Groupe de travail 7
« Flexibilité »

•

Cadrage des hypothèses sur la mobilité électrique

Document de travail

Table des matières

Table des matières 2

1 Contexte et objectifs 4

1.1 Cadre général 4

1.2 Objectifs du groupe de travail « Flexibilité » 5

1.3 Etat des lieux des travaux sur la mobilité électrique 7

2 L'évolution des besoins de transport de passagers et des parts modales associées 10

3 Caractéristiques et mobilité des véhicules légers électriques (véhicules particuliers et utilitaires légers) 13

3.1 Le parc et les technologies aujourd'hui 13

3.2 Les trajectoires d'évolution du parc total à l'horizon 2050 14

3.3 La répartition entre les différents types de motorisation 15

3.4 L'évolution des batteries 17

3.5 L'évolution des consommations kilométriques 19

3.6 L'évolution des comportements de mobilité 20

3.7 Accès aux points de charge 25

3.8 Puissance des points de charge 26

3.9 Comportements de connexion des utilisateurs 27

3.10 Pilotage de la charge et *vehicle-to-grid* 29

4 Caractéristiques et mobilité des autobus et autocars électriques 32

4.1 Le parc et les technologies aujourd'hui 32

4.2 Besoins de mobilité et parc total de véhicules à l'horizon 2050 33

4.3 La répartition entre les différentes technologies pour les bus et autocars 34

4.4 Les hypothèses sur la fréquence de connexion des bus et autocars 38

4.5 L'évolution des batteries pour les bus et autocars électriques 39

4.6 Puissances de recharge des bus et autocars 41

4.7 Consommations unitaires des bus et autocars 42

4.8 Comportements de mobilité des bus et autocars 44

5 Caractéristiques et mobilité des camions électriques 48

5.1 Besoins de mobilité associés au transport de marchandises 48

DOCUMENT DE TRAVAIL

5.2 Le parc de camions aujourd'hui 50
5.3 La répartition actuelle des camions selon leur motorisation 51
5.4 Les trajectoires de parc à l'horizon 2050 53
5.5 Fréquence de connexion 56
5.6 Les caractéristiques des batteries de camions électriques 57
5.7 Puissances de recharge des camions électriques 59
5.8 Consommations unitaires des camions 61
5.9 Comportements de mobilité des camions 62

6 Références 64

DOCUMENT DE TRAVAIL

1 Contexte et objectifs

1.1 Cadre général

Dans le cadre de ses missions prévues par le Code de l'énergie, RTE établit périodiquement un Bilan prévisionnel pluriannuel de l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité en France. Celui-ci contribue à l'élaboration de la politique énergétique, en éclairant le paysage du système électrique à long terme.

Pour répondre à des demandes de certaines parties prenantes, le prochain Bilan prévisionnel à long terme intégrera un volet portant sur l'horizon 2050 et proposera des scénarios d'évolution possibles du mix électrique français, dans un contexte de transition énergétique et d'ambition de l'atteinte de la neutralité carbone de la France à ce même horizon, portée par la Stratégie nationale bas carbone (SNBC).

Les premiers éléments de cadrage pour la construction des scénarios à horizon 2050 ont été présentés par RTE et discutés avec l'ensemble des parties prenantes au cours des réunions plénières de la Commission perspectives système et réseau (CPSR)[1] qui se sont tenues les 17 mai et 27 septembre 2019 et le 28 février 2020.

La gouvernance des travaux d'élaboration des scénarios 2050 est articulée autour de plusieurs piliers, visant notamment à renforcer la transparence et la robustesse des analyses :

- **la CPSR**, qui sert d'instance de cadrage stratégique des travaux, et d'arbitrage des orientations ;
- **neuf groupes de travail thématiques,** lancés depuis juin 2019 et réunissant l'ensemble des experts et parties prenantes intéressées sur des thématiques précises, notamment : la consommation, la base climatique, la scénarisation, le couplage entre les différents vecteurs, la modélisation de la production, les flexibilités, les dynamiques sociétales, l'analyse environnementale, l'évaluation économique ou encore le fonctionnement technique du système et du réseau ;
- **une consultation publique** très large, structurée sous forme d'un appel à contributions prévu pour l'été 2020 et qui viendra enrichir les échanges initiés dans les premiers groupes de travail.

De nombreuses réunions des groupes de travail ont déjà eu lieu et d'autres réunions thématiques s'étaleront tout au long de l'année 2020.

Pour chacun de ces ateliers, RTE diffuse un document de cadrage visant à présenter de manière synthétique la méthodologie et les jeux d'hypothèses envisagés pour la construction des scénarios. Le document présent porte sur le cadrage de l'analyse du gisement de flexibilité associé aux recharges de véhicules électriques.

[1] Les supports de présentation des réunions plénières de la CPSR sont disponibles sur le site de la concertation : https://www.concerte.fr/content/actualité-de-la-commission-perspectives-système-et-réseau

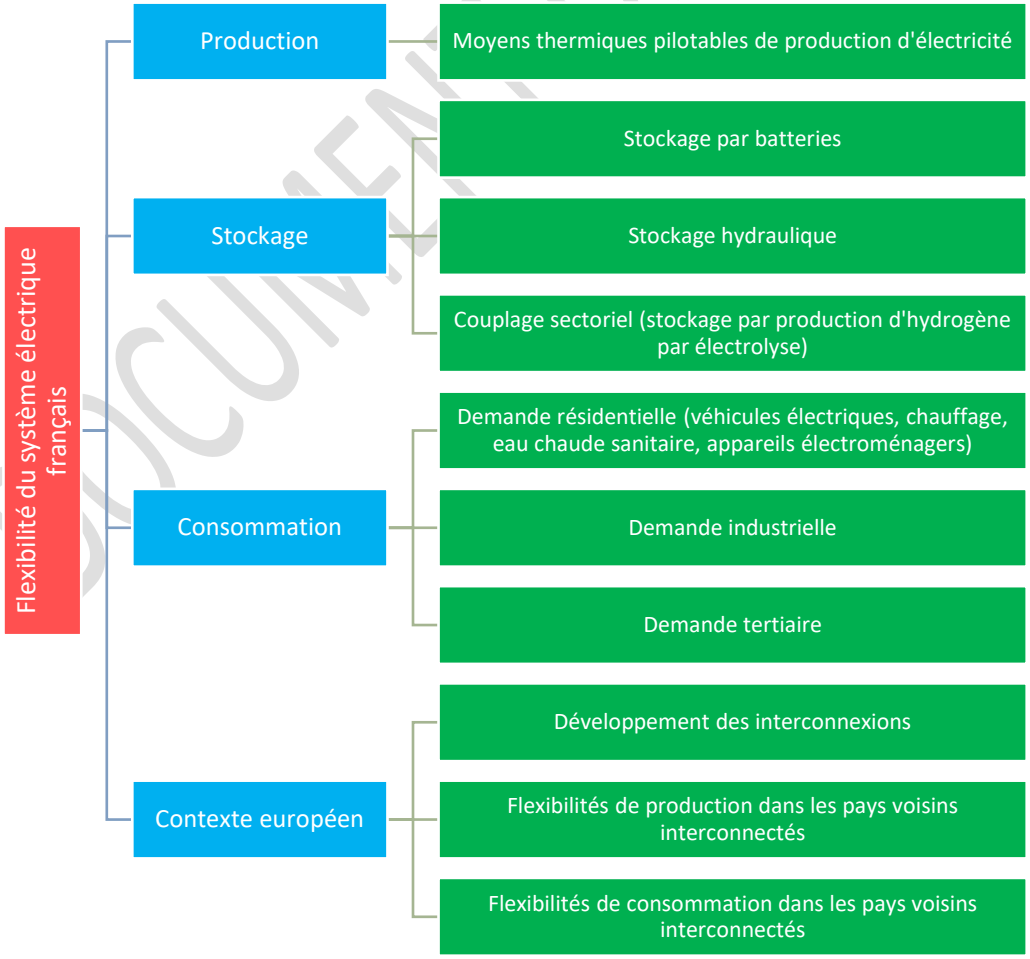
DOCUMENT DE TRAVAIL

1.2 Objectifs du groupe de travail « Flexibilité »

Comme cela a été évoqué dans le cadre de précédentes réunions de concertation, le prochain Bilan prévisionnel de long terme examinera des scénarios contrastés pour l'évolution du mix électrique, en lien avec les objectifs de la neutralité carbone. Dans tous les cas, les scénarios seront caractérisés par une part croissante d'énergies renouvelables variables (éolien et solaire) dans le mix en France mais également sur le reste de l'Europe interconnectée.

Cette diversification du mix rend nécessaire une analyse approfondie des enjeux liés à la sécurité d'approvisionnement. La variabilité de la production solaire et éolienne soulève ainsi de nouvelles problématiques et il convient donc de pouvoir caractériser finement les besoins de flexibilité du système électrique et d'estimer les gisements de flexibilité disponibles aux différents horizons temporels pour garantir la sécurité d'approvisionnement.

Ceci inclut la prise en compte des contraintes associées à ces flexibilités, comme par exemple leur acceptabilité ou les coûts de mise à disposition et d'activation. Les gisements de flexibilité étudiés seront notamment le pilotage de la demande d'électricité (effacements de consommations, recharge des véhicules électriques, etc.), le stockage (batteries, hydraulique…), le couplage sectoriel (*power-to-gas-to-power*) et la production des centrales thermiques pilotables. Un autre facteur fondamental pour l'analyse de flexibilité est le degré d'interconnexion des pays européens : des capacités d'échange plus élevées permettent d'une part le foisonnement des productions variables, en réduisant donc les besoins de flexibilité dans chaque pays, et d'autre part la mise en commun des gisements de flexibilité avec les pays voisins, en réduisant le volume de moyens nécessaires.



DOCUMENT DE TRAVAIL

Les différents leviers mobilisables peuvent être complémentaires. En effet, les besoins de flexibilité pour garantir l'équilibre du système électrique en tenant compte des fluctuations de la consommation et des productions variables dépendent de l'horizon considéré (journalier, hebdomadaire, saisonnier). Etant donné leurs caractéristiques techniques (contraintes de stock, de disponibilité, de délai de mobilisation, etc.), les leviers de flexibilité identifiés peuvent fournir différents types de services et répondre à des besoins de différentes natures.

Dans le cadre de l'élaboration des scénarios 2050 du Bilan prévisionnel, l'étude des problématiques de flexibilité sera structurée autour de trois axes :

1- **Une caractérisation des besoins de flexibilité dans les différents scénarios d'étude** : des premiers éléments méthodologiques ont par exemple été présentés dans le cadre des réunions du groupe de travail sur les interfaces entre l'électricité et les autres vecteurs[2]. Cette description des besoins de flexibilité sera reprise et appliquée aux nouveaux scénarios d'étude du Bilan prévisionnel à l'horizon 2050.
2- **Une définition des hypothèses et caractéristiques associées aux différents leviers de flexibilité considérés** (stockage, flexibilité de la demande, capacités de production…) : gisement, coûts, contraintes, acceptabilité, etc. En particulier, différents niveaux possibles de flexibilisation des usages seront intégrés dans l'étude, en cohérence les réflexions sur les évolutions des comportements, modes de vie et structures sociétales, et l'acceptabilité ou la volonté des consommateurs de flexibiliser leurs usages.
3- **Une analyse technico-économique sur les volumes de flexibilité à mobiliser pour répondre aux besoins identifiés dans les différents scénarios** et assurer la sécurité d'approvisionnement : cette analyse sera basée sur des éléments économiques permettant d'estimer la pertinence des différentes solutions. Elle constituera la mise en relation et la synthèse des travaux des deux premiers axes.

Un des enjeux de cette analyse sera d'apporter un éclairage sur le développement nécessaire des flexibilités dans les différents scénarios visant la neutralité carbone mais également d'identifier les échéances auxquelles ces flexibilités doivent être développées.

La première réunion du groupe de travail prévue le 29 mai 2020 porte essentiellement sur le cadrage des hypothèses concernant le développement de la mobilité électrique et la flexibilité sur la recharge des véhicules électriques. A long terme, le pilotage de la recharge des véhicules électriques constituera en effet une des principales sources de flexibilité du système électrique. Cet usage fait donc l'objet de travaux d'analyse spécifiques, dans le prolongement des études déjà menées sur ce sujet au cours des dernières années (voir ci-dessous).

Les réunions suivantes porteront sur la description des autres sources de flexibilité du système, notamment la flexibilité de la demande sur les autres usages (chauffage, eau chaude sanitaire, usages industriels et tertiaires…).

[2] Voir en particulier le document de cadrage sur les interfaces entre l'électricité et les autres vecteurs (section 5) https://www.concerte.fr/system/files/document_travail/2019%2012%2019%20-%20GT%20interfaces%20%C3%A9lectricit%C3%A9%20autres%20vecteurs%20-%20document%20de%20travail%20v2.pdf

DOCUMENT DE TRAVAIL

1.3 Etat des lieux des travaux sur la mobilité électrique

Les recharges des véhicules électriques présentent des enjeux importants pour le système électrique en raison des consommations d'énergie et des appels de puissance attendus en cas de développement massif de la mobilité électrique. RTE avait déjà fourni une première évaluation de l'impact du développement de l'électromobilité sur le système électrique dans l'édition 2017 du Bilan prévisionnel, avec des trajectoires contrastées atteignant entre 3,5 et 15,6 millions de véhicules électriques à l'horizon 2035. Ces premières analyses avaient démontré la faculté du système à accueillir 15 millions de véhicules électriques d'ici 2035 sans difficulté majeure. En particulier, la consommation d'énergie totale des véhicules ne présenterait aucune difficulté, dans un contexte de baisse des consommations sur d'autres usages grâce à la progression de l'efficacité énergétique.

Un point d'attention avait été identifié concernant les appels de puissance aux moments des pointes de consommation du soir en hiver, mais les analyses avaient montré que le pilotage, même simple (tarif heures pleines/heures creuses) des recharges d'une partie du parc de véhicules suffirait à lever toute incertitude concernant la sécurité d'approvisionnement. Ces analyses se fondaient sur une représentation simplifiée des comportements de mobilité des utilisateurs et de leurs comportements de recharge.

Suite à la publication des résultats du Bilan prévisionnel 2017, de nombreuses parties prenantes ont demandé un approfondissement des analyses, en particulier concernant certains points tels que les impacts des déplacements lors des grands départs en vacances, l'évaluation de la valeur économique de la flexibilité des recharges ou encore les enjeux pour le consommateur et pour l'environnement.

RTE, en copilotage avec l'AVERE-France (association nationale pour le développement de la mobilité électrique), a donc mis en place en 2018 un groupe de travail sur l'analyse des enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique. Ce groupe de travail a réuni l'ensemble des parties prenantes intéressées par la mobilité électrique et a notamment alimenté les travaux d'approfondissement sur les enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique, dont les principaux résultats ont été publiés dans un rapport [1] en mai 2019 (un rapport détaillé sera publié à l'été 2020). 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.

Ce document reprend les principes et hypothèses de modélisation retenues dans ces travaux (à l'horizon 2035), pour proposer un cadrage des hypothèses à l'horizon 2050. L'intégration des scénarios de mobilité électrique dans les scénarios représentant le fonctionnement du système électrique à l'horizon 2050 se fonde sur un module de simulation du comportement des véhicules électriques. Les besoins de recharge des véhicules, ainsi que leurs comportements de connexion, sont ensuite intégrés dans le modèle de simulation du fonctionnement du système électrique à l'échelle européenne, qui permet de représenter également la flexibilité des recharges.

DOCUMENT DE TRAVAIL

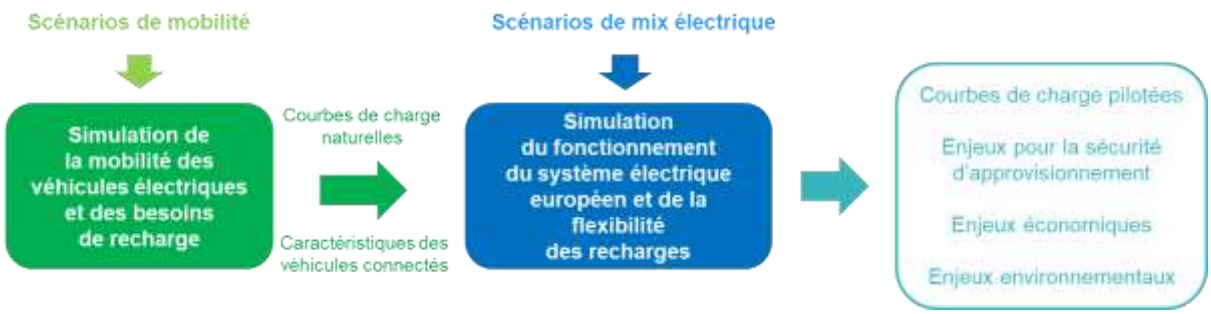


Figure 1 : principes de la modélisation de la flexibilité des recharges

Trois grandes catégories de véhicules, sur la base de caractéristiques similaires en matière de distances, consommation et autonomie, sont considérées : les véhicules légers, les bus/autocars et les camions. Les premiers incluent les voitures particulières et les véhicules utilitaires légers (VUL), ayant un poids inférieur à 3,5t (camionnettes, etc.). Les camions sont des véhicules dont le poids en charge est supérieur à 3,5t. En effet, ce sont les recharges de ces trois grandes catégories de véhicules qui présentent les enjeux les plus importants pour le système électrique.

En particulier, c'est le segment des véhicules légers qui représente le gisement de flexibilité le plus important, vu le nombre de véhicules particuliers électriques qui devraient être en circulation et la flexibilité potentiellement importante sur la recharge pour ce type de véhicules, comme l'a montré le rapport publié en mai 2019.

Sur le segment des poids lourds pour le transport de marchandises longue distance, l'analyse nécessite des travaux spécifiques. Toutefois, même si les bus et encore plus les camions présentent des consommations kilométriques élevées, des tailles de batteries et des puissances de recharge importantes, leur nombre plus limité et les trajectoires d'électrification envisageables (en particulier concernant les camions) font que les enjeux liés à ces deux catégories seront moins importants que ceux liés aux véhicules légers.

Les travaux d'approfondissement publiés en 2019 se fondaient sur une représentation très détaillée de la mobilité légère, accompagnée d'une représentation simplifiée de la mobilité et des caractéristiques des véhicules lourds électriques pour l'horizon 2035. En raison du développement plus important attendu pour la mobilité lourde électrique en 2050, ce document présente également des hypothèses détaillées concernant les poids lourds (bus, autocars et camions) électriques.

La section 3 de ce document est consacrée aux caractéristiques des véhicules légers, les sections 4 et 5 abordent les véhicules lourds.

DOCUMENT DE TRAVAIL

Tableau 1 : Caractérisation des scénarios de développement de la mobilité électrique proposés par RTE : nombre de véhicules électriques (tout-électriques ou hybrides rechargeables) et consommations d'énergie. Les chiffres relatifs au scénario de référence se fondent sur une estimation de RTE des trajectoires de parc SNBC

	2035		2050		Paramètres les plus dimensionnants pour la flexibilité de la recharge	Principales variantes envisagées
	Nombre (part du parc)	TWh	Nombre (part du parc)	TWh		
Véhicules légers (VP et VUL)	**Référence : ~ 15 M (40%)** *Variante électrification modérée :* ~ 12 M (32%)	**Référence : ~ 35 TWh** *Variante électrification modérée :* ~ 25 TWh	**Référence : ~ 36 M (95%)** *Variante électrification modérée :* ~ 29 M (76%)	**Référence : ~80 TWh** *Variante électrification modérée :* ~ 65 TWh	• Nombre de véhicules • Fréquence de connexion • Puissance des points de charge • Part des recharges pilotées • Développement de la recharge bidirectionnelle (V2G)	• Flexibilité maximale (paramètres favorables pour le système électrique) • Recharges contraintes (basse acceptabilité du pilotage, faible développement des technologies V2G, …)
Camions	**Référence : ~ 20 000 (4%)** *Variante forte électrification :* ~ 130 000 (23 %)	**Référence : ~ 1 TWh** *Variante forte électrification :* ~ 7 TWh	**Référence : ~145 000 (25%)** *Variante forte électrification :* ~ 250 000 (43%)	**Référence : ~ 6 TWh** *Variante forte électrification :* ~ 10 TWh	• Fréquence et durée de connexion • Puissance des points de recharge • Taille des batteries • Part des recharges pilotées	• Développement des caténaires routières électriques pour les transports « longue distance » • Développement des camions à hydrogène pour la mobilité « longue distance »
Bus	**Référence : ~ 10 000 (21%)** *Variante électrification modérée : ~ 6000 (12%)*	**Référence : ~ 1 TWh** *Variante électrification modérée : < 1 TWh*	**Référence : ~ 50 000 (80%)** *Variante électrification modérée : ~ 30 000 (50%)*	**Référence : ~ 4 TWh** *Variante électrification modérée : ~ 2 TWh*	• Type de recharge (dépôt ou biberonnage) • Taille des batteries • Puissances de connexion	• Électrification modérée • Recharge par biberonnage généralisée
Autocars	**Référence : ~ 15 000 (18%)** *Variante électrification modérée : ~ 9 000 (11%)*	**Référence : ~ 1 TWh** *Variante électrification modérée : < 1 TWh*	**Référence : ~ 30 000 (35%)** *Variante électrification modérée : ~ 15 000 (16%)*	**Référence : ~ 2 TWh** *Variante électrification modérée : ~ 1 TWh*	• Taille des batteries • Puissances de connexion	• Électrification modérée • Développement des caténaires routières électriques pour les déplacements « longue distance »

2 L'évolution des besoins de transport de passagers et des parts modales associées

Le trafic global de passagers s'est élevé en 2018 à 945 Gpkm (source : compte des transports, SDES). La répartition modale de ce trafic global montre une très large prépondérance de la voiture particulière (cf. Figure 2).

