

## Électrification des véhicules terrestres en France à l'horizon 2050

### 1. QUE PRÉVOIT LA LTECV ET LA PPE POUR LE SECTEUR DE LA MOBILITÉ [Ref.1]

« La Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) » prévoit l'élaboration d'une **stratégie de développement de la mobilité propre**, volet annexé de la « Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) ».

Les émissions de gaz à effet de serre du secteur transport ont augmenté de 12,3 % en 2013 par rapport à 1990. **Il est nécessaire d'inverser cette tendance** et que le secteur des transports participe à l'objectif global de division par quatre des émissions à l'horizon 2050 par rapport à 1990.

**Les transports sont le deuxième secteur le plus consommateur d'énergie**, représentant 33 % de la consommation finale d'énergie française, derrière le secteur du bâtiment et devant le secteur de l'industrie. La consommation énergétique du secteur des transports était en 2012 de 49,06 Mtep (Méga tonne équivalent pétrole), avec 45,24 Mtep de produits pétroliers, 1,07 Mtep d'électricité, 2,66 Mtep d'énergies renouvelables et 90 000 tep de gaz.

**Les orientations et actions en matière de développement de la mobilité propre** prévoient notamment :

- Atteindre un parc de **2,4 millions de véhicules électriques et hybrides rechargeables en 2023, soit 4,8 millions en 2028** [Ref.2]
- Atteindre une part de **3 % des poids lourds roulant au GNV (Gaz Naturel pour Véhicules)** en 2023.
- Viser un **objectif d'incorporation pour les biocarburants avancés** de 1,6 % en 2018 et 3,4 % en 2023 pour l'essence, et de 1 % en 2018 et 2,3 % en 2023 pour le gazole, sous réserve qu'un ensemble de conditions soient réunies. »

Depuis le vote de ce décret, un plan de développement et d'accompagnement de solutions de mobilité utilisant l'hydrogène couplée aux piles à combustibles a été épaulé par l'Europe et le gouvernement français : c'est la voie H<sup>2</sup> + PAC citée ci-après.

### 2. OBJECTIFS DE LA STRATÉGIE NATIONALE BAS-CARBONE (SNBC) [Ref.3]

« **Le secteur des transports est aujourd'hui le premier secteur émetteur de gaz à effet de serre en France** (30 % des émissions nationales en 2015). Ces émissions étant en totalité de nature énergétique, la stratégie vise une réduction de 28 % des émissions en 2030 par rapport à 2015 et une décarbonation complète des transports à l'horizon 2050. »

Ce que disent la SNBC et son scénario de référence :

« En cohérence avec la transition énergétique du secteur visée, fixer des objectifs ambitieux en termes de performance énergétique des véhicules, à la fois pour les véhicules particuliers (objectifs de 4 l/100 km en 2030 en conditions réelles pour les véhicules thermiques et de 12,5 kWh/100 km à l'horizon 2050 pour les véhicules électriques contre environ 17,5 kWh/100 km aujourd'hui), les poids lourds (objectif de 21 l /100 km en 2040 en conditions réelles, soit près de 40 % de baisse par rapport à 2015). En 2040, 100 % des véhicules légers vendus devront être zéro-émission. »

NB : il vient d'être imposé par la commission européenne en juillet 2021 qu'il ne sera plus vendu de véhicules particuliers thermiques dès 2035 en Europe.

La figure 1 suivante, issue du rapport SNBC, présente un historique et une projection des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur des transports entre 1990 et 2050.

