



Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique

MAI 2019

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique

MAI 2019

PRINCIPAUX RÉSULTATS

SOMMAIRE

1. L'état des lieux initial : des premiers enseignements sur l'intégration de l'électromobilité au système électrique dans le Bilan prévisionnel 2017 de RTE	6
1.1 L'essor de la mobilité électrique est désormais une certitude et son intégration au système électrique doit être préparée	6
1.2 Le Bilan prévisionnel 2017 a montré la faculté du système électrique à intégrer un nombre massif de véhicules électriques sous réserve d'un minimum de pilotage de la recharge	8
1.3 Des demandes d'approfondissements de la part des parties prenantes, qui permettent d'éclairer les discussions sur les feuilles de route «énergie» et «mobilité»	9
2. L'enjeu de l'étude approfondie : une bonne compréhension des déterminants et des paramètres clés pour le système	10
2.1 Les besoins de mobilité : une analyse détaillée, basée sur les données de l'enquête nationale transports et déplacements	10
2.2 Le développement du véhicule électrique : une identification des différents paramètres clés	11
2.3 Le pilotage de la recharge : une analyse systématique des différentes variantes envisageables	14
2.4 Le système électrique : une modélisation du mix conforme aux scénarios du Bilan prévisionnel et aux ambitions du projet de PPE	17
3. Des scénarios contrastés pour le développement de la mobilité électrique	19
4. Un système électrique en mesure d'accueillir le développement du véhicule électrique	30
4.1 Dans tous les scénarios, le parc de production français sera largement capable de produire la quantité d'énergie consommée par les véhicules électriques	31
4.2 Les appels de puissance lors des périodes de forts déplacements n'engendrent pas d'inquiétude pour la sécurité d'approvisionnement	32
4.3 L'enjeu pour le système électrique porte essentiellement sur la recharge pour les besoins de mobilité « du quotidien »	33
4.4 Le pilotage de la recharge permet d'adapter la consommation à la production d'électricité renouvelable	35
4.5 Le développement massif du pilotage de la recharge ne constitue pas un prérequis à l'intégration de la mobilité électrique...	36
4.6 ... mais le pilotage est une option sans regret pour accroître la résilience du système électrique	37
5. L'analyse économique à l'échelle du système électrique : une forte cohérence entre l'électrification des transports et la feuille de route énergétique, et des leviers pour réduire les coûts	40
5.1 La production d'électricité pour la recharge des véhicules électriques représente une composante minimale du coût complet de la mobilité...	41
5.2 ... et une faible part des coûts totaux de production d'électricité à horizon 2035	43

5.3	Le coût de la production d'électricité est variable selon les scénarios : il existe des leviers pour l'optimiser	44
5.4	Le pilotage de la recharge : le déploiement généralisé de dispositifs de pilotage simples conduit a des gains importants pour le système électrique, pouvant atteindre 1 milliard d'euros par an	45
5.5	Le <i>vehicle-to-grid</i> : des gains supplémentaires, pour un déploiement sur une partie du parc	48
5.6	La participation aux réserves pour l'équilibrage du système électrique : une contribution possible, mais un marché de niche	49
5.7	L'utilisation des batteries de seconde vie comme solution de stockage : des débouchés économiques incertains	50
5.8	Le développement de la mobilité électrique permet un meilleur équilibre du système électrique, au bénéfice de l'ensemble de ses utilisateurs	52
6.	Pour le consommateur, un coût de la mobilité électrique qui peut être maîtrisé par la valorisation de la flexibilité sur la recharge	54
6.1	Le transfert du véhicule thermique vers le véhicule électrique permet une forte réduction du coût du « plein »	55
6.2	Le pilotage de la recharge offre des opportunités supplémentaires pour maîtriser la facture	56
6.3	Différents modèles économiques pour la recharge réversible, conditionnés aux habitudes de mobilité et au cadre de régulation	58
6.4	Combiner mobilité électrique et autoconsommation : une opération qui peut avoir du sens du point de vue économique	60
7.	Analyse environnementale : une réduction significative de l'empreinte carbone des transports	62
7.1	Dans tous les scénarios, une forte réduction des émissions du secteur des transports en France	63
7.2	À parc électrique inchangé, les effets baissiers sur les émissions des transports en France sont plus importants que les effets haussiers liés à la production d'électricité carbonée dans les pays voisins	64
7.3	Le bénéfice carbone de la mobilité électrique reste important en intégrant l'ensemble du cycle de vie du véhicule, y compris avec des batteries « made in China »...	65
7.4	... mais la localisation de la production des batteries en France améliore significativement le bilan carbone	67
7.5	La capacité de stockage des batteries et les modes de recyclage permettent également de limiter les émissions associées à l'extraction des matériaux et à la fabrication des batteries	68
7.6	Le pilotage de la recharge a un impact important sur le contenu CO ₂ de la consommation des véhicules électriques	69
7.7	Le renforcement des transports en commun et des mobilités douces réduit encore l'empreinte carbone des transports	70
7.8	Le coût de la décarbonation via le développement de la mobilité électrique, initialement important, devrait à terme être faible	72
7.9	Le développement de la mobilité électrique soulève d'autres enjeux environnementaux et éthiques	74
8.	Prolongements	76

L'ÉTAT DES LIEUX INITIAL : DES PREMIERS ENSEIGNEMENTS SUR L'INTÉGRATION DE L'ÉLECTROMOBILITÉ AU SYSTÈME ÉLECTRIQUE DANS LE BILAN PRÉVISIONNEL 2017 DE RTE

1.1 L'essor de la mobilité électrique est désormais une certitude et son intégration au système électrique doit être préparée

En France, la consommation énergétique du secteur des transports représente près de 30 % de la consommation énergétique finale et près de 40 % des émissions de gaz à effet de serre, dont 95 % est émis par le transport routier. C'est le seul secteur dont les émissions ont augmenté de façon continue depuis 1990. Les ambitions publiques en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre et notamment l'objectif de neutralité carbone à horizon 2050 découlant de l'accord de Paris, impliquent de réduire très fortement les émissions de ce secteur.

Outre les émissions de gaz à effet de serre, le secteur des transports induit des impacts environnementaux locaux (nuisances sonores, pollution de l'air, etc.) qui affectent la qualité de vie et la santé des français. À ce titre, la transition du véhicule thermique vers d'autres types de mobilité figure également parmi les priorités du Gouvernement.

Face à ces problématiques environnementales et de santé publique, les pouvoirs publics, aux niveaux européen, national et local, mettent en place des politiques publiques visant à faire émerger une mobilité plus propre. Ces différents outils portent à la fois sur l'offre et la demande de transport, et prennent la forme de mesures prescriptives ou d'incitations financières : objectifs contraignants pour les constructeurs sur les émissions moyennes des nouveaux modèles commercialisés, mise en place de « zones à faible émissions » (ZFE), prime

à la conversion, bonus-malus écologique, taxe carbone, défiscalisation de la recharge de véhicules électriques fournie par une entreprise à ses salariés, exonération de la taxe sur les véhicules de société pour les véhicules propres, etc.

La maîtrise des impacts environnementaux des transports s'appuiera sur différentes solutions : report modal vers les transports en commun ou la mobilité douce, développement du covoiturage et sobriété, mais également développement de différentes solutions techniques de mobilité propre (véhicules tout électriques, véhicules hybrides rechargeables, véhicules à hydrogène, véhicules au gaz naturel, etc.).

Parmi ces solutions, les véhicules électriques représentent aujourd'hui la principale solution envisagée pour réduire les émissions de gaz à effet de serre du transport routier, en s'appuyant sur un parc de production d'électricité peu carboné. Si les véhicules électriques ne constituent pas la seule solution pour décarboner le secteur des transports, leur développement est sensiblement plus avancé que celui des technologies propres alternatives. Bien qu'encore modeste à l'heure actuelle, la part de marché du véhicule électrique s'inscrit dans une trajectoire de fort développement en France mais également au niveau mondial.

Si la dynamique précise de pénétration de la mobilité électrique à moyen terme reste soumise à plusieurs incertitudes, il apparaît

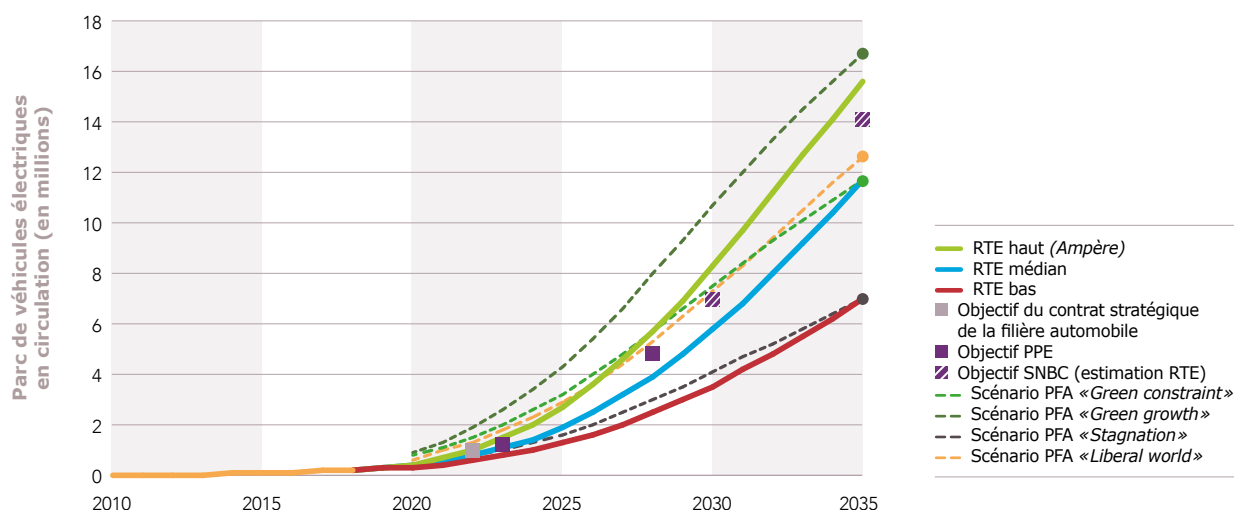
désormais très probable que le véhicule électrique devrait se développer fortement au cours des prochaines années. Ainsi, les différentes projections des constructeurs (scénarios de la Plateforme française automobile – PFA) et des pouvoirs publics (ambitions de la Programmation pluriannuelle de l'énergie et de la Stratégie nationale bas carbone) tablent sur un nombre de véhicules électriques en circulation en France de plus d'un million d'unités à l'horizon 2022-2023, de 4,8 millions en 2028 (échéance de la PPE), et pouvant atteindre 7 à 16 millions d'unités (véhicules particuliers et véhicules utilitaires légers) en 2035 (soit entre près de 20 % et plus de 40 % du parc total). Le développement devrait concerner en premier lieu essentiellement les véhicules particuliers et véhicules utilitaires légers mais devrait à terme également porter sur les véhicules lourds (bus et camions électriques).

Le développement massif du véhicule électrique constitue un défi et une évolution structurante

pour les secteurs de l'énergie et des transports, et la réussite de ce développement nécessite que plusieurs conditions soient remplies. Outre les problématiques liées à l'accessibilité des bornes de recharge ou à l'évolution industrielle de la filière automobile, la maîtrise de la sécurité d'approvisionnement en électricité, des impacts environnementaux et des coûts pour la collectivité et pour l'utilisateur sont des facteurs de nature à faciliter l'intégration de la mobilité électrique.

Ces problématiques suscitent cependant encore des interrogations. Une partie d'entre elles portent notamment sur la capacité du système électrique à assurer l'approvisionnement en énergie de millions de véhicules électriques, ou encore sur l'intérêt de déployer des solutions de pilotage de la recharge des véhicules. Ces problématiques doivent faire l'objet d'études détaillées afin d'anticiper les impacts du développement de l'électromobilité et de préparer le système électrique à l'intégration massive de ce nouvel usage.

Figure 1. Projections d'évolution du nombre de véhicules légers (véhicules particuliers et véhicules utilitaires légers) électriques en France, toutes technologies confondues : véhicules 100 % électriques (VEB) et véhicules hybrides rechargeables (VHR)



1.2 Le Bilan prévisionnel 2017 a montré la faculté du système électrique à intégrer un nombre massif de véhicules électriques sous réserve d'un minimum de pilotage de la recharge

En 2017, RTE a apporté des premiers éclairages sur les impacts du développement de l'électromobilité dans le cadre du Bilan prévisionnel, établi chaque année au titre du Code de l'énergie.

Les scénarios de long terme construits en concertation avec les parties prenantes du secteur électrique et publiés dans l'édition 2017 du Bilan prévisionnel intègrent ainsi différentes trajectoires contrastées de développement de l'électromobilité, atteignant jusqu'à 15,6 millions de véhicules électriques à horizon 2035. Les scénarios *Volt* et *Ampère*, utilisés par le Gouvernement pour établir le scénario de la PPE, prévoient notamment des trajectoires soutenues de développement de la mobilité électrique.

L'objectif des analyses réalisées dans le Bilan prévisionnel 2017 n'était pas de prédire la dynamique de pénétration du véhicule électrique mais de tester la résilience du système électrique à un développement massif de cette technologie. En particulier, **les études menées sur le scénario « haut » de développement de la mobilité électrique ont démontré, en première approche, la faculté du système à accueillir jusqu'à 15 millions de véhicules électriques d'ici 2035 sans difficulté majeure.**

Ces analyses aboutissent à une double conclusion :

- ▶ Sur la *consommation en énergie*, les analyses du Bilan prévisionnel ont montré qu'il n'existait pas de doutes sur la capacité du système électrique à produire la quantité d'énergie nécessaire à la recharge de plusieurs millions de véhicules, dans un contexte de baisse de consommation observée sur les autres usages. Ainsi, la consommation annuelle de 15,6 millions de véhicules électriques représenterait environ 35 à 40 TWh d'électricité, soit moins de 8% de la production d'électricité totale en France.
- ▶ Sur les *appels de puissance*, un point de vigilance était identifié sur la maîtrise de la pointe du soir en hiver, mais la faculté à absorber une flotte massive de véhicules électriques semble attestée dès lors que des solutions simples de pilotage (par exemple, asservissement tarifaire sur le signal heures pleines/heures creuses de manière similaire au dispositif utilisé aujourd'hui pour l'eau chaude sanitaire) sont mises en place pour une partie du parc de véhicules électriques.

Ces résultats étaient établis sur une représentation simplifiée des besoins de mobilité, l'essentiel de l'analyse portant sur les caractéristiques principales des scénarios de transition (évolution du parc nucléaire, des énergies renouvelables et du parc thermique, régimes d'évolution de la consommation, politiques énergétique des pays voisins, etc.).

1.3 Des demandes d'approfondissements de la part des parties prenantes, qui permettent d'éclairer les discussions sur les feuilles de route « énergie » et « mobilité »

Depuis novembre 2017, les enseignements du Bilan prévisionnel ont été largement utilisés, dans le cadre de travaux ultérieurs de prospective sur le système électrique, ou pour l'élaboration du projet de PPE. Ils ont notamment fourni des bases techniques pour envisager des scénarios de déploiement rapide de la mobilité électrique.

Dans ce cadre, RTE a été saisi de demandes régulières des parties prenantes pour poursuivre la démarche engagée en 2017 et approfondir les analyses croisées sur le développement de la mobilité propre et ses impacts sur le système électrique. Ces demandes ont notamment porté sur un ensemble de points précis : procéder à une analyse d'événements spécifiques tels que les périodes de grands départs en vacances, préciser la valeur économique du pilotage de la recharge et le coût pour le consommateur, détailler les enjeux en matière de réduction des émissions de CO₂ en intégrant l'analyse de cycle de vie des batteries, analyser l'économie des batteries de seconde vie...

Au cours des derniers mois, de nombreux rapports ont été produits sur la mobilité électrique. L'étude de la FNH, publiée en avril 2018, a analysé les conséquences du véhicule électrique sur le bilan carbone, et a appelé à des prolongements. À l'automne 2018, un rapport publié par la CRE a interrogé sur les opportunités offertes par la flexibilité de la recharge et ses modalités de mise en œuvre, et noté le besoin d'études approfondies sur l'intégration de la mobilité électrique au système électrique. En mars 2019, l'OPECST a rendu public un rapport sur les scénarios technologiques permettant d'atteindre l'objectif d'un arrêt de la commercialisation des véhicules thermiques en 2040.

Pour approfondir ces sujets et répondre aux demandes des pouvoirs publics, RTE, en copilotage avec l'AVERE-France (association nationale pour le développement de la mobilité électrique) a mis en place un groupe de travail

réunissant l'ensemble des parties intéressées : acteurs du système électrique (producteurs, fournisseurs, gestionnaires de réseau de distribution, opérateurs de flexibilité et d'effacement, institutions et représentants de l'État, régulateur, etc.), acteurs du secteur de la mobilité au sens large (constructeurs automobiles, start-up proposant des solutions de pilotage de la recharge, opérateurs de bornes de recharge, aménageurs, collectivités, etc.), ONG, syndicats professionnels, consultants, universitaires et institutions publiques (représentants de l'État, régulateur...).

Le cadrage des travaux, les hypothèses utilisées, les résultats préliminaires et définitifs ont été présentés, débattus, et affinés dans ce groupe de suivi. Ce travail de concertation s'est étalé sur plus d'une année. Il a nécessité une adaptation des outils de modélisation de RTE, de manière à pouvoir traiter des scénarios de mobilité très différenciés.

Il a également été nourri des travaux sur la politique de l'énergie (loi énergie-climat, Programmation pluriannuelle de l'énergie et Stratégie nationale bas carbone) et des transports (loi d'orientation des mobilités ou LOM), actuellement discutés au Parlement. Notamment, le projet de SNBC table sur une électrification forte du parc automobile à moyen terme (dans des ambitions comparables à celles du scénario *Ampère* du Bilan prévisionnel 2017 de RTE), et le projet de PPE publié en janvier 2019 projette un déploiement ambitieux du véhicule électrique (4,8 millions d'unités en 2028) et intègre un volet spécifique « stratégie de développement de la mobilité propre ». L'un des enjeux de cette stratégie est de permettre un développement parallèle et coordonné « des énergies nouvelles non carbonées et des nouvelles motorisations et infrastructures logistiques associées ».

Les analyses réalisées et restituées dans ce document permettent ainsi d'éclairer le débat public sur les interactions entre les feuilles de route « énergie » et « mobilité » de la France.

L'ENJEU DE L'ÉTUDE APPROFONDIE : UNE BONNE COMPRÉHENSION DES DÉTERMINANTS ET DES PARAMÈTRES CLÉS POUR LE SYSTÈME

2.1 Les besoins de mobilité : une analyse détaillée, basée sur les données de l'enquête nationale transports et déplacements

Caractériser précisément les formes de mobilité des véhicules électriques est essentiel pour modéliser leur impact sur le système électrique dans une approche de prévision ou de prospective.

Ceci implique de disposer d'une évaluation robuste des distances parcourues (et des vitesses) – qui conditionneront la consommation en énergie – mais aussi d'identifier les types de trajets effectués, les heures et lieux de départ et d'arrivée qui détermineront à quels instants les utilisateurs sont susceptibles de charger leurs véhicules et avec quelle puissance, ou encore de caractériser les services de flexibilité que ces véhicules peuvent rendre au système électrique sans contraindre la mobilité des utilisateurs.

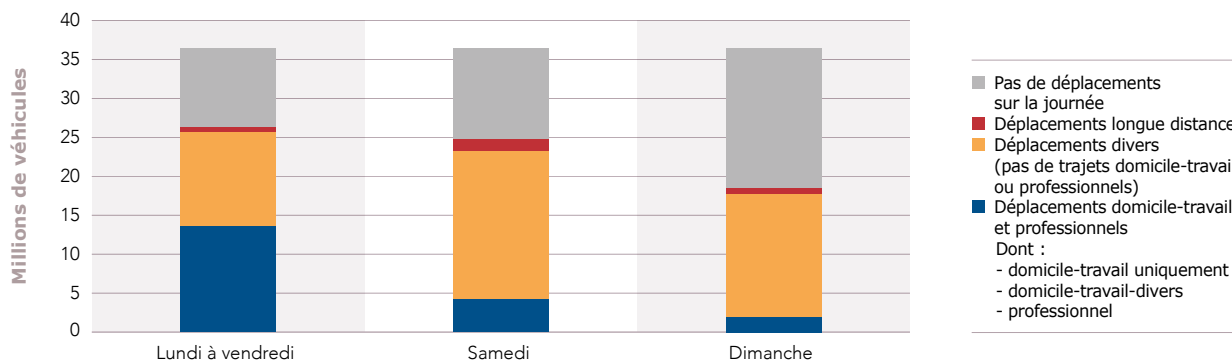
La représentation des besoins de mobilité et de leur évolution utilisée pour ces travaux repose sur

l'étude détaillée des habitudes de transport et de leurs projections, et notamment :

- (i) une analyse détaillée des caractéristiques de la mobilité actuelle au sein des différentes catégories de population, issue des enquêtes sur les habitudes de déplacement (en particulier l'enquête nationale transports et déplacements) ;
- (ii) l'établissement de plusieurs projections différenciées sur l'évolution de ces besoins de mobilité (tenant compte du développement du télétravail, du covoiturage, etc.) ;
- (iii) des hypothèses prospectives sur la diffusion de l'électromobilité parmi les différents profils d'utilisateurs.

L'enquête nationale transports et déplacements (ENTD)¹ fait office de document de référence sur les habitudes de mobilité. Elle fournit des informations

Figure 2. Profil de mobilité moyen des véhicules légers en France selon le jour de la semaine (calculs à partir de l'ENTD 2008)



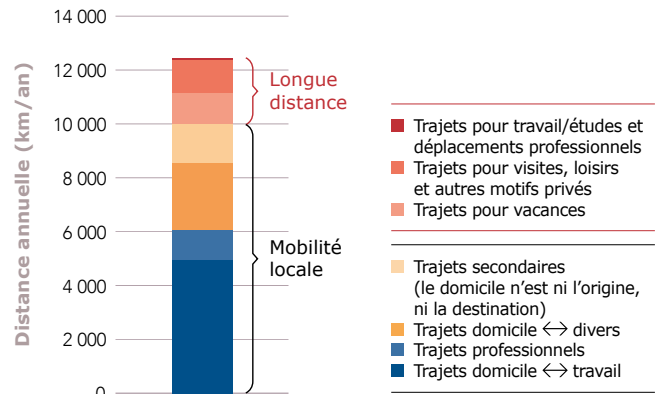
1. La dernière enquête de cette ampleur a été réalisée en 2008. Une réactualisation est prévue en 2020.

détaillées sur la mobilité actuelle du parc de véhicules légers, les différents types de trajets (motifs, lieux d'origine et de destination, distances parcourues, horaires de départ et d'arrivée, selon les jours et selon les catégories d'utilisateurs). L'analyse détaillée des données de l'enquête permet ainsi de dresser un état des lieux factuel sur la mobilité des français, potentiellement différent des représentations implicites que peuvent s'en faire les uns et les autres.

Elle permet de révéler plusieurs caractéristiques marquantes de la mobilité :

- ▶ **Chaque jour ouvré, seulement 30% des véhicules sont utilisés pour réaliser des trajets domicile-travail et 7% des véhicules sont utilisés pour des trajets professionnels.** Les autres véhicules ne sont utilisés que pour d'autres types de déplacements locaux (33%), pour des déplacements longue distance² (2%) ou ne se déplacent pas du tout (28%).
- ▶ Parmi les véhicules qui sont utilisés pour des trajets domicile-travail, **une partie significative (15%) rentrent à leur domicile pour la pause méridienne.** Il s'agit d'une spécificité française.
- ▶ **Seulement 15% des distances parcourues annuellement par un véhicule correspondent à des trajets de plus de 250 km,** susceptibles de dépasser l'autonomie typique d'un véhicule électrique actuel.
- ▶ **La distance moyenne parcourue chaque jour par un véhicule utilisé pour la mobilité locale est d'environ 35 à 40 km,** ce qui signifie que l'autonomie typique d'un véhicule électrique actuel permet de réaliser l'équivalent d'une semaine de déplacements moyens.

Figure 3. Distances annuelles moyennes parcourues par véhicule en France (source : ENTD 2008)



Ce sont ces caractéristiques « intrinsèques » qui détermineront le profil des appels de charge sur le système électrique et les marges de manœuvre envisageables pour piloter la recharge. Typiquement, les besoins de recharge d'un véhicule concerné par un trajet longue distance seront très contraints – mais peu de véhicules sont concernés chaque jour. *A contrario*, la large majorité des véhicules qui réalisent des trajets « locaux » (70% des véhicules en semaine, 48% le dimanche) ou ne sont pas utilisés (28% des véhicules en semaine, 50% le dimanche) disposeront de plus de latitude pour piloter leur recharge.

Ces caractéristiques apparaissent d'emblée favorables au développement du véhicule électrique, et à une recharge choisie – plutôt que subie – par l'utilisateur.

2.2 Le développement du véhicule électrique : une identification des différents paramètres clés

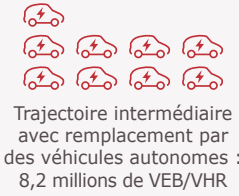
La reconstitution des appels de puissance des véhicules électriques et de la flexibilité que ces derniers sont susceptibles d'apporter repose sur un ensemble d'hypothèses et de « paramètres clés ». La concertation sur les hypothèses a mis en lumière les incertitudes et disparités entre les anticipations des différentes parties prenantes sur ces paramètres.

Pour chacun d'entre eux, des hypothèses contrastées ont été considérées, afin d'évaluer la sensibilité des enjeux techniques, économiques et environnementaux aux différents paramètres.

2. Dans l'ENTD, les déplacements longue distance sont définis comme les déplacements dont la destination principale se situe à plus de 80 km à vol d'oiseau du domicile.

Véhicules légers électriques non autonomes

(parc en 2035)



Différentes trajectoires de développement du véhicule électrique sont considérées. Les scénarios étudiés se concentrent sur les trajectoires médiane et haute afin d'évaluer la résilience du système électrique dans des scénarios ambitieux de développement de la mobilité électrique.

Véhicules légers électriques autonomes

(parc en 2035)



Développement nul ou marginal du véhicule électrique autonome



1 million de véhicules électriques autonomes partagés

L'analyse réalisée intègre la possibilité de développement d'une nouvelle forme de mobilité, dans laquelle une partie des utilisateurs ne sont plus propriétaires de véhicules en propre mais ont recours à des services de mobilité basés sur des véhicules électriques autonomes partagés sous forme « robots-taxis »

Parts modales des différentes formes de mobilité



Ambitions publiques sur l'évolution des parts modales



Forte augmentation de la part des transports en commun



Renforcement des transports en commun et mobilités douces

Les efforts en matière de décarbonation des transports peuvent également conduire à des évolutions en matière de besoins de mobilité, avec par exemple une augmentation du recours aux transports en commun et/ou aux mobilités douces.

Bus et camions électriques

(parc en 2035)



20 000 camions électriques
5 000 bus et cars électriques



94 000 camions électriques
18 000 bus et cars électriques



129 000 camions électriques
27 000 bus et cars électriques

Le développement de la mobilité électrique devrait être de moindre ampleur pour les véhicules lourds, dont la plupart font face à des besoins d'autonomie importants. Toutefois, le développement du véhicule électrique est susceptible de concerner une partie des véhicules lourds, notamment pour la desserte locale (bus et cars en zones urbaines, camions de livraison urbaine et régionale).

Part des véhicules hybrides rechargeables (VHR) et véhicules 100% électriques à batterie (VEB)

(parc en 2035)



22% VHR/78% VEB



40% VHR/60% VEB



45% VHR/55% VEB

En fonction de l'évolution des différentes technologies, des politiques de soutien public ou encore des besoins des utilisateurs en matière d'autonomie, la part des véhicules hybrides rechargeables dans l'ensemble de la flotte de véhicules électriques pourrait se fixer à des niveaux très différents. Par ailleurs, un développement marginal de véhicules à hydrogène (produit par électrolyse) est considéré : entre 16 000 et 35 000 unités en 2035.

Taille des batteries des VEB en circulation

(en 2035)



56 kWh - 330 km



73 kWh - 440 km



89 kWh - 530 km

La tendance actuelle est à l'augmentation de la taille des batteries, permettant d'améliorer l'autonomie des véhicules et faciliter leur acceptabilité. Toutefois, des batteries de grande taille conduisent également à des impacts environnementaux plus importants et ne sont pas toujours justifiées pour des véhicules réalisant essentiellement des parcours de courte distance.

Fabrication et recyclage des batteries



Fabrication France



Fabrication Asie (Chine, Corée du Sud)



Recyclage 50%



Recyclage 85%

Le lieu de fabrication et le recyclage des batteries influent sur l'analyse environnementale.

Dynamique de diffusion

Diffusion du véhicule électrique



Homogène sur la population



Plus importante chez les actifs aisés en région urbaine ou périurbaine

Le véhicule électrique est susceptible de se développer plus ou moins fortement selon les différentes catégories de population (actifs/inactifs, gros rouleurs, populations plus ou moins aisées, etc.)

Mobilité

Kilométrage moyen



1 1 5 0 0

Moyen hors longue distance



1 2 5 0 0

Moyen avec longue distance



1 4 0 0 0

Haut hors longue distance



1 5 3 0 0

Haut

L'utilisation des véhicules électriques et les distances qu'ils parcourent annuellement peuvent différer selon les catégories d'utilisateurs dans lesquelles le véhicule électrique se diffuse.

Points de charge

Accès aux points de charge



Faible accès hors domicile



Accès médian hors domicile



Fort accès hors domicile

L'accès aux points de charge (au domicile, au travail, sur la voie publique, etc.) conditionne les lieux mais également les périodes au cours desquelles les véhicules électriques pourront être rechargés, ainsi que la flexibilité sur le déplacement de la recharge.

Puissance des points de charge



Puissance basse

Moyenne à domicile en 2035 : 5,2 kW



Puissance médiane

Moyenne à domicile en 2035 : 6,2 kW



Puissance haute

Moyenne à domicile en 2035 : 6,7 kW

La puissance des points de charge détermine la vitesse de recharge des batteries (recharge lente, rapide, ultra-rapide, etc.). Ceux-ci pourront être de puissance très différente selon les lieux dans lesquels ils sont déployés (domicile, lieu de travail, voie publique, stations sur autoroute). Ainsi, à domicile, les points de charge seront essentiellement constitués de prises de 3,7 kW à 7,4 kW, tandis que les puissances des bornes de recharge rapide sur autoroute pourront elles atteindre jusqu'à 350 kW.

Recharge

Fréquence de connexion des utilisateurs



45% en connexion systématique



65% en connexion systématique



85% en connexion systématique

Les utilisateurs de véhicules électriques parcourant des distances limitées chaque jour, leurs batteries seront rarement vides à la fin de la journée. Plusieurs comportements peuvent alors être observés : soit l'utilisateur se branche systématiquement quand il est garé et qu'il a accès à une borne de recharge, soit il ne se branche que lorsque la batterie est en dessous d'un niveau de charge (50%). Ce paramètre détermine la fréquence des recharges et le nombre de véhicules connectés à chaque instant et donc les possibilités de flexibilité offertes au système électrique.

Pilotage de la recharge



Aucun pilotage



Pilotage bas
40% des recharges pilotées dont 0% de V2G



Pilotage médian
60% des recharges pilotées dont 3% de V2G



Pilotage haut
80% des recharges pilotées dont 20% de V2G

Un développement plus ou moins poussé du pilotage de la recharge des véhicules électriques, sous ses différentes formes (pilotage tarifaire simple, pilotage dynamique, *vehicle-to-grid*, etc.) constitue un paramètre clé de l'étude.

2.3 Le pilotage de la recharge : une analyse systématique des différentes variantes envisageables

Le véhicule électrique en tant que consommation « pilotable » selon l'état du système

Un véhicule particulier est majoritairement un objet statique : la majeure partie du temps, il est stationné – souvent à domicile ou sur le lieu de travail –, et beaucoup plus rarement, il est utilisé (4% du temps en moyenne). Au niveau de tout le pays, même lors des heures de déplacement les plus chargées, moins de 10% du parc de véhicules est en circulation.

