

# Parc de véhicules électriques en France : combien de réacteurs nucléaires ?

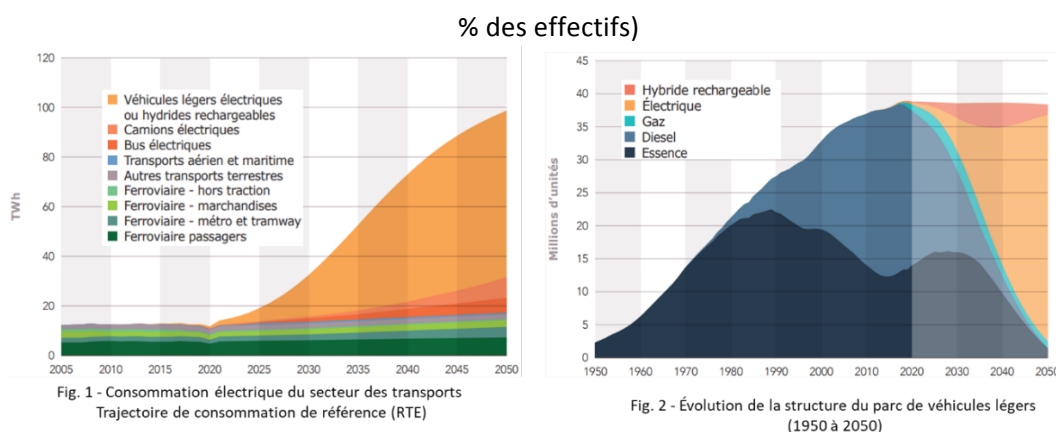
Dominique GRENECHE<sup>1</sup>

Le développement des véhicules électriques (VE), pour les particuliers comme pour une partie des transports légers, apparaît aujourd'hui inéluctable en France (comme d'ailleurs dans de nombreux pays industrialisés), quels que soient les inconvénients parfois mis en avant pour s'opposer à ce mode de transport individuel. Il convient donc d'anticiper dès maintenant les besoins de consommation futurs d'électricité ainsi que les besoins de puissance correspondants pour assurer les recharges des batteries de ces véhicules. Cette note est destinée à apporter des éléments de réponse à ces questions.

Le cas français est très particulier, avec son mix électrique à 70 % nucléaire, une capacité pilotable aujourd'hui sensiblement inférieure au pic d'appel de puissance, et une forte incertitude sur le réalisme des objectifs déclinés dans la LTECV et la PPE. Nous disposons de deux références récentes et assez complètes, toutes deux publiées par RTE<sup>2</sup> et <sup>3</sup>. Se projeter dans un futur aussi incertain impose de limiter l'ambition de notre analyse à 2035, alors que ces rapports se focalisent sur un objectif 2050 très hypothétique et donnent des renseignements fragmentaires sur 2035, les valeurs fournies par les modèles de RTE apparaissant essentiellement dans des figures.

## 1) 2035 : les données 2019 en regard des projections.

Elles présentent, même dans ses scénarios « raisonnables », des évolutions très ambitieuses de la traction électrique : elle augmenterait, tous transports inclus, de 13 TWh aujourd'hui, à 53 environ en 2035 (et à 98 en 2050). En ce qui concerne les véhicules légers électrifiés, le nombre progresserait de 0.4 millions à environ 15,6 en 2035 (et 35.9 en 2050).



<sup>1</sup> Docteur en physique nucléaire : successivement Commissariat à l'Énergie Atomique ; Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire ; conseiller au Cabinet du Haut-Commissaire à l'Énergie Atomique ; relations internationales à AREVA ; enseignant dans les grandes écoles.  
Publications : « Transition énergétique : la France en échec » et « Histoire et techniques des réacteurs nucléaires et de leurs combustibles »

<sup>2</sup> Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique – Rapport RTE – Mai 2019

<sup>3</sup> Futurs énergétiques 2050 – Rapport RTE - Octobre 2021

Nous nous intéresserons dans cette analyse essentiellement aux véhicules légers, hors véhicules lourds (plutôt orientés vers l'hydrogène) et transports ferroviaires, dont le taux de remplacement restera faible à l'horizon 2035.

a) Combien de véhicules électrifiés ?