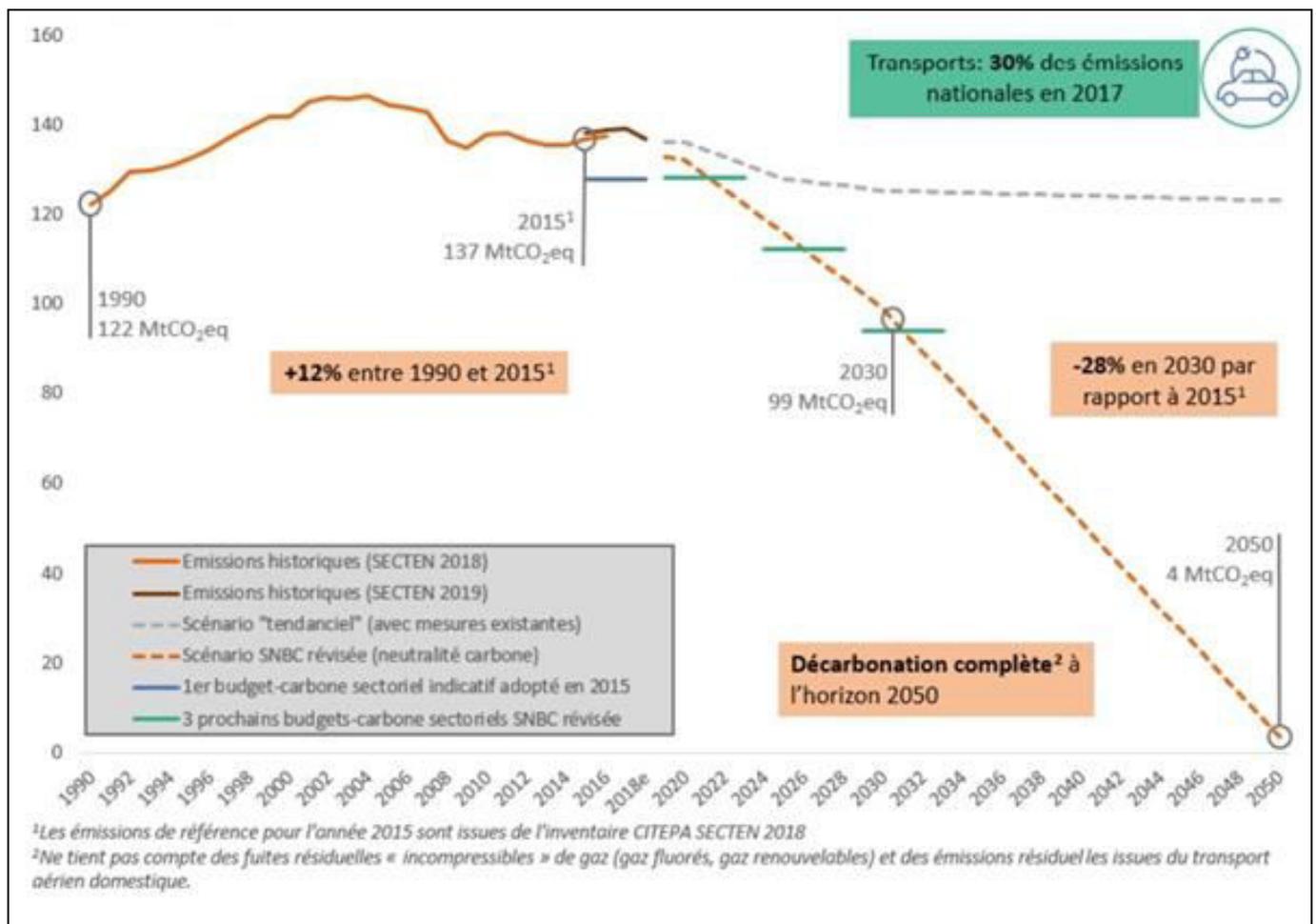


Figure 1 - Historique et projection des émissions du secteur des transports entre 1990 et 2050 (en MtCO<sub>2</sub>eq)

### 3. HYPOTHÈSES ENVISAGÉES

Pour la mobilité terrestre, trois voies de développement sont en concurrence dans la transition écologique actuelle :

- o l'électrique à batteries,
- o l'électrique à hydrogène (H<sup>2</sup>) via les piles à combustibles (PAC),
- o le biocarburant de synthèse (carboneutre) à partir de biométhane. Cette voie n'est pas abordée dans ce document.

Le parc automobile français en 2019 était de 27,7 millions de VP (véhicule particulier), 6 millions de VUL (véhicule utilitaire léger) et 600 000 de PL (poids lourd).