Une partie des véhicules en stationnement ne peuvent pas être systématiquement raccordés à une borne. Par exemple, 6 millions de ménages en France parmi ceux qui possèdent au moins une voiture n'ont pas accès à une place de stationnement à usage privé. L'accès à la recharge sur le lieu de travail constitue également un enjeu. Néanmoins, même en intégrant ces facteurs, de nombreuses voitures sont très souvent immobiles à proximité immédiate d'un point de recharge. **Dès lors que le véhicule électrique est largement adopté et qu'un nombre suffisant de points de charge existent, un nombre important de véhicules électriques pourront être raccordés au système en quasi-permanence : pour tous ces véhicules, des marges de manœuvre réelles existent sur le positionnement de la recharge.**

De plus, l'analyse des données sur la mobilité des français montre que les périodes de stationnement sont généralement longues (plusieurs heures d'affilée, notamment la nuit). Ces durées sont suffisamment importantes pour permettre de placer la charge aux meilleurs moments (à la fois pour le système électrique et le consommateur). **Sauf dans des configurations spécifiques (par exemple recharge en itinérance sur autoroute lors d'un trajet long), la recharge des véhicules électriques peut être pilotée sans impact sur la mobilité.**

Le pilotage de la recharge des véhicules offre donc une source de flexibilité très intéressante pour le

système électrique. Ceci présente *a priori* un grand intérêt dans un système où la consommation (température) et la production (vent, ensoleillement, hydraulité) dépendent fortement de paramètres exogènes.

Le véhicule électrique en tant que solution de stockage

Dans leur dimensionnement et leur doctrine d'exploitation, les systèmes électriques ont été construits selon un principe simple : l'électricité ne se stocke pas, et à l'exception de certains barrages hydrauliques (type STEP) en nombre limité, les solutions de stockage sont très onéreuses.

Or, à partir du moment où les véhicules électriques seront diffusés en nombre suffisant, une flotte de petites batteries seront en permanence connectées au système électrique. Ceci offre la possibilité d'une mise en partage à large échelle de ce potentiel de flexibilité, et d'envisager que ce «stockage diffus» joue un rôle important dans l'optimisation et l'équilibrage du système et la réduction de ses coûts.

En tant que tel, le développement de la mobilité électrique conduit donc à modifier largement notre représentation du système électrique, et à envisager ce nouvel usage comme une opportunité technique.

Des volumes importants de flexibilité, pouvant être gérés à l'échelle de la semaine

L'analyse technique de ces nouveaux gisements (pilotage simple accessible via une recharge monodirectionnelle, utilisation comme un stockage via une recharge réversible) montre, sur le plan technique, le grand intérêt que représente la mobilité pour le secteur électrique.

FOCUS SUR LES DIFFÉRENTES FORMES DE PILOTAGE

Fonctionnalité : recharge simple ou réversible

Fonction monodirectionnelle / recharge simple :

La charge de la batterie peut être modulée dans le temps mais celle-ci ne peut pas réinjecter de l'électricité sur le réseau extérieur.



Fonction bidirectionnelle / recharge réversible :

La batterie peut soutirer sur le réseau mais peut également réinjecter sur le réseau (réseau électrique domestique et/ou réseau public d'électricité). Cette fonctionnalité nécessite un convertisseur AC/DC au niveau du véhicule ou de la borne de recharge.



Signaux de pilotage et modes de valorisation

Pilotage tarifaire simple

La recharge se déclenche sur des plages tarifaires définies (p.e. heures creuses actuelles ou autres signaux tarifaires). Ceci peut être réalisé grâce à un asservissement tarifaire (comme pour les ballons d'eau chaude) et être ainsi transparent pour l'utilisateur.



Pilotage dynamique sur signaux de prix de l'électricité

Les instants de déclenchement de la recharge (et éventuellement de l'injection sur le réseau) sont pilotés dynamiquement, en fonction des prix horaires de l'électricité sur le marché de gros et des besoins de mobilité future de l'utilisateur.



Pilotage avec participation à l'équilibrage temps réel du système électrique

La charge (éventuellement la décharge) des batteries est modulée en fonction des besoins d'équilibrage du système électrique, par exemple via un asservissement au signal de fréquence.



Couplage avec autoconsommation photovoltaïque

La charge (éventuellement la décharge) est placée de manière à utiliser au mieux l'énergie produite localement avec des panneaux photovoltaïques.



Modes de valorisation combinés et autres modes...

Les différentes formes de pilotage

En combinant ces différents modes de valorisation et fonctionnalités, une multitude de formes plus ou moins sophistiquées de pilotage de la charge des batteries peuvent émerger

1. Pilotage tarifaire simple et monodirectionnel avec asservissement



2. Pilotage monodirectionnel de la recharge avec participation au réglage de fréquence



3. « Vehicle-to-home » : utilisation de la fonction bidirectionnelle pour couvrir la consommation du foyer sans injection sur le réseau



4. « Vehicle-to-grid » avec participation au marché de l'énergie



5. « Vehicle-to-grid » avec participation au réglage de fréquence



6. Couplage avec autoconsommation (avec ou sans fonction bidirectionnelle)



7. ...

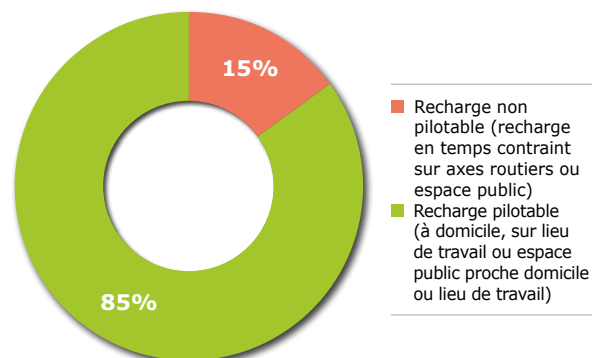
D'une part, le pilotage peut porter sur un volume très important : les recharges flexibles – c'est-à-dire celles qui ne correspondent pas à des besoins de recharge en temps contraint – représentent environ 85% de l'énergie annuelle consommée par les véhicules. Dans le scénario médian utilisé dans l'analyse (11,7 millions de véhicules à horizon 2035), la consommation pilotable équivaut à 25 TWh par an, soit un volume comparable à l'énergie consommée aujourd'hui par les ballons d'eau chaude, également pilotables. Avec le *vehicle-to-grid*, la flexibilité apportée par les véhicules électriques est encore plus importante. À horizon 2035, la capacité de stockage cumulée des véhicules électriques devrait représenter entre 6 et 11 fois celle des stockages hydrauliques actuels (STEP) : avec seulement 20% des véhicules électriques équipés pour la recharge réversible, la flexibilité qui peut être fournie par les véhicules à chaque instant est au moins égale à celle des STEP, à la fois en capacité de stockage en énergie et en puissance disponible.

D'autre part, cette flexibilité permet de gérer des variations à l'échelle de la semaine, et pas uniquement de la journée. En effet, même si la capacité de la batterie est considérée comme limitante par certains utilisateurs potentiels de véhicules électriques, elle présente aujourd'hui une autonomie de l'ordre de 250 km (pour une batterie de 40 kWh), suffisante pour couvrir environ une semaine de déplacements en moyenne. Ceci permet à la plupart des utilisateurs de concentrer leur recharge lors des périodes de la semaine où les prix de détail sont les plus intéressants, typiquement le week-end. Cette flexibilité pourra être encore plus importante à l'horizon 2030-2035 avec l'augmentation possible de la capacité des batteries des véhicules. En comparaison, les ballons d'eau chaude ne peuvent apporter qu'une flexibilité à l'échelle de la journée.

Une analyse détaillée des modes de recharge

De nombreuses études sur le véhicule électrique ont tendance à confondre ce qui relève de la fonctionnalité (charge monodirectionnelle ou bidirectionnelle), du mode d'asservissement et de pilotage (qui peuvent être plus ou moins dynamiques) et ce qui relève des modes de valorisation de la flexibilité. En pratique, des fonctionnalités identiques peuvent

Figure 4. Part des recharges flexibles (en énergie annuelle)



être associées à des modes de valorisation différents : à titre d'exemple, la recharge réversible peut être utilisée pour couvrir la consommation du foyer de l'utilisateur (mode *vehicle-to-home*) ou encore pour réinjecter sur le réseau public d'électricité (mode *vehicle-to-grid*). Il en résulte une grande diversité de modèles possibles.

L'un des objectifs de la nouvelle étude menée par RTE avec le soutien de l'AVERE-France consiste spécifiquement à analyser en détail ces modes de pilotage et leurs impacts sur le fonctionnement du système électrique.

Une analyse qui porte également sur les aspects économiques

Certains rapports sur la mobilité électrique qui traitent du pilotage réalisent des études avec une approche «marginale», c'est-à-dire étudient la valeur des solutions en supposant l'ajout d'un seul véhicule, toutes choses égales par ailleurs. Depuis 2017 et les aménagements méthodologiques présentés dans le cadre des travaux sur les réseaux électriques intelligents, RTE présente systématiquement ses résultats en réalisant un «passage à l'échelle», de manière à vérifier si les gisements identifiés sont robustes à un déploiement massif.

Ce nouveau rapport reprend cette méthode, et distingue à ce titre les gisements rémunérateurs mais étroits (services système) des opportunités plus robustes à une montée d'échelle (pilotage simple généralisé, par exemple).

2.4 Le système électrique : une modélisation du mix conforme aux scénarios du Bilan prévisionnel et aux ambitions du projet de PPE

L'évaluation des impacts du développement de la mobilité électrique et des enjeux techniques, économiques et environnementaux associés à la flexibilité des recharges repose sur une modélisation du fonctionnement du système électrique européen. Cette modélisation, également utilisée pour les analyses du Bilan prévisionnel, consiste à simuler l'équilibre offre-demande au pas horaire à l'échelle européenne (en considérant les possibilités d'échanges aux interconnexions) et pour un très grand nombre de chroniques d'aléas (consommation, production éolienne, solaire et hydraulique, disponibilité des centrales nucléaires et thermiques à flamme, etc.).

Les véhicules électriques font l'objet d'une modélisation explicite représentant leurs besoins de mobilité, les périodes où ils sont connectés (et les puissances de connexion) et l'état de charge des batteries. Cette modélisation permet de simuler la sollicitation de la flexibilité des véhicules électriques en tenant compte des besoins de mobilité.

Les hypothèses d'évolution du mix électrique utilisées pour l'analyse sont basées sur les ambitions indiquées dans le projet de PPE publié par le Gouvernement début 2019. Elles intègrent en particulier :

- ▶ une accélération du développement des énergies renouvelables (EnR) d'ici 2028 (multiplication par 2,5 des capacités d'éolien terrestre d'ici 2028 et multiplication par 4 des capacités photovoltaïques sur la même période, développement des parcs éoliens en mer, etc.), supposée prolongée sur la période 2029-2035,
- ▶ la fermeture des centrales au charbon à moyen terme et l'absence de nouveaux projets de centrales thermiques à combustible fossile,
- ▶ un déclassement de 14 réacteurs nucléaires d'ici 2035 (en comptant ceux de Fessenheim) selon la trajectoire indiquée par le Gouvernement,
- ▶ une consommation d'électricité finale stable (les effets d'efficacité énergétique compensant les nouveaux usages comme le véhicule électrique) et un développement de la production d'hydrogène par électrolyse,
- ▶ un développement soutenu des interconnexions.

Figure 5. Principes de la modélisation utilisée dans l'analyse

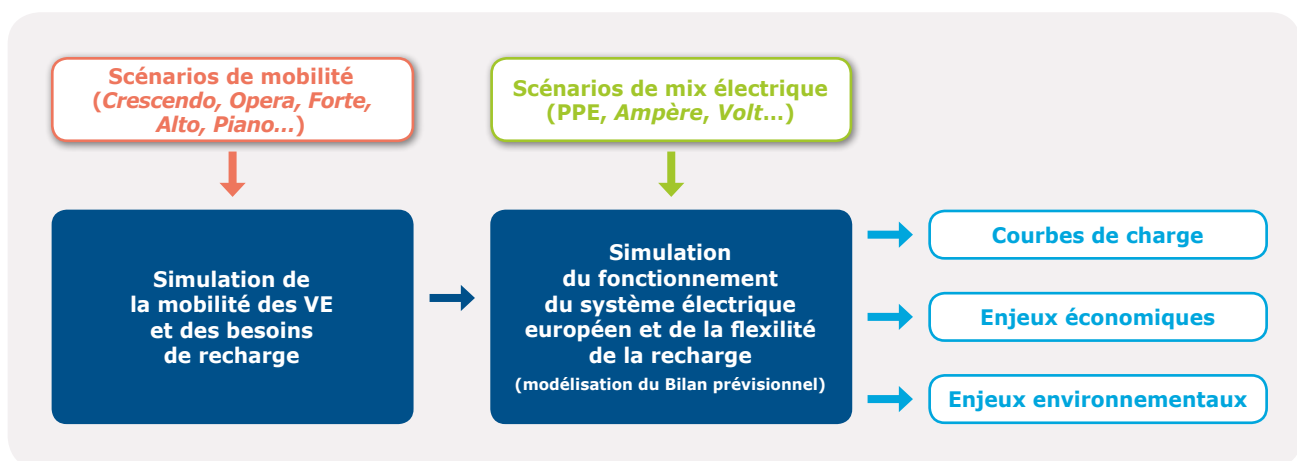
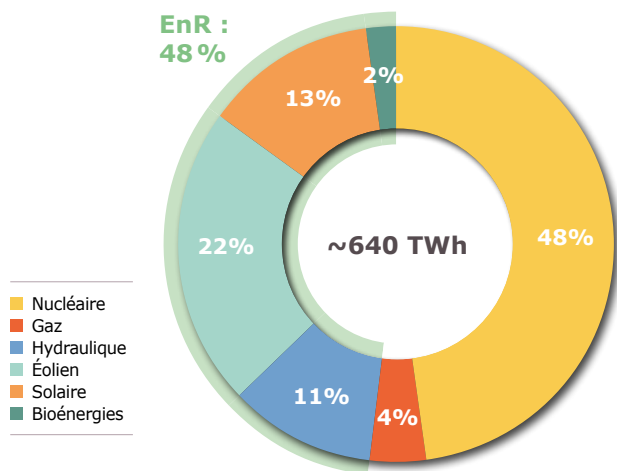


Figure 6. Bilan électrique projeté à horizon 2035 dans le scénario de la PPE



Ce scénario d'évolution du mix électrique présente certaines caractéristiques communes avec les scénarios *Ampère* et *Volt*, analysés dans le Bilan prévisionnel 2017 :

- ▶ Le mix est marqué par une forte croissance du parc «décarboné à faible coût variable» (énergies renouvelables et nucléaire). Cela signifie qu'il existe souvent beaucoup de puissance disponible à faible coût, et que cette électricité est compétitive sur les marchés de l'énergie (elle trouve donc quasi systématiquement preneur).
- ▶ En conséquence, dans un contexte où la consommation électrique serait globalement stable, le système électrique français se retrouve fortement exportateur, avec des volumes d'export pouvant atteindre voire dépasser 100 TWh par an à partir de 2030. Cette caractéristique a fait l'objet d'analyses détaillées à la suite du Bilan prévisionnel 2017³ qui ont confirmé la faisabilité technique de soldes exportateurs très importants dans ce type de scénario mais ont également identifié un point de vigilance sur les conditions économiques de ces exports

(possible apparition de prix faibles sur les marchés de l'électricité).

- ▶ Enfin, un tel mix est «faiblement manœuvrant» pour deux raisons : d'une part, il existe des *contraintes techniques* conduisant à des limites sur les possibilités de modulation du nucléaire (contraintes de sûreté notamment) et des EnR ; d'autre part, du point de vue économique, il est dommage d'arrêter des moyens de production dont le coût variable est faible voire nul. L'exemple du dimanche 21 avril 2019 illustre cet effet : cette journée, marquée par une consommation faible en France et en Europe ainsi que par une bonne disponibilité de la production éolienne et solaire en Allemagne et de la production nucléaire en France, a conduit à un surplus de production à coût faible et à des prix négatifs sur certaines heures de la journée.

Par conséquent, l'intérêt d'un mix comme celui de la PPE est fortement renforcé avec de la consommation pilotable (qui permet d'adapter la consommation à la disponibilité de la production renouvelable), et des nouveaux usages comme le véhicule électrique (qui permettent de profiter de la production d'électricité décarbonée à faible coût variable en France et entrent en concurrence avec les exports).

Ceci renforce l'intérêt de disposer d'une analyse approfondie de la coordination entre la feuille de route «énergie» et la feuille de route «mobilité». Un développement de la mobilité électrique réalisé en cohérence avec la PPE offre l'opportunité d'exploiter le système dans ses conditions optimales (corréliser les recharges avec la production solaire ou éolienne, réduire les écrêtements de production renouvelable, ne pas faire peser sur le nucléaire la charge de l'ajustement du système mais la renvoyer à d'autres moyens flexibles, comme la recharge des véhicules électriques, etc.).

3. RTE, octobre 2018, *Analyses complémentaires sur les échanges d'électricité aux interconnexions dans les scénarios du Bilan prévisionnel.*

DES SCÉNARIOS CONTRASTÉS POUR LE DÉVELOPPEMENT DE LA MOBILITÉ ÉLECTRIQUE

Les hypothèses clés, établies en concertation avec les participants au groupe de suivi, peuvent donner lieu à de nombreux croisements. Pour faciliter la restitution de leur impact et offrir des analyses pertinentes, deux clés de lecture sont proposées :

► une restitution autour de cinq scénarios de mobilité, décrivant chacun une forme d'électrification du secteur des transports. Ces scénarios visent à explorer des situations volontairement contrastées pour le système électrique : autour d'un scénario correspondant aux projections standards (*Crescendo*), une configuration très favorable (*Opera*) et une autre moins favorable (*Forte*) sont étudiées pour discuter de la résilience du système électrique. Un autre scénario porte sur une évolution de la mobilité centrée sur le véhicule autonome partagé (*Alto*), et un dernier sur une plus grande part des mobilités douces et des choix systématiquement

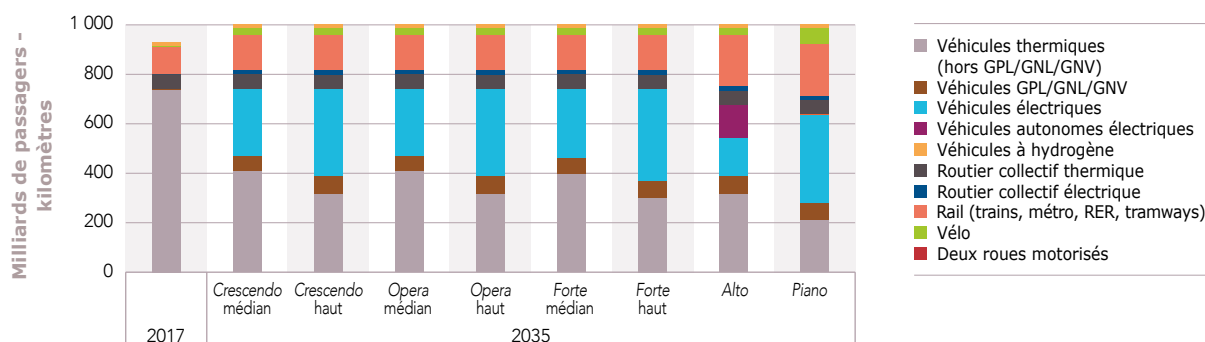
favorables à l'empreinte carbone du véhicule électrique (*Piano*) ;

► une analyse thématique des résultats, autour de quatre volets (technique, économique vu du système, économique vu du consommateur, et environnemental).

Les scénarios *Crescendo*, *Opera* et *Forte* sont présentés selon une variante médiane (basée sur le scénario *Green Constraint* de la PFA) et une variante haute (trajectoire *Ampère* du Bilan prévisionnel 2017). Le scénario *Alto* conduit à une électrification similaire à la variante haute des autres scénarios mais en se basant massivement sur le développement de véhicules autonomes en utilisation sous formes de services (« robots-taxis »). Le scénario *Piano* comporte le même nombre de véhicules électriques que les trois premiers scénarios, mais moins de véhicules thermiques du fait de reports modaux supérieurs vers les transports en commun et les mobilités douces.



Figure 7. Trafic passager pour les différents modes de transport terrestre dans les différents scénarios



SCÉNARIO CRESCENDO –

« PROJECTIONS STANDARDS »

Principe et cadrage général

Le scénario *Crescendo* permet de simuler un développement important de la mobilité électrique, dans un cadre «tendanciel» sur l'évolution des formes de mobilité.

S'agissant des ambitions sur la mobilité électrique : deux variantes sont considérées – l'une, médiane, basée sur les projections des constructeurs (scénario *Green Constraint* de la Plateforme française automobile), l'autre, haute, compatible avec les ambitions publiques de la PPE et de la SNBC (scénario *Ampère* du Bilan prévisionnel 2017).

La mobilité demeure organisée autour du véhicule particulier, qui reste de loin le principal moyen de transport, mais certaines de ses caractéristiques évoluent dans le prolongement des tendances actuelles : développement du covoiturage (meilleur taux de remplissage des véhicules), du télétravail (diminution des besoins de mobilité par personne), de l'utilisation du vélo et des transports en commun (modification des parts modales). Les distances parcourues par les véhicules augmentent ainsi moins vite que la population.

Du point de vue industriel, les caractéristiques des véhicules (taille, performance, autonomie) sont conformes aux projections standards actuelles. La localisation de la fabrication des batteries correspond aux logiques industrielles actuelles, et se situe très majoritairement en Asie.

Dans *Crescendo*, la mobilité électrique se développe de façon plus marquée auprès des « gros rouleurs ». Sont ainsi concernés en premier lieu les actifs se rendant sur leur lieu de travail avec leur voiture, ainsi que les habitants des zones urbaines et périurbaines, là où l'utilisation des véhicules thermiques est le plus susceptible d'être découragée avec la mise en œuvre de mesures et d'incitations pour limiter la pollution locale.

Malgré une augmentation de la capacité des batteries des véhicules, l'autonomie des véhicules demeure relativement contraignante pour les déplacements longue distance. Les véhicules tout électriques restent ainsi moins utilisés que les véhicules thermiques pour les grands déplacements.

Sur le plan de la recharge, des infrastructures se développent sur la voie publique et sur les lieux de travail, permettant à près de 30% des utilisateurs d'avoir un accès régulier à des bornes en dehors de leur domicile. La puissance des bornes reste modérée. Le pilotage de la recharge, dans ses formes les plus simples, est largement adopté, par exemple via un asservissement tarifaire similaire au dispositif utilisé pour les chauffe-eau et dont la mise en œuvre est facilitée par le déploiement des compteurs communicants. En revanche, les services rendus par l'utilisateur au système via la recharge réversible (*vehicle-to-grid*) demeurent marginaux.

SCÉNARIO CRESCENDO - MÉDIAN - 2035



**11,7 millions de véhicules légers électriques
+ 112 000 véhicules lourds électriques**

dont 40% de véhicules hybrides rechargeables

26,6 millions de véhicules légers thermiques
544 000 véhicules lourds thermiques

SCÉNARIO CRESCENDO - HAUT - 2035



**15,6 millions de véhicules légers électriques
+ 156 000 véhicules lourds électriques**

dont 22% de véhicules hybrides rechargeables

22,7 millions de véhicules légers thermiques
500 000 véhicules lourds thermiques

Parc de véhicules



Batteries de capacité moyenne
(73 kWh/440 km en moyenne)



14 000 km parcourus en moyenne par an pour
les véhicules légers 100% électriques



28% des véhicules ont un accès
régulier à une borne hors domicile



Puissance médiane
des bornes de recharge
(65% de bornes de 7,4 kW à domicile)



Habitudes de connexion panachées
(65% systématique et
35% occasionnelle)



60% des recharges
pilotées dont **3% V2G**

Modalités d'usage et comportements

Cadrage environ.



**Batteries fabriquées en Asie
(Chine, Corée du Sud)**



Pas de choix fort en faveur du recyclage

Résultats

Le scénario *Crescendo* permet de capter une part importante des gains (techniques, économiques, et environnementaux) associés à la mobilité électrique et décrits dans le rapport. En revanche, il ne permet pas d'aller jusqu'au bout de la logique d'optimisation.

Dans ce scénario, la consommation annuelle d'électricité associée au développement de la mobilité électrique atteint environ 29 TWh (scénario médian) à 40 TWh (scénario haut), soit de l'ordre de 6 % à 8 % de la consommation totale d'électricité en France.

Le développement généralisé des solutions simples de pilotage de la recharge permet de limiter les appels de puissance à la pointe. La contribution des véhicules électriques aux pointes de consommation est comprise entre 2,2 GW et 3,6 GW, ce qui est possible dans le scénario de la PPE. Notamment, il n'en résulte pas de difficulté pour la sécurité d'approvisionnement, y compris lors des grands déplacements.

Le pilotage de la recharge permet une utilisation efficace du parc de production d'électricité à l'échelle européenne, et en particulier une meilleure

valorisation de l'électricité décarbonée (EnR et nucléaire) dans des périodes de surplus de production. Les opportunités d'optimisation ne sont pas utilisées au maximum, mais permettent malgré tout de limiter le coût de production d'électricité pour la recharge des véhicules.

Le développement du pilotage permet également de maîtriser la facture énergétique des consommateurs, avec un coût annuel du plein électrique inférieur à 300 € par an en moyenne (contre un coût annuel moyen du plein essence de l'ordre de 1200 € par an aujourd'hui).

Dans le scénario *Crescendo*, le développement de la mobilité électrique conduit à un effet très positif sur les émissions de CO₂ avec une réduction de l'empreinte carbone des transports de plus de 20 millions de tonnes par an. Ce bilan est attribuable aux émissions évitées par la combustion de carburant mais également par une utilisation globalement optimisée du système électrique via le pilotage de la recharge.

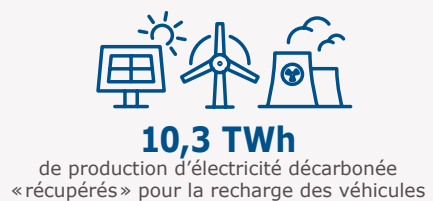
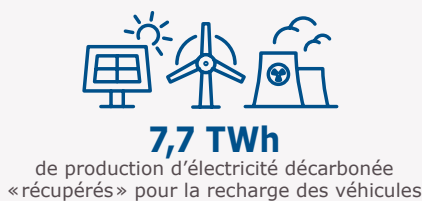
SCÉNARIO CRESCENDO - MÉDIAN - 2035

SCÉNARIO CRESCENDO - HAUT - 2035

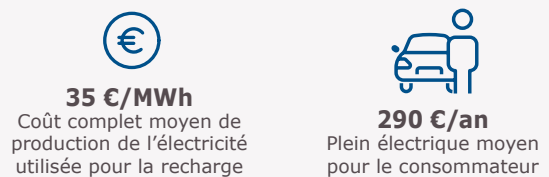
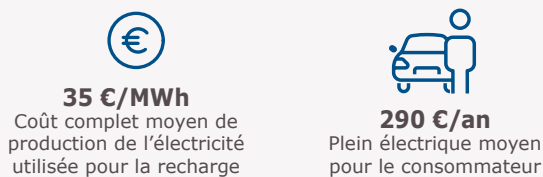
Consommation électrique



Effet sur le mix électrique



Enjeux économiques



Émissions de CO₂



SCÉNARIO OPERA – « FLEXIBILITÉ RENFORCÉE »

Principe et cadrage général

Le scénario *Opera* explore les opportunités offertes par un pilotage généralisé de la recharge et une utilisation poussée de la flexibilité des batteries. Par construction, ce scénario se positionne ainsi parmi les configurations les plus favorables pour le système électrique.

Dans ce scénario, le véhicule particulier reste largement dominant dans les déplacements, selon le même cadrage général que dans *Crescendo* (poursuite des inflexions observées sur le développement du covoiturage, du télétravail, des transports en commun et des mobilités douces). Deux variantes principales sont étudiées pour l'électrification du parc – la médiane est basée sur les projections des constructeurs (scénario *Green Constraint* de la Plateforme française automobile), la haute sur les ambitions publiques de la PPE et de la SNBC (scénario *Ampère* de RTE).

Le développement du véhicule électrique au sein de la population s'effectue de façon plus marquée auprès des gros rouleurs actifs utilisant leur véhicule pour se rendre sur leur lieu de travail et habitant en zone urbaine ou périurbaine. Dans les deux cas, les logiques industrielles existantes (croissance

de l'autonomie des batteries, production des batteries en Asie) sont prolongées.

Les spécificités du scénario *Opera* se déclinent sur les différents paramètres techniques, qui facilitent l'intégration au système électrique.

D'une part, l'accès à un point de charge sur le lieu de travail ou dans les équipements collectifs est généralisé, permettant ainsi de lisser les appels de puissance au sein de la journée et de placer les soutirages aux moments des pics de production solaire.

D'autre part, le pilotage de la recharge est fortement développé : 80% des recharges sont pilotées et une partie significative des véhicules (20%) rend des services au système électrique en utilisant la batterie pour injecter de l'énergie sur le réseau (*vehicle-to-grid*).

Enfin, les utilisateurs prennent l'habitude de connecter systématiquement leur véhicule au réseau électrique et la puissance des points de charge auxquels ils se connectent est généralement élevée, permettant ainsi d'offrir d'importants services de flexibilité au système électrique.

SCÉNARIO OPERA - MÉDIAN - 2035



11,7 millions de véhicules légers électriques
+ 112 000 véhicules lourds électriques

dont 40% de véhicules hybrides rechargeables

26,6 millions de véhicules légers thermiques
544 000 véhicules lourds thermiques

SCÉNARIO OPERA - HAUT - 2035



15,6 millions de véhicules légers électriques
+ 156 000 véhicules lourds électriques

dont 22% de véhicules hybrides rechargeables

22,7 millions de véhicules légers thermiques
500 000 véhicules lourds thermiques

Parc de véhicules

Modalités d'usage et comportements



Batteries de capacité moyenne
(73 kWh/440 km)



14 000 km parcourus en moyenne par an pour
les véhicules légers 100% électriques



45% des véhicules ont un accès
régulier à une borne hors domicile



Puissance élevée
des bornes de recharge
(80% de bornes de 7,4 kW à domicile)



Connexion essentiellement
systématique (85% systématique
et 15% occasionnelle)



80% des recharges
pilotées dont **20% V2G**

Cadrage environ.



Batteries fabriquées en Asie
(Chine, Corée du Sud)



Pas de choix fort en faveur du recyclage

Résultats

La forte flexibilité intégrée au cadrage du scénario *Opera* influe sur tous les indicateurs étudiés.

D'une part, le maintien d'un haut niveau de sécurité d'approvisionnement est facilité. Non seulement le développement de la mobilité électrique ne crée aucune difficulté pour le passage des pointes de consommation, mais en plus les véhicules électriques contribuent à la sécurité d'approvisionnement en électricité grâce au développement du *vehicle-to-grid*, qui permet de disposer d'un réservoir supplémentaire de puissance lors des situations de tension sur le système électrique. Au total, la mobilité électrique et le *vehicle-to-grid* contribuent à une augmentation des marges du système d'environ 5 GW dans les deux variantes considérées.

D'autre part, le fonctionnement du système est optimisé. Le fort développement de la flexibilité et l'accès régulier à des points de charge (notamment sur le lieu de travail) permettent de maximiser les possibilités sur le placement de la recharge des véhicules. En particulier, cette flexibilité offre l'opportunité d'utiliser au mieux l'électricité décarbonée (EnR ou nucléaire) lors des situations de surplus et conduit ainsi à limiter les écrêtements ou épisodes de modulation subie causés par une absence de débouchés. L'effet est important puisque, dans les deux variantes, près de 11 à

14 TWh supplémentaires de production décarbonée à faible coût variable sont «récupérés» grâce aux batteries des véhicules électriques.

Ces avantages se retrouvent dans l'évaluation des coûts pour le système électrique et la facture énergétique des utilisateurs, qui sont limités. En particulier, le coût annuel net de la recharge pour les utilisateurs (coût TTC de l'électricité pour la recharge, diminué des recettes éventuelles des services de flexibilité) s'établit en moyenne en dessous de 280 € par an. Pour les 20% d'utilisateurs tirant parti des possibilités offertes par la recharge réversible, ce coût annuel net est encore nettement plus faible.

Du point de vue environnemental, l'électrification de la mobilité permet de réduire l'empreinte carbone du secteur des transports de l'ordre de 23 à 27 millions de tonnes de CO₂ par an. Ce bilan carbone largement positif s'explique par les émissions évitées dans la combustion de carburant des véhicules thermiques et par le développement du pilotage de la recharge et du *vehicle-to-grid*, qui permet d'optimiser le fonctionnement du système électrique européen et de réduire le recours à des moyens de production d'électricité à combustible fossile.

