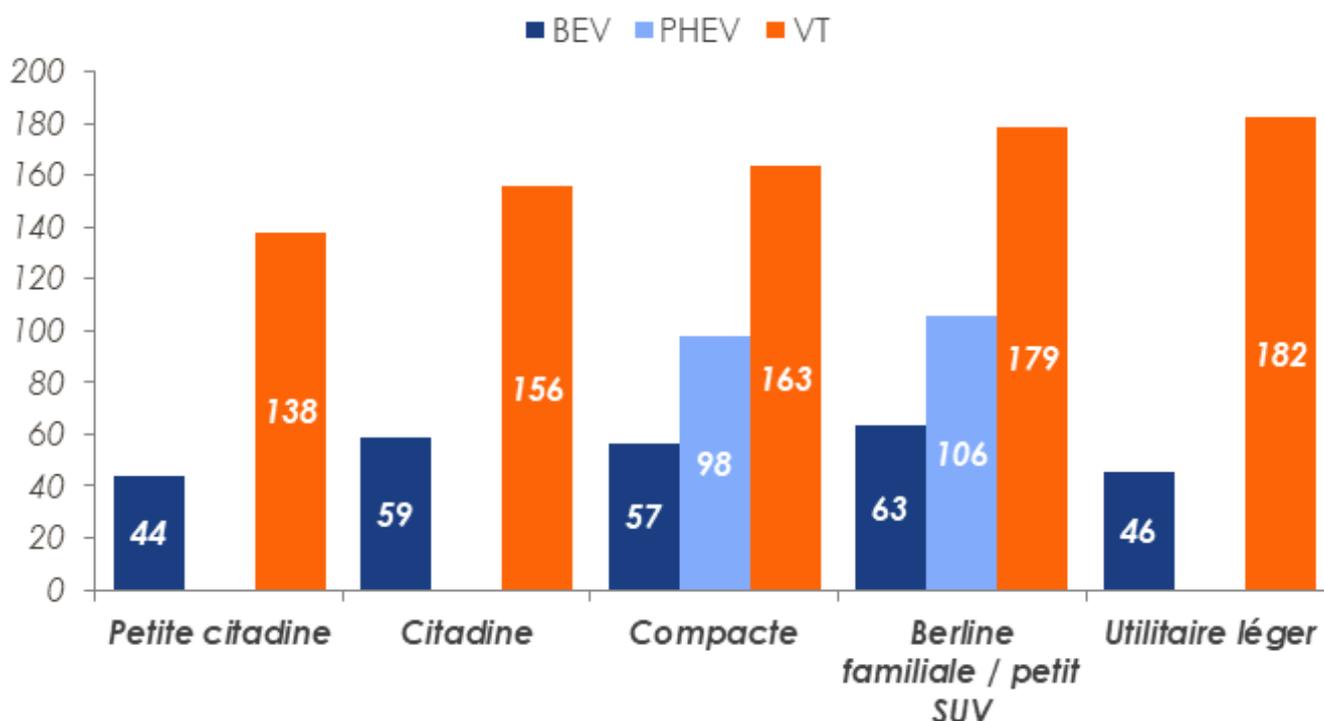
- Pour une citadine de type B (Renault Zoé ou Renault Clio), considérons 40 kWh de batterie, ce qui correspond à près de 300 km d'autonomie réelle (consommation de l'ordre de 0,15 kWh / km). Ainsi le BEV émettra environ 75 gCO₂ / km au cours de sa durée de vie (près de 200 000 km) dont 60 gCO₂ pour amortir la fabrication de la voiture et de la batterie. En comparaison, un VT de taille équivalente émettra 190 gCO₂ / km dont seulement 30 gCO₂ pour sa fabrication, le reste étant dû à son roulage. Il y a donc un facteur 2,5 entre l'impact carbone d'une citadine⁸ thermique et son

équivalent électrique. Une autre façon d'illustrer ce résultat est de considérer au bout de combien de kilomètres parcourus la « dette carbone » (impact de fabrication de la batterie) serait « remboursée » par les économies d'émissions lors de l'utilisation du véhicule : dans notre exemple, l'impact de la batterie est compensé au bout de 50 000 km ;

- Pour une berline, prenons l'exemple d'une autonomie de 500 km d'autonomie réelle avec près de 100 kWh de batterie (consommation de l'ordre de 0,2 kWh / km). Un tel BEV émettrait, sur un kilométrage total d'environ 200 000 km, de l'ordre de 130 gCO₂ / km (110 gCO₂ pour la fabrication) contre 230 gCO₂ / km pour son équivalent thermique. L'écart entre les empreintes carbone est alors de près de 40% pour ce segment de véhicule, et la dette carbone est remboursée après environ 90 000 km.

« L'écart entre les empreintes carbone est alors de près de 40% pour ce segment de véhicule. »

Émissions de carbone en ACV par segment et par motorisation
gCO₂e/km | 2030 | France



Source : analyse Carbone 4

⁷ Par exemple, la Renault Zoé propose un pack batteries de 41 kWh aujourd'hui, la Nissan Leaf de 40 kWh (ce sont les deux modèles les plus vendus en France) alors que les modèles Tesla oscillent entre 60 et 100 kWh.