Les différentes projections des constructeurs (scénarios de la Plateforme française automobile) et des pouvoirs publics (PPE) tablent sur un nombre de VE en circulation en France de plus d'un million d'unités en 2022-2023 (il y en avait 400.000 fin 2021), et de 4,8 millions en 2028 (échéance de la PPE). Dans son scénario (réf. 2 figure 3-22), RTE prévoit 7,3 millions de véhicules électrifiés en 2030 et 24,7 en 2040, avec une évolution quasi linéaire, ce qui conduirait à 15,6 millions en 2035<sup>4</sup>. Par rapport à l'étude publiée en mai 2019 par RTE (réf. 1) ce chiffre, qui était une hypothèse haute, constitue désormais la **trajectoire centrale** de l'étude de 2021 (réf.2), le consensus (réaliste ?) sur les trajectoires possibles de développement de la mobilité électrique ayant été significativement revu à la hausse.

Une évolution importante ressort de la figure 2 ci-dessus : la part des hybrides rechargeables, qui est aujourd'hui encore importante (46 % en 2021) devrait être limitée à 21 % en 2035, puis moins de 4 % en 2050 (source ADEME), avec une évolution vers le tout électrique.

b) Quel besoin d'énergie pour alimenter le parc ?

Le calcul de l'énergie consommée par le parc électrique en 2035 repose sur l'évaluation de la consommation électrique moyenne. Le site<sup>5</sup> fournit les consommations de 24 modèles de VE : la moyenne, en kWh pour 100 km, s'établit entre 16,5 kWh sur route et 25 kWh sur autoroute. On adopte ici le chiffre moyen de 20 kWh/100 km assez généralement cité. A titre d'exemple, dans le rapport RTE Réf. 2, on trouve le chiffre de 18,6 kWh/100 km (tableau 3.31 page 94), qui se réduit cependant à 15.2 kWh/100 km en 2050, pour tenir compte des progrès technologiques, soit environ 17 kWh/100km en 2035. La consommation totale d'électricité d'un parc de 15,6 millions de VE résulte alors des distances totales parcourues annuellement par les différents types de véhicules. Les données délivrées par l'INSEE pour l'année 2019<sup>6</sup> donnent les résultats suivants :

- Nombre de véhicules particulier 37,7 millions et véhicules utilitaires léger 5,9 millions
- Nombre de km parcourus annuellement : 799 milliards km.

Le parcours kilométrique moyen d'un véhicule léger est donc en première approximation d'environ 20000 km/an.

La consommation de 15,6 millions de véhicules en 2035 devrait donc être d'environ 53 TWh. L'estimation du rapport RTE réf. 1 donne une fourchette de 35 à 40 TWh (page 8), sensiblement inférieure, qui s'explique probablement par l'impact des leviers identifiés de sobriété<sup>7</sup> qui sont évalués à 22,1 TWh en 2050 (fig. 3-26 du rapport réf. 2) . Pour conclure sur ce point on peut donc énoncer que **la consommation électrique d'un parc de 15 millions de VE pourrait se situer dans une**

<sup>4</sup> Soit près de 40% du parc total actuel, 43,7 millions de véhicules particuliers et véhicules utilitaires légers en 2020 -INSEE

<sup>5</sup> <https://www.largus.fr/actualite-automobile/autonomie-des-voitures-electriques-les-resultats-de-nos-tests-10283401.html>

<sup>6</sup> <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-transport-2021/livre: donnees> pour , avant la crise du COVID

<sup>7</sup> La sobriété inclut de nombreuses hypothèses : autopartage, travail à domicile, urbanisation dense et transports en commun : l'impact sociétal est probablement lourd.

**fourchette de 35 à 45 TWh.** La capacité de production effective d'électricité par les outils de production (centrales électriques, barrage, EnR, etc.) doit cependant être majorée d'environ 10 % en moyenne pour tenir compte des pertes d'acheminement (transport + distribution)<sup>8</sup> de l'électricité aux bornes de recharge des batteries. Cette consommation peut être comparée à une production totale d'électricité en France, toutes sources confondues, qui a été de 540 TWh en 2019, dont 380 TWh pour le nucléaire.