SCÉNARIO OPERA - MÉDIAN - 2035

Consommation électrique



28 TWh

de consommation des véhicules électriques



-5,2 GW

d'appels de puissance à la pointe hivernale en moyenne (grâce au V2G)

Effet sur le mix électrique



11,1 TWh

de production d'électricité décarbonée «récupérés» pour la recharge des véhicules

Enjeux économiques



23 €/MWh

Coût complet de l'énergie produite pour la recharge des véhicules



275 €/an

Plein électrique moyen pour le consommateur

Émissions de CO₂

-23 MtCO₂/an

empreinte carbone évitée au niveau mondial

SCÉNARIO OPERA - HAUT - 2035



40 TWh

de consommation des véhicules électriques



-5,2 GW

d'appels de puissance à la pointe hivernale en moyenne (grâce au V2G)



13,8 TWh

de production d'électricité décarbonée «récupérés» pour la recharge des véhicules



23 €/MWh

Coût complet de l'énergie produite pour la recharge des véhicules



280 €/an

Plein électrique moyen pour le consommateur



-27 MtCO₂/an

empreinte carbone évitée au niveau mondial

SCÉNARIO FORTE – « STRESS POUR LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE »

Principe et cadrage général

Le scénario *Fort* vise à tester une configuration volontairement peu favorable pour le système électrique, marquée par une absence de choix fort des pouvoirs publics, un faible déploiement des logiques de pilotage, et une forte utilisation des véhicules électriques pour la longue distance. Il répond ainsi au souhait de tester la résilience du système en matière de sécurité d’approvisionnement à un cas de figure volontairement contraignant.

Les habitudes de mobilité sont supposées inchangées par rapport à aujourd’hui. Malgré une très légère augmentation des parts modales des autres moyens de transport, le parc de véhicules individuels ne diminue pas. Les utilisateurs de véhicules électriques attendent essentiellement d’une voiture électrique qu’elle offre le même « service » qu’une voiture thermique : ils privilégient la recherche d’autonomie et donc les batteries de grande capacité, de manière à permettre des déplacements « longue distance ».

Le développement de la mobilité électrique n’est pas accompagné de choix visant à faciliter son intégration dans le système électrique et la valorisation de la flexibilité sur la recharge.

D’une part, l’accès à un point de charge sur le lieu de travail ou les équipements collectifs est faiblement développé. Ainsi l’essentiel des véhicules utilisés pour des trajets domicile-travail ne peuvent se recharger pendant les heures de forte production solaire. D’autre part, seule une minorité des utilisateurs pilotent la recharge de leur véhicule électrique et aucun véhicule ne participe activement au fonctionnement du système via le *vehicle-to-grid*. En conséquence, les recharges obéissent à un profil essentiellement naturel, et se placent en grande partie aux heures de retour au domicile, le soir, à des heures où le système électrique dispose de moins de marges.

Enfin, les puissances des points de charge sont importantes et la plupart des utilisateurs prennent l’habitude de brancher leurs véhicules dès qu’ils en ont la possibilité : les recharges étant systématiques, elles ne portent que sur les besoins d’une journée de déplacement et se font à des puissances relativement élevées. Elles sont donc peu étalées dans le temps, peu flexibles et relativement concentrées aux heures de retour à domicile.

SCÉNARIO FORTE - MÉDIAN - 2035



11,7 millions de véhicules légers électriques
+ 112 000 véhicules lourds électriques

dont 40% de véhicules hybrides rechargeables

26,6 millions de véhicules légers thermiques
544 000 véhicules lourds thermiques

SCÉNARIO FORTE - HAUT - 2035



15,6 millions de véhicules légers électriques
+ 156 000 véhicules lourds électriques

dont 22% de véhicules hybrides rechargeables

22,7 millions de véhicules légers thermiques
500 000 véhicules lourds thermiques

Parc de véhicules

Modalités d’usage et comportements



Batteries de grande capacité
(89 kWh/530 km en moyenne)



15 300 km parcourus en moyenne par an pour
les véhicules légers 100% électriques



16% des véhicules ont un accès
régulier à une borne hors domicile



Puissance élevée
des bornes de recharge
(80% de bornes de 7,4 kW à domicile)



Connexion essentiellement
systématique (85% systématique
et 15% occasionnelle)



40% des recharges pilotées.
Pas de V2G.

Cadrage environ.



Batteries
fabriquées en Asie
(Chine, Corée du Sud)



Pas de choix fort en
faveur du recyclage

Résultats

Par construction, le scénario *Forte* est le moins favorable pour le système électrique. La mobilité électrique a un impact significatif sur les appels de puissance à la pointe avec une contribution moyenne comprise entre 5,7 GW (variante médiane) et 8 GW (variante haute).

Dans la variante haute avec 15,6 millions de véhicules, le taux de pilotage de la recharge doit être d'au moins 55% pour assurer le niveau de sécurité d'approvisionnement requis par les pouvoirs publics.

Les pointes de consommation demeurent dues aux recharges pour les besoins de mobilité «du quotidien». Malgré l'utilisation des véhicules pour les déplacements de longue distance, les épisodes de tension sur la sécurité d'approvisionnement ne sont pas liés aux périodes de grands déplacements (chassé-croisé des vacances d'été...) qui interviennent essentiellement à des périodes pendant lesquelles le système dispose de marges.

Les points de vigilance sur la sécurité d'approvisionnement sont essentiellement une conséquence d'un faible développement du pilotage de la recharge, notamment à domicile. Un développement plus important (55% au lieu de 40%) que dans les hypothèses du scénario suffit à éviter tout problème de sécurité d'approvisionnement.

Sur le plan économique, le scénario *Forte* ne permet pas de bénéficier pleinement des synergies avec le mix de production d'électricité décarboné. L'électricité utilisée pour la recharge demeure très compétitive, mais est plus chère que dans les autres scénarios. En particulier, sur certaines périodes, des surplus de production EnR et nucléaire à coût variable faible voire nul ne sont pas valorisés alors qu'ils pourraient être utilisés pour la recharge des véhicules.

Ceci se traduit sur la facture énergétique des consommateurs, dont le coût annuel du plein électrique apparaît en moyenne supérieur à 350 € par an et pourrait être nettement réduit. Le véhicule électrique demeure largement moins cher à l'utilisation, mais tout le potentiel de baisse n'est pas utilisé.

Sur le plan environnemental, le bilan carbone associé à l'électrification des véhicules demeure largement positif (de l'ordre de 20 à 23 millions de tonnes de CO₂ évitées par an), bien que la plupart des paramètres soient orientés de manière défavorable : la taille importante des batteries, leur fabrication en Asie et leur faible taux de recyclage induisent un bilan carbone plus élevé des véhicules électriques et la faible optimisation de la recharge conduit à des émissions plus importantes à l'échelle du secteur électrique européen. Des leviers supplémentaires de réduction des émissions de CO₂ ou des pollutions chimiques restent donc accessibles.

SCÉNARIO FORTE - MÉDIAN - 2035

SCÉNARIO FORTE - HAUT - 2035

Consommation électrique

**32 TWh**

de consommation des véhicules électriques

**+5,7 GW**

d'appels de puissance à la pointe hivernale en moyenne

**45 TWh**

de consommation des véhicules électriques

**+8 GW**

d'appels de puissance à la pointe hivernale en moyenne

Effet sur le mix électrique

**+6,6 TWh**

de production d'électricité décarbonée «récupérés» pour la recharge des véhicules

**+9,0 TWh**

de production d'électricité décarbonée «récupérés» pour la recharge des véhicules

Enjeux économiques

**45 €/MWh**

Coût complet moyen de production de l'électricité utilisée pour la recharge

**360 €/an**

Plein électrique moyen pour le consommateur

**46 €/MWh**

Coût complet moyen de production de l'électricité utilisée pour la recharge

**365 €/an**

Plein électrique moyen pour le consommateur

Émissions de CO₂**-20 MtCO₂/an**

empreinte carbone évitée au niveau mondial

**-23 MtCO₂/an**

empreinte carbone évitée au niveau mondial

SCÉNARIO ALTO – « ESSOR DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE AUTONOME PARTAGÉ »

Principe et cadrage général

Le scénario *Alto* s'inscrit dans le cadre d'une modification profonde des modes de déplacement, déclenchée par une rupture technologique – le véhicule autonome (de niveau 5) – et organisée autour du principe de services de mobilité partagée – par l'intermédiaire de « robots-taxis ».

Le parc de véhicules autonomes atteint un million d'unités en circulation à l'horizon 2035. Ces véhicules ne sont pas possédés en propre par les ménages, du fait de leur coût important mais sont, au contraire, utilisés de manière régulière et partagée sous forme de « robots-taxis » : l'absence de conducteur permet de rendre l'utilisation de ces taxis beaucoup plus abordable pour l'utilisateur, et une partie de la population peut alors basculer de manière définitive sur ce type de mobilité pour les trajets du quotidien.

La diffusion du véhicule autonome partagé conduit de nombreux ménages à ne plus posséder leur propre véhicule pour utiliser des services de mobilité fournis par les véhicules autonomes partagés, couplés avec l'utilisation accrue de transports en commun. Le parc de véhicules légers se contracte significativement, de 38 millions d'unités aujourd'hui à moins de 32 millions en 2035. En moyenne, un robot-taxi se substitue à sept voitures particulières.

Les véhicules autonomes électriques sont utilisés de façon massive, 50% du temps en moyenne (contre

moins de 5% du temps pour un véhicule classique) et 100% du temps lors des heures «de pointe» de mobilité. Contrepartie à leur mode d'utilisation, les véhicules autonomes réalisent fréquemment des trajets «à vide».

Les véhicules autonomes se rechargent lors des périodes de moindre besoin de mobilité (essentiellement la nuit mais aussi au sein de la journée, hors périodes de pointe de mobilité). Au sein de ces périodes, la recharge est pilotée de manière dynamique en utilisant les fonctionnalités avancées des véhicules.

La bascule vers la mobilité partagée est organisée par les pouvoirs publics de manière conjointe avec un renforcement de l'offre en transports en commun. Le véhicule autonome facilite ainsi l'accès aux transports collectifs dans les zones où le maillage des transports est moins dense.

En parallèle du développement des véhicules autonomes, le reste du parc de véhicules légers s'électrifie avec 8,2 millions d'unités en circulation en 2035. Le parc résiduel de véhicules thermiques légers se réduit à 22,7 millions d'unités, soit un nombre identique à celui de la variante «haute» des autres scénarios. Par rapport aux autres scénarios, la substitution entre véhicules autonomes et individuels concerne donc uniquement les véhicules électriques.

SCÉNARIO ALTO - 2035

Parc de véhicules



**8,2 millions de véhicules légers électriques «classiques»
+ 156 000 véhicules lourds électriques**

dont 22% de véhicules hybrides rechargeables

22,7 millions de véhicules légers thermiques
500 000 véhicules lourds thermiques



1 million de véhicules électriques autonomes partagés



Report modal vers les transports en commun

Modalités d'usage et comportements

Véhicules «classiques»



Batteries de capacité moyenne



28% des véhicules ont un accès régulier à une borne hors domicile



60% des recharges pilotées dont 3% V2G



14 000 km parcourus en moyenne par an pour les véhicules 100% électriques



Puissance médiane des bornes de recharge



Fréquence de connexion panachée

Véhicules «autonomes»



Batteries de très grande capacité (150 kWh)



Accès à des bornes de recharge dédiées



100% des recharges pilotées, mais possibilités de report limitées. Pas de V2G.



125 000 km parcourus par an



Bornes de recharge de 50 kW



Connexion systématique

Cadrage environ.



Batteries fabriquées en Asie (Chine, Corée du Sud)



Pas de choix fort en faveur du recyclage

Résultats

Le scénario *Alto* présente des caractéristiques techniques spécifiques, qui résultent du développement d'un nouveau type de mobilité avec les robots-taxis.

La consommation des transports électriques y est plus importante, du fait de plusieurs caractéristiques liées aux véhicules autonomes (un poids plus important du fait de batteries de forte capacité et une contribution de l'électronique embarquée) et de la forme de mobilité étudiée (les services de mobilité impliquent une forte augmentation des trajets à vide, qui représentent près de 40% des distances parcourues).

Les profils de recharge évoluent également. Du fait des contraintes de mobilité propres aux robots-taxis, de leur forte utilisation et des distances importantes qu'ils parcourent quotidiennement, la recharge de ces véhicules offre moins de flexibilité que celle des véhicules particuliers. Les opportunités d'optimisation du système électrique sont moins nombreuses, et il n'est pas possible de bénéficier pleinement de la production décarbonée à faible coût variable sur certaines périodes.

Le coût moyen de production de l'électricité associée à l'électrification du parc de véhicules demeure maîtrisé, sans préjudice des externalités offertes par ce type de scénario (réduction du parc total

de véhicules, augmentation des services rendus, évolution de l'accidentologie, etc.).

Le scénario *Alto* conduit à une diminution significative des émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, il met en lumière un bilan carbone contrasté pour une utilisation sous forme de robots-taxis du véhicule électrique autonome. D'un côté, celui-ci permet de réduire le parc total de véhicules légers et donc l'empreinte environnementale associée à la fabrication de ces véhicules. Mais d'un autre côté, l'empreinte des batteries de grande capacité et de l'électronique embarquée, et la durée de vie réduite constituent des facteurs haussiers.

Cette analyse ne suffit pas à conclure sur le sujet des services de mobilité partagée, mais souligne l'absence d'automatisme entre autonomie accrue et performances environnementales. Elle devra faire l'objet de prolongements : de multiples modèles de déploiement sont envisageables pour le véhicule autonome, avec des articulations plus ou moins fortes avec d'autres types de mobilité, et certains sont susceptibles de pouvoir améliorer l'équation économique et environnementale du scénario. Enfin, les émissions du cycle de vie spécifiques aux véhicules autonomes font l'objet d'incertitudes et sont encore peu documentées.

SCÉNARIO ALTO - 2035

Consommation électrique



48 TWh

de consommation des véhicules électriques dont 25 TWh pour les véhicules électriques autonomes



+5 TWh

de consommation supplémentaire des transports collectifs



+4,4 GW

d'appels de puissance à la pointe hivernale en moyenne

Effet sur le mix électrique



+10,7 TWh

de production d'électricité décarbonée « récupérés » pour la recharge des véhicules

Enjeux économiques



39 €/MWh

Coût complet moyen de production de l'électricité utilisée pour la recharge



310 €/an

Plein électrique moyen pour le consommateur

Émissions de CO₂

-18 MtCO₂/an
empreinte carbone évitée au niveau mondial

SCÉNARIO PIANO – « MOBILITÉ SOBRE EN CARBONE »

Principe et cadrage général

Dans le scénario *Piano*, politiques publiques et évolutions sociétales se conjuguent pour parvenir à une évolution importante des formes de mobilité.

Les déplacements effectués en véhicules particuliers se réduisent fortement, au profit des mobilités douces et des transports en commun, dont l'offre est renforcée. Dans les zones urbaines, une grande partie des trajets courts (moins de 6 km) sont réalisés en mobilité douce (vélo, vélo électrique, marche à pied, trottinette, etc.). La part modale des transports en commun augmente fortement pour représenter près de 20% des kilomètres passagers en 2035.

Cette évolution des modes de déplacements ne repose sur aucun pari technologique et résulte de politiques publiques volontaristes : limitation de l'utilisation des véhicules (notamment thermiques) en ville, développement d'infrastructures pour les mobilités douces (pistes cyclables), renforcement de l'offre de transports en commun, facilitation de l'intermodalité entre mobilités douces et transports en commun (avec par exemple la mise en place de parkings à vélo sécurisés), etc.

Pour les déplacements individuels en véhicule léger, la mobilité électrique se développe fortement, selon le scénario le plus haut (plus de 15 millions de véhicules électriques en circulation à horizon 2035).

Pour améliorer les bénéfices environnementaux, le développement de la mobilité électrique est systématiquement suivi de choix techniques permettant de faciliter l'intégration dans le système électrique. Ceci implique un accès à des points de charge sur le lieu de travail et la généralisation du pilotage de la recharge. Ces choix permettent d'utiliser au mieux le parc de production d'électricité décarbonée.

Enfin, le souci de limiter l'impact environnemental de la mobilité électrique se traduit par le recours à des batteries de petite taille et par le choix de fabriquer les batteries en France (ce qui permet d'utiliser une électricité décarbonée dans le processus énergivore de fabrication) et de pousser le taux de recyclage au-delà de la réglementation actuelle.

SCÉNARIO PIANO - 2035

Parc de véhicules



**15,6 millions de véhicules légers électriques « classiques »
+ 156 000 véhicules lourds électriques**

dont 22% de véhicules hybrides rechargeables

22,7 millions de véhicules légers thermiques
500 000 véhicules lourds thermiques



Report modal vers les transports en commun et les mobilités douces

Modalités d'usage et comportements



Batteries de petite capacité
(56 kWh/330 km en moyenne)



14 000 km parcourus par an pour les véhicules légers 100% électriques



45% des véhicules ont un accès régulier à une borne hors domicile



Puissance élevée des bornes de recharge
(80% de bornes de 7,4 kW à domicile)



Connexion essentiellement systématique (85% systématique et 15% occasionnelle)



80% des recharges pilotées dont **20% V2G**

Cadrage environ.



Batteries fabriquées en France



Taux de recyclage élevé des batteries

Résultats

Par construction, le scénario *Piano* conduit à une performance environnementale améliorée : l'utilisation globale du véhicule individuel se contracte par rapport à aujourd'hui, le parc de véhicules légers est fortement électrifié, et cette électrification s'accompagne d'une réduction des émissions sur le cycle de vie des véhicules.

Il s'agit d'un scénario où la consommation électrique des transports est plus importante. L'électrification du parc de véhicules légers, et le report modal d'une partie de la mobilité thermique vers les transports en commun électriques, y concourent.

Le pilotage généralisé de la recharge permet d'atteindre un haut niveau de sécurité d'approvisionnement. Il apporte également des avantages certains sur le plan économique : le coût de production de l'électricité correspondante reste maîtrisé. Ceci se traduit également par une facture énergétique réduite pour les consommateurs, avec un coût net du plein électrique annuel (coût TTC de l'électricité pour la recharge, diminués des recettes éventuelles

des services de flexibilité) de seulement 280 € par an pour les utilisateurs en moyenne, et qui est même bien inférieur pour les utilisateurs pour les utilisateurs exploitant les possibilités offertes par la recharge réversible.

Sur le plan environnemental, ce scénario est le plus vertueux : la réduction de l'empreinte carbone des transports est particulièrement importante. Le développement des mobilités douces sur les petits trajets en zone urbaine et le report vers les transports en commun conduisent à réduire à la fois le parc de véhicules thermiques et les distances parcourues, et conduit à une économie de 7 millions de tonnes de CO₂ par an. À elle seule, la fabrication en France des batteries permet d'économiser jusqu'à 3 millions de tonnes, et les exigences supplémentaires sur le taux de recyclage contribuent à hauteur de près d'1 million de tonnes. Au total, l'empreinte carbone de la mobilité peut être réduite d'un peu moins de 40 millions de tonnes par an.

SCÉNARIO PIANO - 2035

Consommation électrique

**40 TWh**

de consommation des véhicules électriques

**+5 TWh**

de consommation supplémentaire des transports collectifs

**-3,3 GW**

d'appels de puissance à la pointe hivernale en moyenne (grâce au V2G)

Effet sur le mix électrique

**14,4 TWh**

de production d'électricité décarbonée «récupérés» pour la recharge des véhicules

Enjeux économiques

**30 €/MWh**

Coût complet moyen de production de l'électricité utilisée pour la recharge

**280 €/an**

Plein électrique moyen pour le consommateur

Émissions de CO₂**-38 MtCO₂/an**

empreinte carbone évitée au niveau mondial

UN SYSTÈME ÉLECTRIQUE EN MESURE D'ACCUEILLIR LE DÉVELOPPEMENT DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS SUR LE VOLET TECHNIQUE

Le développement de la mobilité électrique représente un nouvel usage. Sur la base d'une modélisation très largement affinée de la mobilité, la nouvelle étude offre une vision technique précise des impacts possibles sur le système électrique.

Selon les différents scénarios, le secteur des transports devrait induire une consommation de 40 à 65 TWh à horizon 2035. Ceci intègre les véhicules électriques légers – véhicules particuliers et utilitaires – (autour de 30 TWh dans les scénarios médian et haut), mais également les poids lourds et bus (moins de 5 TWh), les véhicules autonomes (25 TWh dans le scénario *Alto*), et les transports ferroviaires (de 10 à 15 TWh).

Les impacts sur la pointe sont, pour leur part, extrêmement différenciés selon le degré de pilotage et les caractéristiques générales du scénario : entre des appels à la pointe hivernale de 8 GW en moyenne (*Forte*) et 3,6 GW (*Crescendo*), voire une réduction moyenne de la pointe hivernale de 5,2 GW (*Opera*).

Plusieurs conclusions fortes en émanent :

- 1) Les conclusions du Bilan prévisionnel 2017 sont confirmées : la consommation totale d'électricité des transports individuels et collectifs pèserait au plus un dixième de la consommation d'électricité totale en France à l'échéance 2035. Il ne s'agit pas d'un enjeu prégnant : c'est moins que la consommation du chauffage résidentiel, moins que l'augmentation de la consommation électrique de la France entre 2000 et 2010. Le parc électrique décrit par le projet de PPE est amplement suffisant pour couvrir ce nouvel usage.
- 2) L'imaginaire collectif associe en partie la voiture aux grands déplacements – en témoignent les interrogations fréquemment remontées à RTE sur la faculté du système électrique à pouvoir « absorber » les « chassés-croisés » de juillet-août, ou les grands week-ends de mai. Néanmoins, il ne s'agit pas d'un risque pour la sécurité d'approvisionnement. Les longues distances sont mineures dans les distances parcourues chaque année, et les épisodes les plus contraignants sont susceptibles de se produire à des moments (été, week-end) où le système électrique dispose de marges abondantes. Les seules situations de

vigilance identifiées concernent les vacances de Noël, dans un scénario de vague de froid.

- 3) C'est bien au contraire la mobilité du quotidien qui constitue le principal enjeu pour le système électrique. Sans pilotage de la recharge (recharge « naturelle »), les appels de puissance seraient principalement concentrés sur la plage 19-21h. D'autres petites pointes sont susceptibles d'intervenir au cours de la journée, à l'arrivée sur le lieu de travail ou durant la pause méridienne : elles n'occasionnent pas de vigilance particulière.
- 4) Le pilotage de la recharge présente, sur le plan technique, un intérêt évident pour lisser ces recharges et éviter un accroissement de la pointe du soir. Cet intérêt est renforcé dans un système électrique comme celui dessiné par le projet de la PPE (peu de moyens thermiques pilotables, prédominance des capacités à bas coût fonctionnant en base – éolien, solaire, nucléaire – qui n'ont pas vocation technique ou économique à assumer le pilotage avec des rampes importantes). Le pilotage permettrait par exemple d'adapter la consommation, à l'échelle de la journée et de la semaine, aux variations de la production solaire et éolienne, dans des proportions très intéressantes.
- 5) Le développement massif du pilotage de la recharge ne constitue pas pour autant un *prerequis technique* à l'intégration de la mobilité électrique : sauf exceptions, les appels de puissance apparaissent gérables. Le mix de la PPE devrait conduire à des marges importantes, et seule la variante haute du scénario *Forte* conduirait à un problème en matière de sécurité d'approvisionnement (si moins de 55% de la recharge est pilotée).
- 6) Le pilotage est bien une option sans regret pour le système – en tant qu'opportunité d'assurer la sécurité d'alimentation à moindre coût (les solutions de pilotage les plus simples étant déjà très efficaces). Il dégage des marges supplémentaires considérables (6 GW pour le pilotage simple, 13 GW pour le pilotage dynamique avec injection V2G par rapport à une recharge « naturelle »), qui rendent le système plus robuste vis-à-vis des aléas, et augmentent les options pour la collectivité sur la transformation du mix électrique ou son utilisation pour décarboner d'autres secteurs.

4.1 Dans tous les scénarios, le parc de production français sera largement capable de produire la quantité d'énergie consommée par les véhicules électriques

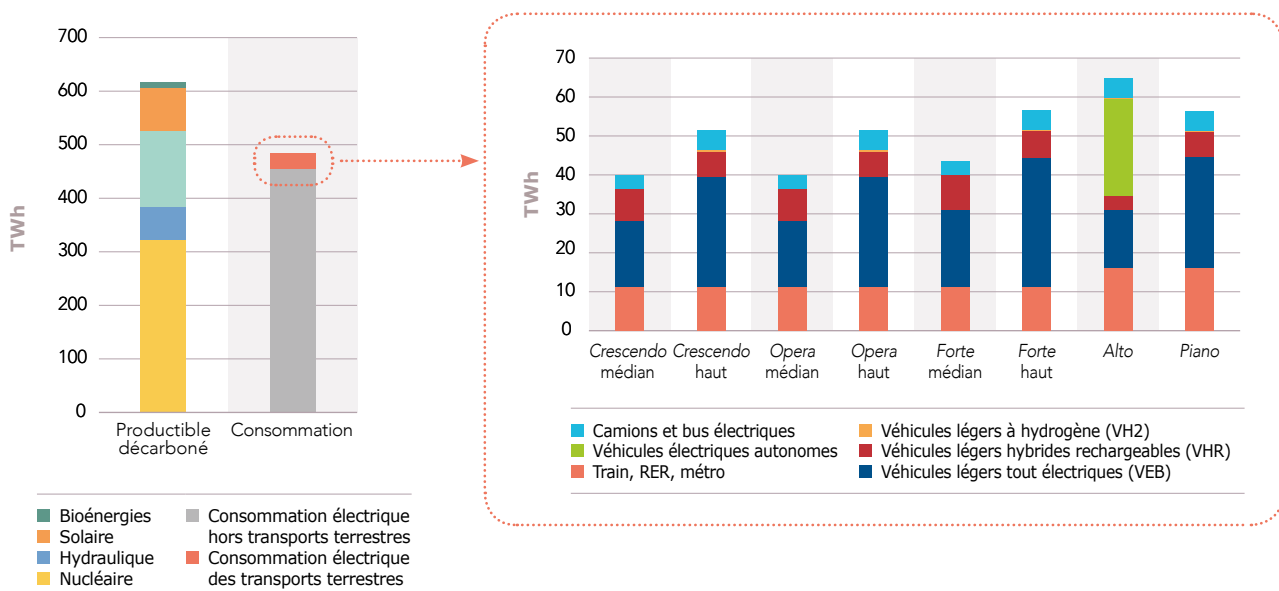
En tenant compte de l'ensemble des mobilités modélisées (véhicules légers, véhicules lourds, transports en commun), l'électrification du secteur des transports induit une consommation électrique de l'ordre de 40 à 65 TWh à l'horizon 2035 (contre 13 TWh aujourd'hui, essentiellement pour les transports ferrés). Cet accroissement de consommation est significatif mais ne représente en moyenne que 8% de la consommation d'électricité, et au maximum 10% dans les scénarios comme *Alto* (du fait des robots-taxis), *Piano* (du fait de l'augmentation du secteur ferroviaire) ou *Forte* (déplacements longue distance importants).

Ce montant est inférieur à la consommation pour le chauffage dans le secteur résidentiel (44 TWh aujourd'hui). Un tel volume serait atteint en 15 ans, ce qui ne constitue pas un rythme inédit (la consommation d'électricité a progressé de 55 TWh en France entre 2000 et 2010) et devrait intervenir dans un contexte par ailleurs baissier sur d'autres postes de consommation.

Les orientations contenues dans le projet de PPE conduisent la France à bénéficier d'un productible d'électricité décarbonée (EnR et nucléaire) de l'ordre de 615 TWh à l'horizon 2035. Dans ce cas de figure, même dans un scénario de fort développement de la mobilité électrique, la consommation électrique nationale pourra être largement couverte, en énergie, par le parc de production français. **Le message du Bilan prévisionnel 2017, obtenu avec le scénario Ampère, est donc confirmé dans le cadre du scénario de la PPE et d'une représentation affinée de la mobilité.**

L'enjeu de l'intégration de la mobilité électrique ne porte pas sur la capacité du parc de production à couvrir l'énergie consommée pour la recharge des véhicules électriques mais sur l'adéquation à chaque instant entre la puissance soutirée par les véhicules électriques et la puissance produite par le parc de production.

Figure 8. Consommation électrique annuelle et productible du parc électrique décarboné (EnR et nucléaire) français à l'horizon 2035, selon les orientations publiques sur l'évolution du parc de production d'électricité



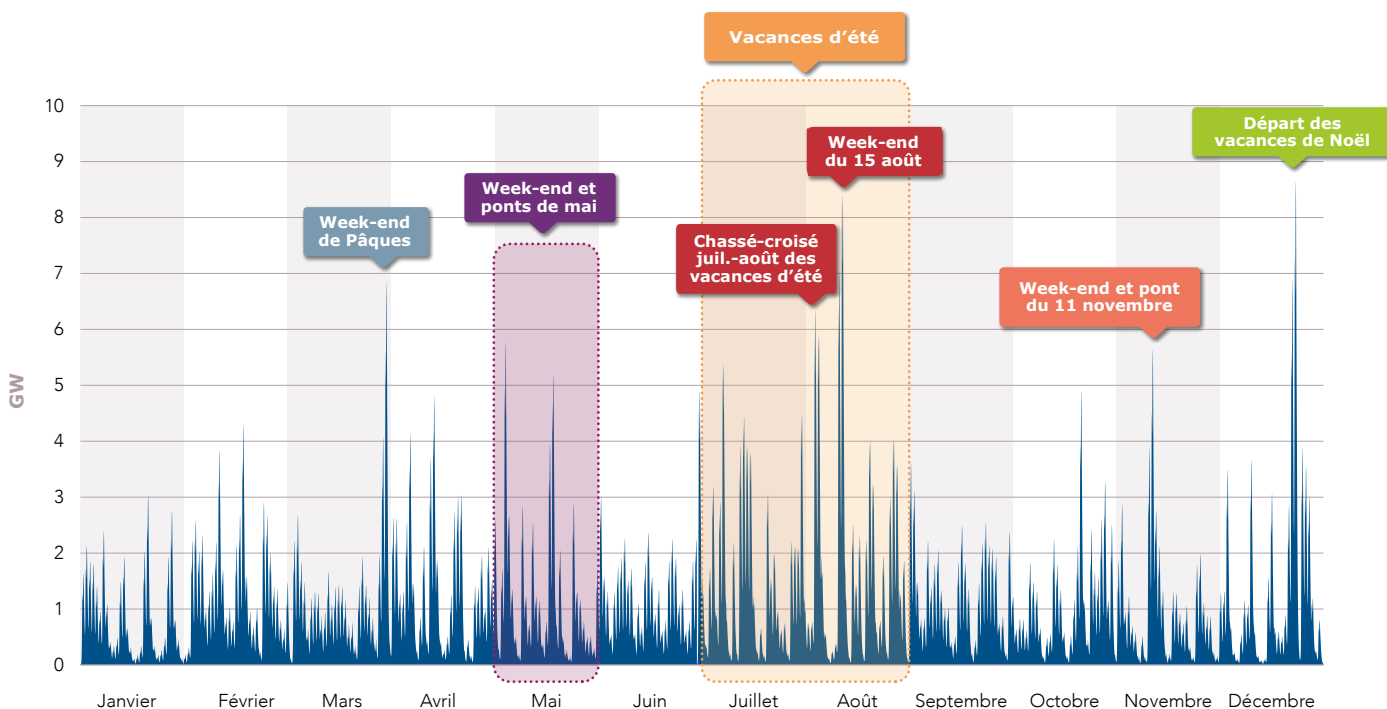
4.2 Les appels de puissance lors des périodes de forts déplacements n'engendrent pas d'inquiétude pour la sécurité d'approvisionnement

Les besoins de mobilité longue distance⁴ représentent aujourd'hui de l'ordre de 20% des distances parcourues. Ils sont très concentrés dans l'année, notamment pendant les jours de fin de semaine, en particulier lors des week-ends prolongés (Pentecôte, Pâques, etc.), lors des départs en vacances scolaires et lors des «chassés-croisés» de juillet-août.

Les nouvelles analyses réalisées par RTE montrent que, dans les scénarios les plus contraints, les appels de puissance pour les besoins de mobilité longue distance peuvent représenter jusqu'à plus de 8 GW lors des jours de plus forts déplacements

(typiquement le samedi du week-end du 15 août ou au moment des vacances de Noël). Des appels de puissance d'une telle ampleur n'existent que dans les scénarios où se développe fortement la mobilité électrique pour la longue distance – ce qui n'est pas acquis et ne devrait pas être le «terrain» privilégié de la mobilité électrique, au moins au cours des prochaines années – et uniquement dans l'hypothèse d'un dimensionnement des infrastructures de recharge sur les axes routiers suffisant pour «passer la pointe de mobilité» (sans assurance d'un modèle économique pour les investissements consentis dans des bornes de recharges qui seraient à l'année très peu utilisées).