⁸ Au demeurant, on peut remettre en question ce vocable de « citadine », sachant que ce type de véhicule est parfaitement adapté à un usage péri-urbain et rural, et même à des parcours longue distance. Le cantonner à un usage purement citadin est un raccourci très trompeur.

L'analyse peut être reproduite en se projetant dans un futur proche, 2030 par exemple, en tenant compte d'un certain nombre d'évolutions attendues, que ce soit sur la production des batteries, le mix électrique ou l'amélioration de l'efficacité des VT. La figure ci-dessous résume les résultats et l'on peut constater que si les chiffres bougent dans l'absolu, les écarts sont globalement conservés (même si légèrement accentués en faveur des BEV). A noter que les rectangles blancs représentent le crédit de recyclage des batteries.

« La moyenne du mix électrique européen (~440 gCO₂ / kWh) permet de garder l'avantage pour l'électrique mais l'écart des émissions avec le thermique est seulement de l'ordre de 10 à 20%. »

En se plaçant désormais hors de France, un mix électrique carboné à hauteur de 550 gCO₂/kWh comme en Allemagne suffit à rendre les berlines électriques aussi émissives que leurs équivalents thermiques. En allant plus loin, un mix électrique comme celui la Pologne (~700 gCO₂/kWh) rend l'ensemble des BEV plus émissifs que leurs équivalents thermiques. À noter que la moyenne en Union Européenne (~440 gCO₂ / kWh) permet de garder l'avantage pour l'électrique mais l'écart des émissions avec le thermique est seulement de l'ordre de 10 à 20%.

Pour conclure, retenons qu'un BEV est bel et bien moins émissif qu'un VT analogue, si toutefois les deux conditions suivantes sont respectées :

- Le mix électrique du pays où il roule est significativement décarboné dès aujourd'hui, ou va l'être à moyen terme (disons moins de 200 gCO₂ / kWh pour conserver un facteur 2 entre citadine thermique et citadine électrique et un écart de 25% entre les berlines) ;
- Son autonomie est volontairement limitée afin de ne pas avoir à surdimensionner sa batterie électrique : par rapport aux voitures thermiques, les véhicules électriques ne peuvent ainsi pas avoir des niveaux d'autonomie comparables (c'est-à-dire de près de 1 000 km). Une limite raisonnable pourrait

être de l'ordre de 50 kWh de capacité de batteries, ce qui autoriserait quand même en pratique des parcours de 300 à 400 km.

« Une limite raisonnable pourrait être de l'ordre de 50 kWh de capacité de batteries, ce qui autoriserait quand même en pratique des parcours de 300 à 400 km. »

Notons que cette évaluation d'empreinte carbone s'effectue dans le cadre de parcours annuels moyens tels qu'on les connaît aujourd'hui. Mais un facteur susceptible d'avoir un impact très significatif pour réduire l'empreinte carbone des BEV est l'amortissement sur un nombre de kilomètres plus important que les usages actuels : en effet, le coût à l'utilisation (coût carbone comme coût économique) des BEV étant très faible, c'est une incitation forte à l'utilisation accrue du véhicule. La durée de vie de la batterie électrique étant plutôt limitée de manière calendaire (~10 ans) que par son nombre de cycles de charge, le BEV est ainsi particulièrement – et paradoxalement – adapté aux usages les plus intensifs en termes de kilométrage (utilitaires, taxis, autopartage, flotte d'entreprises, etc.)

2

NOTRE RÉSEAU ÉLECTRIQUE TIENDRA-T-IL LE CHOC FACE À UN AFFLUX MASSIF DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES SUR LES ROUTES ?

« 8 millions de VE (BEV et PHEV) généreraient une demande d'électricité de 24 TWh ... soit une quantité équivalente à environ 5% de la production nationale. »

Tordons d'emblée le cou à une idée reçue : non, la consommation d'électricité en lien avec le développement de la mobilité électrique ne pose pas de contrainte en termes de production électrique, même avec un volume très important de véhicules. Pour s'en convaincre, il suffit de mettre en regard deux données : 8 millions de VE (BEV et PHEV) généreraient une demande d'électricité de 24 TWh ... soit une quantité équivalente à environ 5% de la production nationale⁹. Par ailleurs, cette consommation d'électricité propre à l'électro-mobilité individuelle ne s'ajouterait pas à la consommation actuelle, car elle serait en grande partie compensée par la baisse générale de la consommation à moyen terme pour les autres usages (effet de l'efficacité énergétique dans l'industrie ou le résidentiel-tertiaire).