### c) Impact CO2 de l'évolution

Il est utile de rappeler à ce niveau que les émissions de CO2 du parc des véhicules particuliers étaient de 67,2 millions de tonnes en 2019 et celui des véhicules utilitaires légers de 25,2 millions de tonnes. La combinaison de l'électrification et d'une meilleure sobriété pourrait être une réduction de ces émissions d'environ moitié lors de la seule utilisation, ce qui est considérable et montre la pertinence de la substitution d'une électricité décarbonée à une énergie fossile. Il ne faut pas oublier que cette réduction est moins spectaculaire si on prend en compte la totalité du cycle de vie (fig. 3<sup>9</sup>). Rappelons que l'ADEME estime qu'avec une électricité carbonée comme en Allemagne, l'intérêt de l'électrification est limité, hors pollution urbaine (voir fig. 4).

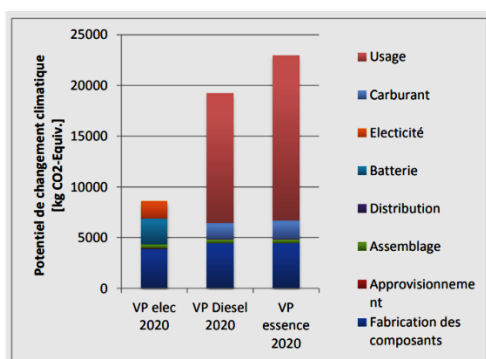


Fig. 3 - ADEME Contribution au potentiel de changement climatique des différentes étapes du cycle de vie des véhicules particuliers à l'horizon 2020

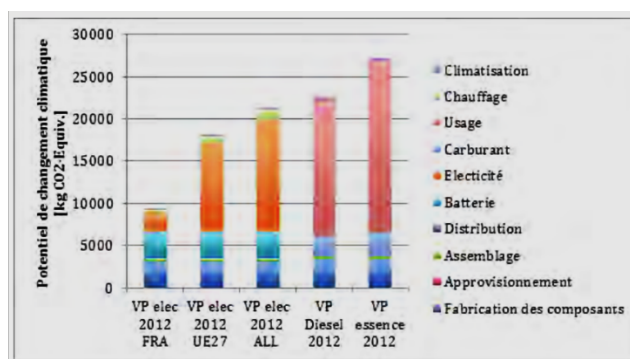


Fig. 4 - ADEME Contribution au potentiel de changement climatique des différentes étapes du cycle de vie des véhicules et des surconsommations liées aux auxiliaires à l'horizon 2012

## 2) De quelles capacités de production supplémentaires d'électricité aurons-nous besoin ?

RTE dans son étude estime qu'en 2050 une puissance de 1,7 GW pourrait être déversée dans le réseau français en cas de production insuffisante, en déchargeant une part de l'électricité stockée dans le parc de véhicules électrique<sup>10</sup>, sans préciser cependant la quantité d'énergie mise à disposition. Nous considérons dans cette analyse qu'en 2035 cette contribution sera encore très faible compte-tenu des profondes modifications techniques qu'elle suppose (développement des réseaux, gestion « intelligente » de millions de sites de production et consommation), mais aussi des adaptations réglementaires et contractuelles à mettre en œuvre.

Si on imagine une consommation homogène étalée sur les 8760 heures de l'année, les 35 à 45 TWh correspondent à une capacité de production moyenne de **4,5 GWe**, compte tenu des pertes d'acheminement, sans préjuger des créneaux tarifaires.

<sup>8</sup> <https://www.connaissancedesenergies.org/electricite-a-combien-s-elevent-les-pertes-en-ligne-en-france-140520>

<sup>9</sup> Etude ZDEME

<sup>10</sup> C'est un concept de recharge intelligente (ou « smart charging ») qui permet la charge et la décharge d'une batterie de VE à l'aide d'une borne dite bidirectionnelle capable de décharger une partie de son électricité sur le réseau (Vehicule-to-grid, V2G) mais aussi sur une maison (vehicule-to-home, V2H) ou sur un bâtiment vehicule-to-building, VTB), lors des périodes de non-utilisation (voir éventuellement plus de détail sur le site <https://blog.romande-energie.ch/fr/comprendre-l-energie/159-recharge-bidirectionnelle>)