Figure 9. Puissance soutirée pour les besoins de mobilité longue distance dans le scénario *Forte haut* (cumul de la puissance soutirée en itinérance sur les axes routiers et de la puissance soutirée à destination).



4. Déplacements réalisés à plus de 80 kilomètres à vol d'oiseau du domicile.

Bien que significatifs, ces appels de puissance n'engendrent pas d'inquiétude pour la sécurité d'approvisionnement. En effet, ils devraient être concentrés essentiellement sur les périodes où le système électrique dispose de marges importantes : période estivale, samedi et dimanche.

Le point d'attention relevé par l'étude ne concerne pas les « chassés-croisés estivaux », mais le vendredi de départ des vacances scolaires de Noël, où les trois zones scolaires sont « synchronisées ». Les appels de puissance pour les besoins de mobilité longue distance pourraient atteindre jusqu'à plus de 8 GW et s'avérer potentiellement contraignants pour le système électrique, en cas de concomitance avec une vague de froid.

Dans ces circonstances spécifiques, des moyens existent pour y remédier et assurer la sécurité

d'approvisionnement notamment via la maîtrise de l'ensemble des usages électriques à la pointe.

Lors des grands déplacements, seulement 30% à 40% (selon l'hypothèse sur l'autonomie des véhicules) de l'énergie utilisée pour la mobilité longue distance serait soutirée « en itinérance » sur les grands axes routiers, au milieu des trajets. Le reste correspond à des recharges qui peuvent être effectuées avant le départ et après, sur le lieu d'arrivée : ces recharges pourront être pilotées et placées aux moments où le système électrique dispose de marges (par exemple au cours de la nuit précédente).

La localisation géographique des appels de puissance pour la mobilité longue distance pourra toutefois entraîner localement des besoins de renforcement des réseaux (transport et distribution).

4.3 L'enjeu pour le système électrique porte essentiellement sur la recharge pour les besoins de mobilité « du quotidien »

Le principal enjeu pour le système électrique correspond aux recharges pour répondre aux besoins de mobilité locale. Celle-ci pèse en effet pour 80% des distances parcourues par les véhicules actuels et le basculement vers le véhicule électrique est susceptible de concerner prioritairement ce type de mobilité.

Les profils des appels de puissance dépendront fortement de la forme que prendra le développement de la mobilité. **La situation à laquelle fera face le système électrique dépendra ainsi en premier lieu de la faculté à recharger le véhicule en milieu de journée et en second lieu de la répartition du développement de la mobilité électrique dans les différentes catégories de la population (actifs⁵/inactifs, citadins/**

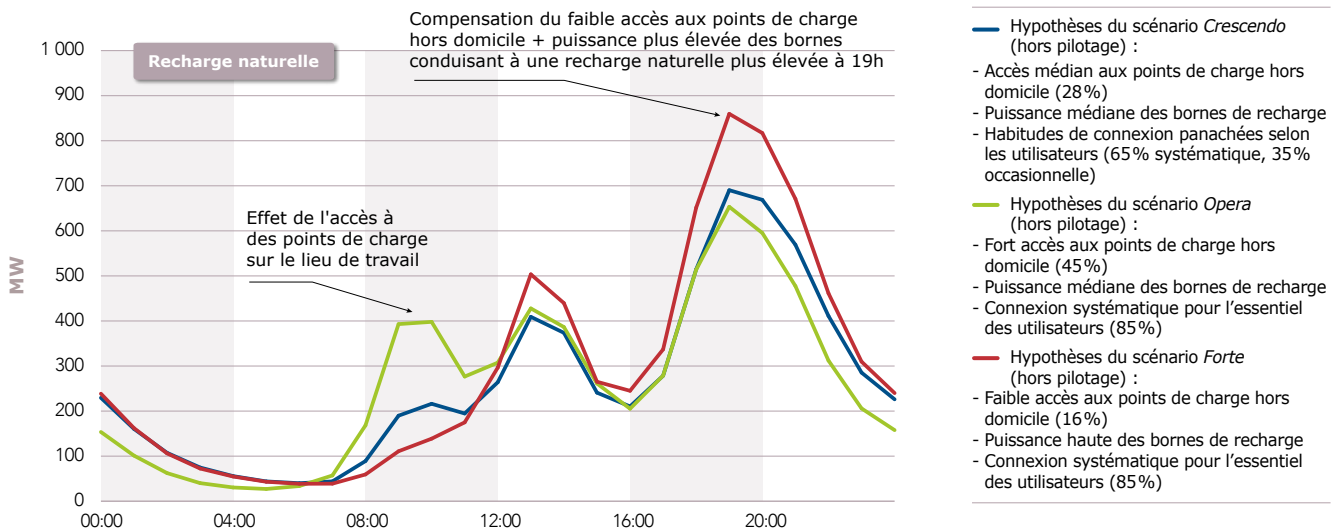
ruraux, niveaux de revenus, professionnels et flottes d'entreprises, etc.).

A contrario, la capacité des batteries, la fréquence de la recharge, la part des véhicules hybrides, ou encore la puissance des bornes de recharge, ont un impact moindre sur le profil des appels de puissance.

Dans toutes les configurations étudiées, les appels de puissance sans pilotage de la recharge (« recharge naturelle») sont principalement concentrés sur la plage 19h-21h. Ceci résulte des retours à domicile des personnes utilisant leur véhicule pour des trajets domicile-travail. Deux autres pics, moins prononcés sont susceptibles d'apparaître (i) le matin correspondant à la recharge à l'arrivée

5. Le terme « actif » désigne dans ce rapport les personnes ayant un emploi, et les étudiants.

Figure 10. Courbe de charge type pour un jour ouvré moyen pour un million de véhicules électriques dans différents scénarios considérés (dans leurs variantes sans pilotage)



sur le lieu de travail et (ii) le midi, correspondant au retour à domicile d'utilisateurs inactifs ou d'actifs rentrant déjeuner à domicile.

Sans aucun pilotage, ces appels de puissance ont des caractéristiques peu favorables au système électrique. D'une part, ils sont concentrés dans la journée au moment où le système électrique a le moins de marges (pointe de consommation du soir, absence de production photovoltaïque) et, d'autre part, ils sont thermosensibles, du fait des besoins d'énergie pour le chauffage de l'habitat. Dans un scénario haut de développement de la mobilité

électrique, la consommation des véhicules électriques à 19h serait plus élevée de 3 GW un jour de vague de froid (avec des températures comparables à celles du 8 février 2012, date du maximum historique de consommation électrique en France) par rapport à un jour tempéré de mi-saison.

Ceci souligne que ce sont bien les trajets « du quotidien » qui constituent le principal enjeu pour le système électrique du développement de la mobilité électrique. Le pilotage de ces recharges présente alors un intérêt évident.

4.4 Le pilotage de la recharge permet d'adapter la consommation à la production d'électricité renouvelable

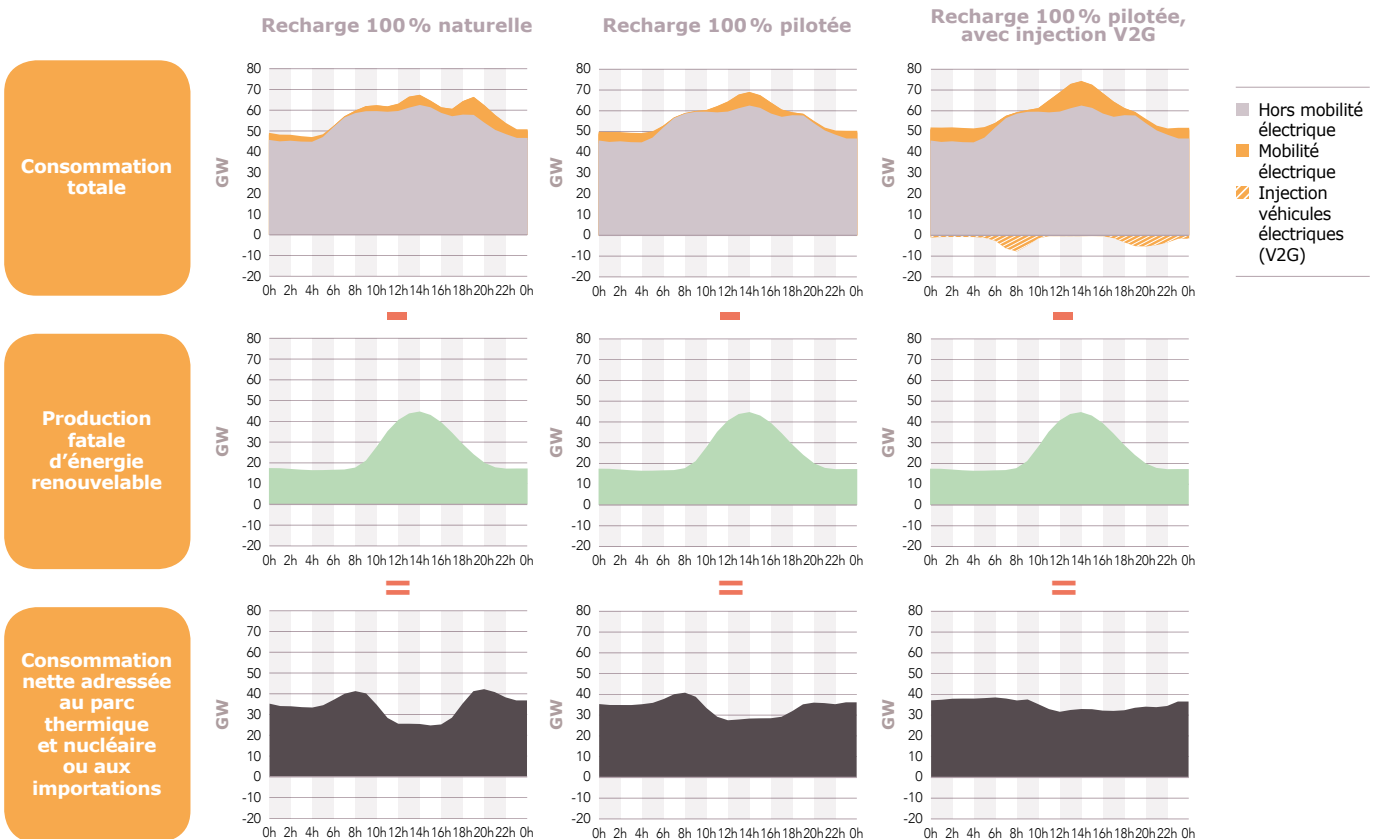
En France, dans le mix dessiné par la PPE et composé essentiellement de moyens EnR et nucléaires, l'ensemble des solutions de flexibilité permettant de déplacer la consommation électrique sur des périodes de forte disponibilité des productions nucléaire et renouvelable présenteront de l'intérêt pour l'équilibrage du système et pour la valorisation de la production d'électricité décarbonée.

En particulier, le pilotage de la recharge des véhicules électriques offre la possibilité de moduler fortement la courbe de consommation nationale et de l'adapter à la production des énergies renouvelables, tout en respectant les besoins de mobilité des utilisateurs de véhicules électriques. **Il permet de réduire fortement les variations journalières**

et hebdomadaires de la demande résiduelle (c'est-à-dire la consommation d'électricité française défalquée de la production EnR fatale) adressée au parc de production pilotable (parc nucléaire, thermique à flamme et hydraulique pilotable).

L'utilisation du parc de production peut ainsi être optimisée, en réduisant notamment les périodes où la production renouvelable doit être écartée par absence de débouchés et en limitant les variations de production du parc nucléaire. Cette optimisation conduit à moins solliciter les moyens fossiles, voire à réduire le besoin de capacité de «back-up» pour assurer la sécurité d'approvisionnement.

Figure 11. Consommation totale France et consommation diminuée de la production EnR fatale dans différentes configurations de pilotage de la recharge des véhicules électriques, pour un jour ouvré moyen (scénario *Crescendo* médian 2035)



4.5 Le développement massif du pilotage de la recharge ne constitue pas un prérequis à l'intégration de la mobilité électrique...

L'une des questions récurrentes du débat public sur le développement du véhicule électrique porte sur la capacité du système à couvrir les appels de puissance associés à la recharge des batteries des véhicules. Cette interrogation concerne en premier lieu la pointe du soir en hiver (autour de 19h), déjà aujourd'hui caractérisée par des appels de puissance importants, et qui pourrait également concentrer demain un nombre élevé de recharges de véhicules électriques au moment du retour au domicile de leurs utilisateurs.

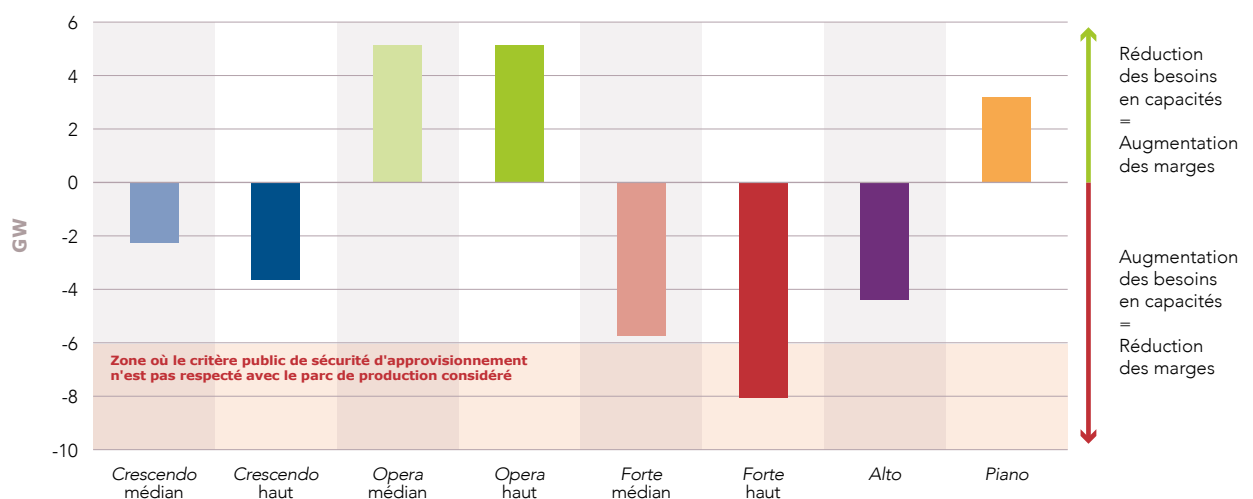
Le scénario *Forte* permet d'étudier un cas de figure volontairement contraint pour la sécurité d'approvisionnement électrique, dans lequel les utilisateurs auraient peu d'accès à des bornes de recharge en dehors du domicile, et où la majorité des recharges de véhicules ne seraient pas pilotées.

Toutefois, même avec ce type de développement de la mobilité et en tablant sur la trajectoire de développement du scénario *Green Constraint* de la Plateforme française automobile (PFA) – avec 11,7 millions de véhicules en 2035 –, le respect du critère de sécurité d'approvisionnement électrique⁶ est assuré.

Ceci s'explique par deux raisons principales :

- (i) L'étalement des heures de départ et d'arrivée des véhicules et la diversité des profils d'utilisation des véhicules (actifs rentrant ou non le midi, inactifs, etc.) conduit à un foisonnement naturel des recharges et permet de limiter les pics de consommation associés à la recharge : de la même façon qu'aujourd'hui, tous les foyers n'allument pas leurs fours ou leurs plaques électriques de manière parfaitement

Figure 12. Effet du développement de la mobilité électrique sur les marges du système électrique selon les scénarios (comparaison avec un scénario sans développement de la mobilité électrique à horizon 2035)



6. Le critère de sécurité d'approvisionnement électrique défini par les pouvoirs publics ne correspond pas à une absence de défaillance mais à un niveau de risque de défaillance limité à moins de trois heures par an en espérance. Les analyses présentées dans le Bilan prévisionnel 2018 et dans le rapport d'analyses complémentaires remis au ministre en avril 2019 détaillent la définition de ce critère.

synchronisée, la recharge des véhicules électriques, même non pilotée, s'étalera naturellement dans le temps.

- (ii) Le mix de production d'électricité projeté par la PPE présente des marges de capacité confortables par rapport au critère de sécurité d'approvisionnement à horizon 2035, du fait notamment du maintien d'un socle nucléaire important et du développement des EnR et des interconnexions.

Seule la variante haute du scénario *Forte*, avec 15,6 millions de véhicules électriques en 2035, est susceptible de présenter un léger déficit de capacité par rapport au critère de sécurité d'approvisionnement en cas de développement limité du pilotage. Il est possible d'y remédier avec un développement un peu plus important de solutions simples de pilotage de la recharge (55% au lieu de 40%).

Par conséquent, si les ambitions publiques en matière d'évolution du parc de production d'électricité sont suivies, la sécurité d'approvisionnement pourrait être assurée au niveau du critère actuel, sans nécessiter un développement à grande échelle du pilotage de la recharge des véhicules électriques. **La modification à large échelle des habitudes de mobilité, ou l'adoption généralisée du pilotage de la recharge, ne constituent donc pas des prérequis techniques à une forte électrification du parc automobile.**

Ce diagnostic est tributaire d'une réalisation effective du scénario de la PPE (notamment les trajectoires EnR et les économies d'énergie pour les usages spécifiques de l'électricité) et d'un degré minimal de pilotage.

4.6 ... mais le pilotage est une option sans regret pour accroître la résilience du système électrique

Si le développement massif du pilotage n'apparaît ainsi pas comme un prérequis pour l'intégration de la mobilité électrique, il constitue cependant une option sans regret pour le système électrique. Des dispositifs même très simples et peu onéreux (par exemple, portant uniquement sur le choix des jours de branchement et des asservissements à un signal tarifaire « statique ») permettent de contribuer à dégager des marges importantes.

Ainsi, dans le scénario *Crescendo* (variante médiane), l'écart entre un pilotage tarifaire simple de la recharge de la totalité des véhicules et une absence de pilotage est estimé à 6 GW à la pointe en 2035. Dans l'hypothèse théorique où le développement du *vehicle-to-grid* serait généralisé, ceci apporterait des marges supplémentaires très importantes (de l'ordre de 7 GW supplémentaires par rapport à un pilotage tarifaire simple) en 2035.

Un scénario comme *Opera*, dans lequel le pilotage est fortement développé (80%, dont 20% en

vehicle-to-grid) aboutit même à une situation où le développement de la mobilité électrique se traduit par une réduction des pointes de consommation. Ces niveaux de pilotage peuvent sembler élevés mais sont accessibles : on estime aujourd'hui qu'environ 80% de la recharge des chauffe-eau est pilotée, sans inconfort pour l'utilisateur.

Même en l'absence de problème sur la sécurité d'approvisionnement, l'intérêt technique et économique du pilotage est fort :

- ▶ **il offre de la robustesse du système électrique pour faire face à certains aléas structurels (incapacité de respecter la trajectoire de la PPE sur les EnR, moindre disponibilité du parc nucléaire suite à aléas génériques) ou conjoncturels (retard dans la mise en service de nouveaux moyens ou d'interconnexions, indisponibilité fortuite de certains groupes, vague de froid, etc.) ;**
- ▶ **il élargit le spectre des choix possibles pour la collectivité, pour adapter le mix**

électrique à politique climatique inchangée, ou pour augmenter les transferts d'usage vers l'électricité à mix inchangé.

Ces deux effets peuvent jouer différemment à long ou moyen terme.

À horizon 2030-2035

Le scénario de la PPE offre des marges conséquentes, via un fort développement des EnR (qui fait plus que compenser la réduction du parc nucléaire) et un développement des interconnexions. Néanmoins, plusieurs facteurs pourraient en pratique conduire à une situation moins favorable : difficulté à tenir les trajectoires EnR, retard dans la réalisation de nouvelles lignes d'interconnexion transfrontalières, fermeture accélérée de moyens thermiques dans les pays voisins, dégradation de la disponibilité du parc nucléaire, etc. Dans ce cas, l'intérêt du pilotage de la recharge sera plus élevé, toutes choses étant égales par ailleurs, car les marges de sécurité d'approvisionnement seront moins favorables.

Les marges supplémentaires dégagées par le pilotage peuvent également servir à accélérer la décarbonation d'autres usages en facilitant leur transfert vers l'électricité. Par exemple, les 6 GW de marges qui peuvent être dégagées par la généralisation du premier niveau de pilotage dans le scénario *Crescendo* offriraient la possibilité d'électrifier le chauffage pour environ 4 millions de foyers (avec

un mix PAC-Joule), et de réduire les émissions de CO₂ d'environ 3 millions de tonnes par an.

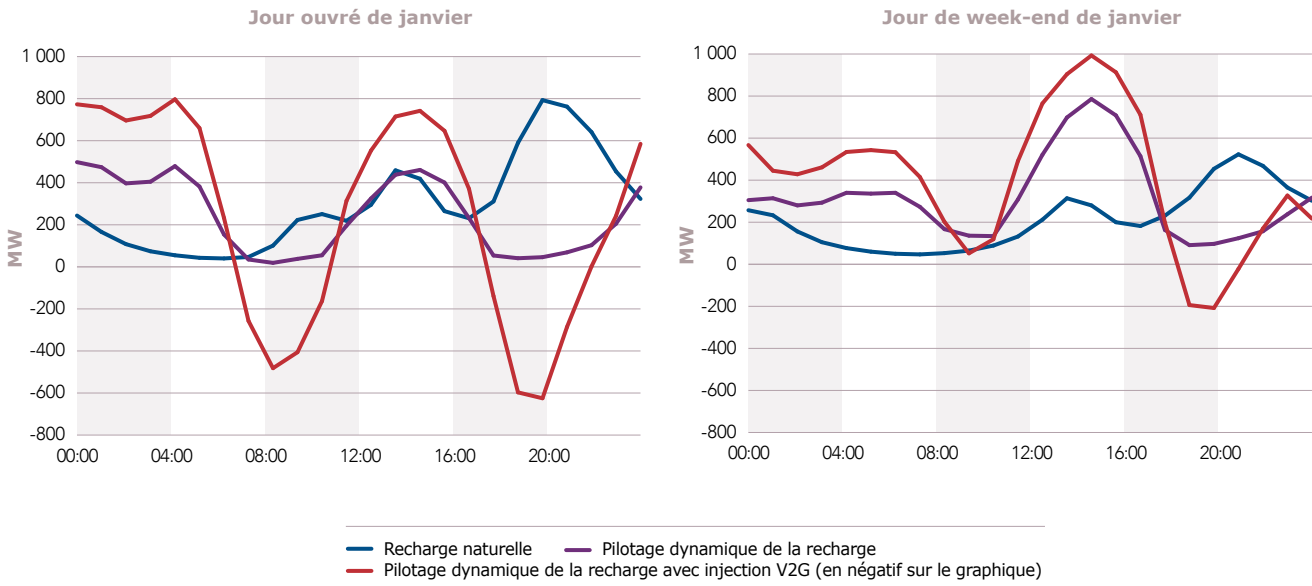
À horizon 2020-2025

À moyen terme sur la période 2020-2025, la sécurité d'approvisionnement pourrait apparaître plus contrainte du fait de la fermeture d'un certain nombre de centrales (centrale nucléaire de Fessenheim, dernières centrales au charbon, etc.) et en l'attente de la mise en service d'autres moyens (EPR de Flamanville, parcs éoliens en mer, interconnexions, etc.). Cette situation a fait l'objet d'analyses détaillées dans le Bilan prévisionnel 2018 et le rapport d'analyses complémentaires remis au ministre d'État le 3 avril 2019.

À l'horizon 2022-2023, le développement de la mobilité électrique sera limité mais les véhicules présents pourraient déjà apporter une contribution à la sécurité d'approvisionnement en électricité. Un pilotage généralisé de la recharge pour un million de véhicules électriques (objectif du contrat stratégique de la filière automobile) conduit à dégager 200 MW de marges supplémentaires. Le développement massif du *vehicle-to-grid*, en supposant qu'il soit accessible⁷, pourrait même théoriquement apporter jusqu'à 2 GW de marges supplémentaires. La technologie étant encore balbutiante dans son déploiement commercial, cette perspective semble néanmoins très théorique, à une échéance aussi rapprochée.

⁷ Le développement massif du *vehicle-to-grid* pose des défis sur le plan technique (compatibilité des matériels, notamment des bornes de recharge, fonctionnement de la chaîne de pilotage, effet sur l'usure de la batterie), sur le plan économique (coût des convertisseurs, attentes de revenus par les utilisateurs et leurs agrégateurs) et sur le plan de l'acceptabilité (perception par les utilisateurs d'un impact sur leurs besoins de mobilité, nécessité d'une participation plus active de l'utilisateur, perception d'un risque d'usure des batteries prématuré).

Figure 13. Courbes de charge pour un million de véhicules électriques dans le scénario *Crescendo* médian, selon le type de pilotage



L'ANALYSE ÉCONOMIQUE À L'ÉCHELLE DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE : UNE FORTE COHÉRENCE ENTRE L'ÉLECTRIFICATION DES TRANSPORTS ET LA FEUILLE DE ROUTE ÉNERGÉTIQUE, ET DES LEVIERS POUR RÉDUIRE LES COÛTS

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS SUR LE VOLET ÉCONOMIQUE

Dans le scénario de la PPE, la France dispose à l'horizon 2035 d'une capacité de production décarbonée en nette croissance par rapport à aujourd'hui (environ 615 TWh – 320 de nucléaire et 295 d'ENR, contre 505 TWh – 395 de nucléaire et 110 d'EnR aujourd'hui). **Les analyses économiques témoignent de la forte cohérence économique entre ce type de transformation du mix électrique et le développement la mobilité électrique.**

Le rapport permet en premier lieu un chiffrage exhaustif du coût occasionné par le développement de la mobilité électrique sur la production d'électricité. Ce chiffrage peut être mis en perspective :

- 1) Par rapport au coût complet de la mobilité : la production d'électricité destinée à la recharge des véhicules électriques (l'équivalent du carburant) constitue une partie infime du coût total, et un poste de dépenses très inférieur à l'approvisionnement en produits pétroliers.
- 2) Par rapport au coût complet du mix électrique : la production d'électricité pour la recharge des véhicules électriques ne représente qu'environ 5% du coût complet à horizon 2035, et se fait sans surcoût par rapport aux évaluations actuelles, qui intègrent déjà cette consommation.
- 3) À niveau équivalent d'électrification, ce poste de coût est lui-même variable selon les scénarios, et dépend au premier ordre des facteurs étudiés dans ce rapport, comme le degré de pilotage.

Au travers des cinq scénarios étudiés, le rapport analyse de manière approfondie les opportunités pour optimiser le coût de la production d'électricité nécessaire pour le véhicule électrique. Ce coût peut varier du simple au double selon le degré de pilotage :

- 4) Le déploiement généralisé du pilotage de la recharge, même simple, apparaît comme une

option «sans regret», conduisant à des gains collectifs à hauteur de près d'un milliard d'euros par an.

- 5) La sophistication du pilotage de la recharge entre le système et les véhicules permet de capter des gains supplémentaires significatifs, mais plus variables selon les scénarios.
- 6) La participation des véhicules électriques aux réserves permet en théorie d'aller encore plus loin dans l'optimisation, mais devrait demeurer un marché de niche et n'a pas de sens à une large échelle.
- 7) La participation ultérieure des batteries à la flexibilité du système électrique (via une utilisation des batteries de seconde vie sous forme de stockage stationnaire) conduit à un intérêt économique incertain.

Ceci montre qu'un développement coordonné de la mobilité électrique avec le parc de production est un gage d'optimisation et de cohérence de l'ensemble du scénario. Les gains associés se traduisent à différents niveaux. Notamment, une bonne articulation entre le déploiement de la mobilité électrique et l'évolution du mix se traduit :

- 8) Pour les finances publiques, par une réduction des besoins de soutien public au développement des EnR à ambitions inchangées.
- 9) Pour les producteurs : par une meilleure stabilité des prix de l'électricité et la réduction des situations de prix faibles ou négatifs.
- 10) Pour le consommateur : par des recharges au moment où les coûts de l'électricité sont les plus faibles, avec un gain annuel (avec un pilotage simple) de l'ordre de 60 à 170 € par an (*chapitre 6*).

5.1 La production d'électricité pour la recharge des véhicules électriques représente une composante minime du coût complet de la mobilité...

L'évaluation économique des transformations nécessaires pour décarboner le secteur des transports fait l'objet d'un nombre croissant de réflexions et d'études – récemment encore avec une publication de l'OPECST citant le chiffre de 500 milliards d'euros sur 20 ans pour atteindre l'ambition de mettre fin à la vente de véhicules thermiques d'ici 2040.

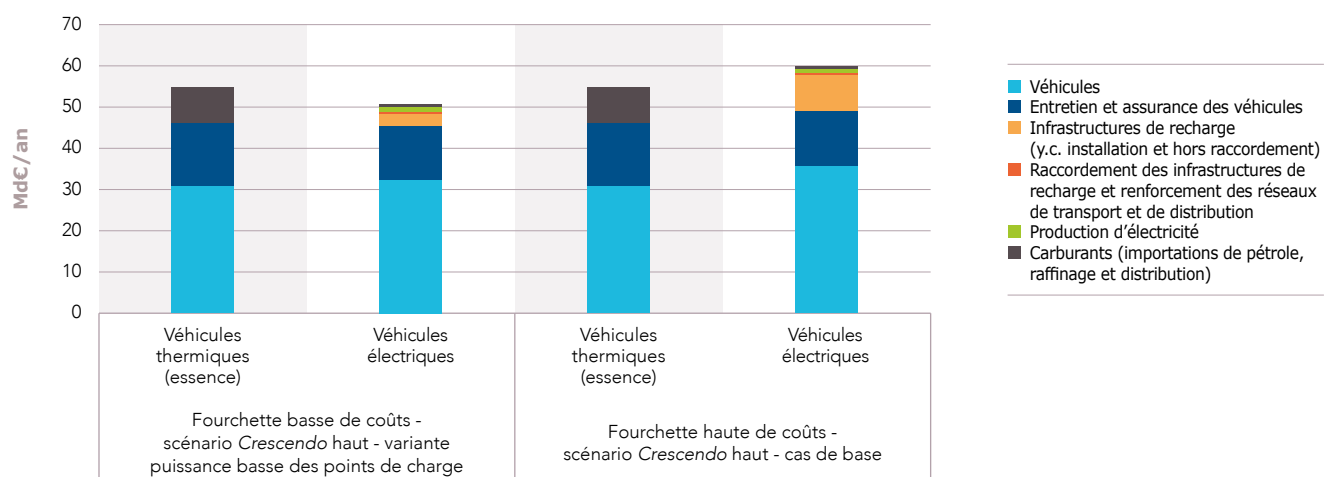
L'évaluation des coûts associés à un scénario de transformation pose des questions méthodologiques importantes. Elle nécessite de distinguer :

- ▶ le coût complet des véhicules à proprement parler (coût initial, coût d'entretien et d'assurance) ;
- ▶ le coût des infrastructures de recharge ;
- ▶ pour les véhicules thermiques et hybrides rechargeables : les coûts de l'approvisionnement en carburants (pétrole, raffinage, distribution) ;
- ▶ pour les véhicules électriques : le coût de l'adaptation du système électrique, en intégrant les réseaux (raccordement des infrastructures de recharge et adaptation des réseaux en amont) et la production d'électricité.

La nouvelle étude de RTE permet de chiffrer précisément un poste spécifique associé à cette transformation : le coût annuel de production d'électricité. Ce poste représente une partie du coût d'adaptation du système électrique, qui lui-même constitue une fraction du coût d'ensemble d'un scénario de mobilité.

À horizon 2035, le coût de production d'électricité est estimé à 1 à 2 milliards d'euros par an (*voir § 5.2 et 5.3*) pour un volume de 15,6 millions de véhicules électriques légers et 156 000 bus et camions électriques : **la production d'électricité constitue donc un poste de coût très faible dans le coût complet du transport, très inférieur à celui des carburants si cette mobilité était faite à partir de véhicules thermiques.** Ce faible coût énergétique, en comparaison au coût associé aux imports de carburant pour les véhicules thermiques, est de nature à faciliter la transition vers le véhicule électrique.

Figure 14. Coûts totaux annualisés pour 15,6 millions de véhicules à l'horizon 2035 selon leur motorisation



À titre de comparaison, la balance commerciale de la France pour l'import de pétrole représente en 2016 un déficit de 24 milliards d'euros. **Les imports de pétrole brut qui seraient évités à l'horizon 2035 par 15,6 millions de véhicules électriques représentent plus de 5 milliards d'euros par an (hypothèses de prix du scénario New Policies de l'IEA), soit de l'ordre de 3 à 8 fois (selon les modalités de développement) le coût de production de l'électricité pour recharger les véhicules.**

Il s'agit d'un élément important à prendre en compte dans la comparaison économique des différentes trajectoires d'évolution des formes de mobilité.