« Avec un pilotage de la charge, la puissance nécessaire aux 8 millions de véhicules électrifiés à la pointe hivernale de 19h serait bien moindre : 3,5 GW,

soit une puissance inférieure aux réductions obtenues par ailleurs sur les autres usages »

C'est sur la question de la puissance, i.e. l'équilibre du réseau (à l'échelle globale ou plus régionale) que la problématique se pose de manière plus sensible. Toutefois, les modélisations récentes faites par RTE indiquent là aussi que l'impact pourrait être absorbé par la production en faisant l'hypothèse d'un pilotage « intelligent » de la charge (utilisation des fonctionnalités des smart grids et des signaux tarifaires). Plus précisément, la puissance électrique que représenterait sans pilotage la charge de 8 millions de véhicules électrifiés serait de 8 GW lors de la pointe hivernale de 19h compte tenu du foisonnement de l'utilisation des charges (pour un jour ouvré moyen d'hiver et par rapport à une situation sans véhicules électrifiés). Selon RTE, il est également intéressant de noter que l'évolution des autres usages électriques à l'horizon 2030 a un impact de réduction de la pointe d'un volume similaire. Avec un pilotage de la charge, la puissance nécessaire aux 8 millions de véhicules électrifiés à la pointe hivernale de 19h serait bien moindre : 3,5 GW, soit l'équivalent de moins de 2°C de variation de température¹⁰. Dans ce cas, pour les mêmes raisons qu'invoquées ci-dessus, la pointe de 19h n'augmenterait pas mais diminuerait par rapport à 2016.

« Le développement à large échelle du BEV en France ne représente donc rien d'inaccessible pour le réseau électrique à l'horizon de 15 ans, même dans l'hypothèse d'une recharge non pilotée. »

⁹ Calculs Carbone 4 sur la base d'un scénario de développement ambitieux des véhicules particuliers et utilitaires électriques (et hybrides rechargeables) à l'horizon 2030.

¹⁰ Lors des pics de froid hivernaux, la pointe de production électrique varie en fonction de la température minimale atteinte. On parle de thermosensibilité. Elle est de l'ordre de 2 GW / °C à la pointe aujourd'hui.

Le développement à large échelle du BEV en France ne représente donc rien d'inaccessible pour le réseau électrique à l'horizon de 15 ans, même dans l'hypothèse d'une recharge non pilotée, pourvu bien sûr que les niveaux de capacités pilotables soient analogues au niveau actuel. Cette analyse laisse toutefois un angle mort sur l'adéquation géographique : à la maille locale de distribution, des congestions sont susceptibles d'apparaître et nécessiteraient des renforcements du réseau de distribution.

Si les contraintes ont été explorées, le champ des opportunités reste en revanche encore peu défriché, en particulier celui des services rendus au système électrique. Des premières évaluations, en cours d'approfondissement, laissent entrevoir des bénéfices économiques et environnementaux significatifs.

3

LES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DE L'ÉLECTRO-MOBILITÉ SONT-ILS COHÉRENTS AVEC LES ANNONCES DES INDUSTRIELS ?

En Europe, le développement des BEV fait l'objet de politiques volontaristes. De nombreux pays se sont fixés des objectifs ambitieux de déploiement dans le parc automobile. A titre d'exemple, l'Allemagne dispose d'un plan d'1 million de véhicules électrifiés en circulation d'ici à 2020, contre seulement 100 000 en 2017.

Fin mai, le gouvernement français, en partenariat avec la filière automobile (constructeurs, équipementiers, etc.), a annoncé son plan 2018-2022 pour la filière automobile. Un des objectifs est de multiplier par cinq le nombre de véhicules électriques neufs vendus en France chaque année pour un parc total de 600 000 BEV (139 000 aujourd'hui) et 400 000 PHEV d'ici 2022. À plus long terme, l'annonce de l'arrêt de la commercialisation des VT en 2040 devrait fortement avantager le véhicule électrique.

Enfin, on peut citer aussi le cas de la Norvège qui fait figure d'exception, avec d'ores-et-déjà des ventes de BEV supérieures aux ventes de VT.

« Il y a une cohérence d'ensemble entre objectifs publics et industriels désormais, ce qui n'était pas le cas 3 ans plus tôt. »

Ces annonces sont globalement suivies par les constructeurs qui annoncent des plans d'investissement cohérents avec ces trajectoires volontaristes de déploiement du véhicule électrique.

Dans la vision de certains constructeurs comme Volkswagen, la demande pour les véhicules électrifiés va très fortement augmenter. À titre d'illustration, le constructeur prévoit d'en commercialiser 25% par an d'ici à 2025, sur l'ensemble de ses marques (VW, Audi, Porsche, etc.), pour un total de 80 modèles dont 50

seront exclusivement électriques.

Le groupe va investir massivement dans la mobilité électrique d'ici 2025 : l'investissement consacré au véhicule électrique, à la conduite autonome et aux nouveaux services de mobilité, représentera presque la moitié de l'investissement total de Volkswagen sur la période, soit 34 Mds€ sur les 70 Mds€ prévus.

BMW va également s'investir dans la production massive de BEV d'ici à 2020. Le groupe a annoncé 25 modèles électrifiés dont 12 entièrement électriques d'ici 2025. Mercedes-Benz (Daimler) prévoit pour sa part de lancer 10 modèles électriques d'ici à 2022.

Côté français, Renault a prévu d'investir un milliard d'euros d'ici 2022 dans la recherche, le design et la production de véhicules électriques dans quatre de ses usines (Douai, Flins, Cléon, Maubeuge). En particulier, l'entreprise entend doubler sa production de Zoé à bref délai (passant de 35 000 en 2017 à 70 000) et multiplier par trois sa capacité de production de moteurs électriques.