L'attente des automobilistes est de pouvoir utiliser leurs véhicules électriques de la même façon que leurs véhicules thermiques : déplacements longs et courtes distances, rechargements rapides et à la demande personnalisée sans contraintes ou restrictions. Les analyses actuelles constatent que les véhicules électriques ne sont utilisés que sur des courts parcours (parcours domicile centre-ville, domicile travail, essentiellement). Dans le futur, sans autre moyen de déplacement personnel (absence de transports en commun à la campagne, liaisons ferroviaires inadaptées, ...), il sera nécessaire de pouvoir parcourir des trajets sur de longues distances, comme c'est déjà le cas actuellement.

#### 3.1. La voie électrique à batteries

Si l'on remplace les 30 millions de VP par 30 millions de VE équipées de batteries et parcourant 10 000 km par an, dont la consommation moyenne est de 20 kWh/100 km, il faudrait produire une énergie de **60 TWh** par an.

Remarque : le chauffage de l'habitacle des voitures thermiques actuelles durant l'hiver est fourni gratuitement par les pertes thermiques des moteurs à explosion. Ce n'est pas le cas pour les voitures électriques qui doivent consommer

l'électricité de la batterie pour chauffer l'habitacle et il en est de même pour la climatisation en été.

Pour les voitures thermiques actuelles, la climatisation prend aussi son énergie sur la batterie mais cette dernière est rechargée en roulant ; néanmoins, il y a une consommation supplémentaire d'essence.

### 3.2. La voie hydrogène et pile à combustible (H<sup>2</sup> + PAC)

Si l'on remplace les 30 millions de VP par 30 millions de VE H<sup>2</sup> + PAC, parcourant 10 000 km par an, dont la consommation moyenne est de 1 kg d'hydrogène aux 100 km (soit 33 kWh), il faudrait produire une énergie de **99 TWh**, sachant que le rendement global du VE H<sup>2</sup> + PAC s'établit<sup>1</sup> à 25 % depuis l'alimentation des électrolyseurs.

En plus des véhicules automobiles il est envisagé la décarbonation de trains fonctionnant au fuel sur 15 000 km de lignes non électrifiées, soit 200 à 250 trains (sur les 1 100 trains et une partie des 15 000 km) à remplacer par des rames électriques H<sup>2</sup> + PAC après 2025 selon une étude de la SNCF [Ref.5]. Cela nécessiterait de disposer d'énergie électrique supplémentaire de l'ordre de 1,2 TWh<sup>2</sup> par an. Sachant que le transport ferroviaire représente seulement 0,4 % des émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports.

### 3.3. Comparaison des deux solutions électriques

La production électrique française annuelle totale actuelle est d'environ 537 TWh en 2019 (dont seulement 21,5 % par les EnR : hydraulique = 11,3 %, éolien = 6,3 %, solaire = 2,2 % et bioénergie = 1,8 %). La PPE prévoit une diminution du nombre de réacteurs nucléaires à partir de 2035 pour atteindre 50 % à l'horizon 2050. Elle prévoit aussi d'augmenter drastiquement la production d'énergie électrique par des éoliennes (offshore et on shore) et par des panneaux photovoltaïques (centrales, particuliers, ...).

Il est prévu aussi d'alimenter les électrolyseurs pour la production d'hydrogène exclusivement par des EnR avec les **inconvenients de l'intermittence que ne supportent pas les électrolyseurs** et l'hydraulique qui ne peut pas être utilisé en permanence (réserve minimale des lacs dépendant de la pluviométrie, utilisation pour les activités annexes, bassin de régulation de débit anti-inondation, variation du débit des rivières,...).

Seule la production d'électricité de façon continue et permanente peut être envisagée pour alimenter les électrolyseurs, et cela doit être produit sans émission de CO<sub>2</sub> soit par des réacteurs de puissance de type REP ou EPR et pourquoi pas par des SMR répartis sur le territoire ?