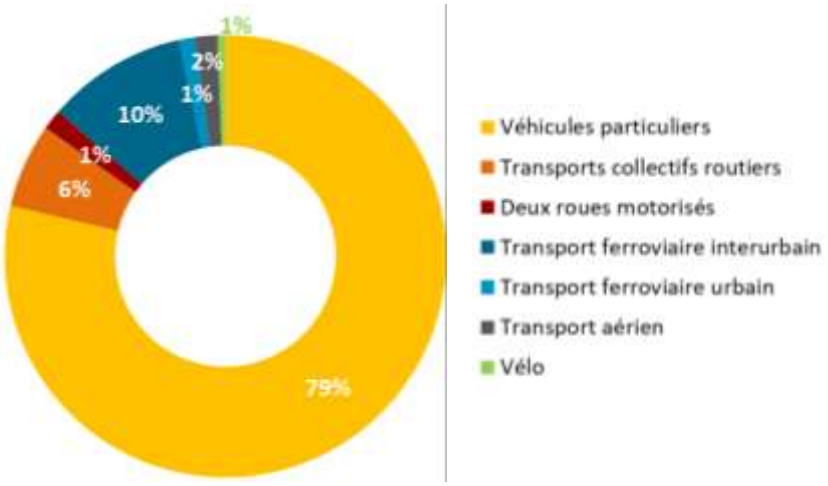


Figure 2 : Parts modales du transport de passagers en 2018

Ce trafic global de passagers s'inscrit à la hausse depuis plusieurs décennies : il a ainsi crû de 0,9% par an en moyenne entre 1990 et 2018. Cette évolution peut être décomposée en deux périodes : entre 1990 et 2002, le rythme moyen de croissance a été d'environ 1,5% par an ; il s'est par la suite ralenti pour s'établir à 0,4% entre 2002 et 2018 (cf. Figure 3).

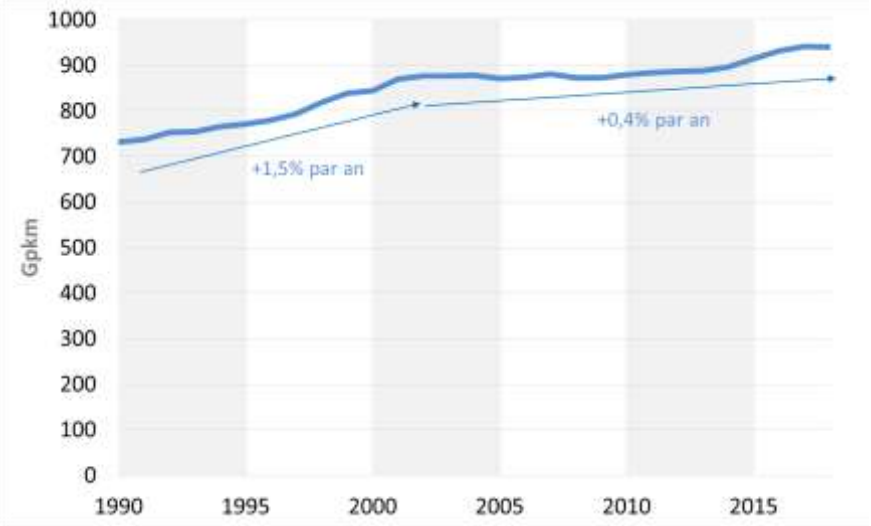


Figure 3 : Evolution historique du trafic de passagers

L'évolution démographique ayant été assez régulière sur la période, cette inflexion est essentiellement due à une relative stagnation, depuis le tournant des années 2000, du besoin moyen de mobilité par personne en France (cf. Figure 4), après une période de croissance quasi continue.

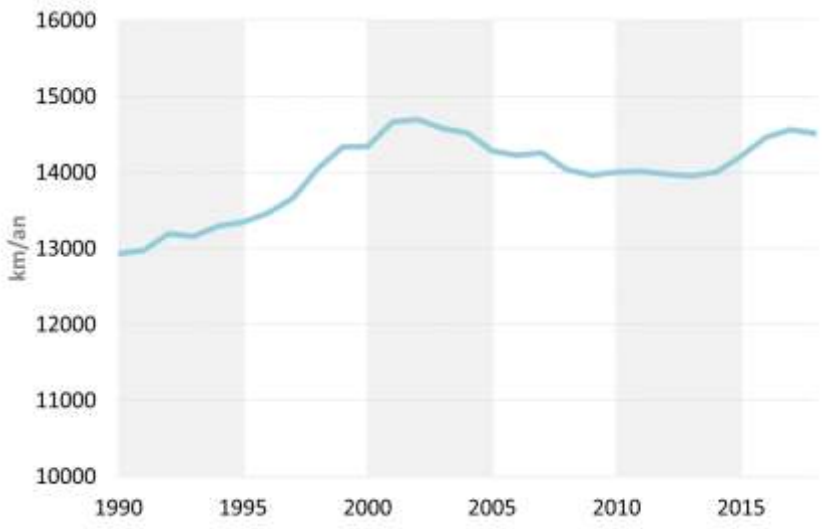


Figure 4 : Evolution historique du besoin moyen de mobilité par personne

Les hypothèses d'évolution proposées pour l'élaboration des scénarios du Bilan prévisionnel sont en ligne avec celles de la trajectoire AMS de la SNBC à l'horizon 2030 et supposent une légère croissance du besoin de mobilité par personne. Au-delà de 2030, ce niveau de croissance du besoin de mobilité par personne est prolongé jusqu'en 2050, sans inflexion, pour atteindre 15070 km/an en 2050.

Cette hypothèse est légèrement en écart avec la trajectoire AMS de la SNBC qui table sur une accélération de la croissance du besoin de mobilité par personne au-delà de 2030, hypothèse apparemment forte au vu de la relative stabilité de ce besoin depuis une vingtaine d'années.

Combinée avec l'évolution du scénario démographique central de l'INSEE (70,8 millions d'habitants en France métropolitaine en 2050), cette hypothèse se traduirait par une croissance modérée du trafic de passagers en France pour atteindre 1070 Gpkm en 2050, soit une hausse de près de 13% par rapport à 2018.

Ce chiffre est légèrement plus bas que celui de la trajectoire AMS de la SNBC (1157 Gpkm en 2050) compte tenu de la moindre croissance du besoin de mobilité par personne retenue. Une variante testant ce niveau plus élevé de trafic de passagers pourra toutefois être analysée en détails si les parties prenantes en manifestent le souhait. De même, une variante avec une sobriété plus importante sur le besoin de mobilité pourrait également être intégrée à l'analyse.

Les hypothèses d'évolution des parts modales sont en phase avec celles du scénario SNBC. Elles se traduisent par une contraction de la part des véhicules particuliers, au profit des modes collectifs (intégrant le Grand Paris express, qui renforce significativement l'offre avec des nouvelles lignes) et de la mobilité douce (cf. Figure 5). Ces hypothèses pourront également faire l'objet de variantes, avec des reports modaux plus ou moins importants que dans les projections de la SNBC.

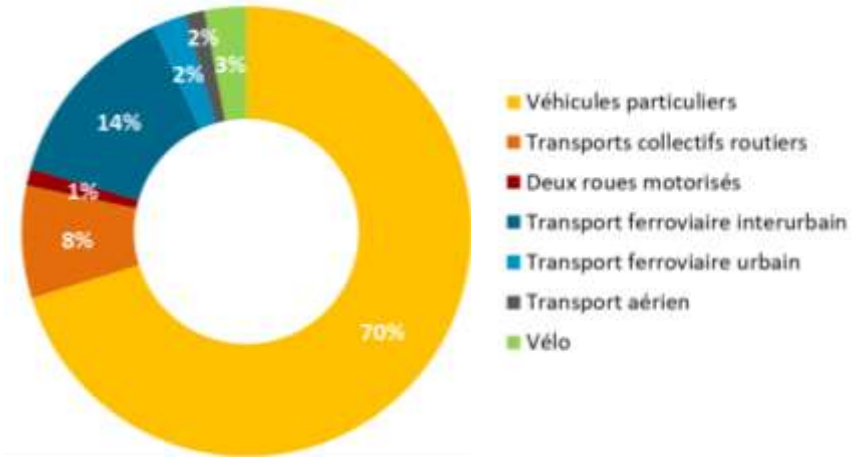


Figure 5 : Parts modales du transport de passagers en 2050

Le Tableau 2 fait la synthèse des principales hypothèses sur le trafic de passagers.

	2018	2050
Population France *(millions)*	64,7	70,8
Besoin annuel moyen de mobilité par personne *(km)*	14600	15070
Trafic total passagers *(Gpkm)*	945	1070
Parts modales :		
Véhicules particuliers	*78,7%*	*70,2%*
Transport routier collectif	*6,2%*	*8,1%*
Deux roues motorisés	*1,5%*	*1,2%*
Transport ferré interurbain	*10,3*	*13,7%*
Transport ferré urbain	*1,1%*	*2,4%*
Transport aérien	*1,7%*	*1,4%*
Vélo, mobilité douce	*0,6%*	*3,0%*

Tableau 2 : Principales hypothèses sur le trafic de passagers à l'horizon 2050

3 Caractéristiques et mobilité des véhicules légers électriques (véhicules particuliers et utilitaires légers)

L'analyse du développement de l'électromobilité et de ses impacts sur le système électrique a fait l'objet de travaux menés dans le cadre d'un large groupe de travail, piloté par RTE en collaboration avec AVERE-France. Ces travaux ont été restitués dans un rapport, publié en mai 2019, et qui sera prochainement complété par un rapport technique détaillant les éléments de modélisation avec une granulométrie fine.

Le présent document reprend les principes de modélisation utilisés pour ces travaux, en les prolongeant à l'horizon 2050.

3.1 Le parc et les technologies aujourd'hui

En 2018, le parc de véhicules particuliers et utilitaires légers, toutes motorisations confondues, s'établissait en France à 38,9 millions d'unités : 32,7 millions de véhicules particuliers et 6,2 millions de véhicules utilitaires légers.

Le parc de véhicules particuliers suit une trajectoire haussière (+40% entre 1990 et 2018), liée à l'accroissement de la population (et plus précisément du nombre de ménages : +34% entre 1990 et 2018) et à l'augmentation du taux d'équipement des ménages (1,13 véhicule particulier par ménage en 2018 contre 1,07 en 1990). Ce taux avait toutefois atteint 1,17 en 2003 avant de s'infléchir et d'entamer une légère baisse, témoignant d'une évolution dans le rapport à l'automobile.

Le parc actuel de véhicules particuliers utilise majoritairement le gazole comme source d'énergie, à près de 60%. Cette part se contracte toutefois depuis plusieurs années, essentiellement au profit de l'essence, sous l'effet d'une fiscalité moins avantageuse que par le passé : en atteste la part de marché du gazole dans les immatriculations de véhicules neufs qui ne s'élève plus qu'à 38% en 2018.

En revanche, le parc de véhicules utilitaires légers conserve une très forte appétence pour le gazole, puisque près de 96% du parc et 94% des immatriculations neuves concernent des véhicules utilisant ce carburant.

Le parc de véhicules électriques à batterie ou hybrides rechargeables demeure relativement modeste, de l'ordre de 0,7% de l'ensemble du parc des véhicules légers, mais son développement est particulièrement rapide, comme en atteste l'évolution du nombre d'immatriculations de véhicules neufs électriques (cf. Figure 6)

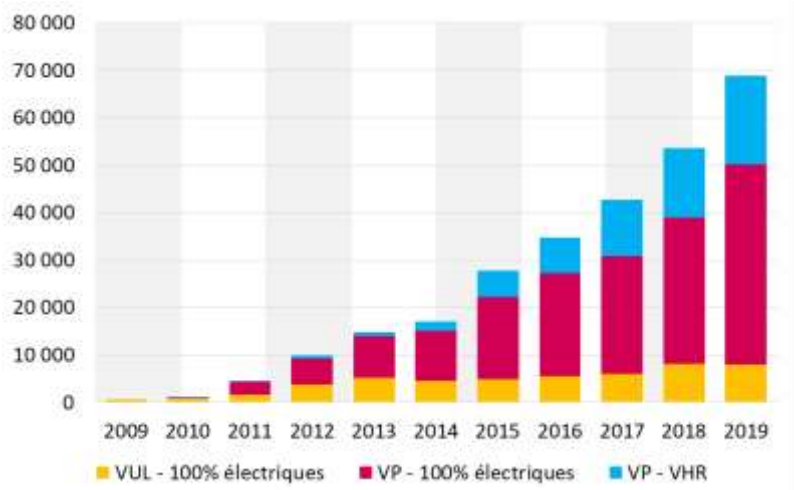


Figure 6 : Immatriculations annuelles de véhicules légers neufs 100% électriques ou hybrides rechargeables

3.2 Les trajectoires d'évolution du parc total à l'horizon 2050

Bien que la population soit amenée à croitre dans les prochaines années, le parc de véhicules particuliers à l'horizon 2050 est susceptible de se contracter par rapport au niveau actuel sous l'effet de plusieurs phénomènes. D'une part, l'usage de la voiture individuelle pourrait se réduire avec le développement des alternatives au véhicule particulier (transports en commun, mobilités douces), les politiques de limitation de la place de la voiture en ville et le développement du télétravail. D'autre part, l'intensification de l'utilisation des véhicules que ce soit en taux d'occupation (effet du covoiturage) ou en durée d'utilisation (effet de l'autopartage) pourrait, à besoin de mobilité par personne constant, conduire à une réduction du parc.

Les projections de parc automobile, toutes motorisations confondues, proposées ici ont été établies en cohérence avec les hypothèses de la trajectoire AMS de la SNBC.

Pour les **véhicules particuliers**, la projection du trafic de passagers assuré par l'automobile est obtenue par croisement du trafic global de passagers et de la part modale de l'automobile (cf. partie 0).

Ainsi, le trafic de passagers assuré par l'automobile devrait être relativement atone la croissance du trafic global étant contrebalancée par la contraction de la part modale de l'automobile pour atteindre 750 Gpkm en 2050.

Avec une hypothèse de taux d'occupation moyen des véhicules particuliers en hausse (1,88 passager par véhicule en 2050, contre 1,62 en 2018), conformément aux hypothèses de la SNBC, le trafic de véhicules devrait baisser légèrement, pour les véhicules immatriculés en France, et s'établir à 400 Gvéh.km en 2050.

Cette projection, combinée à une hypothèse d'évolution baissière du kilométrage annuel moyen par véhicule de 0,3% par an à l'horizon 2050 (effet du télétravail, de la politique de la ville…), permet d'évaluer l'évolution du parc total de véhicules particuliers nécessaires pour répondre aux besoins de mobilité.

Ce parc de véhicules devrait se stabiliser avant de décroître légèrement pour s'établir à 31,3 millions d'unités en 2050 contre 32,7 millions en 2018.

Pour les **véhicules utilitaires légers**, les hypothèses sont également calées sur celle de la trajectoire SNBC.

Ainsi, le bilan de la circulation des VUL passerait de 102 Gvéh.km en 2018 à 116 Gvéh.km en 2050. Sur la base d'un kilométrage annuel moyen relativement stable autour de 16500 km, le parc total de VUL en France devrait poursuivre sa croissance pour atteindre 7,0 millions d'unités en 2050, contre 6,2 millions en 2018.

Au total, l'évolution du parc de véhicules légers immatriculés en France devrait être relativement atone, avec un parc qui se situerait à 38,4 millions d'unité en 2050, contre 38,9 en 2018.

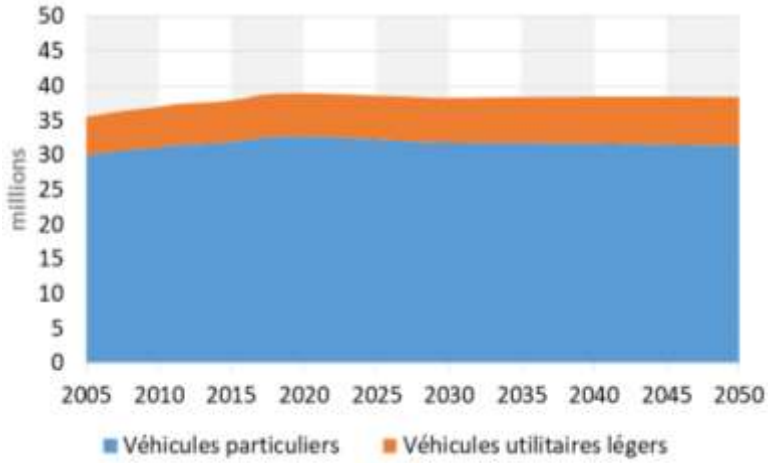


Figure 7 : Parc annuel moyen de véhicules légers immatriculés en France

3.3 La répartition entre les différents types de motorisation

Deux trajectoires de développement du parc de véhicules électriques à batterie et hybrides rechargeables ont été établies à partir de deux jeux d'hypothèses d'évolution des parts de marché de ces technologies dans les ventes annuelles de véhicules particuliers et de véhicules utilitaires légers (établies à partir d'une modèle de parc) et sont proposées pour le cadrage des scénarios. Conformément aux orientations actuelles qui privilégient le développement de l'électrique sur le segment des véhicules légers, ces parts de marché sont fortement orientées à la hausse sur l'horizon de prévision.

Ces hypothèses de pénétration ont été calibrées en cohérence avec les projections de la filière des constructeurs automobiles à l'horizon 2035, et prolongées au-delà en respectant le profil classique de diffusion de produits nouveaux avec des courbes en « S ». Ces parts de marché sont déclinées selon les différents types de véhicules électriques : 100% batterie, hybrides rechargeables ou hydrogène.

La trajectoire de référence est cohérente avec les hypothèses de la trajectoire AMS de la SNBC, et une variante suppose un moindre niveau d'électrification du parc.

Le tableau suivant fournit les hypothèses de parts de marché retenues dans les deux trajectoires sur les ventes de véhicules neufs, ainsi que la pénétration globale sur le parc total de véhicules.

	2018	2050	
		variante électrification modérée	référence
Véhicules particuliers			
Part de marché dans les ventes			
VE 100% batterie	*1,4%*	*75,6%*	*99,6%*
VHR	*0,7%*	*8,4%*	*0,0%*
Hydrogène	*0,0%*	*0,1%*	*0,4%*
TOTAL	2,1%	84,1%	100,0%
Part de marché sur le parc			
VE 100% batterie	*0,4%*	*67,0%*	*94,2%*
VHR	*0,1%*	*14,5%*	*4,7%*
Hydrogène	*0,0%*	*0,1%*	*0,3%*
TOTAL	0,5%	81,6%	99,2%
Véhicules utilitaires légers			
Part de marché dans les ventes			
VE 100% batterie	*1,8%*	*42,1%*	*76,0%*
VHR	*0,0%*	*0,9%*	*0,0%*
Hydrogène	*0,0%*	*0,0%*	*0,0%*
TOTAL	1,8%	43,0%	76,0%
Part de marché sur le parc			
VE 100% batterie	*0,4%*	*41,3%*	*65,6%*
VHR	*0,1%*	*2,4%*	*1,6%*
Hydrogène	*0,0%*	*0,0%*	*0,0%*
TOTAL	0,5%	43,7%	67,2%
TOTAL Véhicules légers			
Part de marché dans les ventes			
VE 100% batterie	*1,5%*	*69,1%*	*95,0%*
VHR	*0,6%*	*6,9%*	*0,0%*
Hydrogène	*0,0%*	*0,1%*	*0,3%*
TOTAL	2,1%	76,1%	95,3%
Part de marché sur le parc			
VE 100% batterie	*0,4%*	*62,3%*	*88,9%*
VHR	*0,1%*	*12,3%*	*4,1%*
Hydrogène	*0,0%*	*0,1%*	*0,3%*
TOTAL	0,5%	74,6%	95,3%

Tableau 3 : Principales hypothèses de développement des véhicules légers électriques en 2050

Les graphiques suivants représentent l'évolution du parc automobile électrique, 100% batterie ou hybride rechargeable, au sein du parc de véhicules légers.

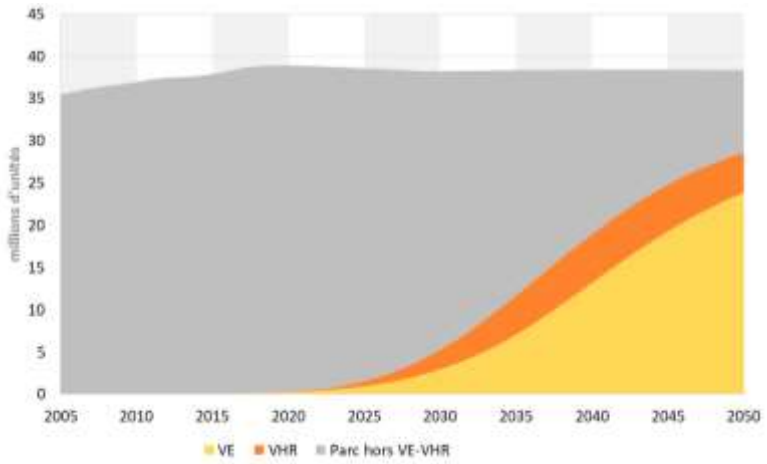


Figure 8 : Projections du parc de véhicules légers électriques en France selon la motorisation Trajectoire variante électrification modérée

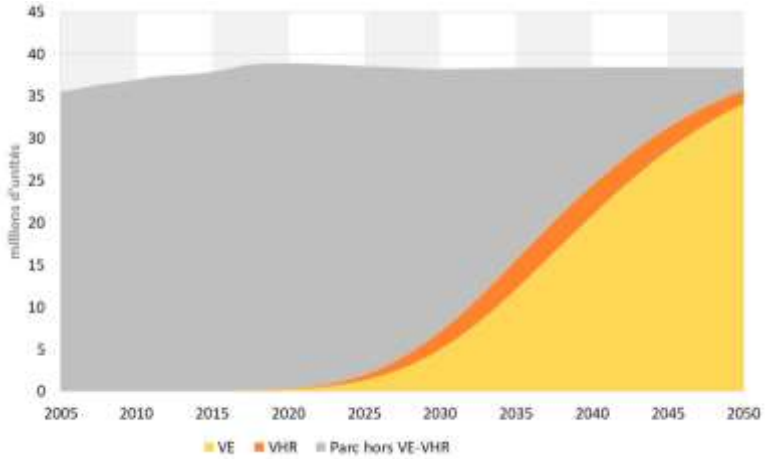


Figure 9 : Projections du parc de véhicules légers électriques en France selon la motorisation Trajectoire de référence

Les trajectoires ainsi identifiées se situent dans le prolongement des trajectoires étudiées à l'horizon 2035 dans le cadre du rapport publié par RTE en 2019 [1]. La trajectoire de référence est compatible avec les objectifs SNBC à l'horizon 2050 (en considérant une répartition de 80%/20% entre la technologie tout-électrique et la technologie hydrogène, là où les objectifs SNBC agrègent les deux).