Mais bien entendu cette hypothèse d'étalement homogène parfait de la demande n'est pas crédible car, même en mettant en place des moyens destinés à « lisser » la demande (par exemple par des incitations tarifaires significatives), il ne sera pas possible d'éviter les pointes de demande de recharge des batteries, par exemple en soirée, au début d'un week-end, ou même au moment des grands départs en vacances. Il serait cependant irréaliste d'imaginer à l'inverse une concentration excessive de la demande de tous les VE simultanément à des périodes données. A titre d'exemple si on suppose que les deux tiers des VE (soit 10 millions de VE) sont rechargés simultanément tous les soirs pendant 10 heures (donc toute la nuit), pendant les 225 jours par an (jours de travail effectifs en moyenne dans l'année, une fois retirés des 2 jours de week-end, les 11 jours fériés et 5 semaines de congés) il faut une capacité de production pilotable de 11,8 GWe. La vérité se situe évidemment entre ces scénarios extrêmes d'autant plus qu'en 2035 les véhicules disposeront de batteries permettant 6 à 7 jours de trajet en moyenne ( mais de 30 à 40 % de moins en hiver avec les batteries actuelles).

Le rapport RTE réf. 2, qui fait appel à des modélisations puissantes, étudie des projections de production et de demande d'énergie à l'horizon 2050, mais présente seulement des courbes. Ainsi, la figure 5 présente un profil hebdomadaire (parmi quatre profils) de la puissance appelée par usages (recharges des batteries de VE, industrie, chauffage domestique, éclairage, production d'hydrogène, etc.) pour une semaine de janvier en 2050. Ce profil est celui d'une trajectoire de référence qui suppose que 95% du parc de véhicules légers, soit **près de 36 millions d'unités, disposent d'une motorisation électrique** (véhicules tout électrique ou hybrides rechargeables). Ces courbes affichent une valeur de l'ordre de 15 à 20 GWe pour les appels de puissance pour les recharges des VE (pics enregistrés le vendredi ou le samedi), à comparer à une puissance totale maximale appelée de l'ordre de la centaine de GWe (maximum 107/108 GWe dans l'exemple). Ramené aux 15 millions de VE en 2035, on peut estimer le pic à environ 6,2 à 8,3 GWe.

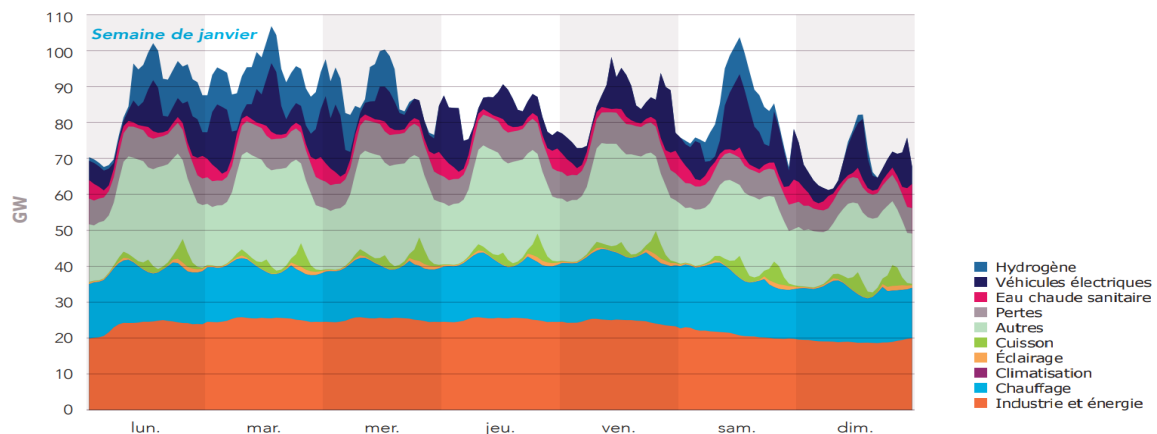


Fig. 5 - RTE oct. 2021 : Exemple de profil hebdomadaire de puissance de la consommation par usages d'une semaine de janvier en 2050 pour une chronique climatique possible

La situation en été (fig. 6) sera bien différente avec un solaire très important, qui reportera la charge des batteries prioritairement en milieu des journées ensoleillées, mais avec des valeurs d'appel de puissance du même ordre de grandeur.