Les études RTE-AIE (Réseau de Transport d'Électricité – Agence Internationale de l'Énergie) prévoient une consommation de l'ordre de **630 TWh en 2050 qui ne tient compte que d'une partie sous-estimée des besoins dus à l'électrification des transports**. [Ref.5]

Un réacteur nucléaire EPR de 1600 MW fournit en moyenne annuelle 11 TWh (1600 MW x 7 000 h/an). D'où les besoins en réacteurs supplémentaires pour alimenter les véhicules électriques suite à l'abandon des carburants d'origine fossile :

- o véhicules à batteries seules : **60 TWh, soit la production équivalente à 5 ou 6 réacteurs EPR**
- o véhicules H<sup>2</sup> + PAC seules : **99 TWh, soit la production équivalente à 9 réacteurs EPR**

La solution H<sup>2</sup> + PAC est la seule capable de stocker des quantités d'énergie nettement supérieure à celles des batteries pour les liaisons longues distances (camions, trains, ...).

<sup>1</sup> Il est nécessaire de prendre en compte tout ou partie des paramètres suivants :

- le rendement de l'alimentation des électrolyseurs : 98 %
- le rendement de l'unité d'électrolyse : 60 %
- le rendement de la distribution de l'hydrogène aux stations-services : 89 %
- le rendement des PAC : 47,5 %

Le rendement global de la voie H<sup>2</sup> + PAC est donc de :  $0,98 \times 0,60 \times 0,89 \times 0,475 = 25 \%$

<sup>2</sup> En 2019, 430 000 000 km ont été parcourus par tous les trains SNCF sur le réseau électrifié ou non de 30 000 km. Les trains alimentés par du fuel ont parcouru moins de 20 % de ce kilométrage sur 15 000 km de lignes non électrifiées. Une rame H<sub>2</sub> consomme environ 25 kgH<sub>2</sub> / 100 km (valeur moyenne mesurée sur les rames en exploitation Coradia i-Link en Allemagne depuis 2 ans). Si on imagine d'alimenter en H<sub>2</sub> tous les trains roulant au fuel, on devrait fournir la quantité d'H<sub>2</sub> suivante :  $430\,000\,000\text{ km} \times 0,2 \times 25\text{ kgH}_2 / 100 \times 0,01 = 21\,500\,000\text{ kgH}_2$  soit 21 500 tH<sub>2</sub>

Le rendement moyen de l'électrolyseur est de 56 kWh/kgH<sub>2</sub>, cela implique de générer une énergie de :  $21\,500\,000\text{ kgH}_2 \times 56\text{ kWh/kgH}_2 = 1\,204\,000\,000\text{ kWh} = 1,2\text{ TWh/an}$

Dans l'hypothèse d'un mix comportant 90 % de véhicules à batteries et 10 % de véhicules H<sup>2</sup> + PAC, les besoins annuels en énergie électrique s'élèveraient à environ **64 TWh** (60 x 0,90 + 99 x 0,10). Les besoins en réacteurs nucléaires seraient encore de **8 réacteurs EPR**.

De plus, le passage aux véhicules électriques, y compris H<sup>2</sup> + PAC, nécessite une modification totale des chaînes de construction de véhicules et de distribution de l'énergie (passage de carburants liquides à l'électricité et à l'H<sub>2</sub>) et doter des stations-service d'électrolyseurs assurant sur place la production d'hydrogène posera de graves problèmes d'exploitation. Il existe certes de petits électrolyseurs d'un mégawatt mais ils sont complexes à exploiter (poste électrique, électrolyseur, unité de purification et de compression, stockage, ...). **Ce sont des unités de production chimiques de type Seveso ICPE (installations classées pour la protection de l'environnement) interdites en ville.** Leur mise en œuvre ne peut se faire que dans de grands espaces.

Par ailleurs, les temps de recharge des batteries électriques, même à l'aide des bornes ultra-rapides (**environ 20 min par charge pour retrouver 80 % de sa capacité** et type de charge en nombre limitée pour préserver la longévité de la batterie) **occasionnera des embouteillages monstres aux stations-services** notamment sur les aires d'autoroutes !