3.4 L'évolution des batteries

L'évolution de la capacité des batteries est susceptible d'avoir des effets significatifs sur le système électrique. D'une part, la capacité des batteries conditionnera le comportement de recharge de certains utilisateurs et ainsi les appels de puissance. Plus l'autonomie des véhicules sera importante, plus les utilisateurs seront susceptibles d'espacer leurs recharges : la quantité d'énergie soutirée à chaque recharge est plus importante et donc la durée de recharge augmente, mais le nombre d'utilisateurs qui rechargent en même temps un jour donné est plus faible, d'où des appels de puissance plus limités que dans le cas d'une recharge quotidienne. D'autre part, la taille des batteries conditionne le gisement de flexibilité pouvant être mis à disposition du système électrique.

En moyenne, la capacité des batteries des véhicules tout électriques commercialisés en France en 2018 se situait autour de 40 kWh. L'évolution de la taille des batteries dépendra de plusieurs facteurs : besoins de mobilité, attentes des consommateurs, coût des technologies, densité énergétique des modules, réglementation et incitations financières, impacts environnementaux de la fabrication et capacité de recyclage des batteries…

A l'horizon 2035, le rapport électromobilité de RTE a examiné plusieurs trajectoires sur la capacité moyenne des batteries des véhicules tout électrique : basse (56 kWh), médiane (73 kWh) et haute (89 kWh). Pour les véhicules hybrides rechargeables, dont la capacité des batteries est plus faible, trois trajectoires sont également prises en compte, représentant 20% de la taille de batterie des véhicules tout électriques : basse (11 kWh), médiane (15 kWh) et haute (18 kWh).

A l'horizon 2050, la réduction des coûts des batteries est attendue avec l'arrivée des nouvelles technologies de cellules et la réduction des coûts de fabrications en raison d'économies d'échelle. Pour l'horizon 2050, RTE propose de retenir une hypothèse d'évolution tendancielle de la taille moyenne des batteries : une trajectoire modérée à 62 kWh et une trajectoire de référence à 85 kWh.

La trajectoire modérée permet un coût maitrisé du véhicule, une moindre empreinte environnementale tout en satisfaisant les besoins de mobilité locale. La réduction des consommations kilométriques des véhicules ainsi qu'un déploiement massif des recharges à haute puissance sur les axes routiers permettrait également l'utilisation de ces véhicules pour des trajets longue distance.

La trajectoire de référence repose sur des hypothèses de réduction importante des coûts des batteries ainsi que d'une utilisation du véhicule électrique à l'identique que le véhicule thermique actuel, notamment lors des déplacements longue distance. Cette trajectoire implique également une capacité de recyclage des batteries supérieure à celle d'aujourd'hui pour réduire l'impact environnemental de fabrication.

Les véhicules hybrides rechargeables disposent d'une capacité moindre que leurs équivalents tout électriques : RTE propose de retenir une hypothèse de 20% de la taille des batteries des VEB est retenue pour chaque scénario.

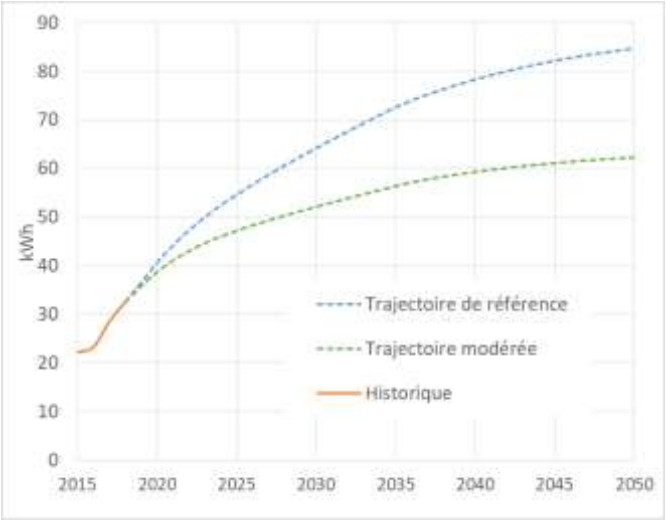


Figure 10 : Trajectoires d'évolution de la capacité des batteries du parc de véhicules tout électriques en circulation

3.5 L'évolution des consommations kilométriques

L'UE rend le transport routier plus propre en établissant de nouvelles normes strictes en matière d'émissions de dioxyde de carbone pour les voitures et les véhicules utilitaires légers. Le conseil a adopté en avril 2019[3] des mesures afin qu'à partir de 2030, les nouveaux véhicules particuliers et utilitaires légers émettent en moyenne respectivement 37,5 % et 31 % moins de CO_2 par rapport aux niveaux de 2021.

Dans le contexte français, la SNBC prévoit une réduction significative des consommations kilométriques des voitures et VUL à long terme (horizons 2030 et 2050). Le Tableau 4 reprend les ambitions françaises de consommation pour le parc neuf et roulant de véhicules légers, toutes motorisations confondues.

Tableau 4 : Consommation kilométrique des voitures et véhicules électriques légers du parc neuf et roulant à l'horizon. Source : Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat

	Parc neuf			Parc roulant		
	2015	**2030**	**2050**	**2015**	**2030**	**2050**
VOITURES						
Thermiques diesel (l/km)	5.7	4.0	2.0	6.8	5.0	3.3
Electrique (kWh/100km)	**17.8**	**15.7**	**12.5**	**17.8**	**16.3**	**13.6**
VUL						
Thermiques diesel (l/km)	8.6	5.4	2.7	8.9	7.3	3.9
GNV (kg/100km)	6.1	3.9	1.9	6.3	5.2	2.6
Electrique (kWh/100km)	**24.0**	**21.2**	**16.9**	**24.0**	**22.8**	**18.5**

Dans la modélisation utilisée par RTE, la consommation kilométrique des véhicules électriques est une fonction de la vitesse du déplacement, du poids du véhicule et de l'utilisation des auxiliaires (chauffage et climatisation). Afin de prendre en compte l'influence du poids, la consommation moyenne est calculée en tenant compte de la répartition du parc entre véhicules particuliers et véhicules utilitaires légers (plus lourds), et entre VEB et VHR (plus lourds). La vitesse et température sont également prises en compte pour le calcul de la consommation moyenne des véhicules. Les figures ci-dessous montrent l'impact de ces deux facteurs : la consommation augmente avec la vitesse et avec des températures très froides ou très chaudes.

RTE propose de recaler les différents paramètres pour que l'évolution des consommations unitaires moyennes corresponde aux orientations publiques de la SNBC.

[3] https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2019/04/15/stricter-co2-emission-standards-for-cars-and-vans-signed-off-by-the-council/

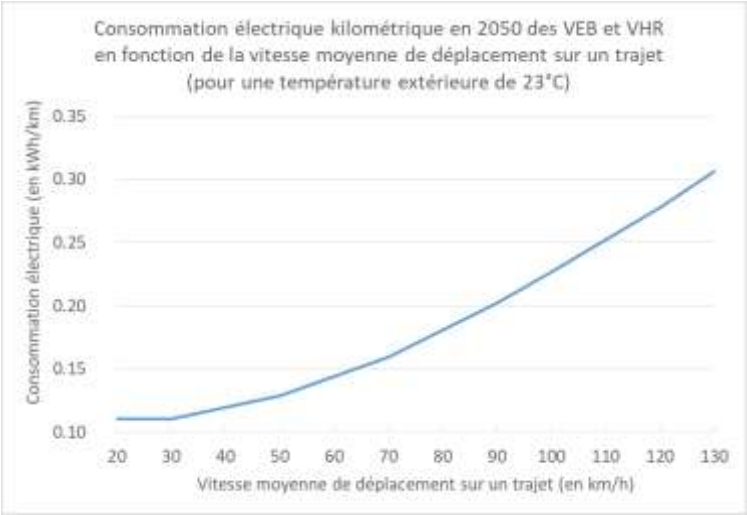


Figure 11 : Consommation kilométrique des véhicules électriques, en 2050, en fonction de la vitesse moyenne de déplacement. A partir de [1] et de la Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat

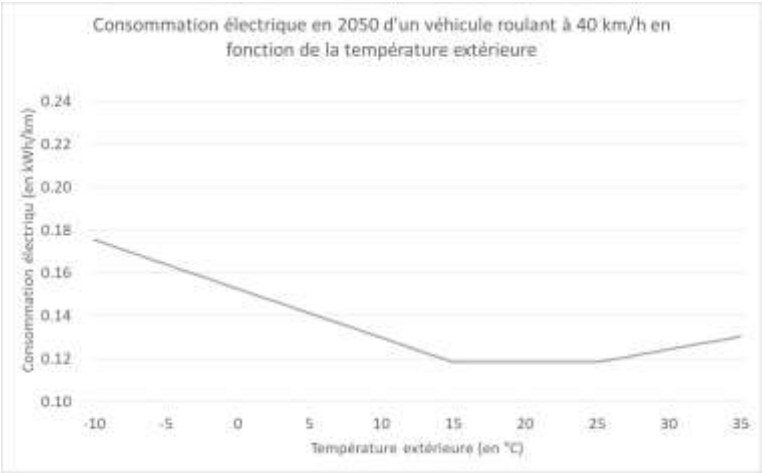


Figure 12 : Consommation kilométrique des véhicules électriques, en 2050, en fonction de la température extérieure. A partir de [1] et de la Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat

3.6 L'évolution des comportements de mobilité

Pour la modélisation des recharges des véhicules et du potentiel de flexibilité associé, il est indispensable en premier lieu de savoir à quel moment, sur quel lieu et pendant combien de temps, les utilisateurs de véhicules électriques ont la possibilité de recharger leur véhicule. Seule une analyse fine des comportements de mobilité, telle que celle réalisée dans le cadre des travaux RTE sur la mobilité électrique à l'horizon 2035 [1], peut permettre de disposer des informations de ce type (heures de départ et d'arrivée, lieux de stationnement…), ainsi que d'autres informations nécessaires pour simuler les besoins de recharge (distances parcourues, vitesses, etc.).

La représentation des comportements de mobilité utilisée pour les travaux du bilan prévisionnel se fonde sur l'analyse détaillée des habitudes de déplacement de la population française en utilisant les dernières enquêtes disponibles, ainsi que sur les projections futures de ces comportements, sur la base

de différentes hypothèses d'évolution des formes de mobilité (télétravail, co-voiturage, auto-partage…).

La modélisation de la mobilité électrique pour ces travaux reprend les principes utilisés pour l'étude à l'horizon 2035, pour envisager des évolutions de la mobilité à l'horizon 2050.

3.6.1 Répartition des véhicules par catégorie de ménage

Les comportements de mobilité peuvent être très variés d'une personne à l'autre. Cependant, il est possible d'identifier des caractéristiques des utilisateurs qui sont déterminantes pour décrire leur utilisation des véhicules, et qui permettent de désagréger les profils d'utilisation dans des groupes suffisamment homogènes. Par exemple, une voiture utilisée régulièrement pour se rendre sur le lieu de travail parcourra des distances journalières et annuelles bien plus élevées que la voiture à disposition d'un ménage où il n'y a pas d'actifs employés. Le statut d'activité (corrélé au revenu) influence également les heures de départ des différents trajets journaliers, les temps de stationnement et les heures de retour au domicile, avec un impact sur la disponibilité du véhicule pour rendre des services de flexibilité au système électrique. Le revenu peut également expliquer la fréquence de longs trajets pour des vacances, avec un impact sur les consommations annuelles et les besoins de recharges à haute puissance en itinérance. Il est donc important, pour dresser un panorama de la mobilité électrique dans les années à venir, de connaître au sein de quelles tranches de population les véhicules électriques seront le plus représentés.

Dans les premières années de son développement, il est vraisemblable que la mobilité électrique ne se diffuse pas de manière uniforme au sein de la population. En effet, le coût à l'achat élevé et le faible coût d'usage du véhicule électrique favorisent une surreprésentation des ménages aux revenus les plus élevés et de ceux qui parcourent plus de kilomètres par jour que la moyenne (actifs employés, notamment). Une généralisation de la mobilité électrique à l'horizon 2050 signifierait une réduction voire une disparition des écarts dans les caractéristiques de mobilité entre les véhicules électriques et les comportements moyens de la population. L'analyse des comportements de mobilité reprend les principes de l'étude réalisée à l'horizon 2035, avec une analyse des comportements de mobilité par groupe de ménages, sur la base du niveau de vie du ménage et de l'utilisation éventuelle du véhicule pour se rendre sur le lieu de travail. Toutefois, si en 2035 la répartition des véhicules électriques scénarisée montre une répartition nettement plus importante parmi les ménages les plus aisés et avec la présence d'actifs employés, la répartition 2050 est supposée revenir à une distribution des véhicules proche de la distribution actuelle. En effet, l'interdiction de la vente de voitures à énergies fossiles carbonées d'ici 2040 inscrite dans la loi d'orientation des mobilités favorisera la diffusion des voitures électriques dans tous les groupes d'utilisateurs.

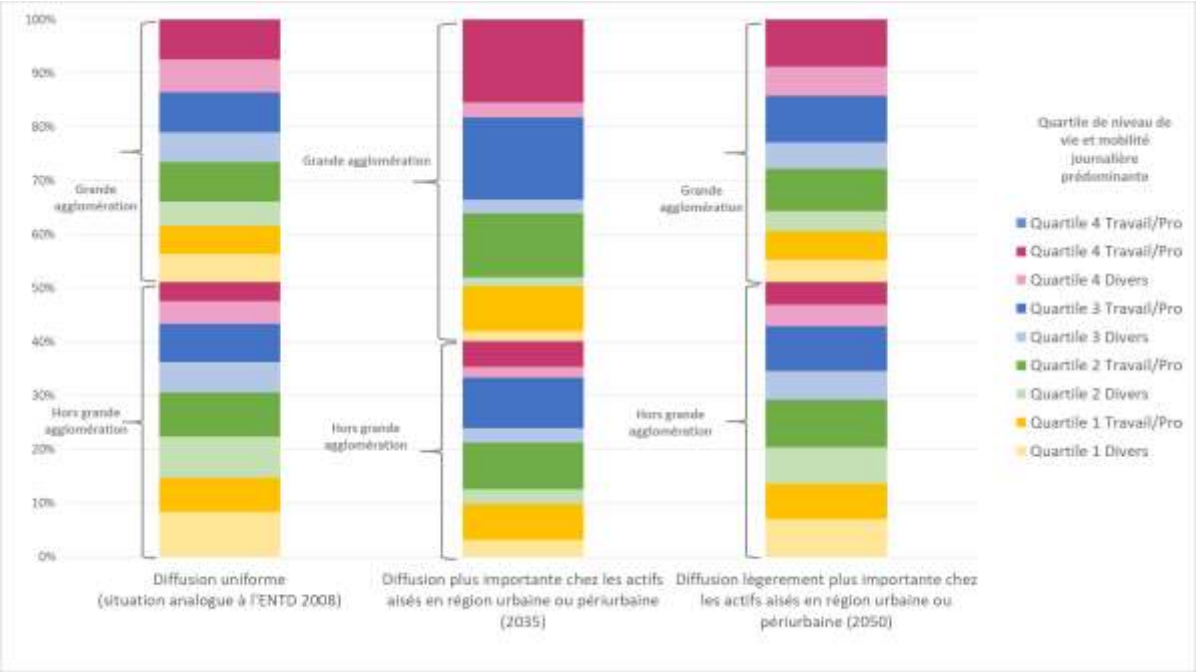


Figure 13 : Hypothèses de diffusion de la mobilité électrique (véhicules légers) au sein de la population, par niveau de vie et mobilité journalière prédominante

3.6.2 Distance annuelle moyenne parcourue par les véhicules légers électriques

Les distances parcourues par les véhicules électriques annuellement influencent évidemment les consommations d'électricité totales liées à la mobilité électrique, mais elles ont également un impact sur les pics de puissance attendus et sur la disponibilité de véhicules pour rendre des services de flexibilité au système électrique. En effet, des plus longues distances impliquent des plus longues recharges (à parité de puissance), ce qui facilite la superposition des recharges des différents véhicules et donc l'augmentation des puissances maximales soutirées. En revanche, un scénario avec des distances parcourues plus faibles pourrait impliquer un nombre plus faible de véhicules qui se déplacent chaque jour, avec donc des temps de stationnement plus longs et une disponibilité accrue de batteries connectées au réseau électrique.

Pour l'étude de la mobilité électrique à l'horizon 2035, l'hypothèse retenue était celle de comportements de mobilité des utilisateurs de véhicules électriques différents des comportements de mobilité moyens de la population aujourd'hui, en raison de la diffusion non uniforme des véhicules électriques au sein de la population.

Toutefois, les comportements moyens sont eux susceptibles d'évoluer de manière non négligeable à cet horizon sous l'effet de politiques encourageant le report modal et la sobriété des usages

L'évolution des besoins de mobilité annuels en véhicule léger suit une trajectoire compatible avec la SNBC : d'une part, les besoins de mobilité en passagers*km augmenteraient sous l'effet de la croissance économique, d'autre part, le développement du télétravail contribuerait à maîtriser cette hausse, et l'augmentation des taux de remplissage des véhicules grâce au covoiturage conduirait in fine à une légère diminution du trafic en véhicules*km en 2050 comparé à aujourd'hui.

Le coût à l'usage plus faible des véhicules électriques, en comparaison des véhicules thermiques actuels, pourrait également comporter un effet rebond et conduire à une augmentation des besoins de mobilité totaux. Les études disponibles montrent cependant que cet effet devrait être modéré [2].

La trajectoire de kilométrage de référence s'accompagne d'une variante qui suppose qu'une partie des déplacements longue distance, pour les utilisateurs de véhicules tout-électriques, seraient reportés sur d'autres modes de transport (train, notamment).

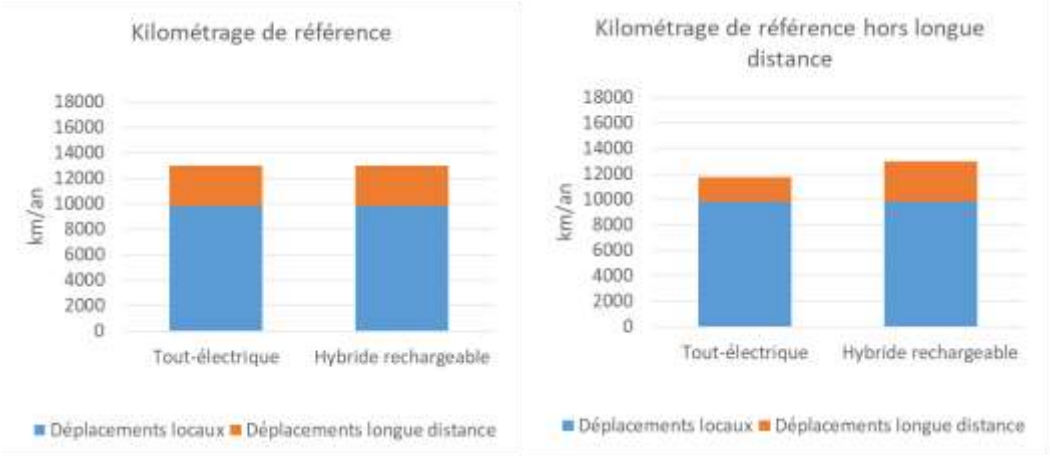


Figure 14 : Hypothèses de distances annuelles parcourues par les véhicules légers à l'horizon 2050

3.6.3 Heures de départ et d'arrivée des déplacements, durées et lieux de stationnement, distribution des distances

Pour la représentation temporelle des recharges des véhicules électriques, ainsi que pour estimer à quels moments les véhicules sont potentiellement connectés à une prise et disponibles pour le pilotage de la recharge ou de l'injection, il est nécessaire de représenter de manière fine la manière dont les besoins de mobilité totaux se déclinent jour par jour. Notamment, les heures de départ et d'arrivée des trajets, les distances parcourues par trajet, les lieux d'origine et destination (domicile, travail, loisirs, etc.), les durées et les lieux de stationnement sont autant de caractéristiques nécessaires pour une modélisation de la flexibilité liée aux véhicules électriques. Les trajets des véhicules sont simulés sur la base de la dernière enquête nationale de mobilité[4] disponible. Les distributions des distances parcourues et des heures de départ/arrivée des déplacements, ainsi que les lieux d'origine et destination, sont analysés selon le motif de déplacement (travail, études, loisirs, vacances), le type de déplacement (mobilité locale ou longue distance) et le type d'aire urbaine de résidence (grandes agglomérations, autres territoires) . L'analyse par type et motif de déplacement permet de prendre en compte la répartition non uniforme des caractéristiques des déplacements au sein des différents groupes d'utilisateurs des véhicules : cette répartition est donc scénarisée en prospective pour être cohérente avec la dynamique de diffusion des véhicules électriques au sein de la population, décrite dans la section 3.6.1.