À l'heure actuelle, le coût complet (au niveau de la collectivité) des véhicules électriques est supérieur à celui des véhicules thermiques. Cela résulte principalement de deux postes de coût : la production des véhicules à proprement parler (coût essentiellement lié aux batteries), et le coût des

infrastructures de recharge. La compétitivité de l'électricité vis-à-vis du pétrole comme carburant ne permet pas de combler ce différentiel : le véhicule électrique bénéficie donc de soutiens publics pour accroître son intérêt vu du consommateur.

Les différences entre le coût de production d'un véhicule thermique et d'un véhicule électrique devraient progressivement se résorber à l'avenir, avec la baisse attendue des coûts des batteries et de production des véhicules électriques. Selon les hypothèses sur l'évolution de ces coûts, la transition vers la mobilité électrique pourrait à long terme ne représenter aucun surcoût pour la collectivité (hypothèses favorables), ou ne représenter qu'un surcoût limité (10% de surcoût avec des hypothèses moins favorables). À cet horizon, alors que les coûts complets des deux technologies seront proches, l'évaluation du volet « production d'électricité » prend donc tout son sens – notamment dans la perspective d'une diminution des soutiens publics.

5.2 ... et une faible part des coûts totaux de production d'électricité à horizon 2035

Le chiffrage du volet «production d'électricité» participe d'une démarche engagée depuis 2017, visant à ce que les analyses réalisées par RTE sur les scénarios prospectifs contiennent un chiffrage économique systématique.

Ce chiffrage intègre les logiques de passage à l'échelle, s'appuie sur des références de coût publiques et/ou ayant fait l'objet d'une consultation publique, et est présenté en intégrant plusieurs variantes afin de hiérarchiser les paramètres et de saisir les ordres de grandeur pertinents. Cette méthode a été présentée dans les rapports sur les réseaux électriques intelligents (juillet 2017) et approfondie dans le Bilan prévisionnel 2017 (qui présente un chiffrage du volet «production – fourniture – imports/exports» des scénarios). Le travail de chiffrage sera prochainement étendu aux aspects réseaux dans le cadre du prochain schéma de réseau (SDDR) de RTE (mi-2019).

Le rapport sur la mobilité électrique permet de chiffrer précisément le poste de coût associé à la production d'électricité destinée à alimenter les véhicules et les transports collectifs projetés dans les différents scénarios. L'évaluation du coût de production intègre les dépenses d'investissement initiales, les dépenses de fonctionnement fixes et variables, et ne se borne donc pas aux seuls coûts variables de fonctionnement des centrales. **Selon cette méthode, le coût de production associé au développement de la mobilité électrique**

(véhicules légers électriques, bus et camions électriques et report modal sur les transports ferrés électriques) est compris entre 0,6 et 2 milliards d'euros par an.

Ce coût de production se situe dans une fourchette autour de 5% d'un scénario comme Ampère et Volt (sur la base des estimations du Bilan prévisionnel 2017) ou de la PPE (sur la base du projet de PPE). Il s'agit donc d'un budget réduit, une fois rapporté à l'ensemble du coût d'un mix électrique.

Le développement de la mobilité électrique peut en effet s'appuyer sur des filières (nucléaire existant, éolien, solaire) qui sont compétitives ou proches de l'être, par rapport à de nouveaux moyens thermiques à combustibles fossiles.

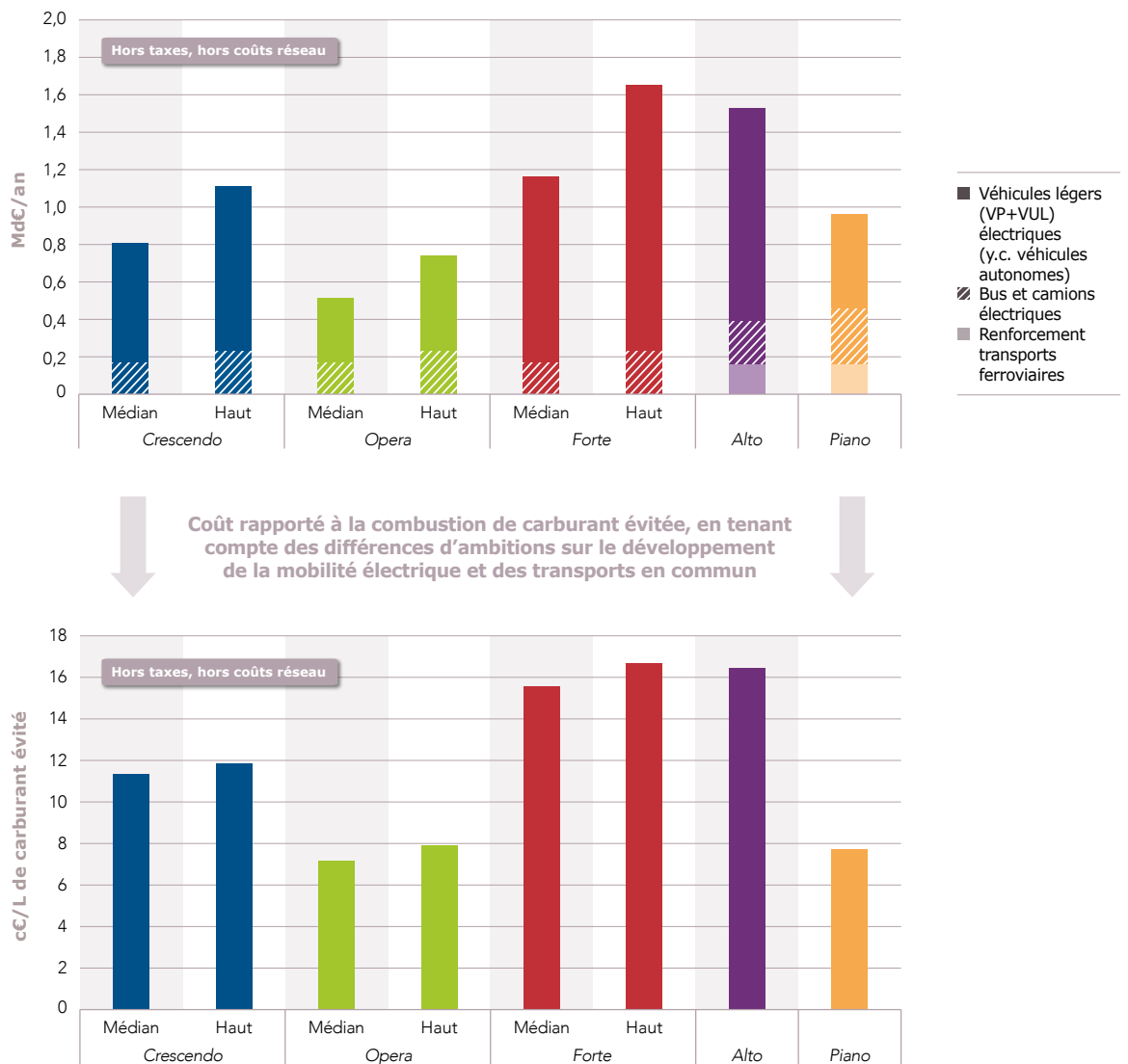
Ce coût est déjà en large partie intégré aux chiffrages existants des scénarios de la PPE ou de ceux s'en approchant. En effet, le parc de production décrit dans le projet de PPE, associé au mix européen, est suffisant pour alimenter tous les scénarios de mobilité considérés dans cette étude, et la consommation électrique d'une flotte importante de véhicules est déjà intégrée aux trajectoires de consommation de la PPE et de la SNBC. **La consommation des véhicules électriques étant intégrée à ce type de scénarios, il n'existe pas de surcoût par rapport aux évaluations déjà diffusées.**

5.3 Le coût de la production d'électricité est variable selon les scénarios : il existe des leviers pour l'optimiser

Même si le poste de coût «production d'électricité» représente une faible part du coût complet, son optimisation peut être recherchée en activant les différents leviers décrits dans les scénarios. Les différentes configurations de développement de la mobilité électrique (part du véhicule hybride

rechargeable, généralisation du pilotage, accès aux points de charge hors domicile, développement de véhicules autonomes, importance du report modal, etc.) conduisent en effet à des résultats très différents, selon les différentes métriques.

Figure 15. Coût de production d'électricité pour la mobilité électrique



Notamment, le coût de production peut varier d'un facteur supérieur à deux, pour des scénarios comparables en termes d'ambitions de réduction de la place de la mobilité thermique.

Les différents scénarios présentent ainsi des coûts d'intégration très contrastés qui peuvent varier du simple au double, pour des scénarios comparables en termes d'ambitions de réduction de la place de la mobilité thermique. Le principal effet provient du développement du pilotage : celui-ci doit donc être compris comme le principal paramètre de contrôle du poste de coût

« production d'électricité » du développement de la mobilité électrique.

Rapporté au litre de carburant évité, le coût de la production d'électricité apparaît environ cinq à dix fois inférieur au coût d'importation et de raffinage des produits pétroliers (environ 60 c€/L aujourd'hui), hors composantes liées aux taxes et aux coûts de réseau et de distribution. En ajoutant ces dernières, le plein électrique annuel pour le consommateur apparaît trois à cinq fois inférieur au plein essence (*voir chapitre 6*). Ce coût dépend fortement des conditions du développement de la mobilité électrique.

5.4 Le pilotage de la recharge : le déploiement généralisé de dispositifs de pilotage simples conduit à des gains importants pour le système électrique, pouvant atteindre 1 milliard d'euros par an

Le pilotage de la recharge des véhicules électriques permet de placer les recharges pendant les périodes où les coûts de production sont les plus faibles. Ceci peut notamment être le cas lors de périodes de très forte production éolienne (qui peuvent survenir de manière aléatoire durant une semaine), ou de très forte production solaire (en milieu de journée).

Aujourd'hui, des épisodes de « surabondance » de la production à bas coût peuvent se produire, essentiellement le week-end. Ils se traduisent par une modulation à la baisse importante du parc nucléaire (avec par exemple une réduction de 10 GW de la puissance produite par le parc le week-end du 17 mars 2019) en France, ou par des prix négatifs en Allemagne (par exemple, -80 €/MWh le 21 avril 2019).

À l'avenir, ce type de situation devrait être plus fréquent avec la croissance des énergies renouvelables. Les scénarios du Bilan prévisionnel

2017 sont ainsi tous caractérisés – chacun selon une intensité différente – par une augmentation de la fréquence de ce type de situation, et par le recours croissant à des « écrêtements » de production fatale comme solution pour y faire face. L'écrêtement consiste en une réduction consentie ou imposée de la production renouvelable. Il s'agit d'une méthode rationnelle pour gérer les situations de surabondance de la production, mais une utilisation trop fréquente serait sous-optimale pour la collectivité, car elle conduirait à renoncer à une production « gratuite ».

Avec un pilotage de la consommation généralisé pour les usages qui peuvent l'être (rechargement des chauffe-eau, recharge des véhicules), il est possible d'éviter la plupart de ces situations. Ceci permet d'optimiser le fonctionnement du système électrique en maximisant l'utilisation des capacités de production à faible coût variable.

Figure 16. Production et consommation d'électricité en France une semaine de forte disponibilité d'énergies renouvelables, dans le scénario *Crescendo* médian avec 100% de recharge naturelle ou 100% de recharge pilotée

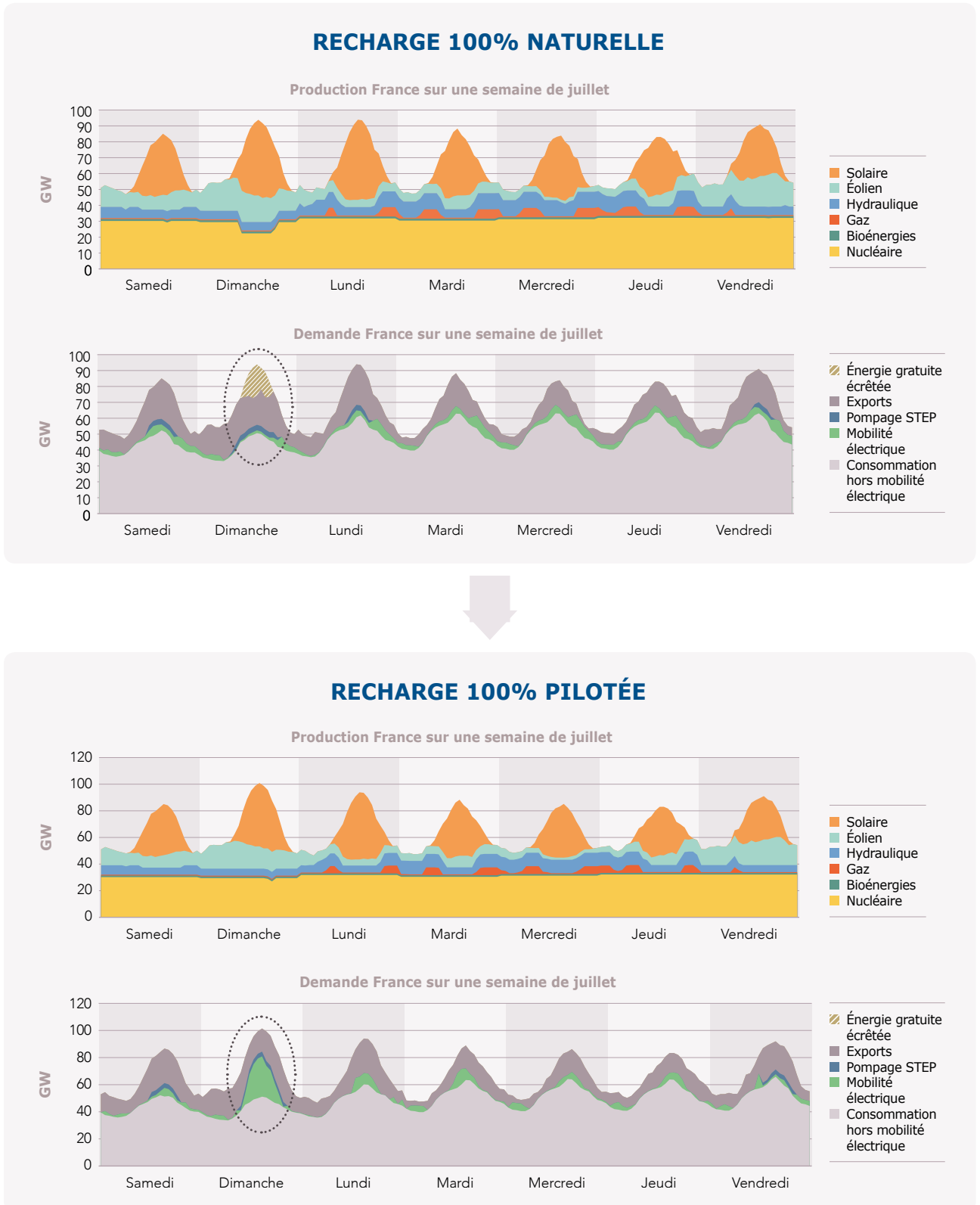
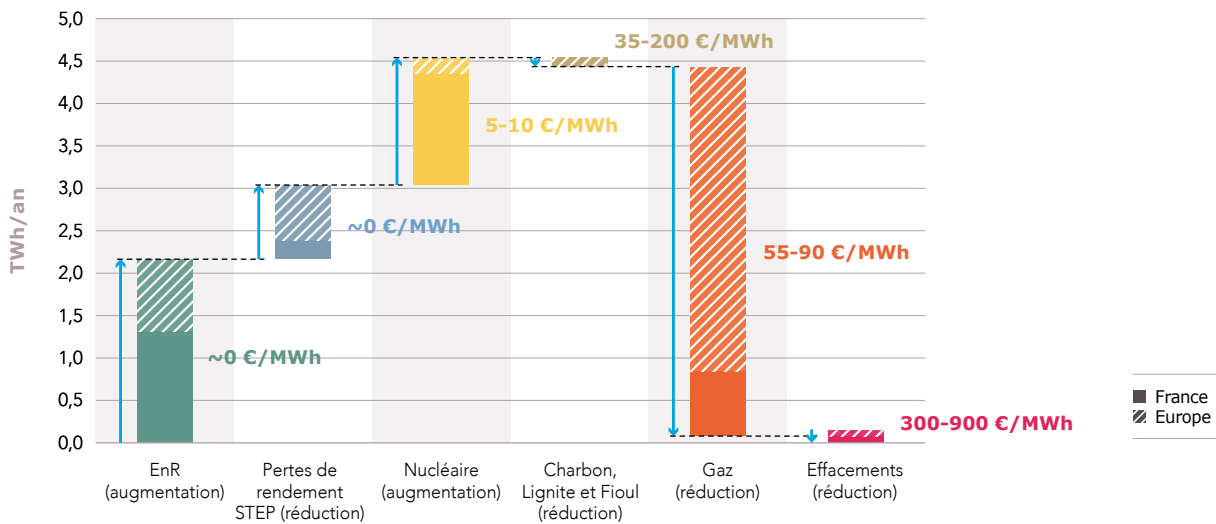


Figure 17. Effet sur les bilans énergétiques du pilotage de la recharge des véhicules électriques à l'horizon 2035 par rapport à une configuration sans pilotage (écart entre la variante 100% pilotage tarifaire et la variante 100% recharge naturelle du scénario *Crescendo* haut)



Sur le plan technique, les bénéfices se traduisent :

- ▶ à court terme par une réduction des écrêtements de production EnR et une moindre modulation du parc nucléaire pour cause de manque de débouchés ;
- ▶ à long terme, par un moindre besoin en capacités (évitant le développement ou le maintien de capacités de pointe).

Les gains associés sont importants. Avec un développement de 15,6 millions de véhicules électriques, **le pilotage peut permettre une économie pour la collectivité française de l'ordre de 0,9 Md€ par an.**

Une conclusion importante des travaux est que des formes très simples de pilotage suffisent pour atteindre ce gain. Elles peuvent reposer simplement sur le branchement du véhicule le week-end et non en semaine pour les utilisateurs pouvant moduler leur recharge sur plusieurs jours, ou un asservissement à un signal tarifaire statique, etc. Le déploiement en cours des compteurs communicants offre notamment toutes les fonctionnalités nécessaires pour mener à bien ce niveau de pilotage, et capter ainsi l'essentiel des gains associés.

Une valeur supplémentaire significative (de l'ordre de 0,3 Md€ par an) est possible à partir de dispositifs de pilotage plus sophistiqués, consistant à adapter chaque semaine, voire chaque jour le pilotage de la recharge en fonction des conditions réelles du fonctionnement du mix de production. Les solutions techniques requises sont plus complexes : elles peuvent engendrer des coûts et nécessiter un niveau d'implication plus important des utilisateurs (par exemple en renseignant leurs habitudes de mobilité à travers une application sur smartphone).

Enfin, le pilotage des recharges peut également présenter un intérêt important à l'échelle locale. Il aura vocation à participer de l'économie des «boucles locales» en intégrant les différents types d'auto-consommation, le foisonnement pour limiter les puissances souscrites, et les optimisations de la boucle locale du réseau par les distributeurs, en intégrant les travaux pilotés par Enedis et les ELD. Ces aspects ne sont pas abordés dans le présent rapport.

La bonne coordination entre le pilotage national et le pilotage local est importante, et fait l'objet de travaux de la part de RTE et d'Enedis.

5.5 Le *vehicle-to-grid* : des gains supplémentaires, pour un déploiement sur une partie du parc

La recharge réversible (*vehicle-to-grid*) offre la possibilité d'aller plus loin dans l'optimisation du système électrique. Les batteries des véhicules électriques sont alors utilisées pour stocker de l'énergie lors des périodes où la production à bas coût est abondante, et la restituer au système électrique lorsque la production doit être assurée par des moyens plus coûteux.

Le *vehicle-to-grid* permet ainsi d'augmenter la production décarbonée à bas coût (par exemple, de l'ordre de 3 à 4 TWh par an dans le scénario *Crescendo*). **L'enjeu économique, par rapport à une situation où tous les véhicules seraient pilotés de manière dynamique mais uniquement monodirectionnelle, a été chiffré à 0,2 Md€ par an.**

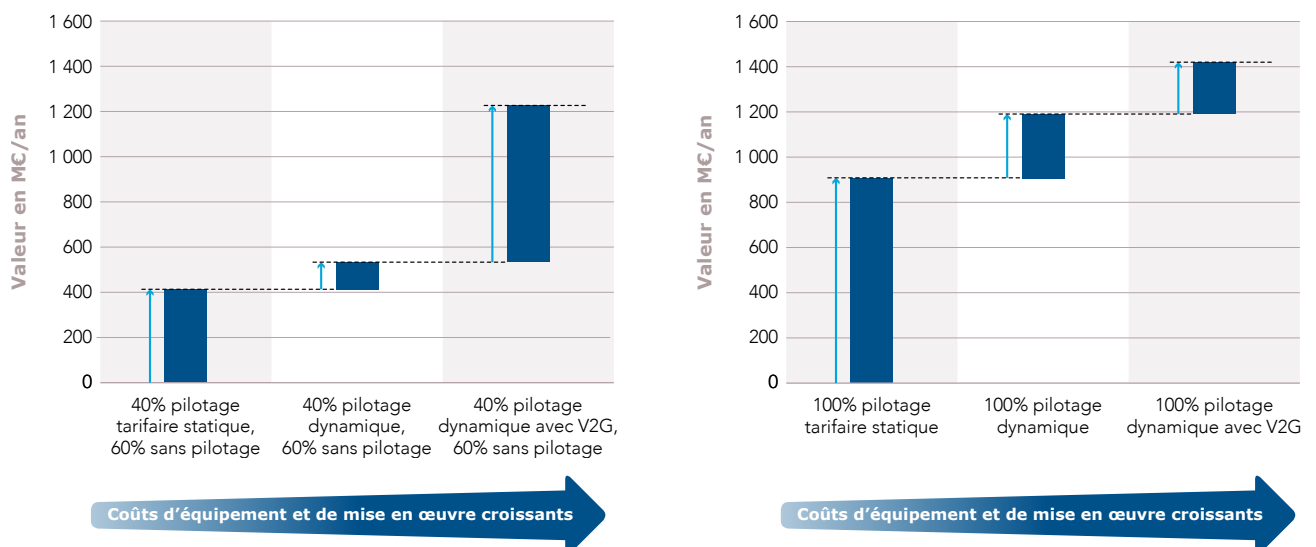
En revanche, l'enjeu de la recharge réversible peut être nettement plus important par rapport à une situation où seulement une partie des véhicules seraient pilotés de manière monodirectionnelle. **Le gain économique par rapport au pilotage simple de la**

recharge peut alors être réévalué à hauteur de l'ordre de 0,6 Md€ par an (si seulement entre 20% et 50% des véhicules sont pilotés).

Ces bénéfices doivent être comparés aux coûts : le développement du V2G nécessite en effet des équipements spécifiques (au sein du véhicule ou dans la borne) pour assurer la conversion en courant alternatif de l'énergie de la batterie (produite en courant continu).

Sur la base de ces éléments, l'espace économique du *vehicle-to-grid* apparaît largement conditionné (1) au déploiement préalable de formes simples de recharge et (2) aux coûts supplémentaires qu'il engendre. Sur la base des hypothèses partagées sur l'évolution des coûts engendrés par la recharge réversible, **l'arbitrage économique entre la valeur apportée au système économique en fonction du nombre de véhicules équipés et le coût des déploiements conduit à envisager un développement significatif (plusieurs millions de véhicules) mais pas sur l'intégralité du parc.**

Figure 18. Gisement de valeur associée au pilotage dans le scénario *Crescendo* haut (variantes sur le développement du pilotage de la recharge, comparées à une situation sans aucun pilotage de la recharge)



La recharge réversible est susceptible d'entraîner une usure prématurée des batteries du fait de l'accroissement du nombre de cycles de stockage-déstockage réalisés.

Cependant, les analyses menées par RTE conduisent à nuancer ce point : si le nombre de cycles stockage-déstockage réalisés peut être potentiellement important (jusqu'à près de

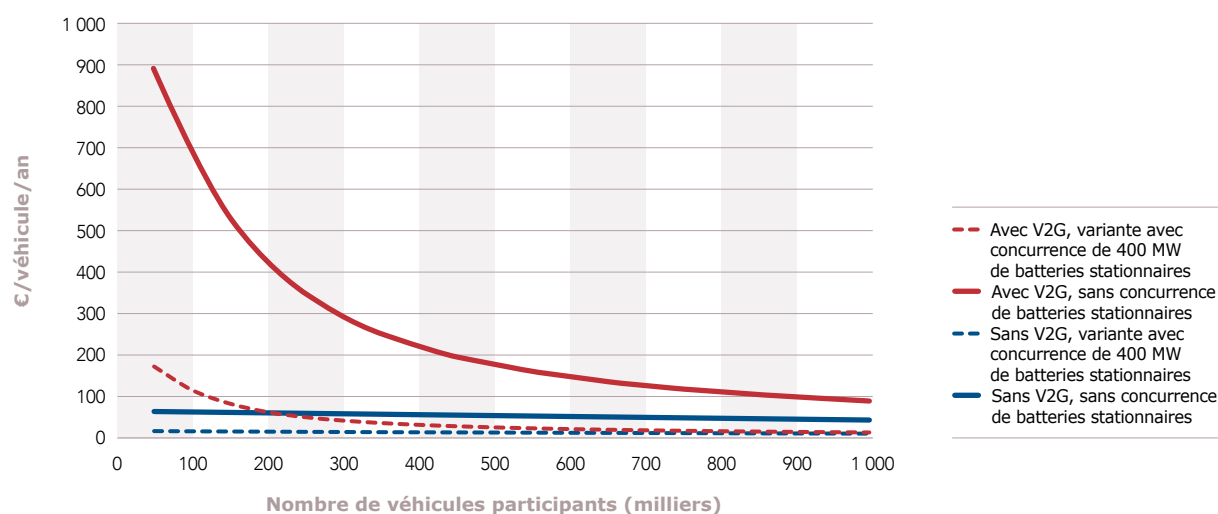
100 cycles complets équivalents quand seulement peu de véhicules offrent cette flexibilité), leur profondeur est généralement très faible (plus de 85% des cycles ont une profondeur inférieure à 30% de la capacité de la batterie), et une grande partie de la valeur est accessible avec un nombre limité de cycles, ce qui permet d'envisager simplement de restreindre le nombre de cycles sans perte significative de la valeur potentielle.

5.6 La participation aux réserves pour l'équilibrage du système électrique : une contribution possible, mais un marché de niche

Pour équilibrer le système électrique au plus proche du temps réel et maintenir la fréquence, les gestionnaires de réseau de transport utilisent des « réserves automatiques » appelées « services système ». Ces services sont exigeants sur le plan technique, et impliquent des temps de réaction de l'ordre de quelques secondes (réserve primaire) ou quelques minutes (réserve secondaire).

Les batteries électrochimiques qui équipent les véhicules électriques sont parfaitement capables de respecter les exigences spécifiques pour fournir ce type de services. Les mécanismes de marché, désormais ouverts aux moyens d'effacement et de stockage, permettent ainsi aux batteries de concurrencer les centrales de production sur ce segment.

Figure 19. Valeur associée à la participation des véhicules électriques à la constitution des réserves primaire et secondaire (bénéfices générés pour la collectivité divisés par le nombre de véhicules y contribuant) - scénario *Crescendo* haut



Les services système constituent à date les services les plus rémunérateurs sur les marchés de l'électricité, car ils impliquent des surcoûts de production importants. Actuellement, une partie de ces services système est fournie par le parc nucléaire, qui doit ainsi abaisser son niveau de production pour libérer une capacité de réglage à la hausse. De ce fait, sur la base d'un raisonnement marginal, plusieurs études anticipent qu'un espace économique important sera ouvert pour les véhicules électriques.

Les analyses confirment que, pour un petit nombre de véhicules, la valeur créée par véhicule pour le système électrique peut être importante : de l'ordre de 900 € par an dans les conditions actuelles, si le service est fourni de manière bidirectionnelle.

Néanmoins, **l'espace économique est très limité car les besoins en réserves d'équilibrage sont très faibles** (moins de 2% de la puissance

maximale produite par le parc de production). Ainsi, **la participation d'un parc de quelques centaines de milliers de véhicules (entre 300 000 et 500 000 véhicules selon les scénarios étudiés) fournirait la totalité des besoins requis par le système, pour un bénéfice pour le système électrique qui serait inférieur à 100 M€ par an à l'horizon 2035, avec le mix considéré.** Le bénéfice dépendrait fortement du développement de solutions de flexibilités concurrentes (batteries stationnaires, flexibilité de la consommation sur d'autres usages, etc.) sur ce gisement de niche.

La rémunération perçue par utilisateur étant rapidement décroissante en fonction du nombre de véhicules impliqués, il apparaît difficile d'envisager la participation d'une large flotte de véhicules à l'équilibrage « instantané » du système dans des conditions économiques où les utilisateurs en tireraient un profit significatif.

5.7 L'utilisation des batteries de seconde vie comme solution de stockage : des débouchés économiques incertains

La croissance prévisible du nombre de véhicules électriques doit conduire à préparer le retraitement massif des batteries utilisées, une fois que leurs performances ne sont plus compatibles avec un usage « mobilité ».

Deux options principales sont aujourd'hui envisagées pour traiter cette question.

- ▶ La première consiste à recycler les matériaux et à les réutiliser, notamment pour fabriquer de nouvelles cellules pour les batteries des futurs véhicules électriques.
- ▶ La seconde solution, envisagée par certains constructeurs automobiles, consiste à reconditionner les batteries usagées des véhicules électriques pour un usage stationnaire (moins exigeant en capacité de stockage énergétique

par unité de masse). Dans ce cas de figure, les batteries sont alors installées et connectées au réseau, et réalisent des injections et des soutirages de la même façon qu'une STEP. Cette solution implique des coûts de reconditionnement non négligeables, mais les batteries reconditionnées resteront moins chères que des batteries neuves (à capacité de stockage identique).