Dans le giron du même groupe automobile, Nissan affiche des ambitions similaires et souhaite commercialiser un million de véhicules électriques (dont hybrides) par an d'ici 2022, en développant huit nouveaux modèles (dont quatre pour le

marché chinois) de son côté et douze avec ses partenaires Renault et Mitsubishi Motors.

Au vu de ces chiffres étayés par des investissements d'ores-et-déjà engagés, il apparaît que les capacités industrielles de production de véhicules électriques à destination du marché européen devraient croître très rapidement. Il y a une cohérence d'ensemble entre objectifs publics et industriels désormais, ce qui n'était pas le cas 3 ans plus tôt.

Pour conclure, remarquons que le numéro 1 mondial, Toyota, a récemment modifié sa stratégie sur le véhicule électrique. Ainsi, 11 milliards d'euros seront investis par le constructeur nippon d'ici à 2030, dont une grande partie sera consacrée à la production de batteries (technologie solide, en rapprochement avec Panasonic). Déjà précurseur dans l'hybride non rechargeable, la marque envisage de commercialiser 10 modèles 100% électriques d'ici 2020, et étoffer progressivement sa gamme jusqu'à 50% de modèles électrifiés en 2030. Elle s'appuiera pour cela à la fois sur la technologie à batteries mais aussi bien entendu sur l'hydrogène dont elle s'est fait l'ardent promoteur depuis de nombreuses années¹¹.

¹¹ Toyota commercialise ainsi la Mirai en France depuis 2015 : cette berline fonctionne avec une pile à combustible alimentée par de l'hydrogène.

4

EST-CE QUE LA MOBILITÉ ÉLECTRIQUE NOUS PERMETTRA DE CONSERVER NOS PRATIQUES DE MOBILITÉ ACTUELLES ?

S'il ne fait pas de doute que le BEV peut occuper une place importante au sein du système de transport des personnes, celle-ci doit impérativement se définir dans le cadre d'une stratégie long terme d'organisation de la mobilité, au sens large.

« Accepter des véhicules de moindre autonomie (avec des capacités de batteries raisonnables, inférieures à 50 kWh par exemple) fait partie d'un mouvement d'ensemble vers une mobilité plus raisonnée. Cette transition qui va au-delà de la seule électrification des véhicules englobe des évolutions de comportements et de normes sociales. Elles se concrétisent par exemple par la réduction des vitesses de déplacements, ou encore par le développement de véhicules de plus petite taille (à l'inverse de l'essor actuel des SUV), qui soient partagés quand cela est opportun. »

A l'évidence, le BEV pourra constituer en France un levier important de la décarbonation du secteur des transports routiers (y compris pour les marchandises), représentant près de 90% des émissions du transport (sans prendre en compte ni la chaîne amont des carburants, ni les émissions de fabrication des véhicules). Toutefois, la vitesse à laquelle nous devons réduire nos émissions, de même que les contraintes sur les coûts des véhicules, sur les ressources naturelles, ou encore la congestion en zone urbaine, sont autant de facteurs qui poussent pour un rapport différent à la voiture.

Accepter des véhicules de moindre autonomie (avec des capacités de batteries raisonnables, inférieures à 50 kWh par exemple) fait partie d'un mouvement d'ensemble vers une

mobilité plus raisonnée. Cette transition qui va au-delà de la seule électrification des véhicules englobe des évolutions de comportements et de normes sociales. Elles se concrétisent par exemple par la réduction des vitesses de déplacements, ou encore par le développement de véhicules de plus petite taille (à l'inverse de l'essor actuel des SUV), qui soient partagés quand cela est opportun. Par ailleurs, comme l'une des premières sources d'émissions de GES en France, l'hégémonie de la voiture pour les déplacements doit être remise en question : il est indispensable de développer en parallèle les modes actifs (marche, vélo) et les modes collectifs dans leurs domaines de pertinence pour atteindre le bon rythme de décarbonation.

Avec une population qui s'urbanise de plus en plus et des technologies de l'information facilitatrices de la multimodalité, nous sommes en présence d'un faisceau de facteurs à même de favoriser ces changements de comportement. Reste le délicat sujet de la ruralité où les alternatives à la voiture individuelle sont moins évidentes : c'est probablement là que le BEV a la meilleure carte à jouer et où sa place pourrait sans doute être encore renforcée.

« La mobilité électrique individuelle sera un instrument important pour limiter les émissions de CO₂ du secteur des transports à l'avenir. Mais cela devra impérativement s'accompagner d'une réduction de la place de la voiture dans la mobilité globale. »

Ainsi, le déploiement du BEV doit s'accompagner d'un développement des transports en commun et des modes actifs, d'une acceptation large de la non-mobilité (notamment pour

des déplacements considérés comme « contraints », par exemple via le télétravail), d'une augmentation des taux de remplissage des véhicules (seulement 1,5 personnes par véhicule en moyenne en 2015 en France, et encore moins pour les trajets inférieurs à 80 km) grâce à l'auto-partage et le covoiturage. De manière générale, le BEV peut parfaitement y trouver sa place, tout en s'insérant dans une dynamique de décroissance tendancielle du nombre de voitures en zone urbaine.