[4] ENTD 2008

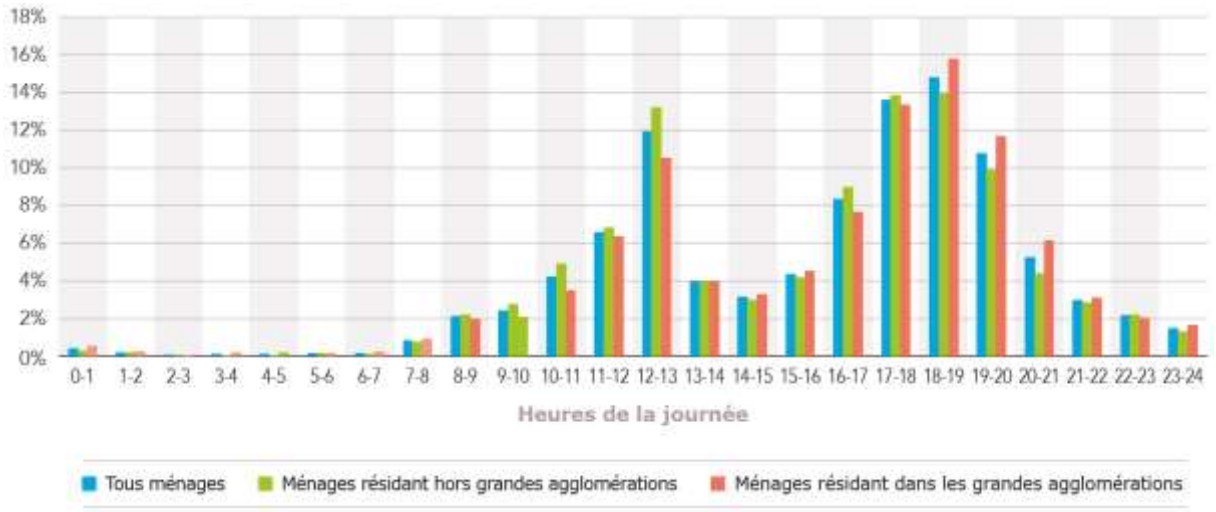


Figure 15 : Répartition des heures de retour au domicile pour des déplacements de mobilité locale un jour du lundi au vendredi, selon la zone urbaine de résidence du ménage (calculs à partir de l'ENTD 2008)

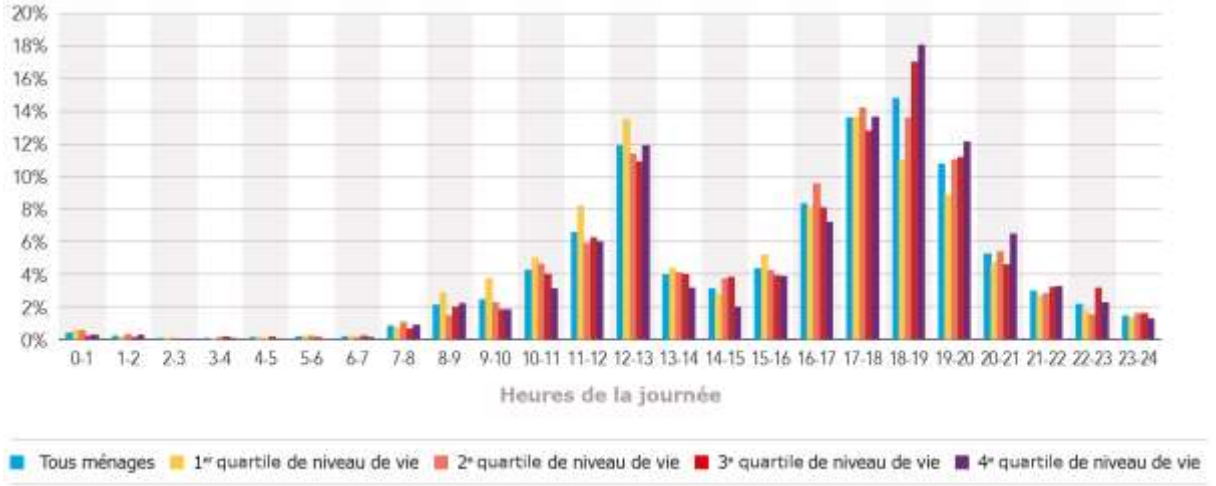


Figure 16 : Répartition des heures de retour au domicile pour des déplacements de mobilité locale un jour du lundi au vendredi, selon le niveau de vie du ménage (calculs à partir de l'ENTD 2008)

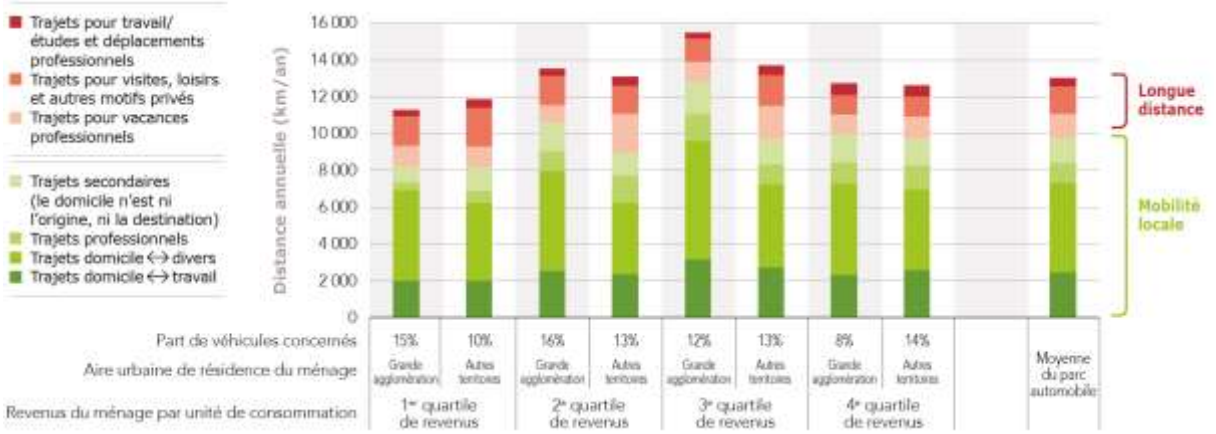


Figure 17 : Distance moyenne parcourue annuellement par un véhicule en fonction du niveau de vie et la zone urbaine de résidence du ménage (calculs à partir de l'ENTD 2008)

3.7 Accès aux points de charge

Les périodes pendant lesquelles les véhicules électriques sont connectés au système électrique impactent leur courbe de charge et la flexibilité sur cette courbe de charge. Les points de recharge peuvent être installés dans des emplacements publics ou privés, ce qui déterminera la disponibilité du pilotage de la recharge, voire de l'injection. La recharge privée (à domicile ou sur le lieu de travail) permet des durées de connexion longues ce qui facilite le pilotage des recharges pendant les créneaux les plus favorables pour le système électrique. Elle permettrait également l'injection d'énergie au système électrique depuis le véhicule, pour ceux équipés de la technologie V2G. Au contrario, la recharge publique (voirie, station de service, centres commerciaux), de son caractère opportuniste et ponctuel, n'est pas une recharge pilotable. Il s'agit donc d'une consommation non pilotable que le système électrique doit satisfaire.

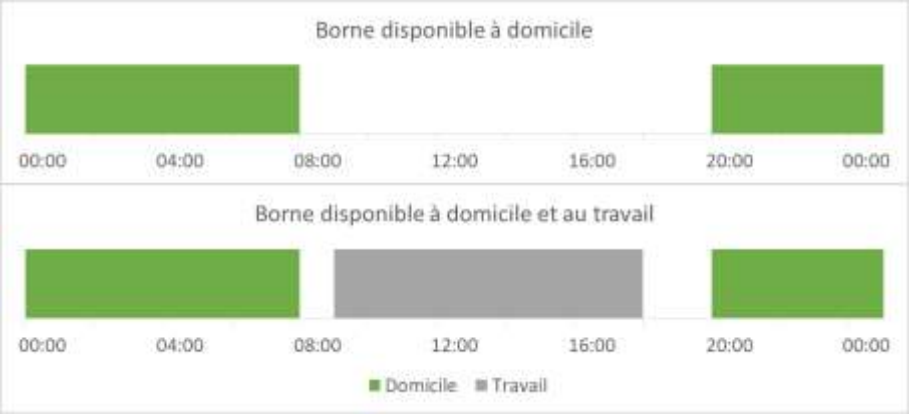


Figure 18 : Illustration des durées de connexion de deux véhicules avec des accès différents aux points de charge

Les hypothèses sur l'accès aux points de charge représentent la répartition des véhicules selon les points de charge auxquels ils ont accès régulièrement dans le cadre d'une journée de déplacement typique, en croisant les possibilités d'accès à des points de charge à domicile, à des points de charge sur lieu de travail et à des points de charge publics.

L'hypothèse de référence suppose que la plupart des utilisateurs de véhicule électrique ont accès à un point de charge à domicile ou à proximité (soit dans le domicile, soit sur la voie publique). Une fraction d'entre eux dispose en complément d'un accès à un autre point de point de charge (notamment sur le lieu de travail). Dans cette configuration, une partie significative des utilisateurs professionnels a aussi accès à un point de charge proche du domicile.

L'hypothèse « déploiement important de points de charge publics » suppose que la mobilité électrique se développe aussi auprès des utilisateurs qui n'ont pas accès à un point de charge proche du domicile, au même rythme qu'auprès des utilisateurs ayant accès à un point de charge proche du domicile. Dans cette trajectoire, la part des utilisateurs professionnels ayant aussi accès à un point de charge à domicile est plus faible.

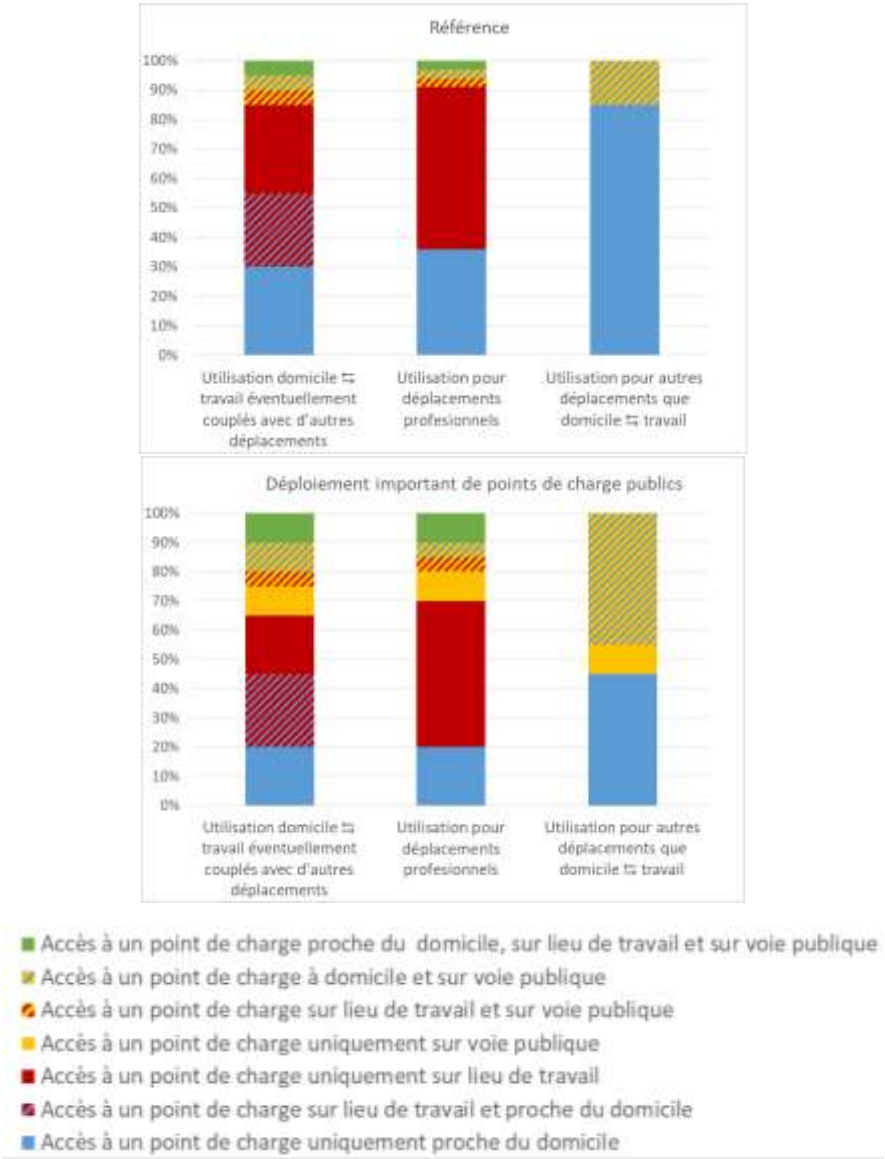


Figure 19 : Hypothèses d'accès aux points de charge à l'horizon 2050

3.8 Puissance des points de charge

La puissance des points de charge des véhicules connectés au réseau est dimensionnant pour la flexibilité à double titre : pour la recharge des véhicules cela va déterminer la puissance totale que le système électrique doit satisfaire, pour l'injection des véhicules (V2G) cela permet de déterminer la puissance maximale dont le système électrique dispose pour faire face à d'autres consommations.

Les points de charge présentent une variété importante de puissances. Ces puissances de charge sont généralement catégorisées en plusieurs niveaux : charge normale lente (typiquement inférieure à 3,7 kW), charge normale standard (typiquement entre 3,7 et 11 kW), charge normale accélérée (typiquement 22 kW), charge rapide (typiquement entre 22 et 50 kW) et charge très rapide (typiquement à partir de 130 kW).

Deux hypothèses d'évolution de la puissance des points de charge sont établies. Ces hypothèses s'expriment par la répartition des puissances de charge pour chaque type de point de charge (à domicile, sur lieu de travail, dans l'espace public hors axes routiers et sur axes routiers). Dans toutes les hypothèses, les puissances moyennes des points de charge évoluent à la hausse par rapport à aujourd'hui. Ceci reflète notamment l'effet de l'augmentation de la taille des batteries.

L'hypothèse de « référence » considère une augmentation modérée de la part de la puissance moyenne à domicile et sur le lieu de travail et une augmentation significative de la puissance des points de charge publics, par rapport à la situation actuelle. Sur les axes routiers, l'essentiel des points de charge ont une puissance de 130 kW à l'horizon 2050.

L'hypothèse de « forte électrification » considère une augmentation significative de la puissance des différents points de charge, notamment proche du domicile et sur le lieu de travail. L'augmentation de la puissance de recharge sur voie publique permet de réaliser des recharges pour faire « le plein » pour les utilisateurs ne disposant pas des bornes proches du domicile ou du travail. Sur les axes routiers, la plupart des points de charge ont une puissance supérieure à 350 kW à l'horizon 2050, notamment pour mutualiser les infrastructures de recharge des poids lourds électriques avec des missions longue distance.

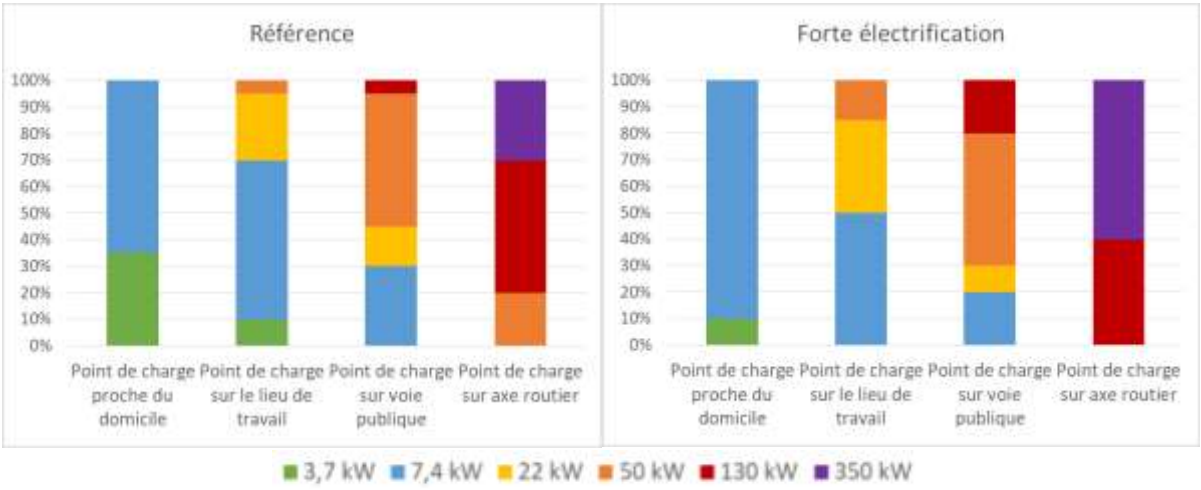


Figure 20 : Hypothèses sur la puissance des points de charge à l'horizon 2050

3.9 Comportements de connexion des utilisateurs

La fréquence à laquelle les utilisateurs connectent leurs véhicules au réseau électrique influence à la fois le profil d'appels de puissance pour la recharge et le gisement de flexibilité mis à disposition du système électrique.

Les appels de puissance dépendent de la fréquence de connexion en raison de la variation de la quantité d'énergie nécessaire pour chaque recharge : si le véhicule est rechargé très fréquemment, par exemple tous les jours, l'énergie soutirée à chaque connexion sera relativement faible, la recharge sera donc de courte durée. Si, en revanche, le véhicule est connecté plus rarement, la recharge durera plus longtemps parce qu'elle concernera une quantité d'énergie supérieure (celle correspondante à plusieurs jours d'utilisation). Avec un comportement de recharge « naturel », c'est-à-dire sans pilotage

des recharges, la seconde configuration est plus favorable au système électrique. Par exemple, un grand nombre de véhicules en train d'être rechargés en même temps le soir, au moment du retour de l'utilisateur au domicile, même si ce n'est que pendant une heure, génèrent des appels de puissance plus importants que ceux générés si seulement un tiers des utilisateurs connectent le véhicule un soir donné (ce qui correspondrait en moyenne à une recharge tous les trois jours). Ces recharges dureraient plus longtemps, à parité de puissance du point de charge.

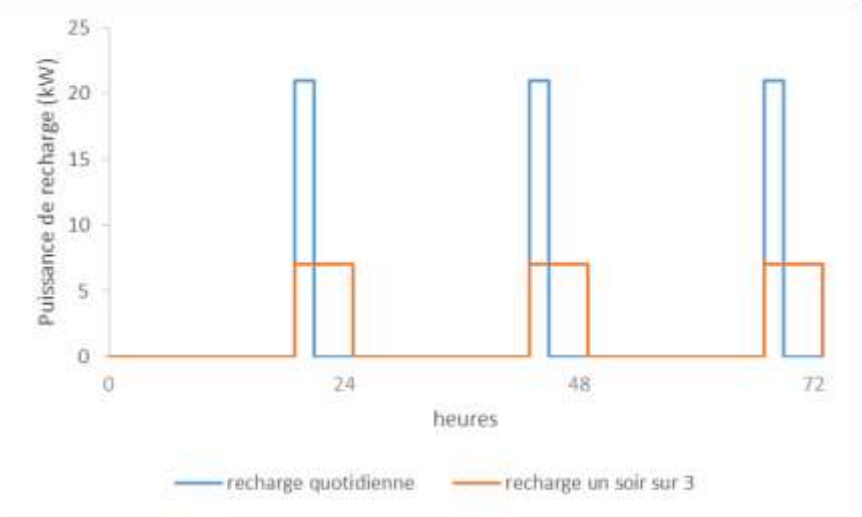


Figure 21 : Illustration des puissances soutirées par trois véhicules se rechargeant en même temps tous les soirs, ou se rechargeant chacun un soir sur 3

La fréquence de connexion est également déterminante pour évaluer les services de flexibilité que les véhicules peuvent rendre au système électrique. Nous avons vu que, dans le cas d'une recharge « naturelle », une fréquence de connexion journalière serait plus contraignante pour le système électrique qu'une fréquence de connexion plus faible. En revanche, si la recharge est pilotée (de manière simple – signal tarifaire fixe – ou dynamique, avec ou sans V2G), une fréquence de connexion élevée devient avantageuse pour le système électrique. Un plus grand nombre de véhicules connectés correspond en effet à une capacité totale de stockage disponible ainsi qu'à une puissance cumulée plus élevées.

Si parmi les utilisateurs de véhicules électriques étaient jusqu'à récemment majoritaires ceux qui préféraient recharger leurs véhicules quotidiennement, les habitudes sont en train d'évoluer avec la diffusion su de modèles de voitures électriques ayant des capacités de batterie suffisantes à assurer plusieurs jours de mobilité quotidienne moyenne sans recharge. C'est le cas notamment des véhicules équipés de batteries de 40 kWh, aujourd'hui majoritaires dans les ventes en France. Cette tendance à la diminution de la fréquence des recharges est visible dans les statistiques réalisées dans les pays où la mobilité électrique connaît une diffusion importante, notamment les pays de Nord de l'Europe. L'augmentation des capacités des batteries et l'augmentation de la confiance des utilisateurs avec la généralisation des véhicules électriques et des points de charge conduiront vraisemblablement à une progression de cette tendance à la connexion occasionnelle, du moins en l'absence d'incitations à une connexion plus régulière (qui pourrait par exemple être représentée par les revenus éventuels liés aux services de flexibilité rendus).

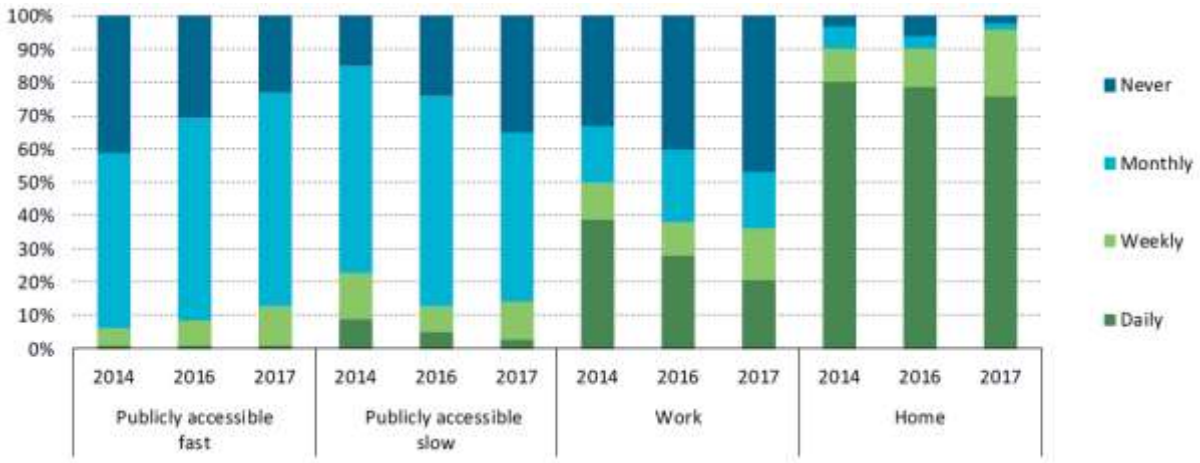


Figure 22 : Fréquence de recharge des véhicules tout-électriques ou hybrides rechargeables en fonction du lieu de recharge, en Norvège (source : IEA Nordic EV Outlook 2018 [3])

Deux hypothèses sont établies concernant la fréquence de connexion des véhicules à l'horizon 2050 : elles vont d'une généralisation du comportement de connexion seulement lorsqu'il est nécessaire vis-à-vis de l'état de charge de la batterie du véhicule, à un comportement de connexion en majorité fréquent (dès que possible), par exemple pour participer à des mécanismes de flexibilité.