Avec les niveaux de développement de la mobilité électrique considérés dans les différents scénarios, des volumes significatifs de batteries en fin de vie devraient être traités à l'horizon 2035-2045. Les capacités résiduelles de stockage d'énergie des cellules pourraient représenter des volumes importants, même si leur durée de vie résiduelle est aujourd'hui mal connue. À cet horizon et sur la base des scénarios actuels (PPE, ou scénarios de type *Ampère* ou *Volt*), les besoins

Figure 20. Évolution du stock de batteries de seconde vie potentiellement utilisables dans le scénario haut de développement de la mobilité électrique (en l'absence de retraitement et de recyclage, avec une hypothèse de durée de première vie de la batterie de 15 ans et une capacité résiduelle moyenne de 65% sur cinq années d'utilisation en seconde vie)

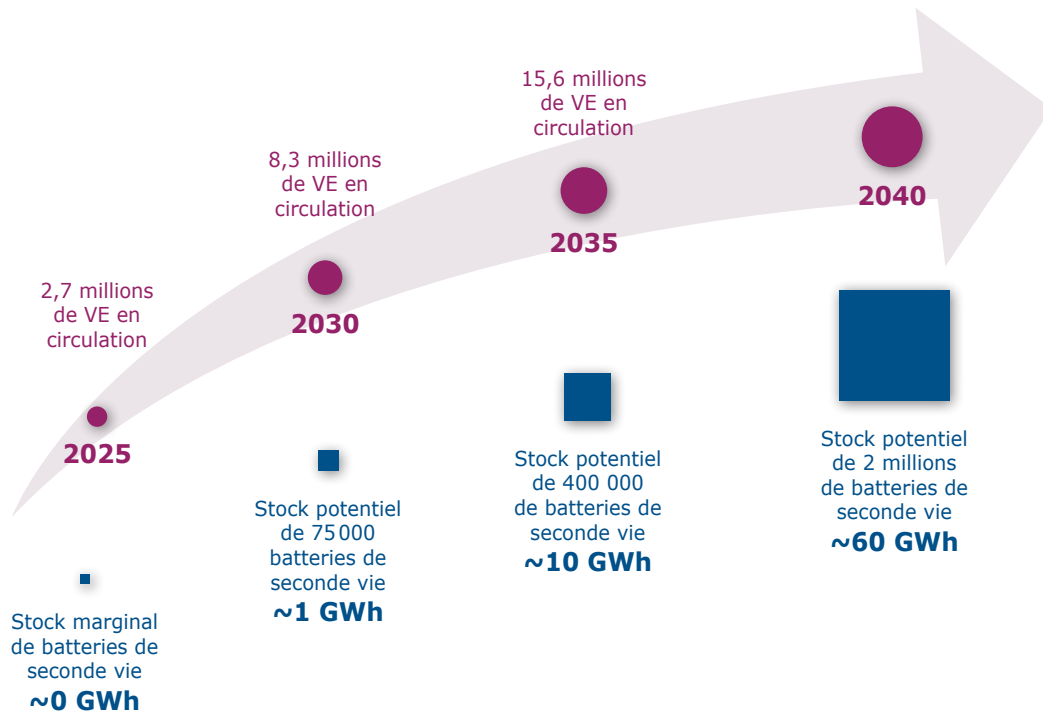
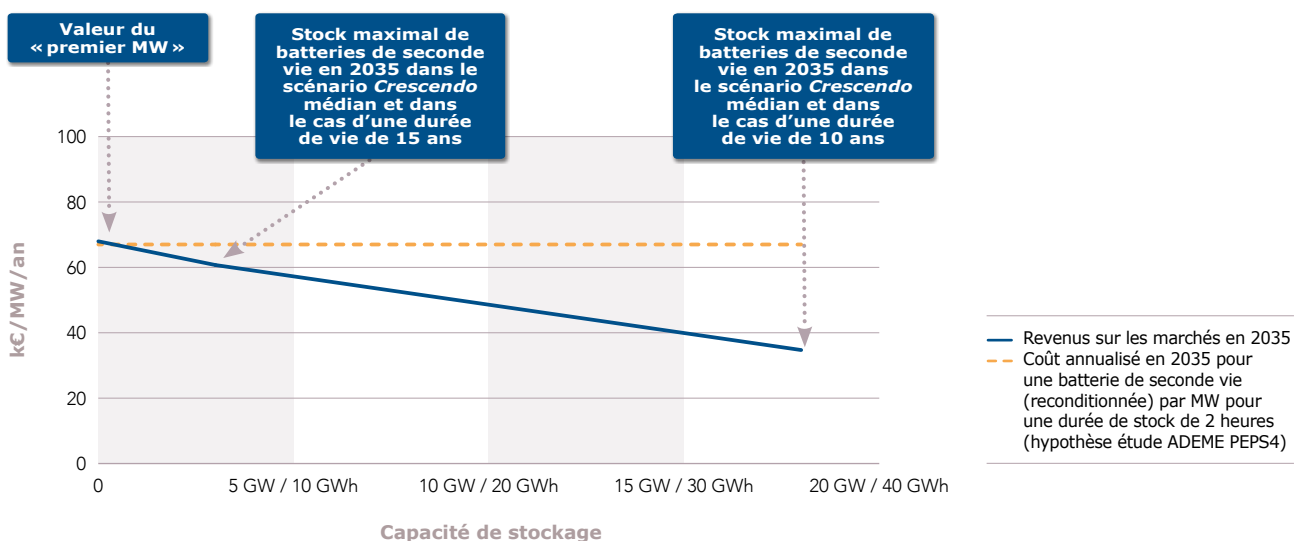


Figure 21. Coûts annualisés et revenus de marché des batteries de seconde vie à horizon 2035 (scénario *Crescendo* médian) selon le volume de stockage disponible (6 GWh avec une hypothèse de durée de vie initiale de 15 ans, 36 GWh avec une hypothèse de durée de vie initiale de 10 ans)



de flexibilité du système électrique ne semblent pas suffisants pour éviter une concurrence entre les filières pour la fourniture des services de flexibilité.

Or, une fois converties pour le stockage stationnaire, les batteries de seconde vie seraient en concurrence avec la flexibilité sur la recharge des batteries de véhicules électriques («batteries de première vie»). Les projections actuelles sur le coût des batteries de seconde vie ne sont pas massivement inférieures aux coûts des batteries stationnaires neuves car les cellules ne représentent qu'une minorité des coûts dans une batterie stationnaire et des coûts significatifs de reconditionnement sont nécessaires. En conséquence, l'analyse suggère que l'espace économique offert

à ces batteries de seconde vie pour le stockage stationnaire demeurerait très limité.

Des expérimentations pourraient toutefois permettre de disposer d'un retour d'expérience sur les coûts et caractéristiques techniques réels des batteries de seconde vie (capacité de stockage résiduelle, durée de vie, délai de mobilisation...), et ainsi d'affiner l'analyse sur la valorisation économique de ces dispositifs.

Il ressort dès lors de ces études que l'option privilégiée pour le traitement des batteries en fin de vie est bien le recyclage des matériaux. Les analyses environnementales permettent d'établir l'intérêt d'un tel recyclage (voir partie consacrée aux résultats environnementaux).

5.8 Le développement de la mobilité électrique permet un meilleur équilibre du système électrique, au bénéfice de l'ensemble de ses utilisateurs

Les filières EnR et nucléaire ont comme point commun d'être caractérisées par des coûts fixes importants, mais des coûts variables très faibles voire nuls, et d'être donc compétitives sur le marché de l'électricité européen. Sauf dans certains cas de saturation du marché conduisant à ne pas utiliser du productible décarboné disponible, la production EnR et nucléaire française peut être exportée sur le marché européen.

Toutefois, les analyses menées par RTE montrent qu'en cas de retard sur le développement des interconnexions ou des nouveaux usages électriques, le haut niveau de production d'électricité décarbonée disponible en France pourrait conduire à des situations de prix bas. Ce type de situation pourrait par suite entraîner des problèmes de rentabilité pour certains moyens de production (nucléaire et centrales à gaz) et conduirait à un niveau de soutien public important pour les énergies renouvelables.

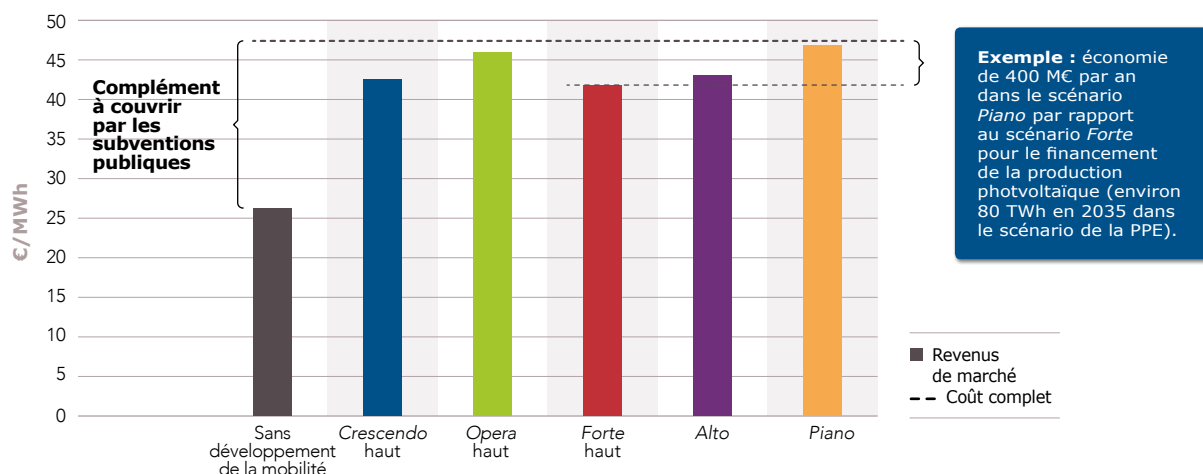
Les conclusions de ce rapport mettent en lumière deux effets importants.

D'une part, le développement de la mobilité électrique en tant que telle contribue à l'équilibre économique du scénario de la PPE. Il permet en effet de tirer parti (1) des marges de production assurées par le développement du parc, et (2) d'utiliser le productible décarboné pour réduire les émissions du secteur des transports.

D'autre part, le développement du pilotage améliore cette intégration, en faisant mieux correspondre les soutirages avec les périodes de forte production. Il a donc pour effet de réduire à la fois les occurrences de prix bas mais aussi les occurrences de prix haut (la charge en période de forte consommation étant plus limitée). Ceci permet de réduire l'appel aux moyens thermiques, en France, mais surtout dans les pays voisins – le fonctionnement du système électrique obéissant à une logique européenne et non nationale.

Cette intégration vertueuse se traduit selon différents indicateurs.

Figure 22. Coûts complets et revenus de marché des installations photovoltaïques au sol à l'horizon 2035 dans les différents scénarios de développement de la mobilité électrique et avec le mix électrique de la PPE



Vis-à-vis des producteurs

Dans le scénario de la PPE, les prix sur les marchés de l'électricité pourront s'établir à des niveaux faibles sur des durées annuelles significatives. Si la quantification précise des prix durant ces périodes est un exercice délicat (elle dépend de nombreux « petits » paramètres, et très largement de l'évolution des parcs électriques dans les pays voisins), les analyses existantes soulignent que, dès 2025, ce type de situation pourrait devenir beaucoup plus fréquent. À titre d'exemple, en croisant le scénario de la PPE (pour le mix électrique) avec un scénario de type *Forte* haut pour la mobilité, les prix pourraient être inférieurs à 20 €/MWh pendant 20% du temps.

Une généralisation du pilotage est susceptible d'entraîner un rééquilibrage important. En considérant 80% de pilotage (scénario *Opera*) au lieu de 40% (scénario *Forte*), les périodes pendant lesquelles les prix sont très bas (inférieurs à 20 €/MWh) seraient réduites de 400 heures par an.

Vis-à-vis du budget de l'État

L'ajout de la demande d'électricité associée à la recharge des véhicules électriques conduit également à soutenir le prix de l'électricité et, à objectifs

inchangés, à réduire les soutiens publics pour certaines filières.

La mobilité électrique contribue donc, au même titre que les autres transferts d'usage vers l'électricité et le développement des interconnexions, à limiter le coût public du soutien aux EnR et à permettre la viabilité économique des différentes filières de production d'électricité et à la rendre moins dépendante des choix des pays voisins (sur leur parc de production, sur l'acceptabilité de projets d'interconnexion).

Avec les ambitions sur l'évolution du mix de production, le développement de la mobilité électrique (dans une configuration à 15,6 millions de véhicules) conduit à réduire le coût de soutien public au développement du photovoltaïque et de l'éolien d'environ 1,8 à 2,3 Md€ par an. Cette réduction du coût public provient d'une part de l'effet du développement de la mobilité électrique (consommation supplémentaire) et d'autre part de l'effet du pilotage de la recharge (déplacement de consommation).

Les bénéfices pour le consommateur

Les résultats sont présentés dans le chapitre suivant.

POUR LE CONSOMMATEUR, UN COÛT DE LA MOBILITÉ ÉLECTRIQUE QUI PEUT ÊTRE MAÎTRISÉ PAR LA VALORISATION DE LA FLEXIBILITÉ SUR LA RECHARGE

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS SUR LE VOLET CONSOMMATEUR

Différentes enquêtes d'opinion se sont penchées récemment sur la perception des Français vis-à-vis de la voiture électrique. Elles mettent en avant que son coût supposé apparaît – au même titre que les craintes sur l'autonomie des véhicules et la faculté à trouver un point de charge – comme le principal frein à l'acquisition d'un véhicule électrique.

Les analyses menées dans le cadre de la nouvelle étude – en croisant les choix les plus récents des pouvoirs publics sur la PPE avec les différents scénarios de mobilité – permettent une analyse poussée du coût de l'approvisionnement en électricité pour les besoins de mobilité, vu du consommateur. Elles montrent que la bascule vers l'électricité représente, en tant que telle, un facteur très important de réduction des dépenses contraintes associée à la détention d'un véhicule et à son utilisation régulière. Elles illustrent l'influence des différents leviers de pilotage pour réduire encore cette facture. Elles soulignent ainsi que la mobilité électrique peut participer du bouquet de solutions à mobiliser pour répondre aux attentes de la population sur le coût de la mobilité en général et le coût du plein d'essence en particulier.

- 1) Le coût du « plein d'électricité » pour une année serait aujourd'hui environ trois fois inférieur au coût du « plein d'essence » (véhicule essence), même en l'absence d'optimisation de la recharge du véhicule et sans tenir compte d'une éventuelle hausse de la fiscalité carbone associée aux produits pétroliers. Ce rapport de un à trois se retrouve aujourd'hui et à l'horizon long terme.
- 2) Ce gain constitue un facteur décisif dans le rapprochement du coût complet de détention du véhicule vu de l'utilisateur (*Total Cost of Ownership* ou TCO) entre la voiture électrique et la voiture thermique : dans certains cas, avec les subventions à l'achat et la moindre fiscalité sur l'électricité, le véhicule électrique est déjà compétitif.

- 3) La « facture annuelle » en électricité dépend du scénario de mobilité. Pour un véhicule de catégorie moyenne parcourant entre 14000 et 15300 km par an et ne se rechargeant qu'à domicile, le « plein d'électricité » coûte de l'ordre de 400 € par an s'il n'y a aucun pilotage et que le profil de mobilité conduit l'utilisateur à se recharger en heures pleines.
- 4) Pour les ménages qui le souhaitent et le peuvent, le pilotage de la recharge constitue un levier significatif de maîtrise de la facture : rien qu'en utilisant des modes simples de recharge, un bénéfice de l'ordre de 60 à 170 € par an est atteignable, selon les situations.
- 5) Ce niveau de pilotage peut être poussé plus loin, en activant les différentes solutions de recharge pilotée et de recharge réversible explorées dans le rapport. Il offre la possibilité de gagner jusqu'à 100 € dans certains cas de figure, en supplément des gains déjà acquis.
- 6) Une optimisation ultime, à l'échelle d'un utilisateur combinant recharge réversible et fourniture systématique de services au système électrique, permet d'envisager d'atteindre un coût annuel nul, voire légèrement négatif, pour la recharge. Ce modèle devrait néanmoins relever davantage de l'exception que d'un cas de figure largement généralisable.
- 7) Le développement du pilotage sur la recharge peut aller de pair avec la mise en place de logiques d'autoconsommation pour certains foyers. Les analyses montrent alors la possibilité d'augmenter le taux d'autoconsommation via un asservissement de la recharge et ainsi un intérêt accru, vu du consommateur, pour la mise en place d'une opération d'autoconsommation.

6.1 Le transfert du véhicule thermique vers le véhicule électrique permet une forte réduction du coût du « plein »

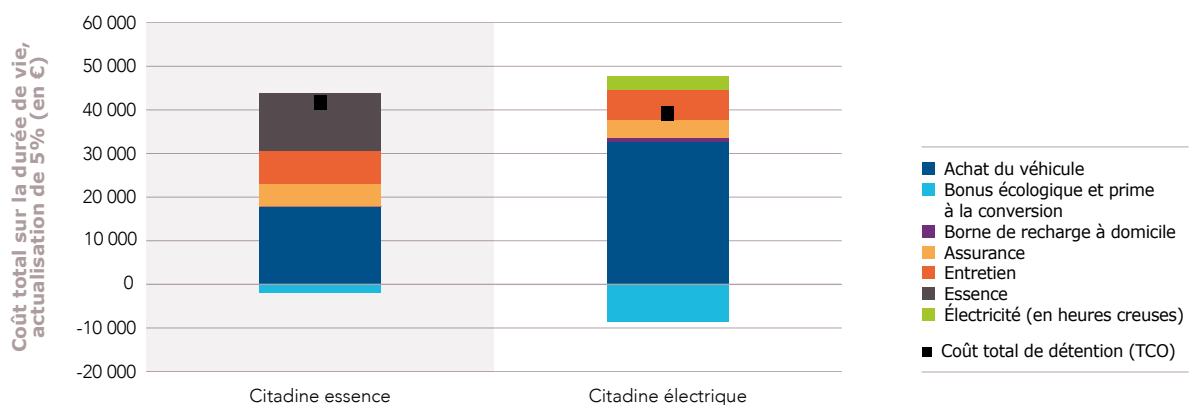
La part relative à l'énergie consommée dans le coût total de détention d'un véhicule est beaucoup plus faible pour les véhicules électriques que pour les véhicules thermiques : cela tient à la moindre consommation énergétique des véhicules électriques (meilleur rendement de la motorisation) et à un coût TTC de l'énergie électrique plus faible. Cependant, la consommation d'électricité représente quand même un montant significatif, typiquement de l'ordre de 5 à 10% du coût total de détention d'un véhicule électrique sur sa durée de vie (contre une part de la consommation de carburant d'environ 30% pour un véhicule thermique).

Le coût du « plein électrique annuel » est dès aujourd'hui environ trois fois inférieur

au coût du « plein essence annuel » même en l'absence d'optimisation de la recharge du véhicule et sans tenir compte d'une éventuelle hausse sur la fiscalité carbone associée aux produits pétroliers.

Le transfert de l'usage « mobilité » vers l'électricité permet donc de réduire fortement la facture énergétique des automobilistes. Cette réduction de facture énergétique peut être en partie compensée par un surcoût à l'achat du véhicule électrique (aujourd'hui en partie réduit par les primes à la conversion et les subventions), même si à long terme les différences de prix entre les véhicules thermiques et électriques devraient progressivement se réduire, notamment avec la baisse attendue des coûts des batteries.

Figure 23. Comparaison des coûts totaux de détention sur la durée de vie entre un véhicule essence et électrique (citadine de catégorie A, basé sur une comparaison entre Renault Clio 5 zen essence et Renault Zoe life 41 kWh)



6.2 Le pilotage de la recharge offre des opportunités supplémentaires pour maîtriser la facture

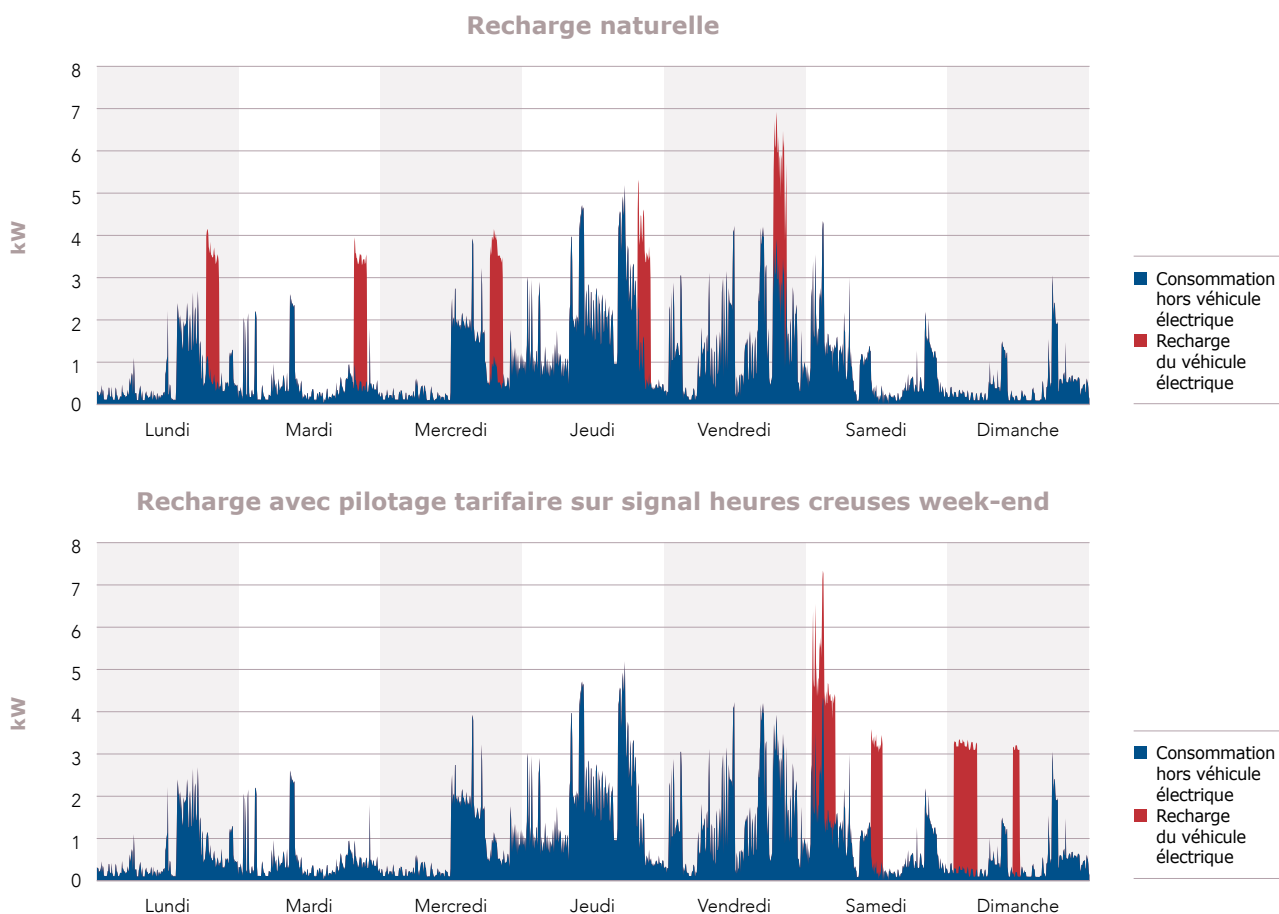
L'optimisation du placement de la recharge des véhicules électriques conduit à des économies pour le consommateur sur sa facture d'électricité. Ces économies de facture dépendent évidemment du profil de l'utilisateur, notamment du nombre de kilomètres parcourus, mais également de la flexibilité dont il dispose sur la recharge de son véhicule.

L'étude explore les gains potentiels pour plusieurs profils d'utilisateurs choisis pour être représentatifs de différents comportements de mobilité qui émergent de l'enquête transport : actif utilisant

son véhicule pour des trajets domicile-travail avec ou sans retour à domicile le midi, actif utilisant son véhicule pour des trajets professionnels, personne en situation d'inactivité, etc.

En l'absence totale de pilotage, la recharge du véhicule électrique coûte typiquement de l'ordre de 400 € par an, pour un véhicule de taille moyenne, ne se rechargeant qu'à domicile : l'essentiel de l'énergie soutirée se situe lors des périodes où les tarifs de détail sont les plus élevés. C'est notamment le cas pour un actif qui rentre le soir à domicile après

Figure 24. Placement de la recharge sur une semaine dans différents modes de pilotage, pour un utilisateur actif se rechargeant uniquement à domicile

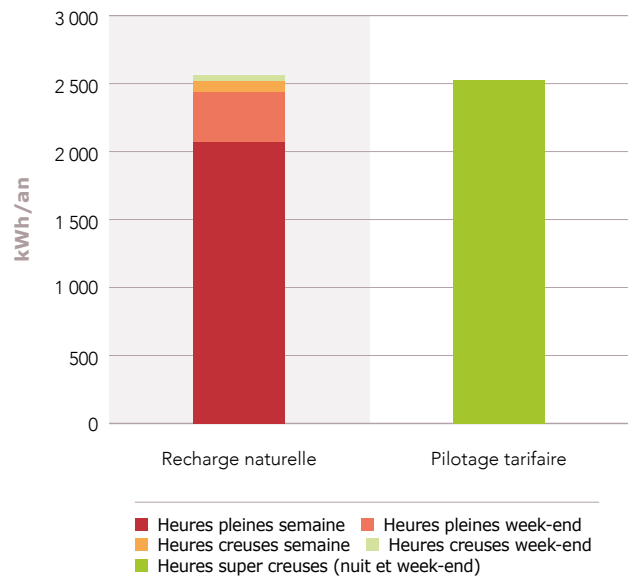


une journée de travail, et met immédiatement son véhicule en charge, aux heures où les prix/tarifs de détail sont les plus élevés.

Un pilotage simple de la recharge, basé sur un asservissement à un signal tarifaire et un choix judicieux des jours de branchement du véhicule (privilégiant le week-end par rapport à un jour ouvré, quand c'est compatible avec l'état de charge de la batterie) permet de placer l'essentiel de la recharge pendant les périodes où les prix de détail sont les plus bas. **Il en résulte une réduction de 30% à 35% du coût annuel de la recharge, soit de 60 € à 170 € par an selon les profils de mobilité considérés (en dehors des consommateurs disposant d'une possibilité de recharge sur leur lieu de travail à prix avantageux).**

Une conclusion intéressante de l'étude montre que ce type de réduction est observé à la fois avec les niveaux de prix actuels et ceux projetés à l'horizon 2035 (hors modification liée à la fiscalité).

Figure 25. Placement de la recharge sur les différentes plages tarifaires en fonction du mode de pilotage, pour un actif réalisant un aller-retour vers le lieu de travail sur la journée, sans retour méridien au domicile



6.3 Différents modèles économiques pour la recharge réversible, conditionnés aux habitudes de mobilité et au cadre de régulation

La recharge réversible peut permettre aux utilisateurs de véhicules électriques de recharger leur batterie pendant les heures où leur tarif de soutirage est le moins élevé, en vue d'une restitution ultérieure. Cette restitution peut prendre différentes formes :

- ▶ elle peut être destinée à couvrir tout ou partie de la consommation des autres usages du foyer pendant les périodes où le tarif est plus élevé, sans injection nette sur le réseau public d'électricité (on parle de *vehicle-to-home*). La détention d'un véhicule électrique revient alors, pour un foyer, à disposer d'une solution de stockage interne, qui peut être mise au service d'une meilleure gestion de la consommation du foyer ;
- ▶ elle peut être réinjectée sur le réseau public d'électricité (on parle de *vehicle-to-grid*). Ceci revient à mutualiser les solutions de stockage individuelles à l'échelle de tout le réseau, selon la même logique que pour les installations de production «classiques».

L'intérêt du *vehicle-to-home* pour l'utilisateur est très dépendant de ses habitudes de mobilité et de la consommation électrique de ses autres usages. Il est notamment tributaire de la présence du véhicule au domicile à la fois (i) pour injecter pendant les périodes de consommation des autres usages et où les tarifs sont élevés et (ii) pour soutirer pendant les périodes où les tarifs sont faibles. L'économie supplémentaire pour l'utilisateur peut varier fortement, entre 20 € et 100 € par an pour les profils étudiés (hors profils ayant accès à une borne de recharge avec un tarif préférentiel sur le lieu de travail).

L'intérêt du *vehicle-to-grid* pour des arbitrages sur les marchés de l'énergie est aujourd'hui réduit pour les consommateurs (voir évaluations dans le rapport complet). Ceci tient à la structure de tarif TTC de détail : alors que l'énergie soutirée est valorisée au tarif TTC de l'énergie (intégrant la part proportionnelle à l'énergie des taxes et du

Figure 26. Illustration du principe du *vehicle-to-home* et du *vehicle-to-grid*

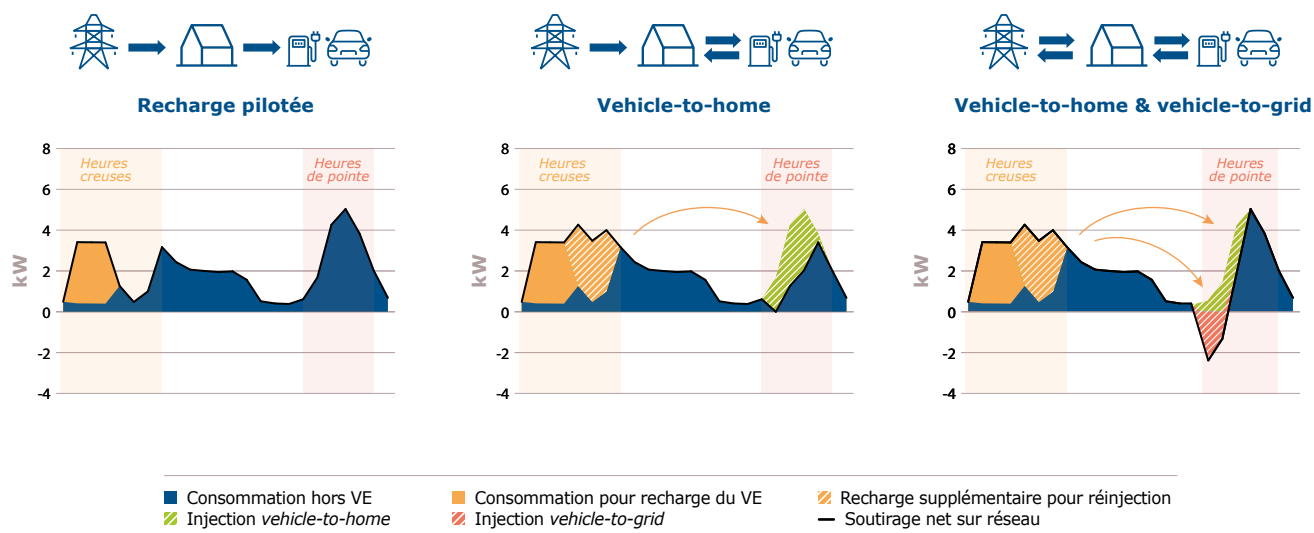
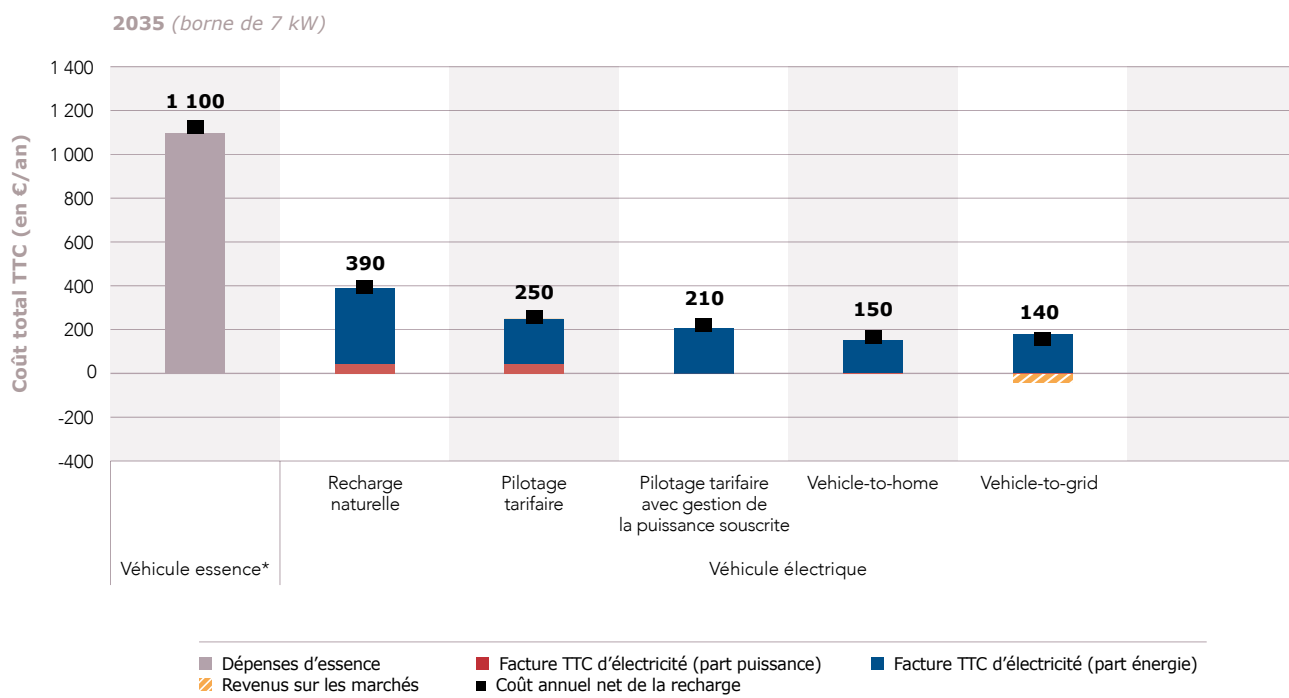
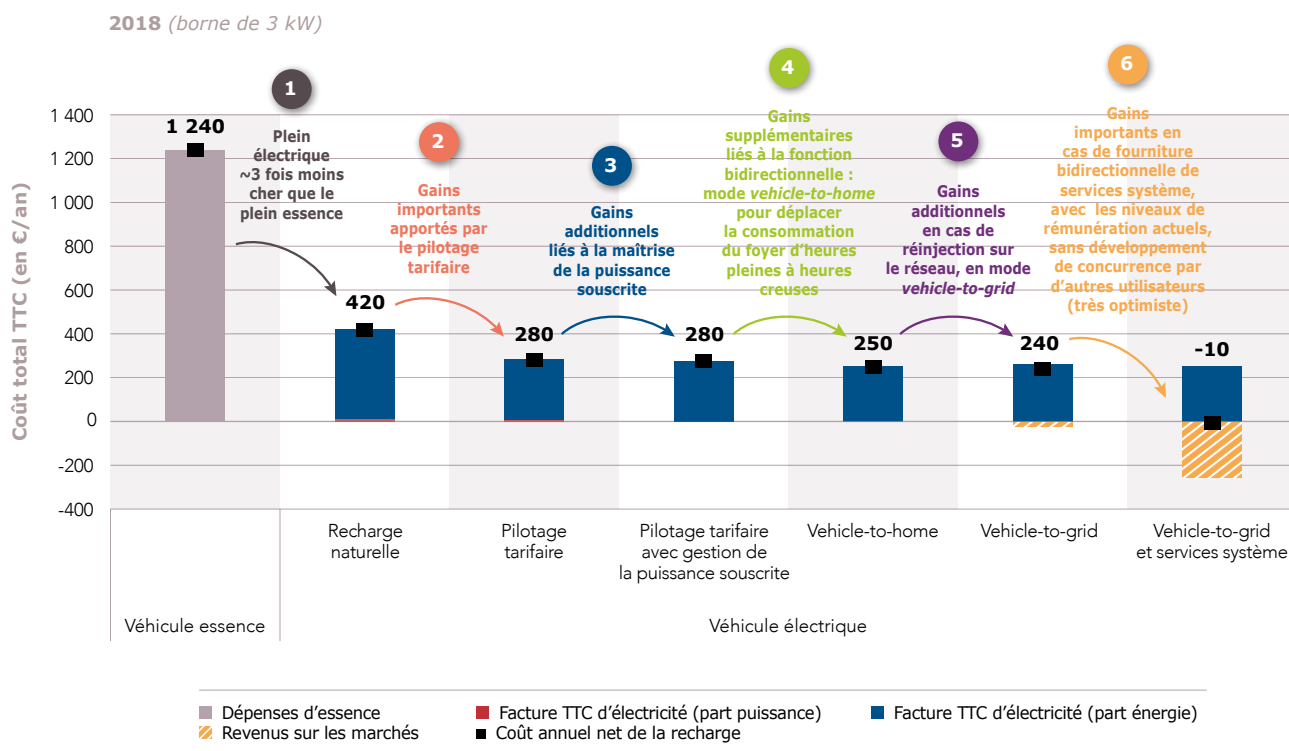


Figure 27. Coût du plein annuel pour un automobiliste (actif réalisant un aller-retour vers le lieu de travail sur la journée et réalisant 14 000 km par an) selon le mode de pilotage de la recharge



* Scénario New Policies de l'AIE, hypothèse de fiscalité inchangée

TURPE), l'énergie injectée n'est valorisée qu'au prix de marché. Ainsi, chaque cycle de stockage-déstockage «paie» le TURPE (ce qui peut faire sens, vu qu'il utilise le réseau) mais aussi des taxes.