« La mobilité électrique individuelle constituera un instrument efficace à moyen et long-terme si elle s'accompagne impérativement d'une réduction de la place de la voiture dans la mobilité globale, par rapport aux usages actuels. »

Si le développement des transports en commun, des modes actifs et la sobriété des déplacements sont des leviers majeurs, en particulier à court terme avec un transport routier éminemment fossile, la mobilité électrique individuelle constituera un instrument efficace à moyen et long-terme si elle s'accompagne impérativement d'une réduction de la place de la voiture dans la mobilité globale, par rapport aux usages actuels.

5

LES CITOYENS DOIVENT-ILS S'ATTENDRE À DÉPENSER PLUS POUR LEUR MOBILITÉ INDIVIDUELLE SI ELLE DEVIENT ÉLECTRIQUE ?

Dès aujourd'hui en France, les coûts complets¹² (TCO en anglais) du BEV peuvent être équivalents, voire plus faibles que ceux des VT, dans certains cas de figure, pour des capacités de batteries réduites.

Cela dit, du point de vue de l'automobiliste, le raisonnement économique ne relève pas nécessairement de cette rationalité : c'est le coût d'acquisition qui prévaut en grande majorité. Même en tenant compte des aides publiques, et même si les batteries peuvent être louées dans certains cas, le coût d'acquisition reste un obstacle pour beaucoup d'automobilistes. Enfin, dans un secteur qui évolue très rapidement du fait des évolutions technologiques et des gains industriels d'apprentissage, il existe une réelle incertitude sur la valeur résiduelle des véhicules au bout de quelques années.

« Sans aides publiques, les évolutions attendues sur les coûts de production placent les BEV à parité avec les VT vers 2025. On peut donc dire que les Français n'auront pas à dépenser plus pour leur mobilité individuelle en passant à l'électrique, au contraire. »

À l'avenir, en logique de bilan économique, la situation s'améliorera encore en faveur du BEV, compte tenu de la baisse du coût des batteries, mais aussi du renchérissement des carburants (renchérissement probable de l'énergie fossile, et renchérissement certain de la fiscalité des carburants, du fait du rattrapage TICPE essence-gazole et de la hausse de la contribution climat-énergie). Les aides publiques pour le BEV ont toutefois vocation à disparaître,

ce qui rend plus délicate l'analyse. Il semble néanmoins logique que ces aides baissent de manière progressive au fur et à mesure que les BEV deviennent d'eux-mêmes compétitifs économiquement avec les VT. Sans aides publiques, les évolutions attendues sur les coûts de production placent les BEV à parité avec les VT vers 2025. On peut donc dire que les Français n'auront pas à dépenser plus pour leur mobilité individuelle en passant à l'électrique, au contraire.



¹² Le coût complet intègre toutes les composantes liées à l'utilisation du véhicule : l'achat, l'énergie, l'assurance, l'entretien, les frais de péage/de parking, la revente, etc.

6

LE DÉVELOPPEMENT DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE N'EST-IL PAS UNE UTOPIE COMPTE TENU DE LA DISPONIBILITÉ DES RESSOURCES MINÉRALES NÉCESSAIRES ?

Le BEV en tant que tel ne nécessite pas de métaux différents que le VT, mais sa batterie lithium-ion oui. Parmi les métaux nécessaires à la fabrication de ces batteries, le lithium et le cobalt apparaissent comme les plus critiques.

Focus Lithium :