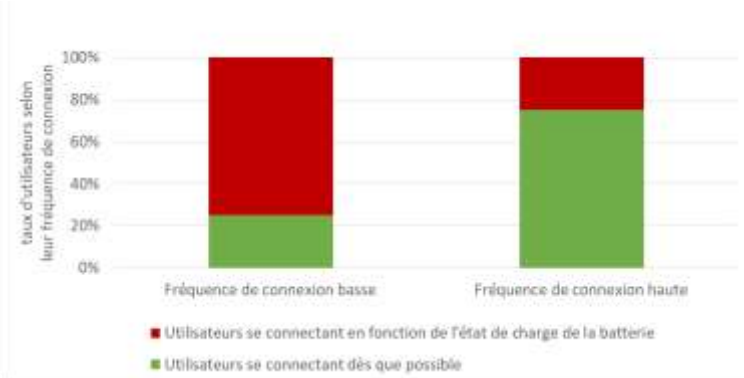


Figure 23 : hypothèses concernant la fréquence de connexion des utilisateurs de véhicules électriques à l'horizon 2050

3.10 Pilotage de la charge et *vehicle-to-grid*

Le niveau de pilotage des recharges des véhicules électriques est un paramètre dimensionnant pour le système électrique, et pour le développement même de la mobilité électrique. En effet, une diffusion généralisée de la mobilité électrique à l'horizon 2050, telle que celle envisagée par les pouvoirs publics (environ 36 millions de véhicules légers électriques), ne sera pas possible sans un minimum de pilotage (même simple) des recharges des véhicules. Une diffusion plus large du pilotage, et la généralisation de systèmes de pilotage plus sophistiqués, sont susceptibles d'apporter des bénéfices importants pour la collectivité en optimisant le fonctionnement du système électrique : réduction des écrêtements d'énergies renouvelables, réduction des besoins de capacités thermiques pour satisfaire la demande

lors des pics de consommation, réduction des besoins de modulation des centrales nucléaires. Le pilotage garantit également des bénéfices économiques directs pour le consommateur, soit par une optimisation de la recharge par rapport au tarif de fourniture, soit par la rémunération des services de flexibilité rendus.

En l'absence de pilotage, la recharge de la batterie démarre dès que le véhicule est connecté à une station de recharge (ou à une prise) : on parle alors de recharge « naturelle ». La modalité de pilotage la plus simple est l'asservissement de la recharge à un signal tarifaire de type heures pleines / heures creuses ou la programmation de la recharge (qui est possible avec la plupart des véhicules) : un relais sur le compteur électrique qui peut faire démarrer la recharge du véhicule connecté, lorsque le signal tarifaire passe en modalité « heures creuses ». Alternativement, une programmation du véhicule permet le même type de pilotage. Ce type de signal est statique car il ne sera pas optimisé au jour le jour. Un pilotage plus sophistiqué consiste en l'envoi au véhicule ou à la borne de recharge d'un signal de recharge dynamique, optimisé en fonction des conditions du système électrique et des prix de marché en temps réel. Ce pilotage dynamique peut enfin être associé à une possibilité de recharge bidirectionnelle, c'est-à-dire à une technologie qui permet également le transfert d'énergie de la batterie du véhicule vers le réseau électrique (*vehicle-to-grid*).

Le pilotage mono-directionnel des recharges n'impliquerait pas de coûts additionnels significatifs pour l'utilisateur du véhicule par rapport à une recharge « naturelle ». En effet, le pilotage tarifaire passerait par le compteur électrique, l'asservissement de la recharge au signal pouvant être réalisé lors de l'installation de la borne de recharge. Le pilotage dynamique nécessite un signal transmis par un agrégateur soit à la borne, soit directement au véhicule. Dans ce dernier cas, il pourrait exploiter les cartes SIM qui sont déjà intégrées aujourd'hui dans la majorité des véhicules électriques vendus, sans surcoût.

La fonctionnalité bi-directionnelle avec possibilité d'injection *vehicle-to-grid* est en revanche aujourd'hui coûteuse, parce qu'elle nécessite un convertisseur de courant alternatif/continu bidirectionnel (capable de convertir le courant continu provenant de la batterie en courant alternatif pour l'injection dans le réseau électrique). Les bornes de recharge qui intègrent cette possibilité peuvent avoir actuellement un surcoût de plusieurs milliers d'euros comparé aux bornes de recharge monodirectionnelles. En revanche, une généralisation de la technologie *vehicle-to-grid* pourrait amener à une forte réduction des coûts associés, notamment si les constructeurs automobiles intègrent le convertisseur en série dans le véhicule. Dans ce cas, le surcoût du *vehicle-to-grid* pourrait descendre jusqu'à une centaine d'euros par véhicule voire moins.

Si tous les types de pilotage peuvent contribuer à la flexibilité du système électrique sur des échelles de temps qui vont de quelques heures à quelques jours, le pilotage dynamique peut également répondre à des exigences de flexibilité sur des échelles de temps très courtes, en permettant la participation des véhicules électriques aux services d'équilibrage proches du temps réel (« services système ») qui demandent des temps de réaction qui vont de quelques secondes à quelques minutes.

Le pilotage à large échelle des recharges des véhicules électriques soulève toutefois des questions concernant l'acceptabilité de la part des utilisateurs des véhicules, en particulier en ce qui concerne la technologie *vehicle-to-grid*. En effet, des cycles additionnels de recharge et injection sont susceptibles d'avoir un impact sur la durée de vie des batteries comparé à des recharges exclusivement pour satisfaire les besoins de mobilité. Même si ces impacts devraient en général demeurer limités, voire être négligeables dans certains cas [1], les consommateurs pourraient néanmoins montrer une

certaine méfiance vis-à-vis de la possibilité de céder le contrôle des charges/décharges de leurs batteries. Les trajectoires de développement du pilotage envisagées prendront en compte les problématiques d'acceptabilité, et seront affinées par la suite en cohérence avec les réflexions sur les dynamiques sociétales dans le cadre des scénarios du Bilan prévisionnel.

Trois hypothèses concernant le pilotage des recharges sont considérées. La première prend en compte une situation de pilotage minimal des recharges, avec la moitié des véhicules en recharge naturelle et pour les autres un pilotage réalisé en grande partie grâce à un signal tarifaire statique. La deuxième considère une situation plus optimiste, avec une diffusion relativement large du pilotage des recharges et de formes de pilotage sophistiquées. La dernière hypothèse représente une configuration très favorable pour le système électrique, avec une flexibilité des recharges importante grâce à la diffusion généralisée du pilotage dynamique accompagnée par une large diffusion de l'injection *vehicle to grid*.

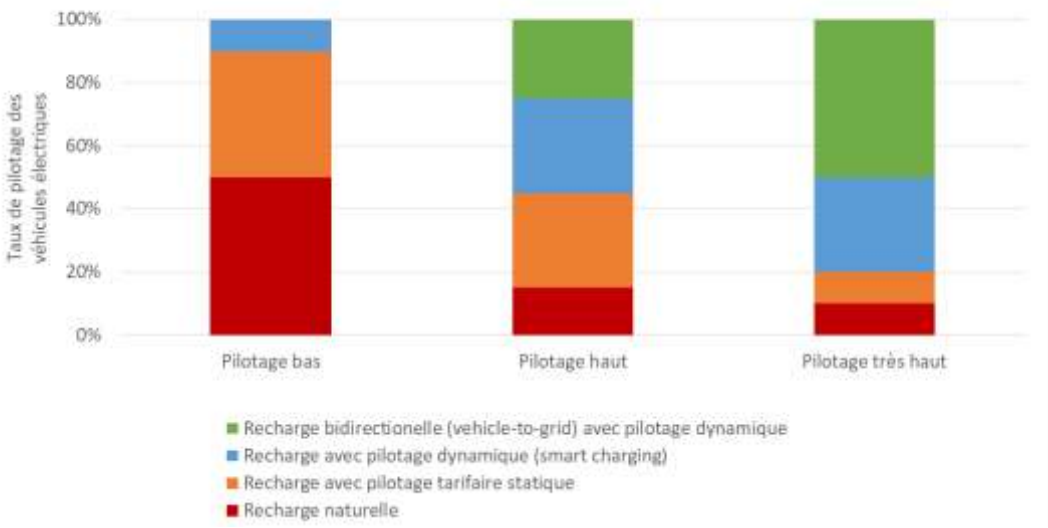


Figure 24 : hypothèses de pilotage des recharges à l'horizon 2050

4 Caractéristiques et mobilité des autobus et autocars électriques

4.1 Le parc et les technologies aujourd'hui

Au 1er janvier 2018, environ 100 900 autobus et autocars étaient en circulation en France (dont 72% d'autocars). La motorisation prédominante est de type diesel (95%), même si elle est en légère diminution sur les 15 dernières années [4]. Les autres véhicules roulent essentiellement au gaz naturel (comprimé ou liquéfié). Environ 6 000 nouveaux autobus et autocars sont immatriculés chaque année.

D'un point de vue des technologies, si les autocars roulent aujourd'hui très majoritairement au gazole [4], les flottes de bus urbains sont déjà constituées pour une partie non négligeable de motorisations « alternatives », notamment les motorisations GNV (gaz naturel pour véhicules) qui représentaient en 2018 environ 17% du parc des autobus capacitaires (autobus d'au moins 12 mètres) et 14% du parc total selon l'UTP. Les bus hybrides non rechargeables représentent environ 6% de ce parc [5].

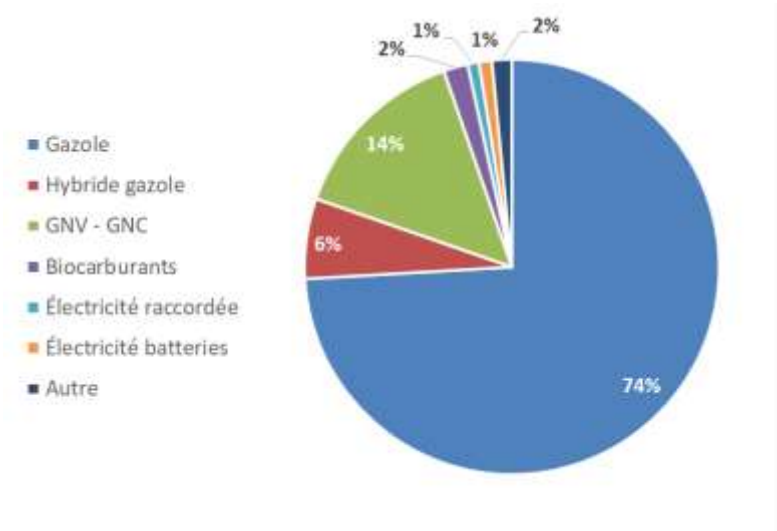


Figure 25 : Répartition des autobus urbains en France par technologie en 2018 (à partir de données UTP 2018).

En revanche, la part de véhicules électriques (hybrides rechargeables, tout-électriques ou à hydrogène) est aujourd'hui très minoritaire. Toutefois, une progression importante des ventes de ces véhicules est envisageable dans les années à venir, sous l'impulsion des politiques de développement durable européennes et nationales, ainsi que des politiques locales pour la réduction de la pollution dans les territoires. Notamment, la directive UE 2019/1161, qui modifie la "directive véhicules propres" de 2009, impose aux Etats membres de l'Union européenne des objectifs minimaux de présence de véhicules lourds propres dans les marchés publics (hors véhicules spéciaux tels que véhicules sanitaires, militaires etc.). En matière de transports collectifs routiers, la directive concerne essentiellement les autobus. Les autocars en sont exemptés en raison de la plus forte maturité du marché des autobus urbains à faibles émissions ou émissions nulles par rapport à celui des autocars, et de la faible prévalence des autocars dans les marchés publics.

Pour la France, la directive impose un objectif de 43% pour la part d'autobus à faibles émissions dans les achats publics sur la période 2021-2025 et de 61% sur la période 2026-2030. Au moins la moitié de l'objectif doit être rempli avec des autobus zéro-émissions. Le rôle de telles mesures concernant les marchés publics est particulièrement important pour la décarbonation des flottes de bus, pour lesquelles il est estimé que 75% des achats sont des achats publics [6]. Concernant les autobus, sont considérés des véhicules à faibles émissions ceux roulant au gaz naturel (incluant le biométhane, GNC et GNL), aux biocarburants d'origine renouvelable, aux combustibles synthétiques et paraffiniques et au gaz de pétrole liquéfié (GPL). Font partie des véhicules zéro-émissions, les autobus tout-électriques et les autobus hydrogène (piles à combustible). Le statut des autobus hybrides reste à clarifier [7].

Les effets de ces politiques commencent à être visibles dans les immatriculations des véhicules. Selon l'AVERE-France [8], les bus électriques ont représenté 4,1 % des immatriculations européennes en 2019, avec une augmentation de 184 % par rapport à 2018, bien que le gazole reste la motorisation dominante dans les immatriculations (85%).

En France, la part de marché des autobus électriques en 2019 a été 4,2% (+200% par rapport à 2018), avec 285 exemplaires vendus [8]. La RATP a affiché un objectif ambitieux de décarbonation complète de sa flotte de bus (4 700 unités) à l'horizon 2025, avec deux tiers de bus électriques et un tiers de bus au gaz naturel renouvelable. En avril 2019, l'entreprise a lancé un appel d'offres de 400 millions d'euros pour 800 bus tout-électriques (le plus grand appel d'offres de bus électriques en Europe à ce jour), qui a été remporté par trois fabricants français (ALSTOM, Bolloré et Heuliez). Les premières livraisons sont prévues en 2020-2022 à hauteur de 150 bus, pour une livraison complète d'ici 2025.

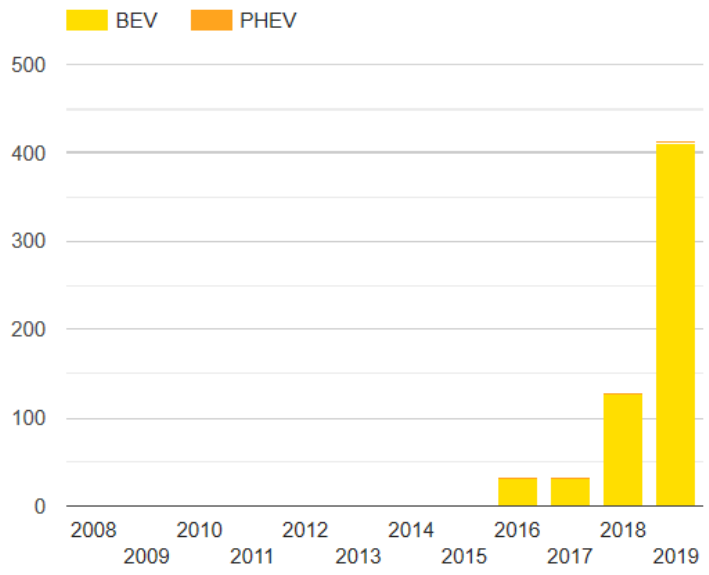


Figure 26: parc de bus électriques en France (source : EAFO)

4.2 Besoins de mobilité et parc total de véhicules à l'horizon 2050

L'augmentation du trafic passagers et de la part modale du transport collectif routier, exposés précédemment, se traduisent mécaniquement par un accroissement marqué du trafic de passagers dans les transports collectifs routiers, qui atteindrait 86 Gpkm en 2050 contre 59 en 2018. Cette forte

croissance découle de l'évolution importante des parts modales des transports collectifs dans le scénario AMS de la SNBC, avec une augmentation de 7 points d'ici 2050 [9]

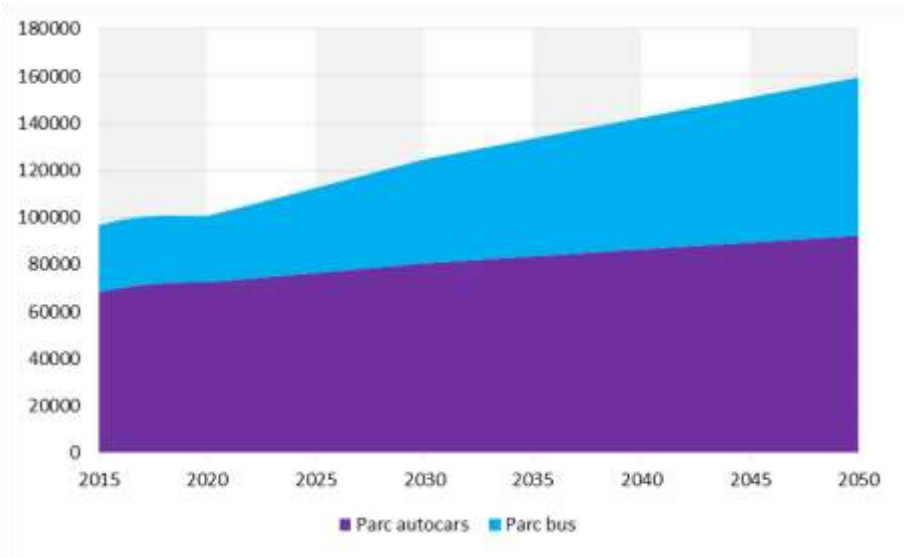
En considérant une stabilité du taux de remplissage, la circulation des bus en France passerait de 3,7 Gvéh.km en 2018 à 5,5 Gvéh.km en 2050 (chiffre légèrement inférieur à celui de la SNBC en raison d'une moindre croissance du besoin de mobilité par personne – Cf. partie 2).

Tableau 5 : évolution du trafic de passagers et des distances parcourues en transports collectifs routiers dans le scénario de référence de la SNBC [9]

	2015	2030	2050
Trafic de passagers (milliards de passagers*km)	58	71	94
Bilan de la circulation (milliards de véhicules*km)	3,7	4,7	6

Conformément au report modal vers les transports en commun et à l'évolution des besoins de mobilité envisagés par le scénario de référence de la SNBC, le parc total d'autobus et d'autocars devrait connaître une augmentation marquée dans les prochaines décennies. Une estimation de la taille du parc d'autobus et autocars nécessaires pour respecter les prescriptions de la SNBC projetterait à 2030 un parc d'environ 125.000 véhicules (soit une augmentation d'environ 24% par rapport à aujourd'hui) et d'environ 160.000 de véhicules en 2050. La part relative des bus devrait augmenter sur la période, en considération du report modal des trajets quotidiens vers les transports en commun.

Tableau 6 : estimation de l'évolution du parc d'autobus et autocars en France, dans une trajectoire cohérente avec les indications de la SNBC



4.3 La répartition entre les différentes technologies pour les bus et autocars

Différentes options technologiques sont envisageables pour décarboner le secteur des transports collectifs routiers de passagers sur le moyen et long terme. Elles peuvent être réparties en trois grandes catégories : les véhicules gaz, que ce soit du gaz naturel comprimé, du gaz naturel liquéfié ou du biogaz, les véhicules électriques (hybrides rechargeables ou tout-électriques) et les véhicules à hydrogène (pile à combustible). Ces technologies n'ont pas toutes le même niveau de maturité, l'offre de marché de

véhicules étant aujourd'hui plus développée pour les véhicules gaz et électriques que pour les véhicules à hydrogène.

À court et moyen terme, le développement d'une technologie plutôt qu'une autre dépendra de différents facteurs, notamment la progression des coûts à l'achat et le développement des infrastructures nécessaires pour les différentes filières. À long terme, la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et les polluants favorisera la diffusion des véhicules « zéro émissions à l'usage », en particulier pour les autobus qui évoluent dans des milieux urbains. [10]

En particulier, les autobus urbains se prêtent bien à une électrification massive [11] : en effet, ils évoluent sur des routes bien définies et régulières, avec des besoins énergétiques facilement estimables à l'avance, ce qui est particulièrement adapté à une technologie tout-électrique. Les véhicules hybrides, du fait de leur coût plus élevé et des émissions de gaz à effet de serre et polluants lors de l'usage en mode thermique, semblent moins pertinents dans les contextes urbains. Les technologies utilisant du gaz naturel (comprimé ou liquéfié, y compris le biométhane), font partie des technologies « propres » indiquées, en ce qui concerne les véhicules lourds, par la directive « véhicules propres » révisée. Ces technologies contribueront, sur le court et moyen terme, à la décarbonation des flottes d'autobus et autocars. Cependant, l'efficacité en matière de réduction d'émissions des véhicules roulant au gaz fossile est moindre par rapport à celle des véhicules électriques ou à hydrogène [11]. Les autobus et autocars utilisant du biométhane présentent un meilleur bilan environnemental, mais les contraintes sur les ressources pour la production de biométhane (notamment gisement de biomasse en France) pourraient justifier une limitation de l'utilisation de ce combustible aux usages les plus difficilement électrifiables (par exemple, camions longue distance ou autocars longue distance).

Aujourd'hui, les autobus urbains tout-électriques semblent nettement prédominants dans les ventes par rapport aux autres technologies électriques ou à hydrogène. [11]

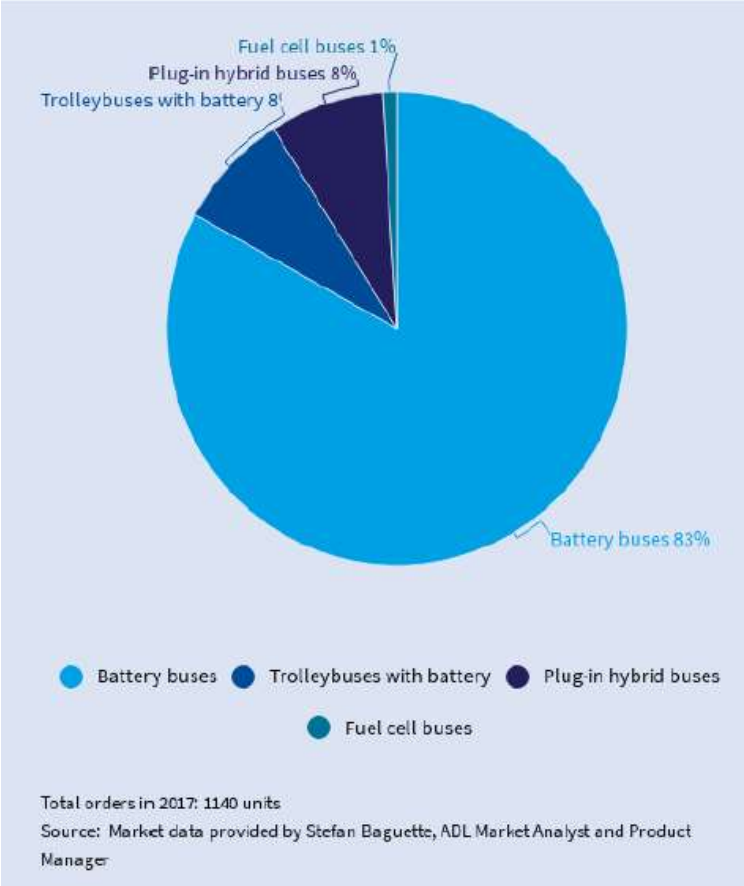


Figure 27: Répartition des ventes de bus électriques par technologie en Europe en 2017 (véhicules électriques et hydrogène) (Source : T&E)

Pour les autocars, le passage aux motorisations alternatives se fait plus lentement, avec une offre de modèles plus restreinte, mais les premiers modèles commencent à être déployés sur des lignes interurbaines en France. Fin 2019, il y avait ainsi une soixantaine d'autocars tout-électriques en circulation [12], alors que le nombre d'autocars hybrides rechargeables est aujourd'hui anecdotique (un exemplaire en circulation en 2019 [13]).