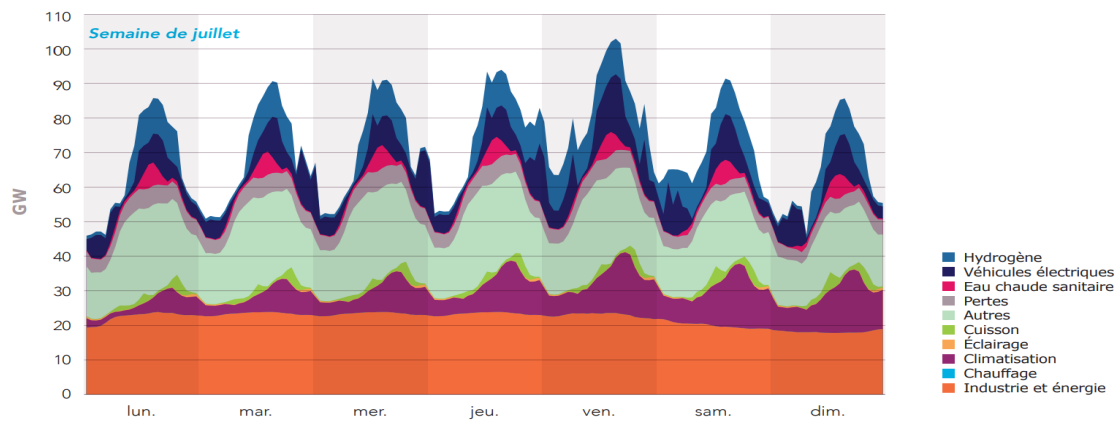


Fig. 6 - RTE oct. 2021 : Exemple de profil hebdomadaire de puissance de la consommation par usages d'une semaine de juillet en 2050 pour une chronique climatique possible

Ces structures de consommation sont très différentes de celles qui sont observées aujourd'hui (fig. 7), ce qui devrait impliquer un pilotage serré de l'équilibre consommation production, avec un nombre considérablement plus élevé de moyens de production (intermittents en particulier) et une grande diversité de situations en fonction des saisons et des conditions climatiques. C'est donc un système de gestion national centralisé considérable qui doit-être mis en place dès les années 2030 pour les recharges et dans les années 40 pour intégrer de plus le système « vehicle to grid ».

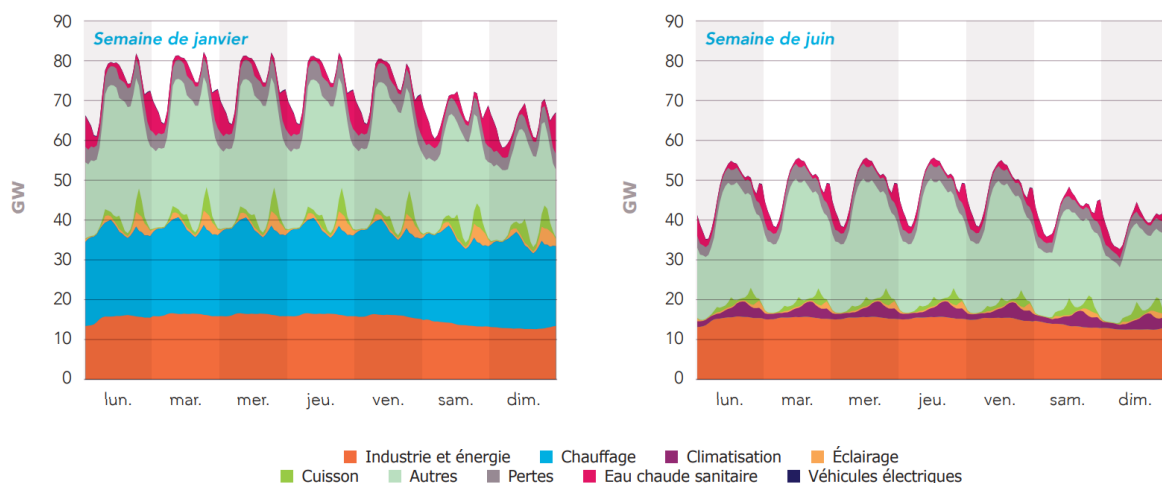


Fig. 7 - RTE oct. 2021 : les appels de puissance hebdomadaire en France en 2019, eu hiver et en été

Il est clair que cette vision du seul secteur des transports, avec les très importantes incertitudes et les développements technologiques majeurs qu'il va générer, doit être vu dans le contexte général de l'étude de RTE, avec une production d'énergie qui va être considérablement perturbée par l'importance de productions très variables, celles de l'éolien et du solaire. Celles-ci devraient croître de 31 GW actuellement (18,5 et 12,5 GW respectivement) à 110 GW en 2035 dans le scénario le plus raisonnable (52 et 47 GW respectivement), des scénarios plus ambitieux les portant à 170 GW au total, alors que le nucléaire serait en décroissance.