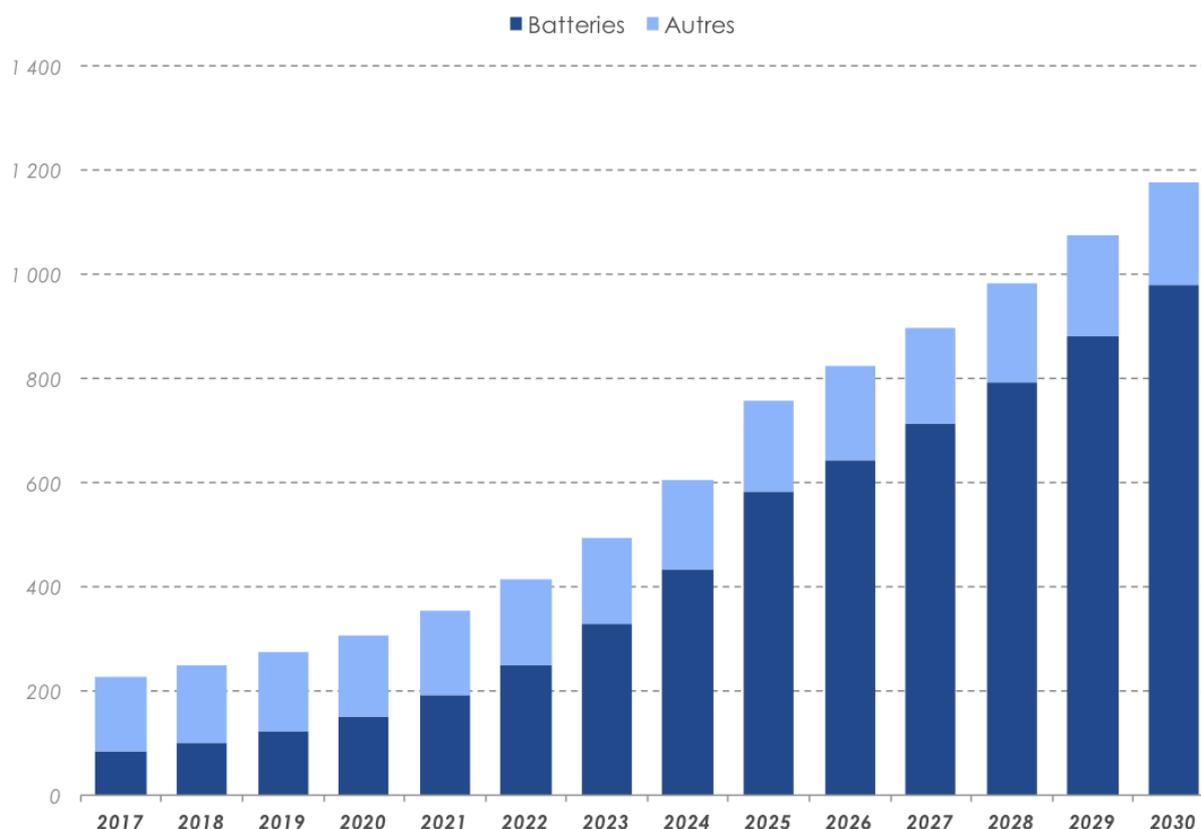
Le lithium est un métal essentiel des batteries « Lithium-Ion », grâce à son fort potentiel électrochimique permettant d'atteindre une grande densité énergétique. Sa substitution n'est donc pas à l'ordre du jour, les prochaines technologies de batteries dites « lithium-

soufre » et « lithium-air » qui pourraient apparaître sur le marché après 2030, misant également dessus.

L'électrification attendue de la mobilité va avoir un très fort impact sur la demande en lithium. Dans un cas de figure où 10 millions de BEV, 6 millions de PHEV, 25 millions de véhicules hybrides non rechargeables¹³ étaient produits en 2030¹⁴, cela impliquerait une croissance annuelle de la demande de 13,5% entre 2017 et 2030. Ce taux de croissance est très significatif : est-il réaliste ?

Demande prévisionnelle de Lithium par usage

ktLCE | Monde | 2017-2030



Evolution de la demande en lithium d'ici 2030 (ktLCE)

Source : étude Carbone 4

¹³ VT intégrant une petite batterie électrique non rechargeable.

¹⁴ Ces chiffres sont en lignes avec un scénario de développement volontariste à l'échelle mondiale (de l'ordre de 30% des ventes totales de voitures neuves).

« Le lithium n'est donc pas le métal qui pourrait venir contraindre précocement [...] une électrification des véhicules. »

Une analyse fine des accroissements de capacité des producteurs actuels et des projets développés par de nouveaux entrants permettent de conclure que l'accroissement de l'offre sera globalement suffisant pour répondre à l'évolution de la demande d'ici 2025.

La mise en production additionnelle de ~550 kt LCE (Lithium Carbonate Equivalent, unité standard du marché du lithium), triplant la capacité actuelle en 7 ans, représente tout de même un challenge industriel très important. Des tensions sur l'offre sont donc prévisibles, ce que les acteurs industriels anticipent en tentant activement de sécuriser leurs approvisionnements. La visibilité est plus faible au-delà de 2025, mais l'ajustement offre-demande devrait se réaliser sans trop de heurts vu le portefeuille de projets en développement.

Une telle croissance de la demande impliquerait une consommation cumulée de 8,6 Mt de LCE sur la période 2017-2030, soit 11,5% des réserves et 3,5% des ressources estimées en 2017. En prolongeant la croissance de la demande au même rythme (~10% par an) jusqu'à atteindre 30 M de véhicules électrifiés vendus en 2030, les ressources connues sont suffisantes pendant des dizaines d'années, sans prise en compte du recyclage.