La loi de transition énergétique pour la croissance verte de 2015 impose un pourcentage minimal de véhicules à faibles émissions (véhicules électriques, hydrogène, GNV, carburants d'origine renouvelable) pour tout renouvellement de flottes de transports collectifs incluant plus de 20 véhicules. Les objectifs s'appliquent à la fois aux autobus et aux autocars, mais en ce qui concerne les autocars interurbains le décret d'application inclut dans les véhicules à faibles émissions, en plus des technologies déjà citées, les véhicules utilisant un carburant d'origine fossile et respectant au moins la norme Euro VI. La part de véhicules à faibles émissions dans les renouvellements doit être de 50% à partir de 2020 et de 100% à partir de 2025.

Pour le mix de technologies dans les parcs d'autobus et autocars à l'horizon 2050, une trajectoire de référence compatible avec les orientations de la SNBC est considérée, accompagnée d'une variante avec un développement significatif des véhicules alimentés à l'hydrogène (piles à combustible) et

d'une variante prenant un compte un développement moins important de l'électrification sur les segments des bus et autocars.

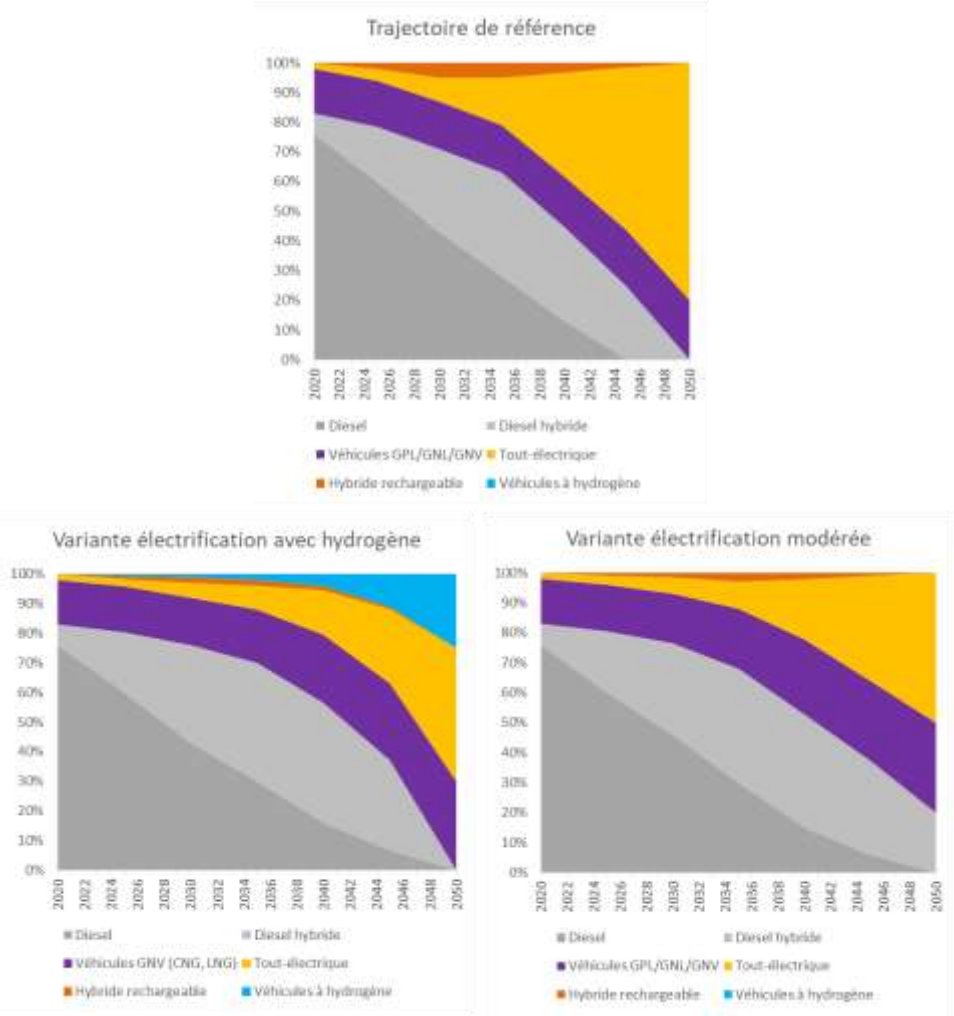


Figure 28 : Trajectoires d'électrification du parc d'autobus à l'horizon 2050 (la trajectoire de référence se fonde sur une estimation RTE d'un parc cohérent avec la SNBC)

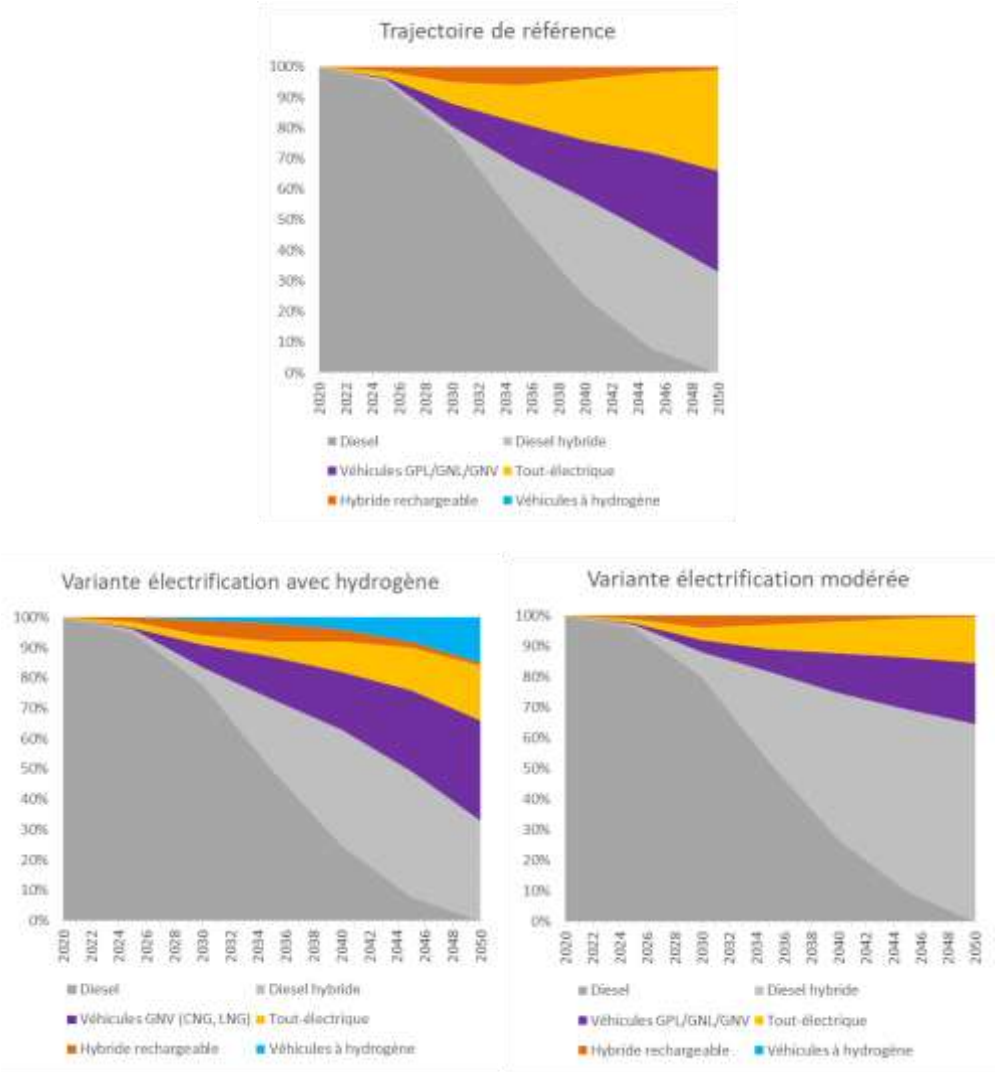


Figure 29 : Trajectoires d'électrification du parc d'autocars à l'horizon 2050 (la trajectoire de référence se fonde sur une estimation RTE d'un parc cohérent avec la SNBC)

4.4 Les hypothèses sur la fréquence de connexion des bus et autocars

Les stratégies de recharge et alimentation des autobus urbains peuvent être multiples : recharge nocturne sur prise électrique au dépôt, recharge rapide en bout de ligne, recharge par biberonnage aux arrêts (par pantographe ou induction), ou alimentation continue par caténaire (trolleybus à batterie). Dans le cas des trolleybus, une petite batterie sert à garantir un marge d'utilisation en dehors des caténaires (manœuvres, rangement) et le fonctionnement de certains auxiliaires.

La stratégie de recharge des autobus est un paramètre important pour l'évaluation des appels de puissance ainsi que pour l'estimation du potentiel de flexibilité liés aux recharges. En effet, une recharge nocturne au dépôt peut représenter une configuration plus favorable pour le système électrique (baisse des consommations dues aux autres usages, dans les heures nocturnes), mais également garantir une certaine marge pour placer la recharge aux meilleurs moments pendant la nuit. En revanche, une recharge par biberonnage aux arrêts laisserait beaucoup moins de marges pour la

flexibilité et présenterait également des puissances plus élevées (voir sections suivantes), plus contraignantes pour le système électrique.

Différentes considérations peuvent jouer en faveur de l'une ou l'autre solution technique de recharge. Par exemple, dans de nombreuses villes européennes il existe encore des systèmes de caténaires qui peuvent être adaptés et utilisés pour des trolleybus électriques. Une alimentation par pantographe aux arrêts peut être nécessaire pour des lignes qui opèrent 24h/24, alors qu'une recharge au dépôt sera préférable dans des villes historiques dans lesquelles il serait difficile d'installer des systèmes de recharge par pantographe aux arrêts de bus. Les systèmes de recharge par induction seraient moins invasifs visuellement, mais l'investissement nécessaire est plus élevé. Le coût et le poids des batteries est également un facteur déterminant : des améliorations dans les densités énergétiques et une baisse des coûts pourraient favoriser la solution de recharge au dépôt, qui nécessite des capacités de stockage plus élevées que la recharge par biberonnage.

Pour les autobus actuellement déployés en France, et notamment pour les 800 autobus électriques commandés par la RATP en 2019, la solution de recharge privilégiée actuellement est exclusivement la recharge lente au dépôt.

Pour les autocars électriques, une hypothèse de recharge nocturne au dépôt généralisée est retenue.

Une proposition d'hypothèses pour l'évolution des types de recharge est illustrée sur la figure suivante. Celle-ci pourra être amendée en fonction des retours de la concertation.

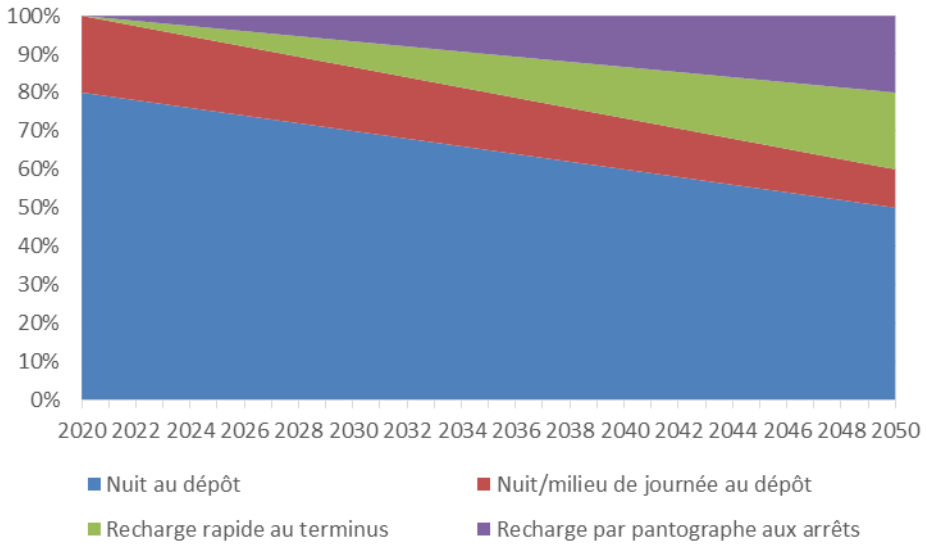


Figure 30 : Hypothèses de répartition des fréquences de connexion des autobus électriques à l'horizon 2050

4.5 L'évolution des batteries pour les bus et autocars électriques

Selon T&E [11], les technologies de batteries qui seront le plus utilisées dans les années à venir pour les bus électriques sont les combinaisons Nickel-Cobalt-Manganèse (NCM) ou Nickel-Cobalt-Aluminium (NCA), qui devraient remplacer les batteries Lithium-Fer-Phosphate (LiFePo ou LFP) majoritaires jusqu'à présent. Pour le futur plus lointain, les technologies lithium-soufre, silicium ou électrolyte solide.

La taille des batteries des bus dépend essentiellement de la stratégie de recharge choisie. Pour les bus actuellement disponibles sur le marché ou présentés par les constructeurs, les tailles des batteries peuvent aller de 50-150 kWh pour les bus tout-électriques caractérisés par une stratégie de recharge par biberonnage, jusqu'à 600 kWh pour les bus se rechargeant au terminus ou au dépôt. La plupart des modèles aujourd'hui disponibles sur le marché prévoient les deux possibilités de recharge, et donc différentes options de taille de batteries.

Pour la recharge au terminus ou au dépôt, les tailles envisagées sur la plupart des modèles sur le marché sont de 200-400 kWh en fonction des dimensions du bus [14] [15] [16], avec des dimensions légèrement plus importantes sur le marché américain [17]. L'encombrement des batteries de cette taille n'aurait pas d'impact négatif sur le nombre de passagers transportables, selon la RATP. La recharge pendant la nuit au dépôt ne poserait pas de problèmes d'autonomie, avec une bonne planification des emplacements des dépôts pour la recharge [18]. Une taille de batterie plus grande permettrait une plus grande latitude dans le placement des recharges, et donc une flexibilité accrue.

Ceci dit, il est peu probable que la tendance à l'augmentation des tailles des batteries observée pour les véhicules légers se reproduise dans la même mesure concernant les bus électriques. En effet, le bus électrique a des besoins de mobilité bien définis et des parcours maitrisés, qui rendent possible une planification optimale des recharges. Si une légère augmentation des tailles des batteries pourrait garantir une plus grande flexibilité d'usage, elle augmenterait également les coûts et risquerait d'avoir des conséquences sur la capacité de transport de passagers. Pour ces raisons, RTE propose de retenir une augmentation maîtrisée à l'horizon 2050 de la taille des batteries des bus urbains par rapport à celles observées aujourd'hui.

Concernant les autocars, le modèle le plus répandu en France aujourd'hui est un modèle du fabricant chinois Yutong, possédant une capacité de transport de 59 passagers et un stockage d'environ 300 kWh, ce qui permettrait de parcourir 200 à 250 km [19].

L'hypothèse proposée par RTE pour l'évolution des tailles moyennes de batteries est illustrée sur la figure suivante mais pourra être amendée en fonction des retours des parties prenantes.

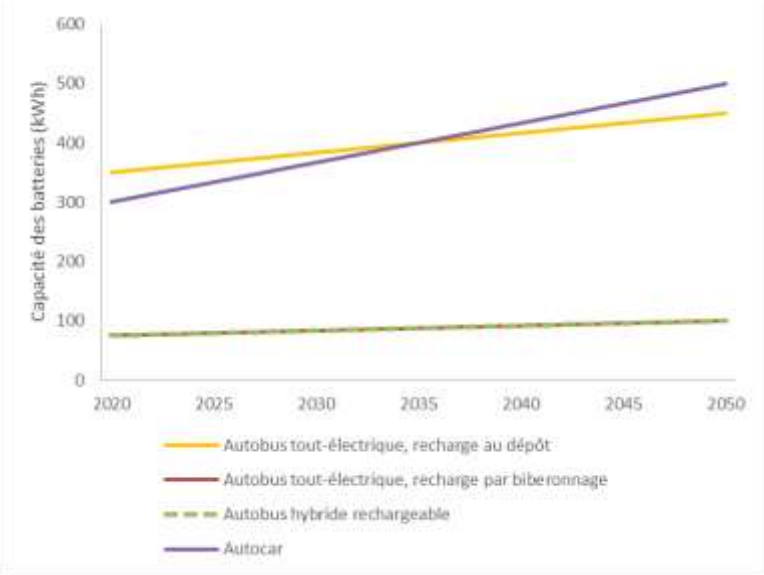


Figure 31 : hypothèses d'évolution des tailles moyennes des batteries pour les différents segments d'autobus et autocars

4.6 Puissances de recharge des bus et autocars

La puissance de recharge des autobus et autocars est un paramètre important pour la caractérisation des appels de puissance attendus, en particulier pour les autobus qui fonctionnent avec des systèmes de recharge rapide. Pour les autobus et autocars qui privilégient des recharges au dépôt, la puissance de recharge peut influencer la durée de la recharge, donc la marge disponible pour le pilotage pour placer la recharge au meilleur moment pendant les heures de connexion.

Pour les autobus urbains, tout comme la fréquence de connexion et la taille des batteries, les puissances de recharge sont très dépendantes de la technologie choisie pour la recharge : recharge lente au dépôt, recharge rapide aux terminus, ou alors recharge rapide par biberonnage aux arrêts pendant le parcours. Pour la recharge lente au dépôt, une puissance de 50 kW est aujourd'hui généralement jugée suffisante. C'est le cas par exemple des bus Heuliez [20] qui ont remporté une partie de l'appel d'offres 2019 de la RATP. Un autre exemple de ce type de recharge vient de la ville de Londres au Royaume Uni, qui a déjà complètement électrifié plusieurs lignes de bus. En particulier, les deux dernières lignes électrifiées dans le centre-ville, avec des autobus fabriqués conjointement par BYD et ADL, s'appuient sur un système de recharge lente au dépôt pendant la nuit, en large partie grâce à des points de charge de 40 kW [21].

Les recharges rapides par biberonnage aux arrêts de bus ou sur borne de recharge au terminus, en revanche, présentent des puissances bien plus élevées. Dans la plupart des solutions technologiques disponibles actuellement, la puissance maximale de recharge par pantographe va de 300 kW jusqu'à 600 kW [20] [22] [23] [24], avec notamment la Chine qui envisage des recharges jusqu'à 900 kW pour les véhicules commerciaux [25]. Les recharges au terminus, sur borne de recharge rapide, sont caractérisées par des puissances maximales du même ordre de grandeur (100 – 600 kW) [20] [22] [24].

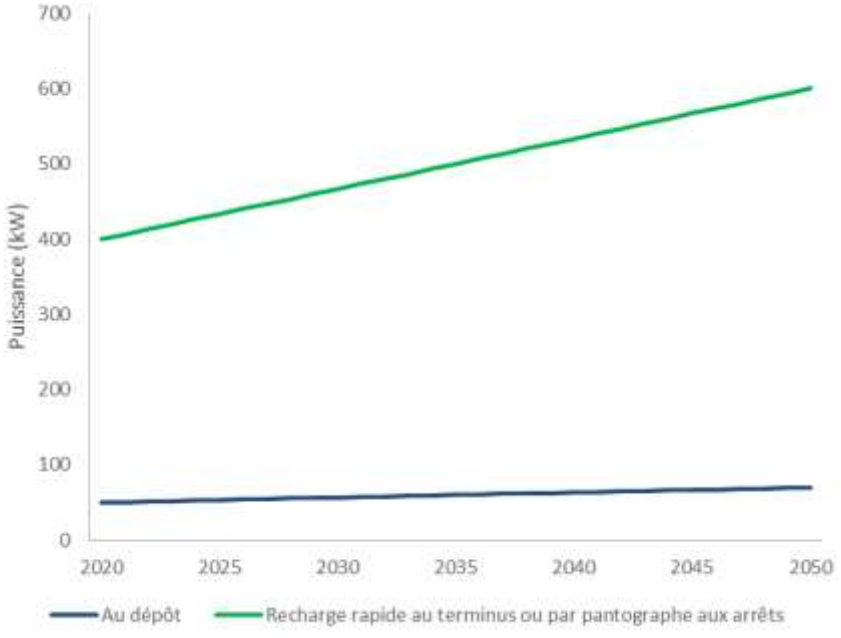


Figure 32 : hypothèses d'évolution des puissances de recharge pour les autobus et autocars

4.7 Consommations unitaires des bus et autocars

L'évolution des consommations unitaires des autobus et autocars électriques déterminera le volume d'énergie nécessaire pour leurs recharges : une évolution à la baisse permettrait de limiter l'augmentation des consommations d'énergie suite au report modal attendu vers les transports collectifs routiers dans les décennies à venir, en limitant les contraintes sur le système électrique et en facilitant le pilotage des recharges. **En effet, une plus faible consommation d'énergie journalière, à parité de distance parcourue, permet une plus courte durée de recharge et donc plus de latitude pour un placement optimisé de celle-ci.**

Les consommations unitaires des autobus et autocars électriques sont très dépendantes de plusieurs facteurs, notamment le type de véhicule, le style de conduite et les conditions d'utilisation. Un facteur déterminant est la présence éventuelle de systèmes de chauffage et/ou climatisation alimentés par la batterie. À titre d'exemple, pour les autobus urbains, ALD (Alexander Dennis Limited) [21] estime :

- pour les autobus de 12 mètres une consommation unitaire de 1,1 kWh/km en conduite urbaine sans chauffage/climatisation, et 2,5 kWh/km en conduite urbaine avec système de chauffage/climatisation.
- pour les autobus de 18 mètres (articulés), les consommations seraient respectivement de 1,8 kWh/km et 3,5 kWh/km.

La présence d'un système de chauffage/climatisation induit donc une augmentation considérable des consommations unitaires des véhicules (doublement par rapport à la consommation sans ces systèmes) [21] [26]. Selon une note de l'UTP, les auxiliaires (dont chauffage et climatisation) utiliseraient 25% de l'énergie totale [7]. C'est pour cette raison que les conclusions du projet européen ELIPTIC (electrification of public transport In cities) recommandent d'utiliser, pendant la première phase de développement des transports publics électriques, des systèmes de chauffage diesel sur les

bus à motorisation électrique. Le développement de systèmes de chauffage par pompe à chaleur permettrait par la suite de réduire l'impact du chauffage sur l'autonomie des véhicules et donc de passer à des bus 100% électriques (y compris pour le chauffage) [26].