#### 4. PUISSANCE NÉCESSAIRE À LA RECHARGE DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Une étude RTE-ENEDIS aborde les conditions d'équipement des stations-services d'autoroute en bornes de recharges<sup>3</sup>. Cette étude est intéressante mais elle ne traite que des autoroutes et donc que des « grands voyages ». Beaucoup de véhicules électriques rouleront tous les jours sur des trajets domicile-travail et autres motifs de déplacement, il faudra donc les recharger régulièrement. Comment estimer la puissance nécessaire à ce flux permanent de recharge ?

Il est possible de faire des simulations à partir de plusieurs hypothèses :

- pourcentage du parc en recharge simultanément,
- puissance des bornes utilisées,
- pourcentage de véhicules branchés sur les différentes bornes.

Les tableaux de la page suivante présentent des simulations à partir d'hypothèses tout à fait arbitraires montrant les puissances nécessaires en fonction du nombre de véhicules se rechargeant simultanément selon les trois types de bornes de recharge existantes. Les puissances disponibles nécessaires vont de 64 à 155 GW.

Les simulations faites mettent en évidence la nécessité de disposer d'une puissance de plusieurs dizaines de GW, ce qui est considérable. Elles mettent également en évidence qu'il sera nécessaire de mettre en œuvre un système de régulation et lequel ? Créneaux horaires ? Modulation de la tarification ?

Les pointes de demande de puissance électrique actuelles sont localisées dans le temps, il n'en serait pas de même des pointes qui seraient liées à la recharge des véhicules électriques car elles seraient aléatoires et risqueraient même d'être en partie synchrones avec les pointes domestiques (recharge au retour du travail).

#### 5. CONCLUSION

Le programme gouvernemental d'élimination des émissions de CO<sub>2</sub> fossile pour les transports terrestres au plus tard en 2050 par l'électrification des véhicules terrestres n'est pas réalisable dans l'état actuel des prévisions et des moyens de production électrique en place si l'on en reste à la décarbonation complète des transports terrestres. Une solution consisterait à mettre en chantier de nombreux réacteurs EPR à partir de 2025 pour une mise en service à partir de 2035 pendant plusieurs années jusqu'en 2050 et au-delà.

#### 6. SOURCES

[1] LTECV et PPE

[2] GAÉNA [fiche d'actualité N° 11](#) « L'objectif de 4 800 000 véhicules électriques en 2028 prévu par le Plan Stratégique pour l'Énergie et le Climat est-il atteignable ? Analyse, impacts »

[3] SNBC

[4] Benoît SIMIAN « le verdissement des matériels roulants du transport ferroviaire en France » - novembre 2018

[5] Projet RTE – AIE sur l'aspect en besoins en énergie électrique – janvier 2021

<sup>3</sup> <https://www.rte-france.com/actualites/mobilite-electrique-longue-distance-developpement-bornes-recharge-rapide-autoroute>

Parc VE : 30 000 000

	% du parc en charge simultanément					
	40 %		30 %		20 %	
Puissance des bornes (kW)	% par type de borne	Puissance (GW)	% par type de borne	Puissance (GW)	% par type de borne	Puissance (GW)
40	10 %	48	10 %	36	10 %	24
20	20 %	48	20 %	36	20 %	24
7	70 %	59	70 %	44	70 %	29
<b>Puissance totale (GW)</b>		<b>155</b>		<b>116</b>		<b>77</b>

	% du parc en charge simultanément					
	40 %		30 %		20 %	
Puissance des bornes (kW)	% par type de borne	Puissance (GW)	% par type de borne	Puissance (GW)	% par type de borne	Puissance (GW)
40	5 %	24	5 %	18	5 %	12
20	25 %	60	25 %	45	25 %	30
7	70 %	59	70 %	44	70 %	29
<b>Puissance totale (GW)</b>		<b>143</b>		<b>107</b>		<b>71</b>

	% du parc en charge simultanément					
	40 %		30 %		20 %	
Puissance des bornes (kW)	% par type de borne	Puissance (GW)	% par type de borne	Puissance (GW)	% par type de borne	Puissance (GW)
40	5 %	24	5 %	18	5 %	12
20	15 %	36	15 %	27	15 %	18
7	80 %	67	80 %	50	80 %	34
<b>Puissance totale (GW)</b>		<b>127</b>		<b>95</b>		<b>64</b>