Ainsi, si le développement de la recharge réversible s'avère intéressant pour l'économie du système électrique, l'intérêt pour les consommateurs, à cadre réglementaire actuel, n'est pas garanti. Des travaux sur le cadre de régulation pourraient être engagés pour évaluer l'opportunité d'aménagements, éventuellement

expérimentaux, du cadre de régulation, pourvu que l'équité dans le financement des charges fixes de réseau et de contribution aux charges de service public soit bien préservée.

Enfin, le *vehicle-to-grid* peut aujourd'hui présenter un fort intérêt pour la fourniture de services d'équilibrage (services système), avec les niveaux de rémunération actuels. Néanmoins, l'intérêt devrait se réduire fortement avec l'arrivée de différentes solutions de flexibilité concurrentes sur ce service (effacements de consommation, stockage stationnaire, etc.).

6.4 Combiner mobilité électrique et autoconsommation : une opération qui peut avoir du sens du point de vue économique

La baisse engagée des coûts des panneaux photovoltaïques ces dernières années conduit à un intérêt croissant pour la généralisation de solutions d'autoconsommation, basées sur l'installation de modules solaires sur toiture. Bien que toujours modeste, le nombre d'installations de ce type⁸ est désormais en augmentation rapide. Les analyses publiées par RTE dans le Bilan prévisionnel 2017 ont permis d'identifier que le développement de l'autoconsommation résidentielle individuelle pourrait concerner plusieurs millions de foyers d'ici une quinzaine d'années, et ont mis en avant les différents facteurs pouvant amplifier ou au contraire atténuer le développement de cette forme de production.

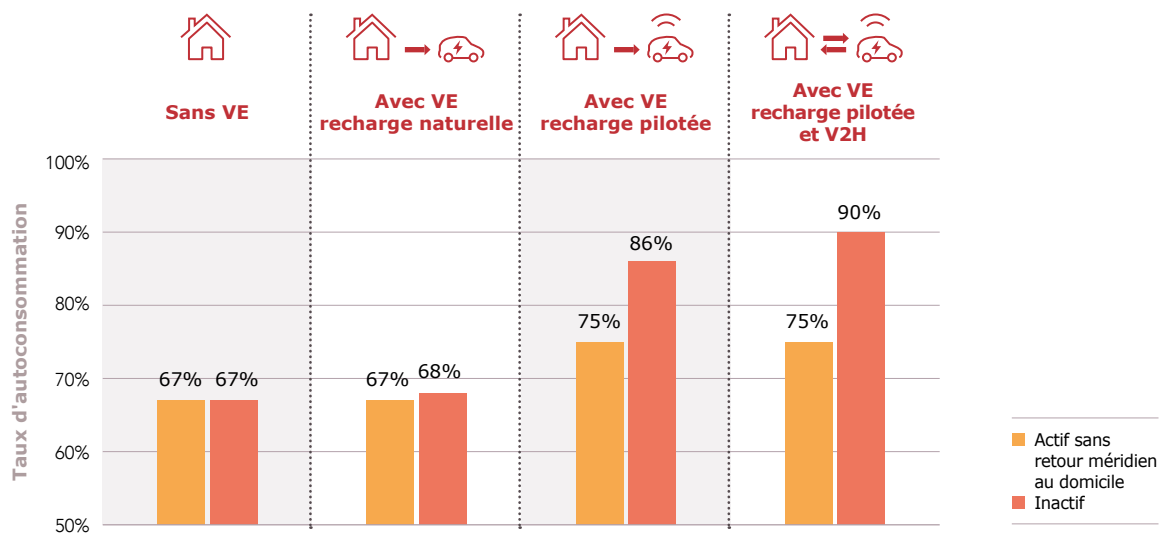
Le couplage de l'achat d'un véhicule électrique avec la mise en place de panneaux photovoltaïques sur toiture est susceptible d'apparaître séduisant d'un point de vue environnemental et de répondre ainsi à une appétence sociétale. Les analyses économiques confirment l'intuition selon

laquelle des modèles combinant détention d'un véhicule électrique et autoconsommation solaire peuvent présenter un intérêt pour le consommateur. Cela nécessite que ces derniers puissent placer la recharge de leur véhicule lors des périodes de production photovoltaïque et ainsi maximiser le taux d'autoconsommation et donc la rentabilité associée. L'intérêt dépend donc du profil d'utilisation du véhicule, et notamment de sa présence au domicile lors des périodes de production solaire. Pour certains utilisateurs, l'intérêt est plus marqué s'ils peuvent mettre en place une solution de type *vehicle-to-home*.

Par rapport à un scénario de référence, le développement de la mobilité électrique est ainsi susceptible d'augmenter la puissance solaire installée en autoconsommation de l'ordre de 1 à 2 GW. L'impact dépend du niveau de développement de la mobilité électrique, de la répartition de cette mobilité au sein des différentes catégories de la population et du développement du pilotage *vehicle-to-home*.

⁸. 40 000 installations pour un total de 143 MW installés au 1^{er} janvier 2019

Figure 28. Influence du pilotage de la recharge du véhicule électrique sur les taux d'autoconsommation (Scénario *Crescendo*, horizon 2035)



ANALYSE ENVIRONNEMENTALE : UNE RÉDUCTION SIGNIFICATIVE DE L'EMPREINTE CARBONE DES TRANSPORTS

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS SUR LE VOLET ENVIRONNEMENTAL

Le développement du véhicule électrique constitue l'un des principaux leviers, activable dès aujourd'hui, pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. En intégrant l'analyse du cycle de vie, l'étude permet une analyse poussée de l'empreinte carbone dans chaque scénario et de l'influence des différents paramètres.

- 1) L'utilisation d'un véhicule électrique, en France, ne conduit à presque aucune émission de CO₂ : par rapport à un véhicule thermique, les émissions sont diminuées d'un facteur 20. Ceci est dû à la structure du mix électrique français très largement décarboné.
- 2) Aujourd'hui, la France est fortement exportatrice d'électricité, et ces exports se substituent à des productions fossiles dans les pays voisins. À parc électrique inchangé, augmenter la part de l'électricité dans les transports en France entre en concurrence avec la réduction des émissions du parc électrique dans certains pays européens. L'analyse menée à montre que l'effet le plus important sur les émissions est obtenu en électrifiant le secteur de la mobilité – cet arbitrage étant de plus en plus vrai à mesure que les pays voisins de la France poursuivront la décarbonation de leur parc électrique.
- 3) Le net avantage du véhicule électrique, sur le plan des émissions, demeure attesté même en intégrant l'ensemble du cycle de vie, y compris dans le cas de batteries fabriquées en Chine utilisant de l'électricité carbonée dans leur processus de fabrication, dans les scénarios les plus contraints comme *Forte* et *Alto*. Un gain minimal de 18 MtCO₂eq par an est ainsi atteignable à horizon 2035.

L'étude met en avant les différents leviers activables pour réduire encore l'empreinte carbone :

- 4) La fabrication des batteries en France permettrait de réduire l'empreinte globale des transports de 2 à 3 MtCO₂eq par an malgré une légère augmentation des émissions du secteur industriel en France, du fait du faible contenu carbone de l'électricité française.

- 5) La réduction de la taille des batteries (par exemple dans le scénario *Piano*) et l'augmentation du taux de recyclage (85% au lieu de 50%) améliorent encore la performance environnementale, et dégagent de l'ordre de 1 à 2 MtCO₂eq par an.
- 6) L'effet d'un pilotage généralisé de la recharge est très net : un gain de 5 MtCO₂eq par an est à la clé. Ces réductions seraient très majoritairement enregistrées dans les pays voisins de la France, via une moindre utilisation de leur parc thermique.
- 7) Le renforcement des transports en commun et le recours aux mobilités douces améliorent systématiquement la performance environnementale (7 MtCO₂eq par an à eux deux).
- 8) L'étude met en avant un bilan carbone contrasté pour le véhicule autonome dans le scénario *Alto*, son effet sur la réduction du parc automobile pouvant être compensé par le mode d'utilisation envisagé (nombreux trajets à vide pour les robots-taxis) et ses caractéristiques (batteries importantes, électronique embarquée, etc.). Ceci invite à identifier les modes de déploiement et d'articulation avec les transports en commun les plus efficaces pour le véhicule autonome partagé.

Ces résultats sont enfin restitués dans la perspective plus large de la politique énergétique et environnementale :

- 9) La promotion de solutions décarbonées pour le transport individuel nécessite aujourd'hui un soutien public important, qui s'exprime notamment via différentes aides à l'acquisition d'un véhicule électrique. L'étude montre que le niveau de soutien requis pourrait décroître à moyen terme et s'établir à moyen terme nettement en dessous de la valeur tutélaire du carbone.
- 10) Les leviers présentés dans le scénario *Piano* permettent également de limiter les besoins d'approvisionnement en métaux rares, qui soulèvent des enjeux environnementaux et éthiques significatifs aujourd'hui.

7.1 Dans tous les scénarios, une forte réduction des émissions du secteur des transports en France

En France, la production d'électricité est déjà très largement décarbonée. En 2018, les émissions associées au secteur électrique se sont élevées à 20,4 millions de tonnes de CO₂, contre par exemple 274 millions en Allemagne, 68 millions au Royaume-Uni, ou 93 millions en Italie. Ramenées à la population, les émissions du secteur électrique en France sont parmi les plus faibles au monde, seuls des pays comme la Norvège (production d'électricité presque entièrement hydraulique) ou la Suisse (nucléaire et hydraulique) étant comparables.

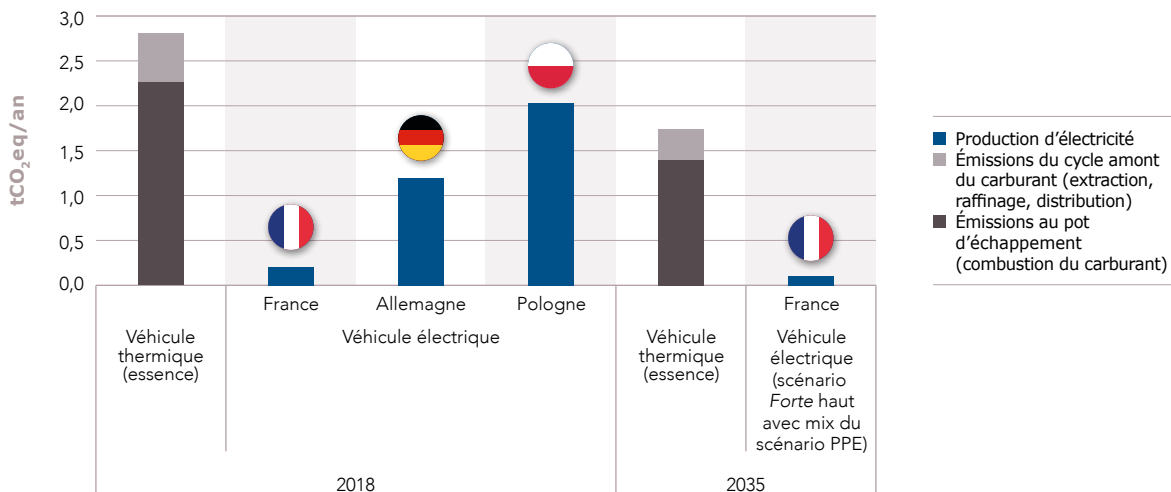
Les orientations de la PPE vont conduire à améliorer encore cette performance. Avec la fermeture des centrales au charbon, prévue pour 2022, un gain d'environ 7 millions de tonnes est attendu. À compter de 2022, la croissance des énergies renouvelables devrait également conduire à réduire les durées de fonctionnement des centrales à gaz. Dans les scénarios *Ampère*, *Volt* ou *PPE*, le système électrique atteint vers 2030-2035 des niveaux d'émissions extrêmement faibles, de l'ordre de 10 millions de tonnes par an.

Cette configuration est particulièrement favorable à la bascule vers l'électricité pour la mobilité, même en tenant compte de la baisse significative de la consommation des véhicules thermiques, projetée au cours des prochaines années.

Sur l'ensemble de la période 2020-2035, **l'électrification de 15,6 millions de véhicules électriques permet ainsi d'éviter entre 150 et 200 millions de tonnes de CO₂ issues de la combustion de carburants (émissions « au pot d'échappement »).**

Ce résultat, cohérent avec les principales études existantes sur le sujet, découle bien de la nature du mix électrique en France. Projeté sur un mix utilisant comme combustible principal le charbon en partie importante (Allemagne) ou en quasi-totalité (Pologne), l'électrification de la mobilité n'a pas d'influence aussi positive sur les émissions de CO₂.

Figure 29. Émissions de gaz à effet de serre annuelles associées à l'énergie consommée par les véhicules en phase d'usage (émissions directes au pot d'échappement et cycle de vie des carburants pour les véhicules thermiques, émissions de la production d'électricité pour les véhicules électriques) pour un véhicule parcourant 14 000 km par an



7.2 À parc électrique inchangé, les effets baissiers sur les émissions des transports en France sont plus importants que les effets haussiers liés à la production d'électricité carbonée dans les pays voisins

Le développement d'un nouvel usage de l'électricité, comme le véhicule électrique, a un effet sur le fonctionnement du système électrique français et européen et sur les émissions associées.

L'évaluation de l'effet soulève des questions méthodologiques d'affectation des émissions totales d'un mix de production aux différents usages de l'électricité. Plusieurs approches ont été testées : dans tous les cas, les émissions du parc de production en France engendrées par le développement de la mobilité électrique sont infimes (elles dépassent à peine 1 MtCO₂ par an, même dans la variante haute du scénario *Forte*).

En revanche, l'effet sur les émissions du système électrique européen peut être plus contrasté. En raisonnant à parc électrique inchangé, le

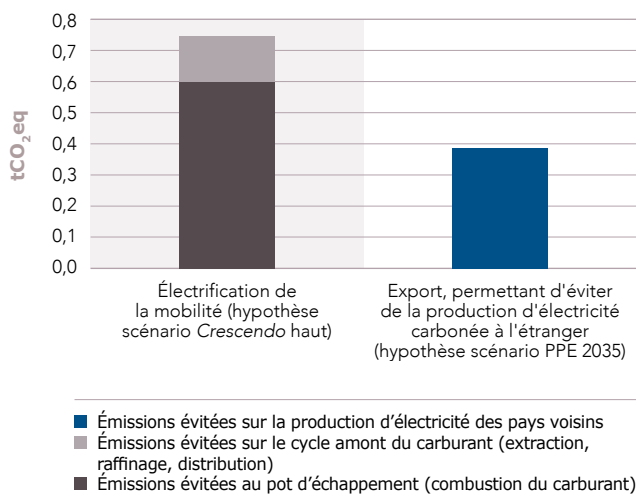
développement d'un nouvel usage – la mobilité électrique – entre en concurrence avec les exports d'électricité vers les pays voisins, ce qui se traduit par un surcroît d'émissions dans les pays frontaliers pour produire de l'électricité.

La France est en effet aujourd'hui le premier exportateur d'électricité en Europe (60 TWh en 2018), et ces exports contribuent fortement à la réduction des émissions à l'échelle de tout le continent puisque l'électricité exportée se substitue à des productions fossiles (si toute la production exportée par la France était assurée par des centrales à gaz plutôt que par le mix français, elle conduirait à des émissions supplémentaires de près de 22 MtCO₂ par an). Les simulations de RTE, détaillées au cours de l'année 2018 avec la parution d'analyses dédiées, montrent que ces caractéristiques devraient se renforcer, avec une croissance du solde exportateur – dans le scénario de la PPE comme dans les scénarios *Volt* et *Ampère*.

Le nouveau rapport permet de mettre en regard ces deux effets (utilisation de la base décarbonée pour réduire les émissions du secteur des transports en France ou de la production d'électricité dans les pays voisins) et d'adopter une approche basée sur l'« empreinte carbone ».

Ces analyses montrent sans ambiguïté que les émissions évitées par l'électrification des transports en France sont plus importantes que celles qui auraient pu être évitées si cette même électricité décarbonée avait été disponible pour l'export et la réduction de la production d'électricité carbonée hors de France. Ce résultat est vrai dans tous les scénarios, y compris dans la configuration du scénario *Forte*.

Figure 30. Émissions de CO₂ évitées par la production d'1 MWh d'électricité décarbonée en France selon son utilisation (année de référence 2035)



7.3 Le bénéfice carbone de la mobilité électrique reste important en intégrant l'ensemble du cycle de vie du véhicule, y compris avec des batteries « made in China »...

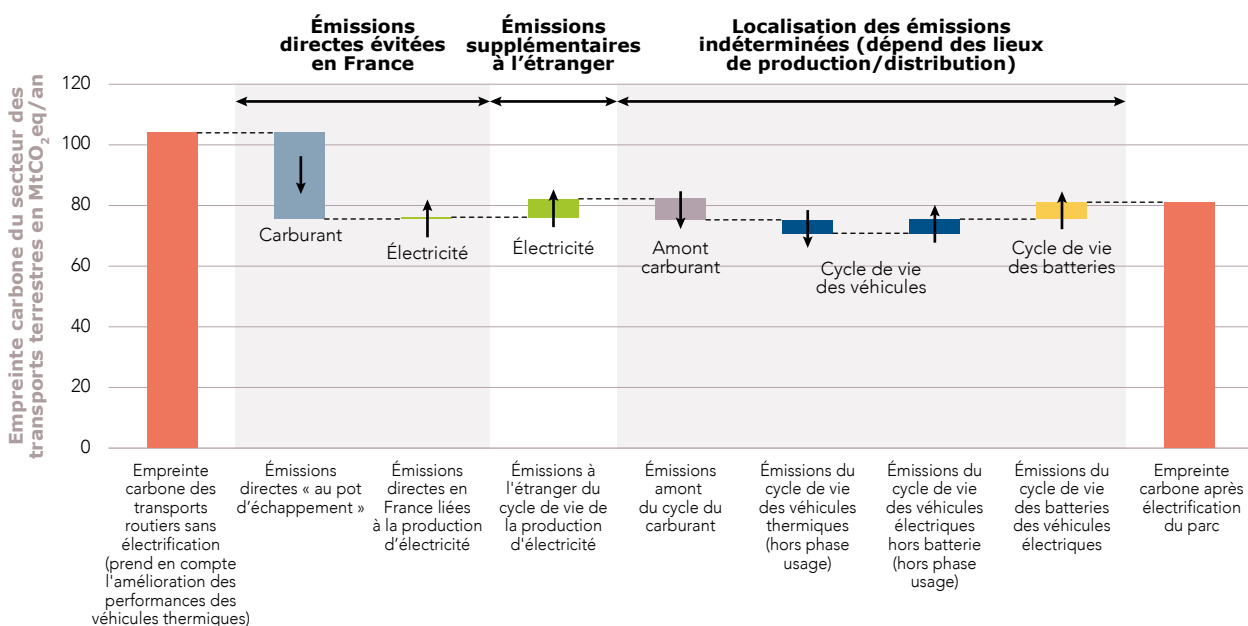
Les études existantes comparant le cycle de vie des véhicules thermiques et électriques (par exemple l'étude récente de la FNH⁹) concordent sur les grandes lignes de l'analyse environnementale de la mobilité électrique. Elles soulignent qu'un véhicule électrique présente un intérêt en termes d'empreinte carbone par rapport à un véhicule thermique à condition que les émissions évitées lors de la phase d'utilisation compensent l'impact carbone de la fabrication des batteries.

Ces études montrent ainsi que, du fait du faible contenu carbone du mix en France, l'électrification des véhicules présente un intérêt en matière d'empreinte carbone dès lors qu'un véhicule parcourt plus de 30 000 à 50 000 kilomètres sur sa durée

de vie, soit un niveau très inférieur à l'utilisation moyenne d'un véhicule en France (200 000 km sur sa durée de vie).

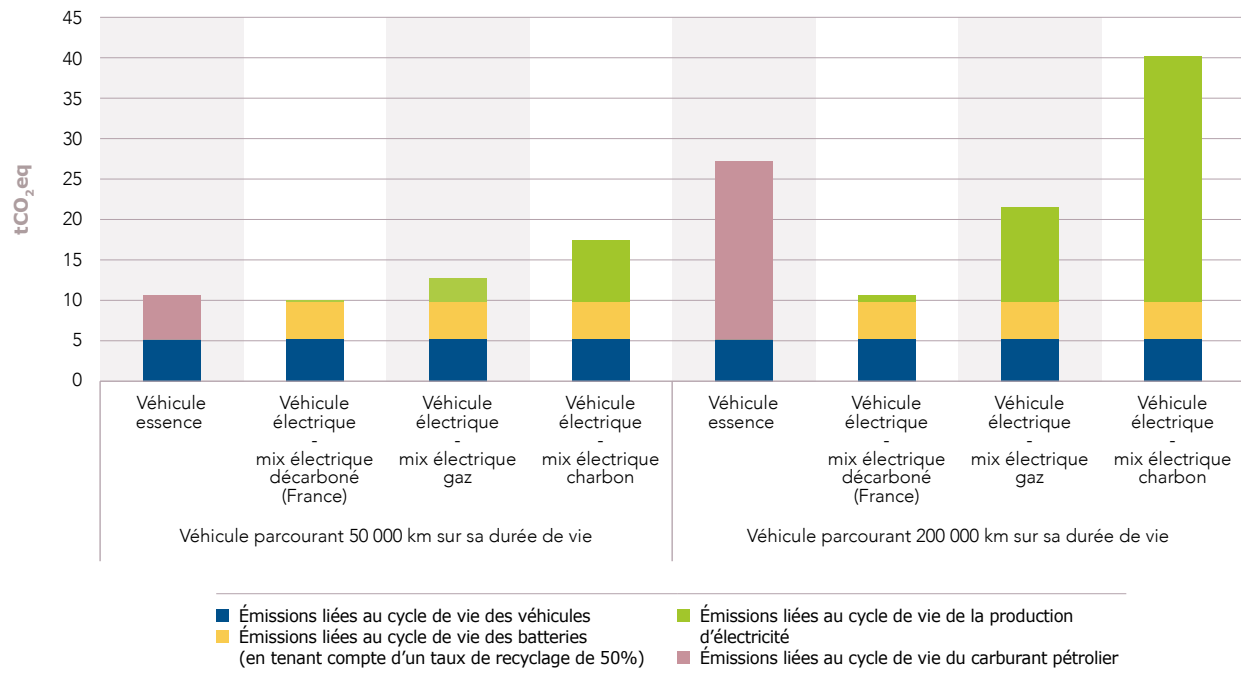
Dans des conditions standards, **les gains sur les émissions nationales ne sont pas compensés par un surcroît d'émission à l'étranger du fait de la production des batteries, même si ces dernières sont produites dans des pays où la production d'énergie utilise très majoritairement du charbon. Selon la capacité de la batterie, le lieu de fabrication, le taux de recyclage et l'horizon considéré, le véhicule électrique a une empreinte carbone 2 à 4 fois moindre que celle d'un véhicule thermique** (selon les modèles comparés et l'horizon considéré).

Figure 31. Décomposition des effets de l'électrification sur les émissions de gaz à effet de serre associées au secteur des transports terrestres (scénario *Forté haut* – année 2035)



9. Fondation pour la nature et l'Homme – Le véhicule électrique dans la transition écologique en France (2018)

Figure 32. Empreinte carbone d'un véhicule sur l'ensemble du cycle de vie selon le type de motorisation, le mix de production d'électricité, et la distance parcourue (année de référence 2035)



Le nouveau rapport permet d'apporter une vision consolidée à la maille du parc (y compris en intégrant les bus et les poids lourds), en comparant les différents scénarios étudiés (via les variantes sur le pilotage des recharges, la capacité des batteries, la localisation de leur fabrication et leur taux de recyclage), et en intégrant de façon détaillée les effets sur le mix électrique européen (via une simulation des imports/exports d'électricité entre zones).

Ces analyses permettent de dresser une analyse exhaustive, à l'échelle du parc total de véhicules, de l'empreinte totale sur les émissions de gaz à effet de serre des transports terrestres.

Elles conduisent à des résultats très nets.

D'une part, **l'électrification de la mobilité légère constitue bien un levier puissant de réduction de l'empreinte carbone des transports, quelle que soit ses modalités de développement.**

La réduction de l'empreinte carbone est systématique, même dans des scénarios où les paramètres ne sont pas les plus favorables aux émissions de gaz à effet de serre, comme dans le scénario *Forte* (batteries de grande capacité, fabriquées en Asie, taux de recyclage limité, développement très limité du pilotage de la recharge).

D'autre part, **ce résultat demeure également vrai pour l'électrification des véhicules lourds (bus et camions).** L'enjeu concernant ce secteur est significatif (la mobilité routière lourde représente environ 30 MtCO₂ par an), même si l'électrification de ce secteur devrait être plus lente et partielle que pour la mobilité légère.

Ceci ne doit pas néanmoins masquer que le véhicule électrique n'a pas une empreinte carbone nulle. L'étude permet de tester l'influence de différents paramètres clés de la mobilité sur les émissions et d'identifier les différents leviers permettant de gérer et de réduire encore cet impact.

7.4 ... mais la localisation de la production des batteries en France améliore significativement le bilan carbone

Les différentes hypothèses testées dans l'étude permettent de rendre compte des enjeux de localisation de la fabrication des batteries pour la réduction de l'empreinte carbone.

La production des batteries s'effectue aujourd'hui très majoritairement en Asie (les 10 plus gros fabricants de cellules lithium-ion sont tous asiatiques), dans des pays où la production d'électricité utilise majoritairement ou principalement le charbon et est donc fortement émettrice de gaz à effet de serre.

Si l'analyse restituée au § 7.3 montre que les réductions d'émissions liées à la bascule vers la mobilité électrique dans un pays comme la France surpassent largement les émissions supplémentaires résultant de la production de batteries en Asie, il demeure qu'un levier d'optimisation pour réduire les émissions de l'ensemble du cycle consiste à localiser la fabrication des batteries dans un pays où la production d'électricité est largement décarbonée.

Au-delà des considérations stratégiques qui peuvent y être associées, la production de batteries dans un pays comme la France permettrait de réduire les émissions de l'ordre de

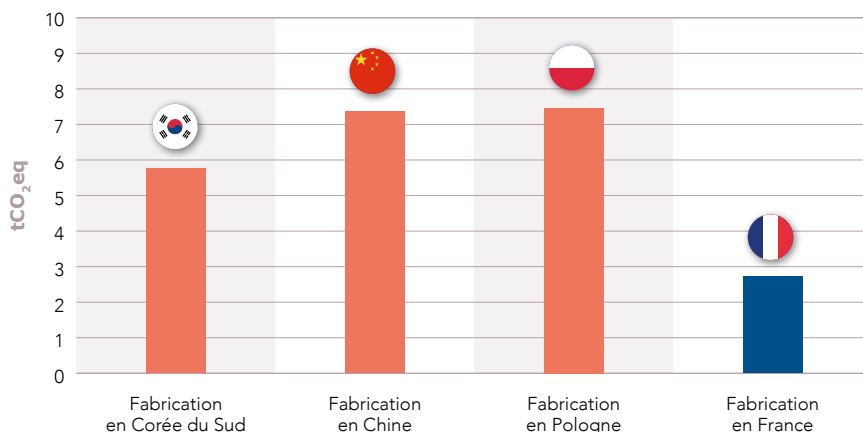
2 à 3 MtCO₂ par an (selon l'hypothèse sur la capacité des batteries), pour un parc de 15,6 millions de véhicules électriques. Cette évaluation intègre une très légère augmentation des émissions nationales liées à la consommation d'électricité pour la fabrication des batteries (de moins de 0,3 MtCO₂ par an).

Sur l'ensemble de la chaîne de valeur du véhicule électrique, une bascule vers la mobilité électrique accompagnée de politiques volontaristes pour la localisation de la production des batteries conduirait donc à un «double dividende» climatique :

- ▶ non seulement les émissions en France seraient réduites d'une vingtaine de millions de tonnes de CO₂ par an en se passant des produits pétroliers (en fonction des scénarios) ;
- ▶ mais en plus l'empreinte du véhicule électrique serait améliorée de 2 à 3 MtCO₂ par an, en déplaçant la production de batteries vers une production d'électricité quasi décarbonée.

Ce type de politique industrielle apparaîtrait particulièrement adapté au mix issu du projet de PPE, potentiellement caractérisé par de nombreux épisodes de prix faibles sur les marchés de l'électricité.

Figure 33. Analyse de cycle de vie d'une batterie actuelle de 40 kWh selon le lieu de fabrication (hors prise en compte du recyclage)



Levier CO₂ n° 1 :
fabrication des batteries en France



7.5 La capacité de stockage des batteries et les modes de recyclage permettent également de limiter les émissions associées à l'extraction des matériaux et à la fabrication des batteries

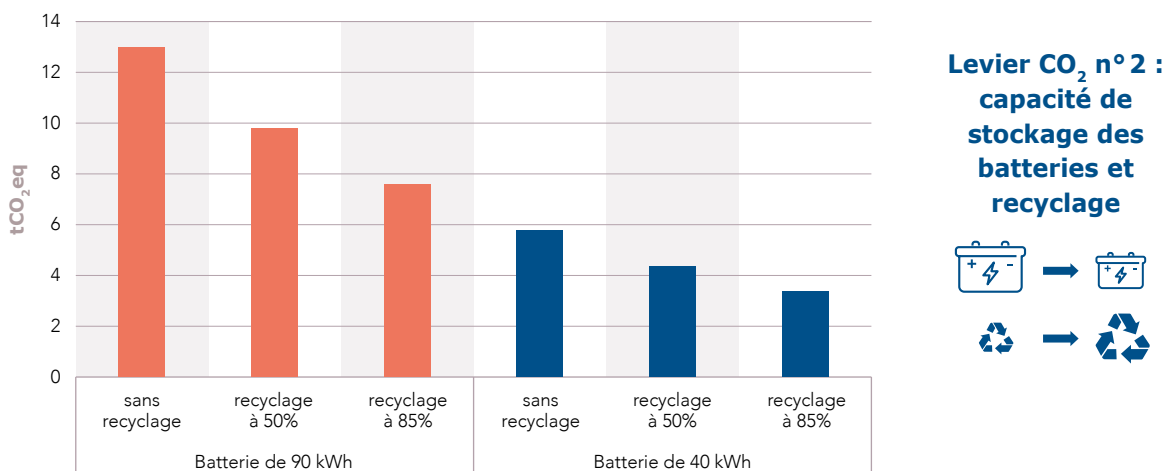
Aujourd'hui, un effort important est consacré, par les constructeurs et fabricants de batteries, à augmenter la capacité des batteries (en kWh d'énergie stockée) pour améliorer l'autonomie des véhicules et faciliter leur adoption par les utilisateurs. Cette croissance de la capacité des batteries est permise par des progrès technologiques et un passage à l'échelle industrielle qui permettent (i) de fabriquer des batteries avec une meilleure densité d'énergie et (ii) de réduire les coûts unitaires du kWh de batterie.