Pour estimer l'évolution des consommations unitaires à l'horizon 2050, le même taux de progression de l'efficacité énergétique pris en compte par la SNBC pour les poids lourds électriques aux horizons 2030 et 2035 est appliqué aux consommations unitaires des autobus. Dans les scénarios considérés, le chauffage des véhicules est considéré électrique. La baisse attendue des consommations unitaires tient compte de l'évolution des technologies de chauffage. Les consommations unitaires des autocars sont fondées sur la limite haute de la fourchette de consommations unitaires observées sur les autobus aujourd'hui, en l'absence de données spécifiques.

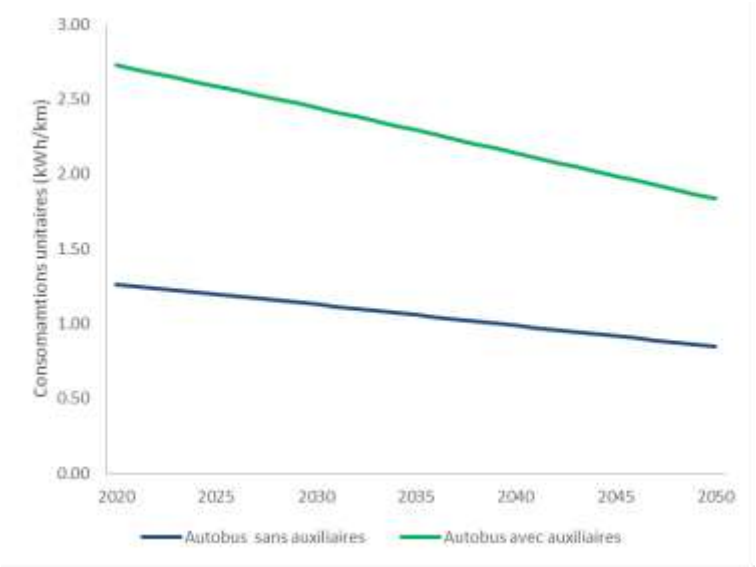


Figure 33 : hypothèses d'évolution des consommations unitaires des autobus électriques à l'horizon 2050 (à température normale)

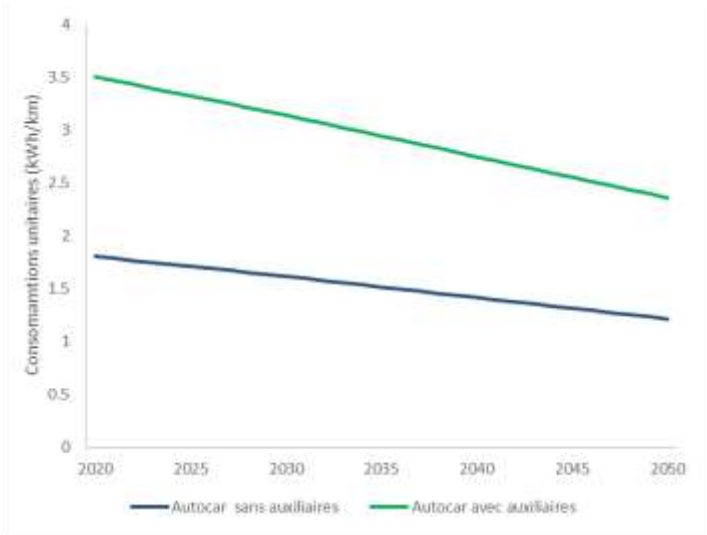


Figure 34 : hypothèses d'évolution des consommations unitaires des autocars électriques à l'horizon 2050 (à température normale)

4.8 Comportements de mobilité des bus et autocars

Pour modéliser les appels de puissance liés à la recharge des autobus et cars électriques, ainsi que les moments de connexion ou les véhicules sont susceptibles de fournir des services de flexibilité au système électrique, il est nécessaire de connaître comment les distances parcourues se répartissent jour par jour et heure par heure au cours de l'année.

Les autobus urbains présentent un profil d'utilisation très intense sur la journée. Si les véhicules particuliers ne sont utilisés que 4% du temps sur une journée moyenne [1], pour un autobus le temps d'utilisation est normalement de 12 à 16 heures [26]. Malheureusement, il est difficile de trouver des informations détaillées sur la mobilité des autobus urbains (distances parcourues pendant la journée, temps d'arrêt, etc.), mais il est possible d'estimer de manière approximative l'utilisation des véhicules en partant des informations sur les déplacements des usagers.

Selon l'ENTD 2008 [27], dernière enquête nationale publique décrivant la mobilité des français[5], la distance parcourue par les usagers d'autobus un jour moyen du lundi au vendredi est presque quatre fois plus élevée que la distance parcourue un jour de week-end. La variation du taux de remplissage des véhicules au cours de la journée et entre les jours ouvrés et le week-end fait que le nombre de lignes actives et la fréquence de passage des véhicules ne suivent pas exactement la même distribution temporelle que la demande de transport. Cependant, on peut supposer en première approximation que les distances couvertes par les flottes de bus suivent les mêmes tendances, une fois l'« effet tampon » lié à la variation du taux de remplissage pris en compte. La distribution horaire des déplacements des véhicules peut également être supposée suivre la même distribution horaire que les déplacements des passagers recensés dans l'enquête.

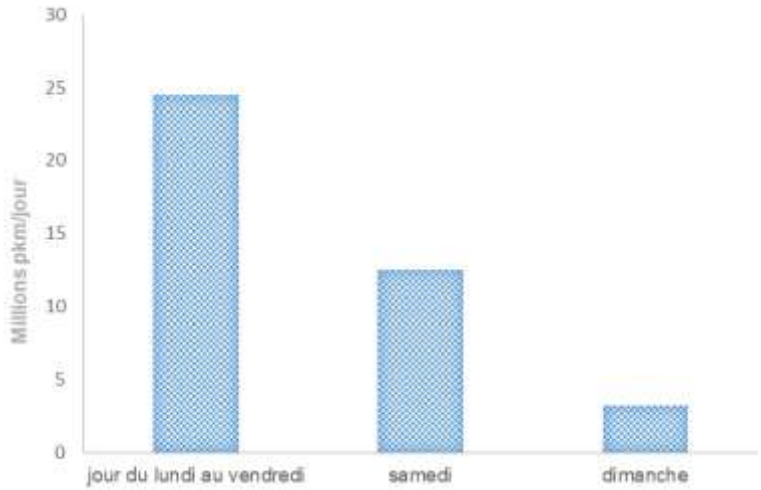


Figure 35 : distance totale parcourue par les usagers d'autobus en France un jour moyen de l'année [calculs à partir de l'ENTD 2008]

[5] Les résultats d'une nouvelle enquête de ce type devraient être diffusés en 2020

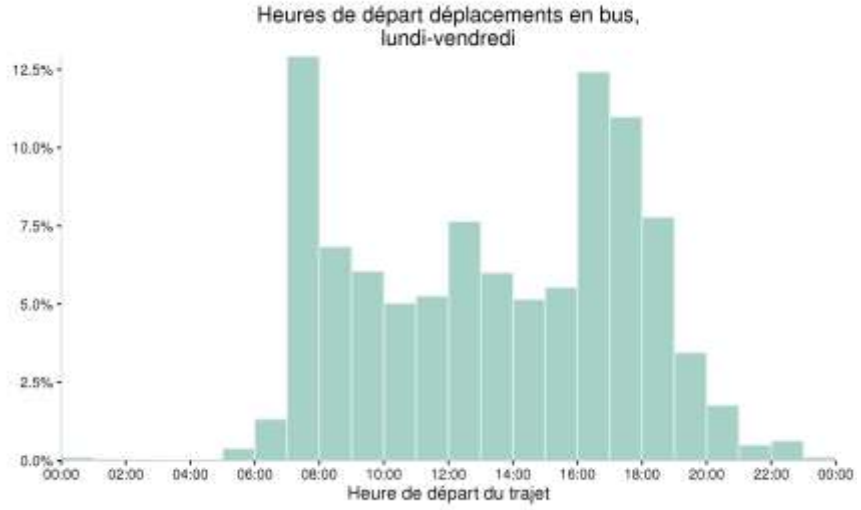


Figure 36 : Heures de départ des déplacements en autobus un jour moyen du lundi au vendredi [calculs à partir de l'ENTD 2008]

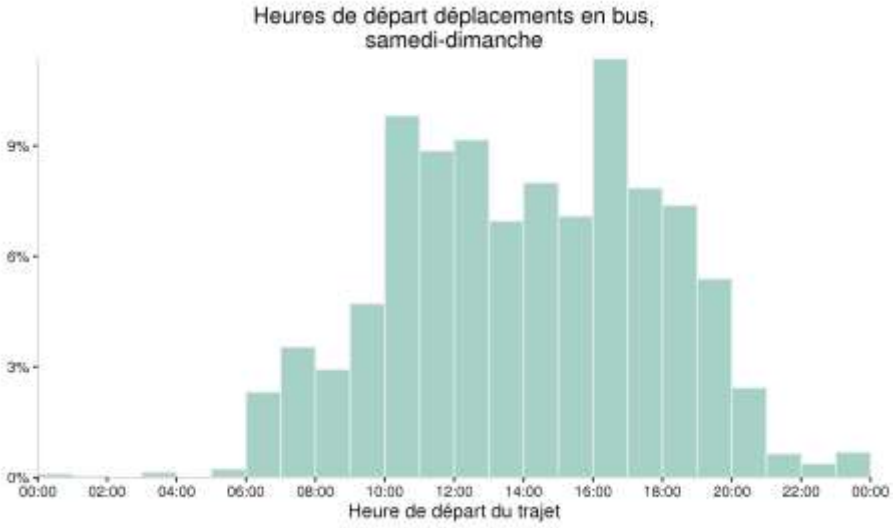


Figure 37 : Heures de départ des déplacements en autobus un jour de week-end moyen [calculs à partir de l'ENTD 2008]

À différence des autobus urbains, les autocars peuvent être utilisés à la fois pour les déplacements de « mobilité locale » au sens de l'ENTD (déplacements à moins de 80 km à vol d'oiseau du domicile), qui couvrent en général des liaisons interurbaines au sein d'un département ou d'une région, que pour des déplacements longue distance. Si le premier type d'utilisation est bien couvert par l'ENTD, le second a connu un développement massif après la libéralisation du marché en 2015 (les liaisons de 100 km ou moins restent régulées [28]).

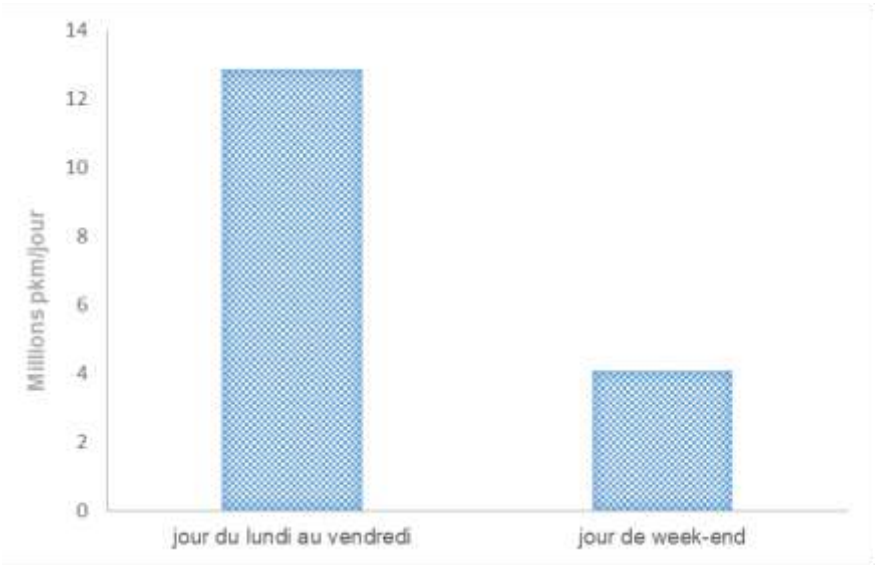


Figure 38 : distance totale parcourue par les usagers d'autocars un jour moyen de l'année, pour la mobilité locale (moins de 80 km à vol d'oiseau du domicile) [calculs à partir de l'ENTD 2008]

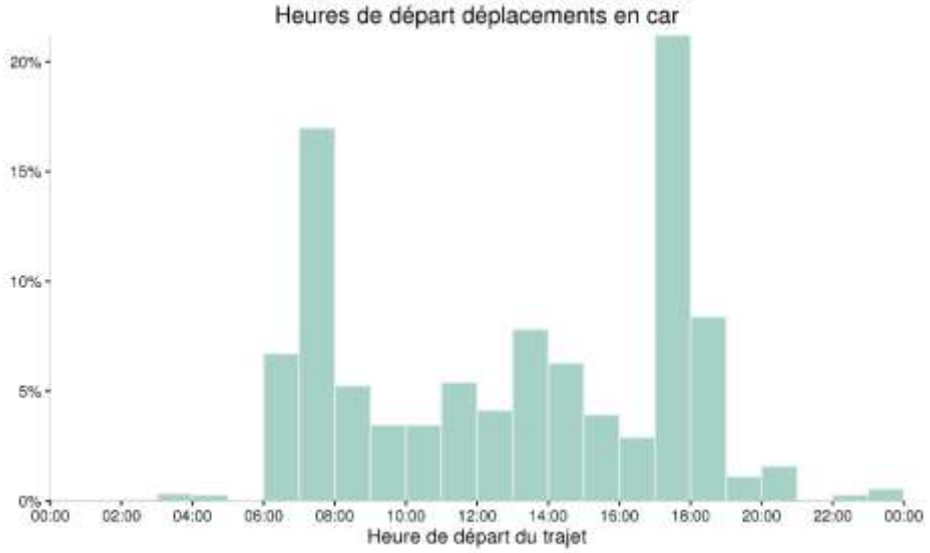


Figure 39: Heures de départ des déplacements en autocar un jour moyen de l'année, pour la mobilité locale (moins de 80 km à vol d'oiseau du domicile) [calculs à partir de l'ENTD 2008, pas suffisamment d'observations pour analyser le profil horaire du week-end séparément]

Il n'est donc pas possible de reconstruire les distributions des déplacements des autocars longue distance par jour et par heure à partir de cette enquête. Les informations à disposition sur les distances parcourues annuellement [28] permettent néanmoins d'observer que les distances totales parcourues par jour (passagers*km) grâce aux autocars longue distance sont du même ordre de grandeur que celles parcourues grâce aux cars utilisés pour la mobilité locale.

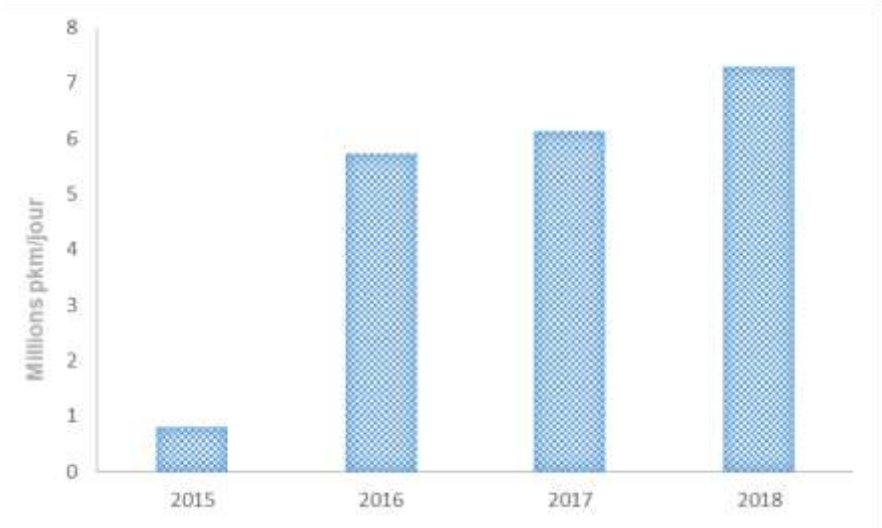


Figure 40 : distances moyennes parcourues par jour par les autocars longue distance depuis la libéralisation du marché [données Arafer]

5 Caractéristiques et mobilité des camions électriques

En 2018, le parc de camions en utilisation au sein de l'Union européenne est de l'ordre de 6,62 millions de véhicules [29], dont 554 000 en France [4]. La part de l'électrique est négligeable (quelques unités).

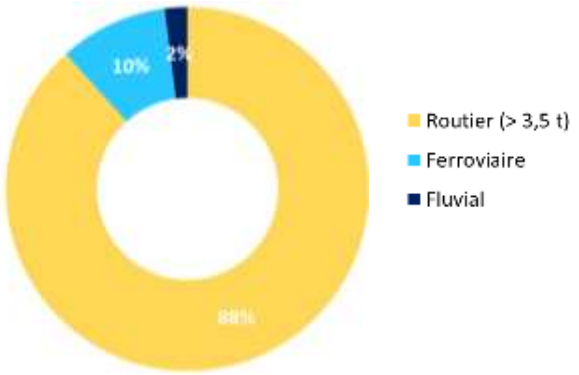
En 2019, les premières normes européennes en matière d'émissions de CO_2 pour les camions et autres véhicules utilitaires lourds ont été adoptées, ce qui encourage fortement les constructeurs de camions à définir des transitions vers les véhicules à zéro émission et particulièrement les véhicules électriques. La vitesse de cette transition dépendra de la capacité des nouvelles technologies à répondre aux besoins des transporteurs de marchandises : autonomie des véhicules, temps de recharge énergétique et conformité avec les règlementations environnementales nationales et locales.

On constate aujourd'hui que l'adoption des camions électriques se concentre sur les profils de missions urbaines pour plusieurs raisons. Le déploiement en milieu urbain facilite l'optimisation des arrêts de recharge le long des itinéraires, ce qui rapproche les profils de mission de ces camions à ceux des bus plutôt que ceux des véhicules long-distance. Les trajets urbains posent donc des exigences moindres en matière d'autonomie des batteries, en particulier dans un contexte où la recharge à haute puissance est très limitée. En outre, les camions électriques auront moins de difficultés d'accès aux villes où la réglementation vise à réduire le bruit ou la pollution atmosphérique, ce qui constitue un avantage concurrentiel potentiel par rapport aux camions avec moteurs thermiques (même ceux neutres en carbone).

Les sections suivantes décrivent les besoins de mobilité des camions (trafic, consommation énergétique, distances parcourues,…), le parc des camions, les technologies de motorisation (diesel, gaz, électrique, hybride…), et le comportement des véhicules (type de desserte, fréquence,…). Ces caractéristiques permettent d'estimer la consommation d'électricité, les besoins d'infrastructure de recharge électrique ainsi que la flexibilité que les véhicules peuvent apporter au système électrique.

5.1 Besoins de mobilité associés au transport de marchandises

Le trafic global de marchandises s'est élevé en 2018 à 332 Gtkm (source : compte des transports, SDES)[6]. La répartition modale de ce trafic global montre une très large prépondérance du transport routier.



[6] *Tableau E1.a « les transports intérieurs terrestres de marchandises », en excluant, comme dans le scénario SNBC, du périmètre le transport par oléoducs et le transport par véhicules utilitaires légers*

Figure 41 : Parts modales du transport de marchandises en 2018

Les hypothèses d'évolution du trafic de marchandises sont basées sur celles de la trajectoire AMS de la SNBC. Elles supposent une évolution du trafic global de marchandises liée à celle du PIB, modulo un gain logistique d'environ 0,8% par an lié à l'essor de l'économie circulaire et aux circuits courts.

Le trafic de marchandises ainsi modélisé passerait de 332 Gtkm en 2018 à 420 Gtkm en 2050.

Les hypothèses d'évolution des parts modales sont également adhérentes à celles du scénario SNBC. Elles tablent sur une baisse de plus de trois points de la part du transport routier, au profit du transport ferroviaire.

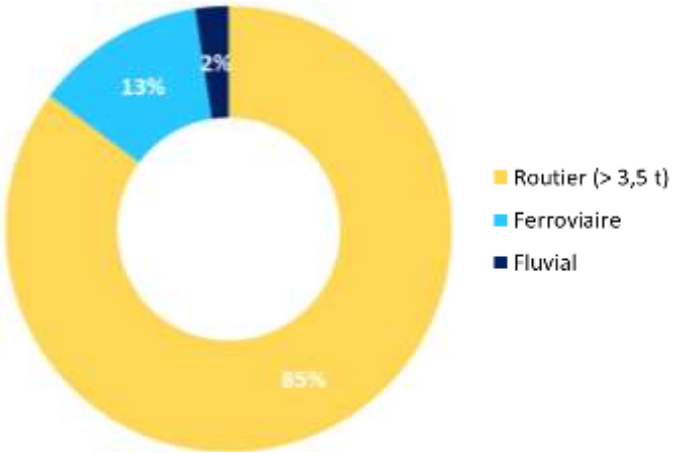


Figure 42 : Parts modales du transport de marchandises en 2050 basées sur les projections de la SNBC

Le tableau ci-dessous fournit une synthèse des principales hypothèses sur le trafic de marchandises.

Tableau 7 : Principales hypothèses sur le trafic de marchandises à l'horizon 2050

	2018	2050
PIB France *(G€2014)*	2286	3620
Gain annuel lié à l'économie circulaire/circuits courts	-	-0,85%
Trafic total marchandises *(Gtkm)*	332	420
Parts modales : *Transport routier (> 3,5 t)* *Transport ferroviaire* *Transport fluvial*	 *88,3%* *9,7%* *2,0%*	 *85,2%* *12,4%* *2,4%*
Trafic routier de marchandises (Gtkm)	293	358

Avec une hypothèse, retenue dans la SNBC, de poursuite de l'optimisation logistique (le tonnage moyen par poids lourd passerait de 10,3 t/véh aujourd'hui à 12,1 t/véh en 2050), la circulation des poids lourds en France pourrait être très légèrement croissante et atteindre 29,6 milliards de véh.km en 2050, contre 28,4 en 2018.

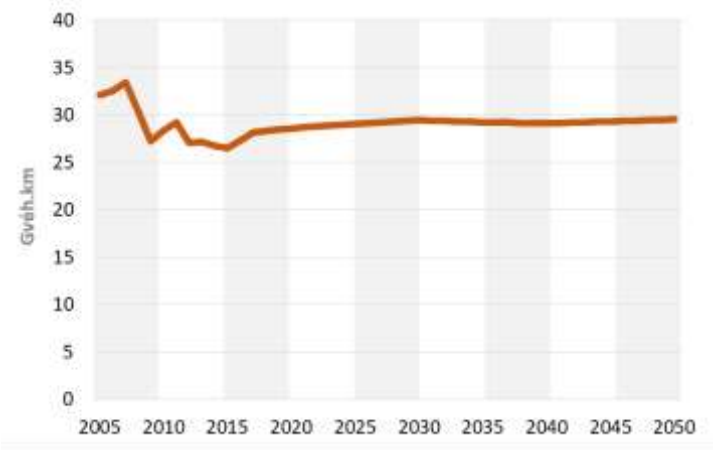


Figure 43 : Circulation de camions en France

5.2 Le parc de camions aujourd'hui

Les principales caractéristiques des camions qui vont impacter le système électrique sont le nombre de véhicules électriques, leur consommation kilométrique et le moment et l'emplacement de rechargement des véhicules.