L'impact opérationnel de cette variabilité aléatoire des productions intermittentes ressort de la figure suivante (fig. 8) qui montre ce que les énergies pilotables (nucléaire, hydraulique et gaz essentiellement), devront fournir (courbe pointillée donnant les fournitures résiduelles). La puissance résiduelle à maîtriser, compte-tenu de l'importance de la capacité intermittente, peut être du même ordre de grandeur que la puissance totale appelée. Mais cette puissance peut devenir « très négative » quand il y a surproduction intermittente, ce qui signifie que les capacités pilotables doivent être mises à l'arrêt total et que les surplus doivent être stockés (batterie et hydrogène) ou

exportées: ce qui est irréaliste pour 2035. L'horizon temporel est dessiné par RTE, mais pas les voies pour y parvenir.

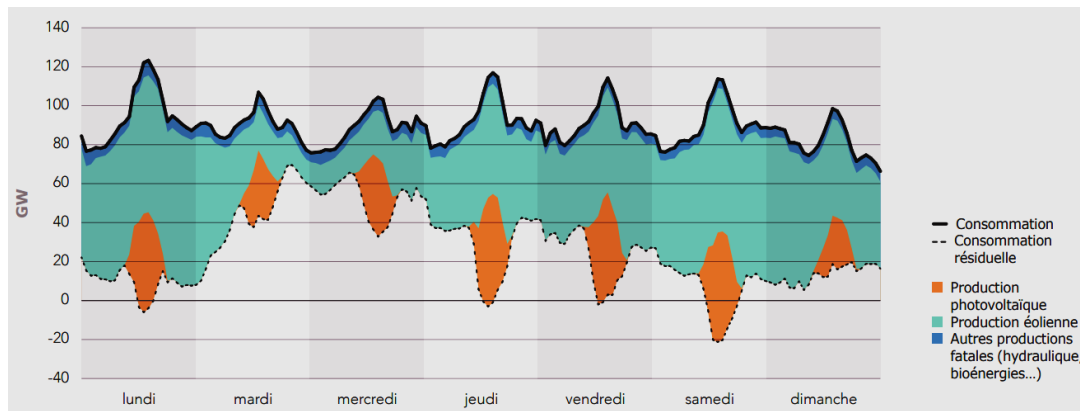


Fig. 8 - RTE oct. 2021 - Semaine d'hiver : écart entre consommation totale et consommation résiduelle

On voit clairement trois difficultés majeures :

- les installations pilotables, essentielles à la stabilité du réseau, sont sous-utilisées car devant s'effacer devant les électricités intermittentes,
- elles doivent cependant être présentes à haut niveau (70 GW), ce qui provoque une forte augmentation de leur prix,
- et elles sont soumises à des variations de puissance extrêmes, de plus de 40 GW quotidiennement et à des obligations d'effacement total.

On voit que la question de la gestion de l'électricité pour les transports, qui demande déjà une croissance considérable de moyens de pilotage « nationaux », n'est qu'une partie d'une gestion globale du réseau qui, dans les scénarios ADEME, fait appel à des puissances aléatoires considérables.

**En conclusion**, on ne peut évidemment pas apporter ici une réponse précise à la question posée, qui est celle de la puissance pilotable nécessaire à la recharge des batteries des VL, et de la quantité d'énergie qui devra les alimenter : nous sommes confrontés à une grande variabilité des hypothèses et à une incertitude sur leur réalisme. Toutefois, on peut raisonnablement situer la puissance électrique installée nécessaire à l'approvisionnement d'une flotte de VE d'environ 15 million de VE à l'horizon 2035, dans une fourchette minimale de **7 GWe** selon les hypothèses prises pour le pilotage de la recharge (mais sans le recours à la technologie V2G). Quant à la consommation elle se situe au niveau de 40 TWh en 2035, soit un peu moins de 10 % de la consommation totale actuelle

C'est en 2035 l'équivalent de 3 à 4 EPR de 1750 GWe chacun en ce qui concerne la puissance, et de 3,5 EPR en moyenne pour la production. Un vrai défi ! Et un défi considérable pour l'industrie automobile qui voit ses technologies remises en cause ainsi que ses accès aux matières et matériaux et équipements.