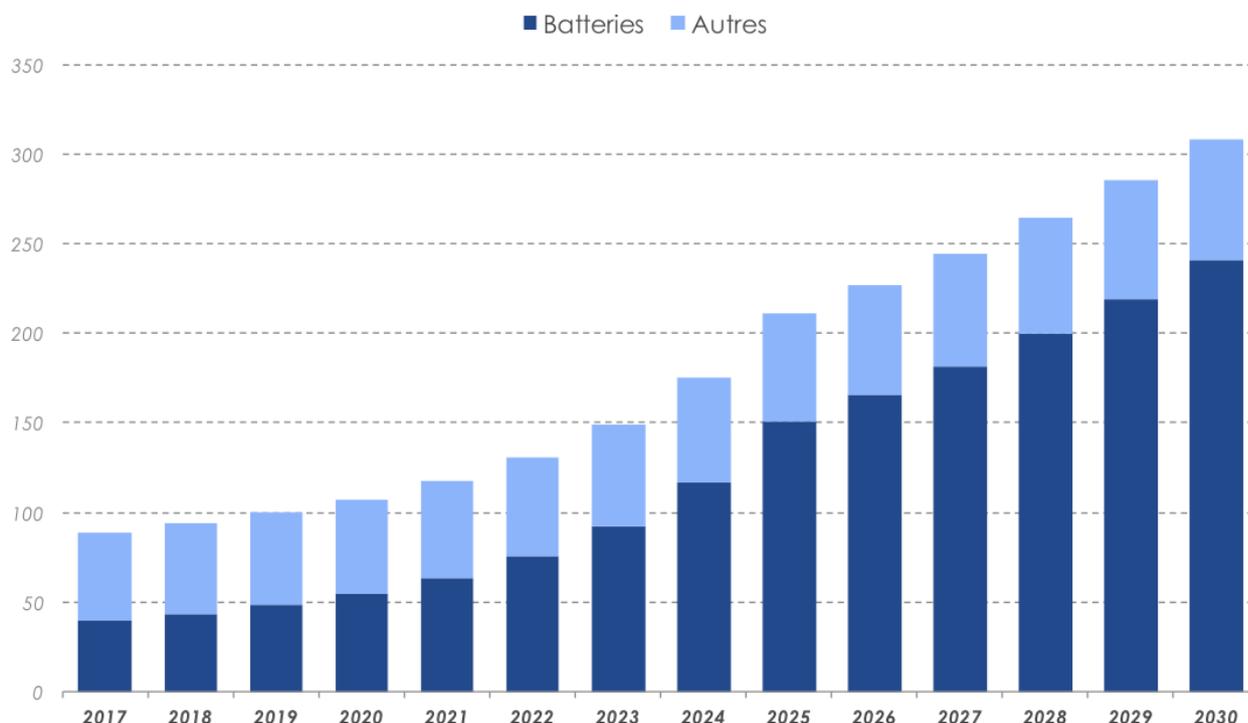
Le lithium n'est donc pas le métal qui pourrait venir contraindre précocement une transition vers une mobilité bas-carbone qui s'appuierait sur une électrification des véhicules.

Focus Cobalt :

Le cobalt voit également sa demande fortement tirée par l'électrification de la mobilité, avec une croissance annuelle d'environ 10% sur la période 2017-2030.

Demande prévisionnelle de Cobalt par usage

ktCo | Monde | 2017-2030



Evolution de la demande en cobalt d'ici 2030 (ktCo)

Source : étude Carbone 4

Le principal défi pour le cobalt concerne l'offre. Cette dernière est actuellement concentrée à ~60% en République Démocratique du Congo (RDC), pays qui détient également ~50% des réserves de ce métal. Le risque géopolitique pouvant impacter la production est par conséquent élevé, ce pays ayant conscience de sa position de force sur ce sujet. Il se matérialise déjà par un nouveau code minier récemment instauré, beaucoup plus favorable aux intérêts de la RDC. Projet que les opérateurs miniers majeurs opérant dans le pays, tels Glencore ou Rangold, combattent actuellement en justice.

Un second risque lié à la RDC concerne les conditions sociales et environnementales d'extraction, ainsi que la traçabilité, ce qui détourne certains acheteurs occidentaux de ce pays et renforce les tensions sur les autres sources d'approvisionnement en cobalt.

Un troisième défi concernant l'offre est que le cobalt est très majoritairement un co-produit de l'extraction du cuivre ou du nickel. La croissance de la production dépend donc de la dynamique d'autres marchés, ce qui pourrait occasionner des déséquilibres ponctuels entre offre et demande.

« Seuls le recyclage et des technologies de batteries moins intensives en cobalt permettront ainsi de sortir d'une tension sur ce métal, déjà réelle aujourd'hui. »

La stabilité des approvisionnements en cobalt constitue donc un réel défi pour le développement de la mobilité électrique. Des solutions existent, en particulier via le développement de projets de production hors RDC, mais également par la R&D dans de nouvelles chimies de cathodes pour batteries lithium-ion consommant beaucoup moins, voire plus du tout de cobalt. Des avancées importantes sont en cours sur ce second aspect, tels Tesla et Panasonic développant une cathode consommant 65% de moins de cobalt

que la génération précédente ou encore les nouvelles chimies dites « NMC » avec un besoin moindre en cobalt de ~80% à l'horizon 2030.

Enfin, les réserves et ressources connues de cobalt sont moins importantes que celles de lithium quand on les rapporte à une évolution similaire de la demande. Il est donc essentiel pour ce métal d'accroître le recyclage, ce qui permettrait d'étendre la durée de vie des ressources de plusieurs dizaines d'années.

Seuls des packs batteries plus petits, un renforcement du recyclage et des technologies moins intensives en cobalt¹⁵ permettront ainsi de sortir d'une tension sur ce métal, déjà réelle aujourd'hui.

¹⁵ Tesla a fait des annonces en ce sens, en indiquant vouloir réduire à « presque à zéro » l'utilisation du cobalt dans les cellules des batteries de ses modèles.

7

ET POURQUOI PAS L'HYDROGÈNE OU LE BIOGAZ PLUTÔT QUE LES BATTERIES ?

La place médiatique prépondérante occupée par les BEV a tendance à occulter l'existence d'autres solutions alternatives au VT classique.