Dans un scénario comme *Forte*, tout comme dans d'autres projections de différents acteurs, la capacité moyenne des batteries de véhicules électriques pourrait ainsi atteindre de l'ordre de 90 kWh, correspondant à une autonomie de plus de 500 km, contre environ 40 kWh pour l'écrasante majorité des véhicules électriques aujourd'hui commercialisés en France.

Or, pour un véhicule parcourant essentiellement des distances limitées (de l'ordre de 35 à 40 km par jour en moyenne, en dehors des quelques déplacements longue distance dans l'année), une capacité de stockage aussi importante peut s'avérer largement superflue, d'autant plus que la taille des batteries a un impact sur le bilan carbone du véhicule électrique. En effet, plus la capacité de la batterie est importante, plus la quantité d'éléments électrochimiques et donc de matériaux nécessaires à sa fabrication est élevée.

Dès lors, **une croissance modérée de la capacité de stockage des batteries, en particulier pour des véhicules principalement utilisés pour des déplacements locaux, contribue à réduire l'impact environnemental du véhicule électrique** (par exemple dans le scénario *Piano*).

Figure 34. Analyse de cycle de vie d'une batterie actuelle selon sa capacité de stockage et le taux de recyclage (hypothèse de fabrication en Corée du sud)



De même, le recyclage des batteries en fin de vie permet de limiter les impacts environnementaux associés à l'extraction des matériaux.

Dans un scénario à 15,6 millions de véhicules, l'enjeu sur la maîtrise de la capacité des batteries et d'un fort taux de recyclage représente

de l'ordre de 1 à 2 MtCO₂ par an (comparaison entre l'hypothèse basse sur la capacité des batteries avec un taux de recyclage de 85% et l'hypothèse haute sur la capacité avec un taux de recyclage de 50%). Le gain dépend de l'hypothèse de localisation : l'enjeu est moins important si la fabrication des batteries est réalisée en France.

7.6 Le pilotage de la recharge a un impact important sur le contenu CO₂ de la consommation des véhicules électriques

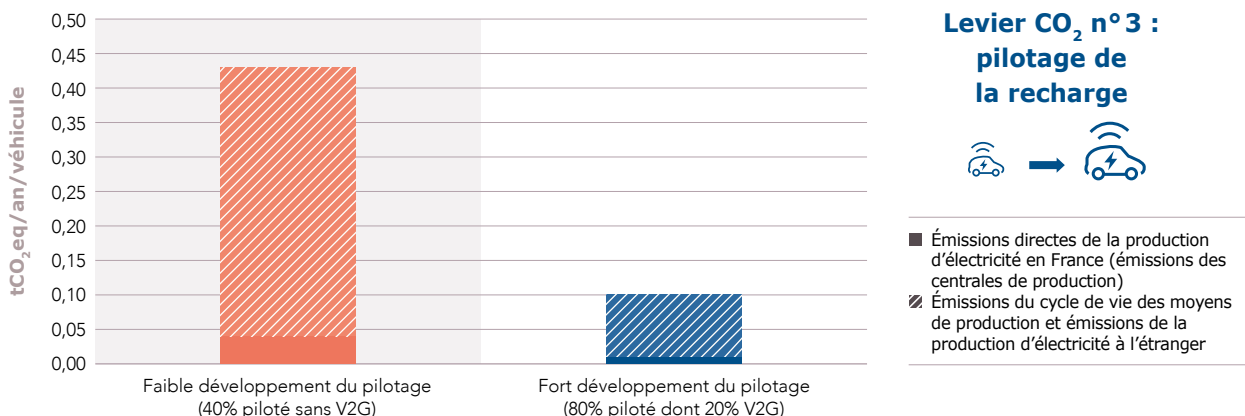
Le pilotage de la recharge présente un intérêt technique évident, et une valeur économique très significative. L'analyse montre également qu'il présente des avantages sur le plan des émissions de gaz à effet de serre.

En améliorant l'utilisation de la production d'électricité décarbonée en France et en réduisant le recours à la production d'électricité thermique fossile en Europe, le pilotage de la recharge conduit en effet à améliorer l'impact de la recharge des véhicules électriques sur les émissions de gaz à effet de serre du système électrique européen. **Près de**

5 MtCO₂ par an peuvent alors être évitées avec une généralisation du pilotage (par rapport à un scénario où il ne serait pas mis en œuvre).

Les gains associés ne se situent pas, pour l'essentiel, en France. Cela résulte de la réalité technique et économique du fonctionnement du système électrique à l'échelle européenne : le degré de diffusion du pilotage en France a une influence sur la sollicitation de tous les moyens de production pilotables en Europe, et notamment les moyens thermiques fossiles qui se situent majoritairement dans d'autres pays.

Figure 35. Émissions associées à la production d'électricité selon le mode de pilotage de la recharge (année de référence 2035)



7.7 Le renforcement des transports en commun et des mobilités douces réduit encore l’empreinte carbone des transports

Au-delà des choix sur les modalités de développement de la mobilité électrique, les évolutions des modes de déplacements offrent la possibilité de maximiser les bénéfices apportés sur l’empreinte carbone des transports. **Les options favorisant le report modal (vers les mobilités douces, vers des transports en commun électriques), le développement de l’auto-partage et du covoiturage présentent un intérêt environnemental, même avec une électrification massive du parc de véhicules.**

Le scénario *Piano* qui combine l’utilisation des différents leviers permet une réduction totale de l’empreinte carbone des transports de près de 40 MtCO₂ par an, soit un volume d’émissions évitées environ 40% supérieur à celui obtenu dans le scénario *Forte* (variante haute).

Les études réalisées sur le développement des véhicules autonomes partagés utilisés sous forme de robots-taxis (scénario *Alto*) conduisent à des résultats ambivalents s’agissant de l’impact sur les émissions.

Au titre des effets positifs sur les émissions, l’utilisation des robots-taxis permet de réduire le parc automobile. Des services de mobilité, basés sur des véhicules fortement utilisés au détriment de la détention de véhicules privés faiblement utilisés, peuvent alors se développer. Le développement de ces robots-taxis, combiné à un développement des transports en commun (les véhicules autonomes agissent comme moyen de « rabattement » vers des liaisons structurantes de transport en commun), peut par ailleurs réduire les distances parcourues en transport routier et ainsi améliorer l’empreinte carbone des transports.

Figure 36. Effet du report modal sur les émissions de gaz à effet de serre (en analyse du cycle de vie)

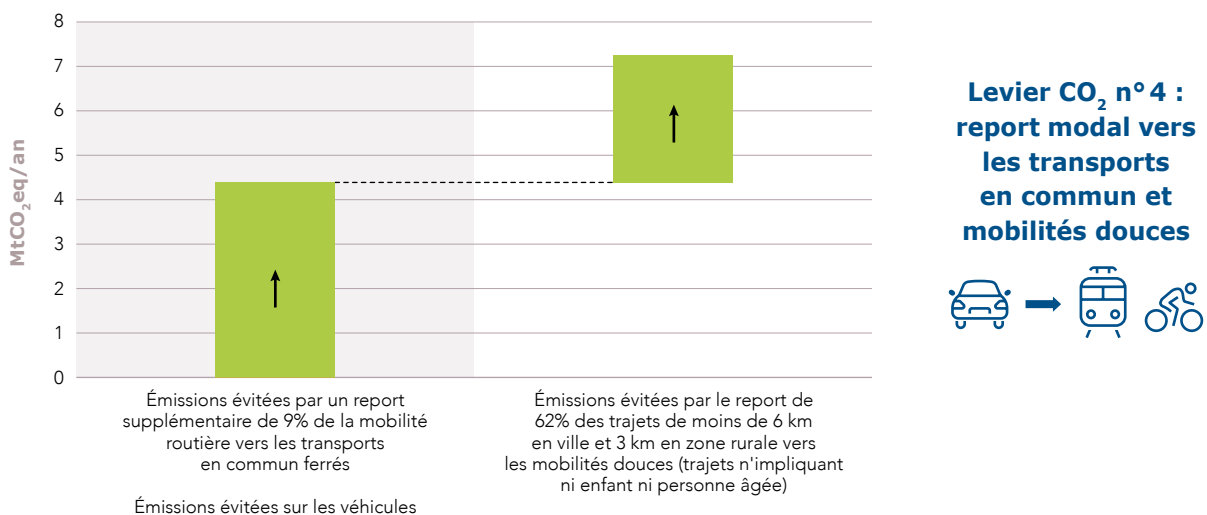
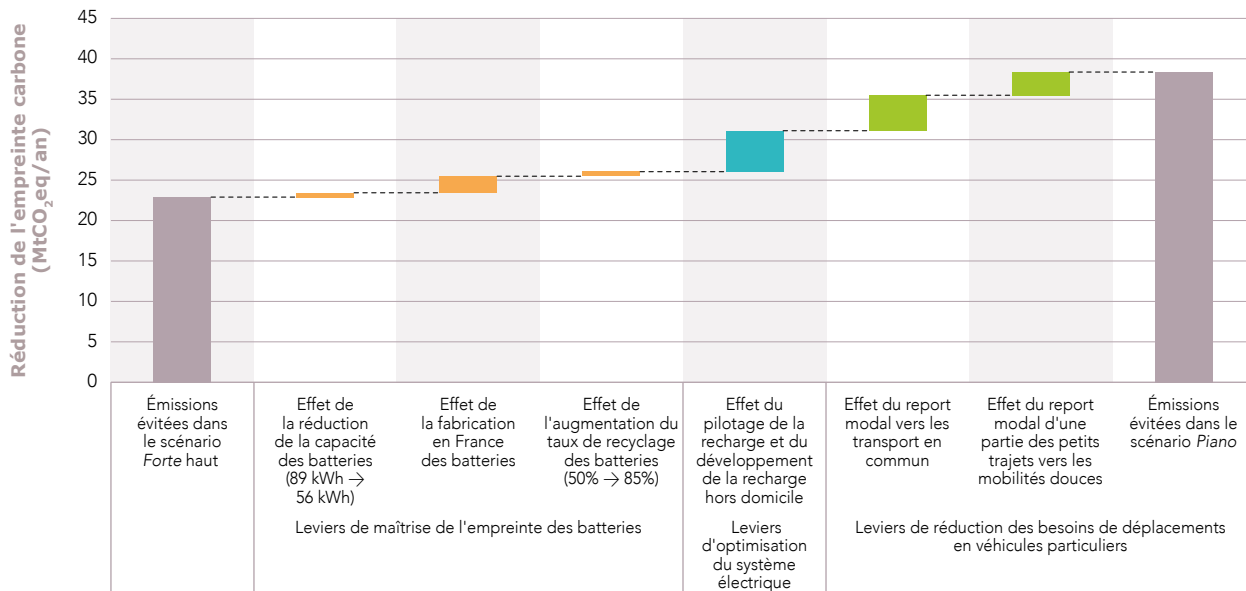


Figure 37. Leviers de réduction de l’empreinte carbone des transports

Cependant, plusieurs impacts viennent contrecarrer les effets positifs associés à la réduction du parc automobile privé :

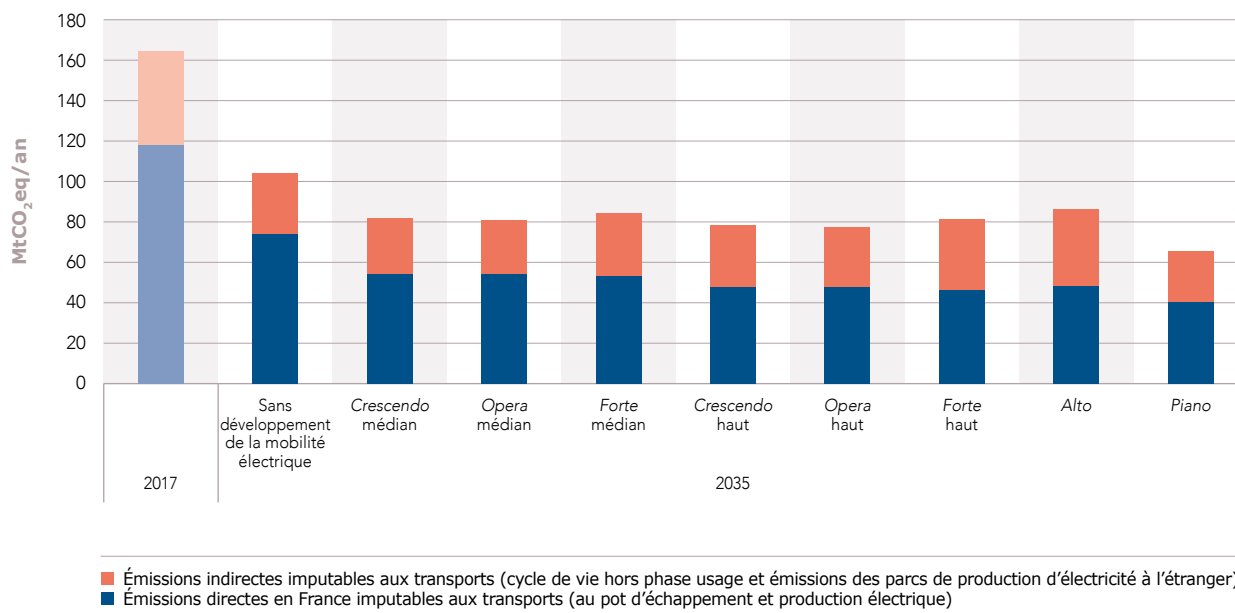
- (i) la durée de vie de ces véhicules partagés est réduite par rapport à celle d’un véhicule particulier du fait des fortes distances parcourues par an,
- (ii) les batteries sont de taille plus importante,
- (iii) l’empreinte de toute l’électronique (calculateur, capteurs) et des *data centers* pour le stockage de données nécessaires aux fonctions d’autonomie pèsent sur l’analyse globale,
- (iv) la consommation unitaire kilométrique de ces véhicules est plus importante (effet du poids et de la consommation des fonctions d’autonomie),
- (v) les distances parcourues à vide (contrepartie à l’utilisation massive et partagée) font augmenter la consommation.

Ceci conduit le scénario *Alto* à présenter des émissions supérieures, par rapport aux variantes hautes de *Crescendo*, *Opera* et *Forte*, alors même qu’un nombre nettement inférieur de véhicules légers sont en circulation.

Ces premiers éléments d’analyse doivent être considérés avec précaution compte tenu des incertitudes sur les futures caractéristiques des véhicules autonomes et leur empreinte carbone. Ils montrent simplement qu’il **n’existe pas d’automatisme ou de réponse évidente, qui tiendrait pour acquis que le développement du véhicule autonome, par son effet sur la réduction du parc de véhicules particuliers, entraînerait une baisse des émissions.**

Ces résultats appellent des prolongements, qui pourraient porter sur une utilisation plus fine des véhicules autonomes, sous forme de transport en commun de faible capacité (avec des taux de remplissage plus élevés que les véhicules classiques). Ces derniers pourraient être potentiellement plus vertueux d’un point de vue environnemental. Enfin, ce scénario pourrait reposer sur le principe d’un développement massif de l’auto-partage sans nécessairement reposer sur des véhicules autonomes. Des variantes du scénario *Alto* plus performantes sur le terrain environnemental semblent ainsi envisageables et pourront être étudiées par la suite.

Figure 38. Émissions de gaz à effet de serre imputables aux transports terrestres (hors deux-roues) selon les scénarios



7.8 Le coût de la décarbonation via le développement de la mobilité électrique, initialement important, devrait à terme être faible

Plusieurs études récentes (IFPEN-ADEME, UFC QueChoisir, CGDD) se sont penchées sur le coût total de détention d'un véhicule pour un utilisateur (le TCO¹⁰) – indicateur qui intègre l'ensemble des coûts sur la durée de possession d'un véhicule (achat et financement du véhicule, entretien, assurance, carburant ou électricité, en intégrant l'ensemble des taxes et subventions perçues).

Ces études convergent pour conclure que ce coût total pour le consommateur est désormais proche, voire inférieur, à celui d'un véhicule thermique. Ce résultat dépend des conditions d'utilisation (notamment les distances parcourues), des types de véhicules (certains

modèles thermiques sont éligibles à un bonus écologique et à une prime à la conversion), de la capacité de la batterie (qui représente un coût important d'un véhicule électrique) et de la situation fiscale de l'acquéreur – personne physique ou morale (la prime à la conversion dépend de la situation fiscale du foyer, les entreprises sont exonérées de l'impôt sur les véhicules de société pour les véhicules peu émetteurs de CO₂, etc.).

La compétitivité du coût de détention des véhicules électriques par rapport aux véhicules thermiques est rendue possible grâce aux soutiens financiers publics, implicites ou explicites : bonus écologique, prime à la conversion, moindre taxation de

10. En anglais, *Total Cost of Ownership*

l'électricité par rapport à l'essence ou le diesel. Ces soutiens publics semblent aujourd'hui indispensables pour que les ventes de véhicules électriques progressent¹¹.

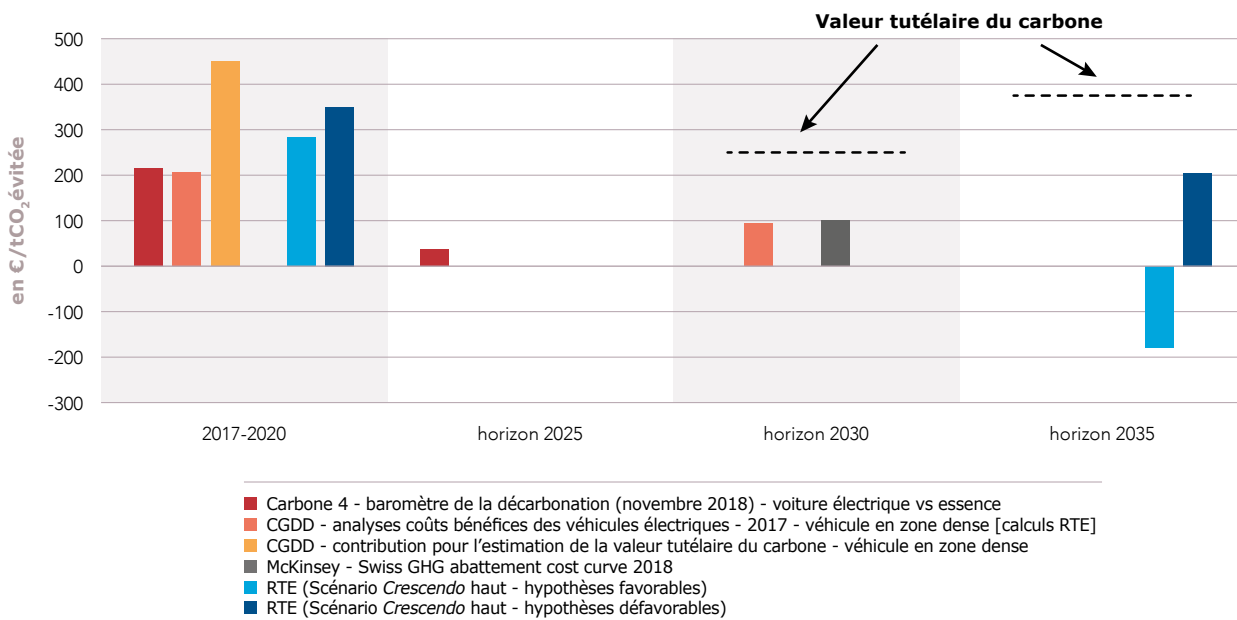
Ceci signifie que le véhicule électrique est plus cher en coût pour la collectivité que le véhicule thermique. Ce surcoût (qui est compensé par les finances publiques) représente de l'ordre de 10 000 € par véhicule sur l'ensemble de sa durée de vie.

Rapporté aux émissions de CO₂ évitées, ce surcoût pour la collectivité représente de l'ordre de 250 à 350 €/tCO₂ évitée sur l'ensemble de la durée de vie du véhicule – un niveau à comparer au coût des émissions pour la collectivité (changement climatique) et des autres externalités (le véhicule électrique émet peu de particules fines et évite les problèmes de santé publique associés). Ce résultat se situe dans le faisceau des études existantes.

Avec la baisse attendue du coût des batteries, le surcoût de la mobilité électrique est amené à baisser, dans des proportions qui font l'objet de fortes incertitudes (dépendance aux hypothèses sur l'évolution des coûts, la capacité des batteries, le prix du pétrole, etc.).

Sous certaines hypothèses optimistes mais plausibles, il pourrait n'y avoir aucun surcoût du véhicule électrique par rapport au véhicule thermique à l'horizon 2030-2035. Dans les projections les plus défavorables, le coût de la réduction des émissions de gaz à effet de serre via l'électrification de la mobilité légère peut représenter jusqu'à 200 € par tonne de CO₂ évitée, soit un niveau en deçà de la valeur tutélaire du carbone à cet horizon (comprise dans une fourchette entre 250 €/tCO₂ et 500 €/tCO₂ à cet horizon). Ceci illustre la compétitivité des actions envisageables pour électrifier le secteur de la mobilité légère, sur le seul motif du CO₂.

Figure 39. Estimations du coût pour la collectivité de réduction des émissions de gaz à effet de serre via l'électrification des transports



¹¹. L'exemple du Danemark, qui a supprimé les subventions aux véhicules électriques début 2016, illustre bien la nécessité, avec les coûts actuels des véhicules, d'un soutien financier pour inciter à l'achat de véhicules électriques (la suppression des subventions au Danemark en 2016 a conduit à une division par dix des ventes de véhicules électriques entre le dernier trimestre 2015 et le premier trimestre 2016).

7.9 Le développement de la mobilité électrique soulève d'autres enjeux environnementaux et éthiques

Les enjeux associés au dérèglement climatique sont aujourd'hui au cœur du débat public. L'essentiel de l'analyse réalisée dans le cadre du rapport porte ainsi sur les émissions de gaz à effet de serre. Néanmoins la question climatique ne doit pas masquer l'existence d'autres enjeux environnementaux, éthiques et stratégiques associés au développement de la mobilité électrique.

D'une part, le développement de la mobilité électrique permet de réduire d'autres sources de pollution et engendre un bénéfice significatif en termes de santé publique : diminution de certains polluants, notamment des particules fines, particulièrement nocives (responsables de 48 000 décès par an en France selon Santé publique France) et de la pollution sonore (responsable de 43 000 hospitalisation et 10 000 décès par an en Europe, selon l'Agence européenne de l'environnement). L'étude du Commissariat général au développement durable (CGDD), qui intègre un coût pour ces pollutions a permis de montrer que les bénéfices de la mobilité électrique en termes de pollutions locales évitées peuvent avoir une valeur monétaire significative : sur la durée de vie du véhicule, 1 000 € d'externalités évitées en termes de nuisances liées au bruit et à la pollution locale.

D'autre part, à travers la production des batteries, le développement de la mobilité électrique augmente l'incidence d'autres impacts pour l'environnement, notamment dans les territoires où les ressources minérales (lithium, cobalt, nickel, manganèse) sont extraites et traitées.

Le développement des véhicules électriques conduit à des impacts sur les écosystèmes à travers l'acidification des milieux naturels et l'eutrophisation

des eaux qui ont pour effet d'appauvrir les milieux naturels et d'affecter la faune et la flore. L'étude de la FNH a permis de quantifier ces effets : pour un européen moyen, basculer vers le véhicule électrique induit une augmentation de ses impacts sur la biodiversité de l'ordre de 8% à 15% (selon le type de véhicule). Dans un contexte de baisse alarmante de la biodiversité (un million d'espèces animales et végétales – soit une sur huit – risquent de disparaître à brève échéance de la surface de la terre ou du fond des océans, selon l'étude de la plate-forme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques), les conséquences du développement des véhicules électriques sur les milieux naturels doivent être considérées.

À ces préoccupations environnementales, s'ajoutent des enjeux éthiques : l'extraction des métaux (notamment le cobalt) nécessaires à la fabrication des batteries, essentiellement concentrée en République démocratique du Congo, s'effectue dans des conditions d'atteinte aux droits humains qui ont été plusieurs fois portées à la connaissance de tous¹².

La réflexion sur la décarbonation du secteur des transports ne doit pas occulter ces questions, ni le fait que la mobilité basée sur des produits pétroliers n'est pas exempte d'enjeux de cette nature. **Le recyclage des matériaux et les efforts de recherche dans de nouvelles technologies de batteries (qui permettent de réduire les besoins de ressources) présentent donc une forte importance, à côté des efforts de sobriété évoqués (usage des mobilités douces, transports en commun, contrôle de la taille des batteries), qui sont de toutes façon sans regret.**

12. Selon l'UNICEF et Amnesty International, 40 000 enfants y travaillent jusqu'à 12 heures par jour, dans des conditions sanitaires déplorables et pour une rémunération de 1 à 2 dollars par jour. Voir le rapport *Les atteintes aux droits humains en république démocratique du Congo alimentent le commerce mondial du cobalt*, Amnesty International.

À titre d'exemple, le passage du scénario *Forte* au scénario *Piano* conduit à une réduction de l'ordre de 35% des besoins d'approvisionnements en cobalt cumulés sur la période 2020-2035 (soit près d'un an de la production de cobalt de la République

Démocratique du Congo), du fait de la maîtrise de la taille des batteries et de l'amélioration du recyclage. Ces chiffres sont basés sur la chimie actuelle des batteries, qui est susceptible d'évoluer, pour limiter les besoins en métaux rares.

PROLONGEMENTS

Les principaux résultats présentés dans ce document résultent d'une étude approfondie, dont les conclusions ont été discutées en groupe de suivi. Ils seront détaillés dans un rapport complet, qui sera publié au cours du mois de juin 2019.

L'étude permet de répondre à un certain nombre de questions, mais appelle également à des prolongements – au niveau théorique et pratique. Ces prolongements pourront être examinés dans ce cadre au cours des prochains mois.

RTE et l'AVERE-France proposent de maintenir le groupe de travail déjà constitué, qui permet à des acteurs d'univers très différents de confronter leurs lectures, afin de poursuivre le travail sur les différents résultats mis en avant dans le rapport.

1) Observer en pratique les conséquences du développement de la mobilité

Les résultats présentés dans ce rapport sont issus de modélisations sur les habitudes de déplacement des français, et reposent sur l'ensemble des sources publiques disponibles à ce jour. Les profils d'appel de puissance qui en résultent ont pu être comparés avec certaines courbes de charge réelles disponibles pour les premiers utilisateurs de véhicule électrique.

Néanmoins, il n'existe encore aucun retour d'expérience consolidé reposant sur un nombre suffisant d'utilisateurs (et permettant donc de corriger les biais liés au panel actuel, par définition très restreint). Il est donc impossible d'anticiper si les modèles de mobilité s'orienteront en pratique vers ou tel ou tel scénario.

Il sera nécessaire de capitaliser, à intervalle régulier, sur les données disponibles afin d'affiner les modèles et les visions prospectives, et ainsi de mieux accompagner le déploiement massif de la mobilité électrique. Ceci constituera

une priorité des futurs travaux sur la mobilité électrique.

Cela implique en premier lieu d'organiser le partage des données existantes afin d'en tirer le plus grand profit. Ce partage devrait s'effectuer au-delà du périmètre des démonstrateurs, aujourd'hui de petite taille en France, et pourrait nécessiter la mise en œuvre de partenariats plus poussés avec certains territoires et d'expérimentations à grande échelle (par exemple sur le *vehicle-to-grid*).

2) Affiner certaines études

Les différents scénarios appellent des prolongements spécifiques, et peuvent faire l'objet de variantes particulières.

Les scénarios *Opera* et *Forte* décrivent des situations opposées pour le système électrique – un pilotage généralisé de la recharge, ou à l'inverse un pilotage très limité. Le retour d'expérience sur le comportement réel des utilisateurs pourra permettre d'alimenter la construction de nouveaux scénarios basés sur des paramètres affinés.

Le scénario *Alto* est nécessairement plus prospectif par nature (il n'existe encore aucun véhicule autonome de niveau 5). Les expérimentations qui pourraient être lancées dans le cadre de la loi d'orientation de la mobilité pourraient fournir des cas d'usage intéressants pour affiner les analyses techniques (modes de recharge), économiques (coût de la recharge, faculté de pilotage) et environnementales (taille des batteries, fréquence des trajets à vide, etc.).

Dans le scénario *Piano*, l'articulation des formes de mobilité et leurs conséquences pour le système électrique pourraient également être précisées.

RTE précisera les partenariats nécessaires avec les autorités organisatrices des transports concernées afin de nourrir ces études.

3) Compléter les investigations

Quand bien même de très nombreux résultats ont été atteints, plusieurs questions n'ont pu être approfondies. Des compléments pourraient concerner :

- ▶ d'autres cas d'usage et logiques de développement de la mobilité électrique et son pilotage (par exemple, cas des entreprises se dotant d'une flotte de véhicules électriques et d'installations solaires pour les recharger, cité par plusieurs participants du groupe de suivi) ;
- ▶ l'analyse des règles de marché, en testant l'influence de cadres de régulation alternatifs sur les enjeux d'optimisation pour le système ;
- ▶ l'intégration des enjeux à la maille du système dans son ensemble (visions nationale et européenne) avec ceux liés aux optimisations locales, portés par Enedis et les ELD ;
- ▶ l'analyse des coûts complets (notamment le pilotage) ;
- ▶ la prise en compte des résultats de la future enquête nationale transports- déplacements (publication d'ici 2020) ;
- ▶ l'appui des pouvoirs publics et collectivités territoriales dans l'analyse de leurs choix en matière de développement de la mobilité électrique.

Par ailleurs, certains pans de l'analyse des conséquences sur le système électrique ont été délibérément placés hors du champ de cette étude. C'est notamment le cas des adaptations requises sur les réseaux pour accompagner un développement massif du véhicule électrique, qui font l'objet de projections de RTE et d'Enedis respectivement pour les réseaux de transport et de distribution.

RTE et Enedis travaillent en concertation sur ces sujets, et ont notamment convenu de mener une étude commune dans les prochains mois pour ce qui est de l'équipement des stations d'autoroute. Les résultats de cette étude sont attendus pour le premier semestre 2020.

4) Garantir l'ouverture des mécanismes de marché

L'étude montre le grand intérêt du pilotage de la recharge. Ceci devrait se traduire dans les offres

commerciales des fournisseurs – qui peuvent aujourd'hui s'affiner avec le déploiement des compteurs communicants. Des offres différenciant fortement heures pleines et heures creuses, et tout à fait dans l'esprit du rapport, sont depuis peu proposées par plusieurs fournisseurs.

L'étude souligne également l'intérêt technique de la recharge réversible (*vehicle-to-grid*) pour une partie des utilisateurs. Aucune offre commerciale n'existe encore aujourd'hui en France pour valoriser cette flexibilité, la technologie étant balbutiante et le nombre de véhicules électriques en circulation encore faible. Fournisseurs d'électricité, constructeurs et agrégateurs de flexibilité joueront un rôle clé pour structurer ces offres.

Pour que la valorisation pratique de la flexibilité corresponde au potentiel théorique, il est nécessaire de faire en sorte que les mécanismes de marché soient bien ouverts et ne contiennent pas de barrière à l'entrée pour ces nouvelles offres. Deux niveaux de réponses complémentaires pourront être envisagés :

- (1) Faire en sorte que l'ensemble des marchés (réserves primaire, secondaire, ajustement, mécanisme de capacité) soient ouverts à la fourniture de tels services par des agrégateurs à partir des batteries embarquées dans les véhicules. Cela nécessitera à minima d'adapter les méthodes de qualification technique et de contrôle pensées historiquement dans une logique de stationnarité plus que de mobilité ;
- (2) Mettre en œuvre, y compris sur des volumes limités, des procédures simplifiées afin d'accompagner des modèles d'affaires nouveaux. RTE rappelle que la procédure de « bac à sable réglementaire » instaurée par la loi PACTE peut être utilisée pour accélérer la mise en œuvre de certaines souplesses, et que RTE a prévu dans les règles d'ajustement une procédure spécifique (« coupe-file ») pour accélérer la mise en œuvre de certaines solutions si l'intérêt des acteurs est manifeste. Ce dispositif pourrait être utilisé pour accompagner une expérimentation sur la flexibilité des véhicules.



Le réseau
de transport
d'électricité



RTE
Immeuble WINDOW - 7C Place du Dôme,
92073 PARIS LA DEFENSE CEDEX
www.rte-france.com

Avec le concours de