Une autre type de véhicule électrique existe : le véhicule électrique à pile à combustible (FCEV), ou plus simplement appelé véhicule à hydrogène (H_2). L'hydrogène stocké dans un réservoir alimente une pile à combustible qui produit de l'électricité (par réaction avec l'oxygène de l'air) pour entraîner ensuite le moteur électrique. Le seul co-produit de cette production d'électricité est la vapeur d'eau, émise au niveau de l'échappement.

« Il semble plus pertinent, à court et moyen-terme, d'envisager l'hydrogène pour des véhicules lourds de forte puissance [...], où les avantages comparatifs de cette solution par rapport à la technologie batteries sont plus flagrants. »

À l'heure actuelle, cette technologie en est à ces prémices industriels, ce qui explique qu'on compte dans le monde environ 1 000 fois moins de FCEV sur les routes aujourd'hui que de BEV.

Dans l'hypothèse d'une production décarbonée du H_2 (par électrolyse de l'eau à l'aide d'une électricité peu ou pas carbonée), l'avantage de ce combustible réside dans l'autonomie qu'il confère et le temps de recharge associé. Ces caractéristiques du H_2 sont toutes deux similaires à celles d'un VT (plusieurs centaines de km avec un plein et quelques minutes seulement pour effectuer une recharge). De plus cette technologie semble moins dépendante de ressources en matières premières

fortement concurrentielles à moyen-terme (métaux « rares » comme lithium et cobalt). Néanmoins le surcoût du 100% H_2 par rapport aux véhicules 100% batteries est aujourd'hui clairement au désavantage de l'hydrogène. Cette différence, même dans un contexte de réduction globale des coûts, devrait subsister à moyen-terme. En outre, les progrès que réaliseront les véhicules à batteries entretemps, et surtout leur adoption progressive par les usagers, rendront moins facile la pénétration de cette solution sur le marché de la voiture particulière.

C'est pourquoi il semble plus pertinent, au moins à court et moyen-terme, d'envisager l'hydrogène pour des véhicules lourds de forte puissance (autocars, camions, trains, etc.), où les avantages comparatifs de cette solution par rapport à la technologie batteries sont plus flagrants économiquement et opérationnellement. Néanmoins, dans le cas des véhicules particuliers ou utilitaires légers, il est également possible d'envisager des solutions hybrides batteries/ H_2 ¹⁶. En effet, dans ce contexte le recours à l'hydrogène serait ponctuel (pour répondre aux rares besoins de trajets longue distance) et les synergies batteries/ H_2 pourraient réduire le surcoût du 100% H_2 . L'opposition frontale entre BEV et FCEV n'a donc pas forcément de sens ...

« L'opposition frontale entre BEV et FCEV n'a pas forcément de sens ... »

¹⁶ Solution déjà proposée par certaines entreprises comme Symbio en France par exemple.



Enfin, une solution thermique et décarbonée est disponible : il s'agit des véhicules roulant au gaz naturel renouvelable, le biométhane (véhicules bioGNV). Il existe d'ores-et-déjà une flotte conséquente de véhicules GNV dans le monde (en Iran, en Argentine et au Brésil notamment) : cette flotte représente près de 30 millions de véhicules, soit environ 10 fois plus que les BEV.

La mobilité gaz permet notamment d'émettre moins de particules et de gaz polluants, le biométhane permettant en plus de décarboner son usage. Néanmoins pour les véhicules particuliers en France, ce type de solution n'a pas émergé du fait de stratégies différentes de la part des constructeurs. En revanche, le fret routier s'intéresse de plus en plus près aux solutions gaz (et biométhane) et l'on voit un certain nombre d'acteurs de la logistique et des transports collectifs s'engager dans des projets GNV, y compris sur les solutions de gaz liquéfié (comme par exemple le projet LNG Blue Corridor).

Par ailleurs, l'offre de camions et autres autocars ou autobus fonctionnant au GNV est très complète. Cela s'explique par la proximité entre technologies diesel et gaz, toutes deux à combustion interne, qui n'oblige pas les utilisateurs à repenser entièrement leurs opérations (avitaillement, maintenance, formation, entretien, etc.), au contraire de la mobilité électrique. Toutefois, les véhicules gaz ne pourront contribuer à la réduction des émissions de GES que si et seulement s'ils auront recours au biométhane ... ce qui pose certaines questions notamment au regard du gisement réellement disponible !

Toujours est-il que ce sujet des alternatives au pétrole pour le transport collectif de personnes et le transport de marchandises est également en pleine effervescence. L'existence de solutions comme le bioGNV, le BEV, le PHEV, le FCEV mérite ainsi un examen plus approfondi qui fera l'objet d'une autre publication de Carbone 4.



Fondé en 2007 par Alain Grandjean et Jean- Marc Jancovici, rejoints en 2017 par un dirigeant de grandes entreprises, Laurent Morel, Carbone 4 est un cabinet de conseil indépendant, leader de la stratégie climat, de la transition énergétique et de l'adaptation au changement climatique. Notre équipe accompagne les entreprises dans la transition vers une économie bas carbone et résiliente au changement climatique.