Pour prendre en compte ces impacts, le parc de camions est ainsi segmenté dans le présent document en fonction de deux critères : le type de déplacement (urbain, régional ou longue distance) et le tonnage (inférieur ou supérieur à 19t). Le type de déplacement a un impact sur les comportements de recharge (moment et emplacement) et sur la consommation (en raison des vitesses différentes des déplacements). Le tonnage a un impact sur la consommation.

Selon le CGDD [2], le parc annuel moyen de camions immatriculés en France compte 554 000 véhicules en 2018. La segmentation du parc par poids montre que 37% des véhicules ont un Poids Total Autorisé en Charge (PTAC) inférieur à 19 tonnes. Ils comprennent principalement des petits camions rigides. Ce type de véhicules ont tendance à effectuer des opérations urbaines (livraison) et régionales de courte distance. Le reste du parc ce sont des camions rigides et des tracteurs routiers pour le transport de marchandises sur des opérations interrégionales et sur des longues distances.

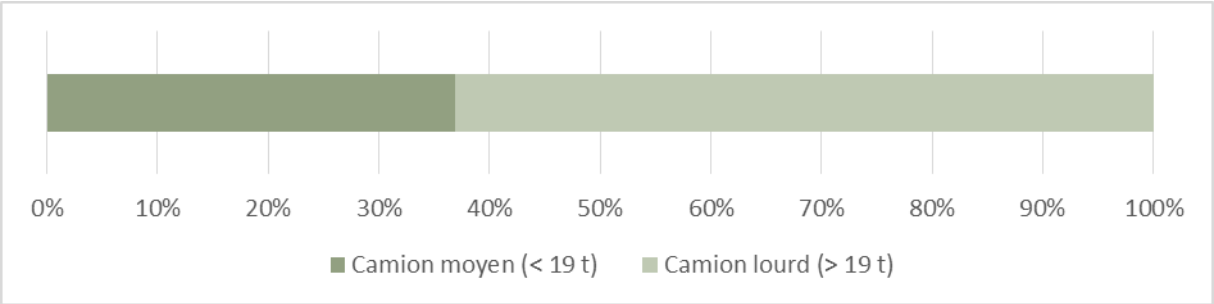


Figure 44 : Répartition actuelle du parc de camions en France par poids. Source : données SDES

Le parc actuel peut être également divisé en fonction des distances journalières parcourues : fret local et urbain (moins de 150 km par jour), fret régional (150-500 km par jour) et fret longue distance (plus de 500 km par jour). Actuellement, 27% des camions ont des missions de type longue distance, 58% régionale et 14% urbaine.

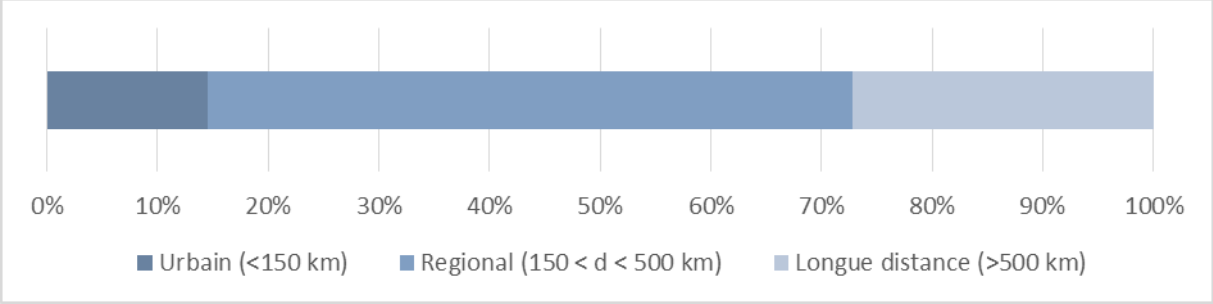


Figure 45 : Répartition actuelle du parc de camions en France par type de desserte.

5.3 La répartition actuelle des camions selon leur motorisation

Selon l'ACEA [29], en 2019, 97,9 % de tous les nouveaux camions immatriculés dans l'Union Européenne fonctionnaient au diesel, alors que l'essence représente que 0,1 % des véhicules. Les camions électriques rechargeables représentaient 0,2 % des ventes totales de camions neufs, tandis que l'ensemble des véhicules à propulsion alternative[7] représentait 2 % du marché de l'UE.

En France, la majorité des camons rigides et des tracteurs routiers utilisent le gazole comme source d'énergie. Le gaz naturel liquéfié (GNL) est la deuxième source d'énergie utilisée, mais cela reste négligeable (<0,5% des véhicules) comparé au diesel. Concernant l'électrique, uniquement quelques unités de camions électriques sont présentes dans le parc français, la plupart sont des camions rigides de faible tonnage.

Tableau 8 : Parc de camions en France en 2019 en fonction du tonnage et de l'énergie de motorisation. Source : données SDES et Eurostat

	Gazole	Essence	Essence-GPL	GNV	Electricité	Total
Camion lourd (> 19 t)	343 361	17	3	1 958	1	**345 340**
Camion moyen (< 19 t)	201 115	76	11	967	97	**202 266**
Total	**544 476**	**93**	**14**	**2 925**	**98**	**547 606**

[7] Motorisations : gaz naturel, GPL, biofuels et ethanol

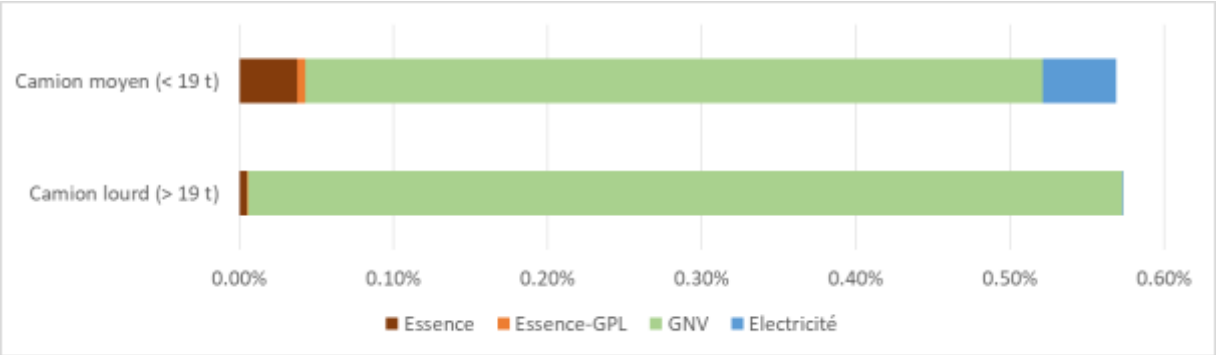


Figure 46 : Répartition du parc actuel de poids lourds par tonnage et énergie hors gazole.
Source : données SDES et Eurostat

Dans l'ensemble, en 2019, la demande de nouveaux camions électriques a légèrement augmenté dans l'UE. Les principaux marchés pour ces véhicules étaient l'Allemagne (608 unités), les Pays-Bas (76) et la France (24), qui représentaient ensemble 95 % de toutes les immatriculations de camions électriques l'année dernière. Concernant les camions hybrides, 272 véhicules ont été immatriculés en 2019, dont 64 en France.

Tableau 9 : Nouvelles immatriculations de camions en France par type de carburant (hors diesel et essence).
Source [29]

	2018	2019
Electrique[8]	0	24
Hybride non rechargeable	49	64
GNV	1 240	1 615

A long terme, la décarbonation du transport routier de marchandises se réalisera principalement grâce à des transferts vers l'électricité et à des améliorations dans l'efficacité de la motorisation des véhicules. Ainsi, le parc de camions sera renouvelé par plusieurs motorisations :

- thermiques (moteurs à combustion interne) : alimentés du biogaz ou biocarburants ;
- électriques : alimentés par des batteries, ou directement par une caténaire ou encore par de l'hydrogène via une pile à combustible ;
- hybrides : combinaison des précédentes.

Il existe un large faisceau d'incertitudes quant au déploiement futur de ces technologies, qui seront influencées par les changements des coûts technologiques, des coûts énergétiques, des préférences des consommateurs et du niveau des taxes et des incitations publiques.

[8] « Electrique » comprend les véhicules électriques à batterie, les véhicules électriques à pile à combustible, les véhicules à autonomie prolongée (« extended-range ») et les hybrides rechargeables.

5.4 Les trajectoires de parc à l'horizon 2050

Le Conseil européen a adopté en juin 2019[9] les premières normes européennes en matière d'émissions de CO_2 pour les camions et autres véhicules utilitaires lourds. En vertu de ces nouvelles règles, les constructeurs seront tenus de réduire en moyenne les émissions de dioxyde de carbone des nouveaux poids lourds de 15 % à partir de 2025 et de 30 % à partir de 2030, par rapport aux niveaux de 2019. Les constructeurs devront également s'assurer que les véhicules à faibles émissions ou à zéro émission représentent 2% de la part de marché des véhicules neufs d'ici 2025.

Dans le contexte français, la SNBC prévoit également des objectifs de décarbonation importante pour ce segment. En conséquence, le parc roulant de poids lourds va être profondément modifié afin d'atteindre ces ambitions. D'un parc majoritairement composé aujourd'hui de véhicules thermiques au diesel (environ 99%), les orientations de la SNBC conduisent à une diminution de la part de marché du diesel dans le parc roulant de poids lourds à 86% en 2030 et jusqu'à 24% en 2050. Concernant les camions au GNV, les orientations établissent un objectif de 12% du parc en 2030 et 51% en 2050. Les objectifs pour les motorisations électriques sont moins amitieux avec des perspectives de l'ordre de 2% du parc pour 2030 et de 25% en 2050, en raison notamment des contraintes liées aux besoins d'autonomie de ces véhicules.

Tableau 10 : Part de marché des énergies dans le parc roulant de poids lourds.
Source : Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat

	2015	2030	2050
Thermique diesel	100%	86%	24%
GNV	0%	12%	51%
Electrique et hydrogène[10]	0%	2%	25%

La répartition au sein des véhicules électriques, qui comprennent les véhicules à batterie, les hybrides rechargeables et les véhicules à hydrogène, n'aura pas les mêmes impacts pour le système électrique. D'une part, la consommation électrique d'ensemble pourra être différente du fait des différences de rendement entre les technologies (rendement du cycle complet électrolyse-pile à combustible de l'ordre de 25 à 35% pour l'hydrogène contre 70 à 90% pour les batteries électriques). D'autre part, les appels de puissance associés à la production d'électricité pour la recharge de ces véhicules peuvent conduire à des sollicitations différentes pour le système électrique. Si le pilotage des recharges des camions électriques à batteries permet une certaine flexibilité sur l'appel de puissance, l'hydrogène utilisé pour les camions peut quant à lui être produit à des heures où les véhicules ne sont pas en train de se recharger, puis stocké (dans une certaine mesure), offrant ainsi plus de flexibilité sur la production.

Les projections de la SNBC donnent un chiffre global pour l'évolution de l'ensemble camions électriques à batteries, à caténaires ou à hydrogène, et ne préjugent pas de la répartition entre ces différentes technologies. Dans la suite du document, les trois technologies électriques (batteries, caténaires et hydrogène) sont donc également prises comme un seul bloc, à ce stade. Pour les besoins

[9] https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-60-2019-INIT/fr/pdf
[10] Y compris : véhicules à batterie, hybrides rechargeables, pile à combustible (hydrogène) et avec alimentation par caténaire.

de la modélisation du système électrique, RTE considérera toutefois plusieurs variantes sur la répartition entre ces différentes technologies, qui seront précisées ultérieurement.

La diffusion des technologies au gaz et électriques ne seront pas uniformes sur tous les segments de camions. Cette diffusion dépendra de l'évolution des technologies disponibles pour les différents segments de transport (tout électrique, pile à combustible, GNV), des coûts des véhicules et des carburants (électricité, hydrogène bas carbone, biogaz) ainsi que des infrastructures de recharge (stations de recharge électrique, à hydrogène, au gaz et caténaires routières).

Les réglementations des villes pour réduire la pollution locale stimuleront une diffusion des technologies électriques dans le segment de livraison urbaine. Par rapport aux VEB, les véhicules au GNV (y compris biogaz) émettent des particules fines [30] [31], ce qui ne serait pas conforme avec certaines réglementations locales.

Les camions de desserte régionale et longue distance auront des consommations unitaires supérieures ainsi que des besoins d'autonomie plus importants. Les technologies de décarbonation privilégiées dans ces segments seront à priori le GNV, l'électrique à caténaire et l'électrique à pile à combustible. Pour les camions électriques à batterie, certains constructeurs présentent des autonomies supérieures à 800 km, ce qui permettrait d'utiliser ces véhicules également pour ce type de trajets.

Par rapport au cadrage donné par la SNBC (scénario de « référence » dans la figure ci-dessous), la place du camion électrique à batterie pourrait être plus importante dans un scénario avec une évolution forte du trafic urbain et des courtes distances, une diminution des coûts des batteries et un déploiement massif des infrastructures de recharge pour le transport longue distance : bornes de recharge rapide en station-service et/ou caténaire routière. En complément du cadrage de la SNBC, RTE fera des analyses complémentaires pour établir des scénarios avec une distinction des technologies électriques (électrique à batterie, caténaire et hydrogène).

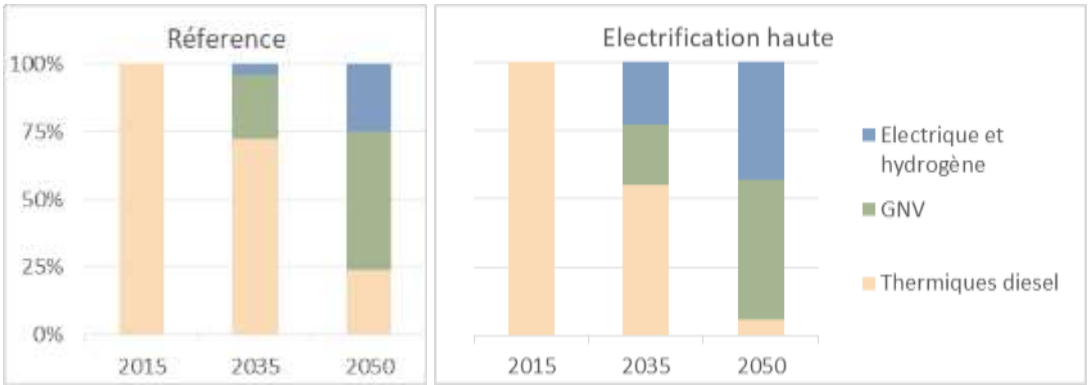


Figure 47 : Hypothèses d'évolution des motorisations du parc de camions en 2035 et 2050

Les trajectoires d'électrification du parc de camions s'appuient sur la projection du trafic de marchandises présentée précédemment. Cette évolution du trafic est traduite homothétiquement en évolution du parc de poids lourds.

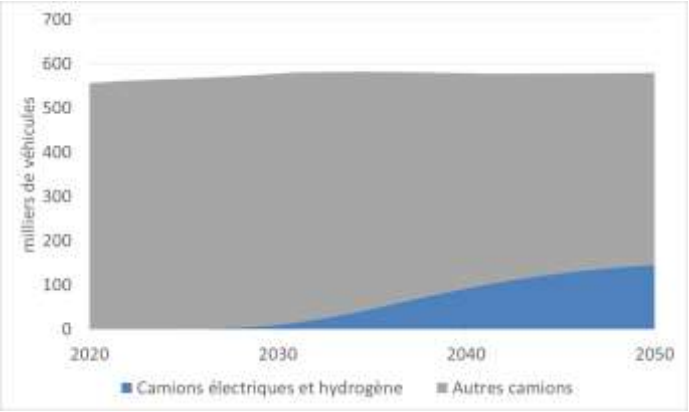


Figure 48 : Projections du parc de camions en France selon la trajectoire de référence

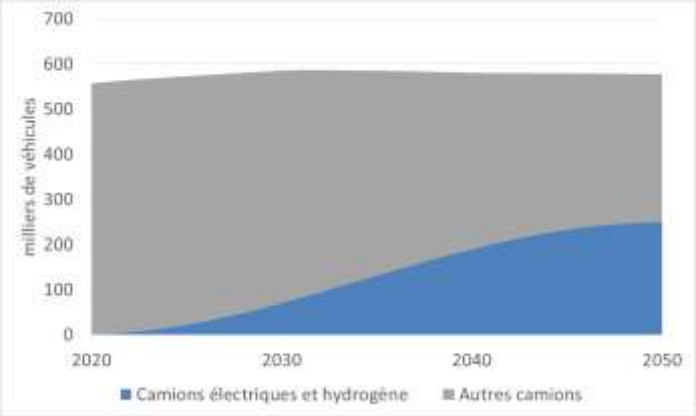


Figure 49 : Projections du parc de camions en France selon la trajectoire d'électrification haute

La modélisation prend en compte la diversité de segments de transport de marchandises. Dans tous les scénarios, l'électrification est plus marquée dans les segments urbain et régional, en cohérence avec les projections des constructeurs automobiles. La trajectoire haute prend en compte une électrification plus importante du segment de longue distance, notamment en raison du développement massif des infrastructures de recharge électriques (station de service et caténaires routières) dans les axes routiers européens.

RTE propose donc de retenir des hypothèses différenciées sur la répartition des technologies en fonction des segments. Dans les scénarios et variantes proposées, la part des camions électriques au sein du segment des camions urbains atteint ainsi entre 49% et 78% en 2050. S'agissant du segment des poids lourds régionaux, la part des véhicules électriques atteint entre 26% et 43%. La longue distance a quant à elle un taux d'électrification compris entre 11% et 24%.

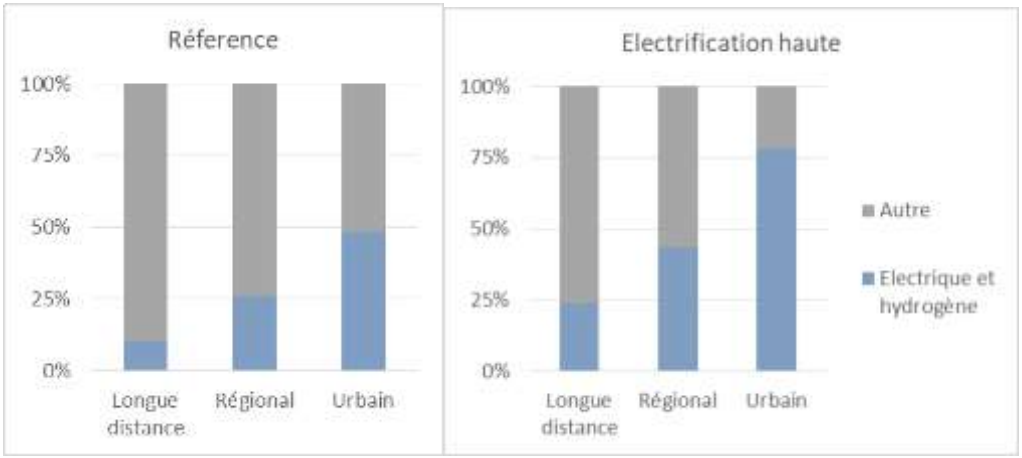


Figure : Hypothèses d'évolution de la répartition des camions électriques en fonction du type de desserte en 2050

5.5 Fréquence de connexion

La fréquence de connexion des camions est un des paramètres les plus impactant pour le système électrique. Des recharges lentes au dépôt le soir n'auront pas le même impact que les recharges rapides en station de service ou encore les recharges dynamiques pour les camions utilisant des caténaires électriques routières. La recharge électrique des camions va dépendre du type d'utilisation. Il existe trois cas d'utilisation différents: au dépôt, à destination et recharge publique [32]. Ces termes décrivent les situations où on peut s'attendre à ce que le camion soit rechargé :

- Recharge au **dépôt** : recharge en fin de service au dépôt de l'opérateur de transport. Recharge privilégiée pour des camions avec des missions urbaines. La recharge se fera normalement la nuit avec une fréquence journalière. Sous l'hypothèse que la puissance de recharge et l'énergie à recharger permettent de recharges plus courtes que la durée de stationnement, ce type de recharge est de caractère flexible et peut être placée aux moments où le prix de l'électricité est le plus bas.

- Recharge à **destination** : recharge dans les centres de distribution pendant la journée lors du chargement et déchargement. Recharge adaptée pour les camions électriques avec des parcours régionaux, lorsqu'ils effectuent des opérations de chargement et déchargement. Le temps de chargement/déchargement est en moyenne de 3 heures [33], ce qui rend cette recharge non flexible.

- Recharge **publique** : pendant la journée ou la nuit, dans des lieux accessibles au public pour des camions. Par exemple, les stations de service et les aires de repos. Pour des pauses en cours de trajet, la recharge n'est pas flexible. Néanmoins, pour des pauses nocturnes la recharge pourrait être flexible et placée aux heures de prix d'électricité plus bas.

En plus des recharges à destination et publiques, les camions électriques avec alimentation dynamique peuvent utiliser des recharges avec caténaires sur les routes. La caténaire n'a pas besoin d'être installée sur l'ensemble du parcours : des solutions intermédiaires permettront un compromis technico-économique entre la taille des batteries et les tronçons d'autoroute équipés de caténaire.

Selon l'International Council on Clean Transportation [34] , les camions réalisent 75% du trajet avec connexion au caténaire. Ces recharges ne sont par nature pas flexibles.

La répartition des fréquences de connexion en fonction de l'emplacement varie en fonction de la pénétration des technologies dans chaque segment du scénario considéré. A l'horizon 2050, l'augmentation de la taille des batteries et des puissances de recharge vont permettre l'électrification des camions avec des missions plus longues (régionaux et longue distance). Cela se traduit par une augmentation de la fréquence de connexion sur des bornes en dehors des dépôts. Dans le scénario d'électrification haute, notamment du transport longue distance, l'utilisation des caténaires routières impliquerait une moindre connexion en station-service ou à destination.

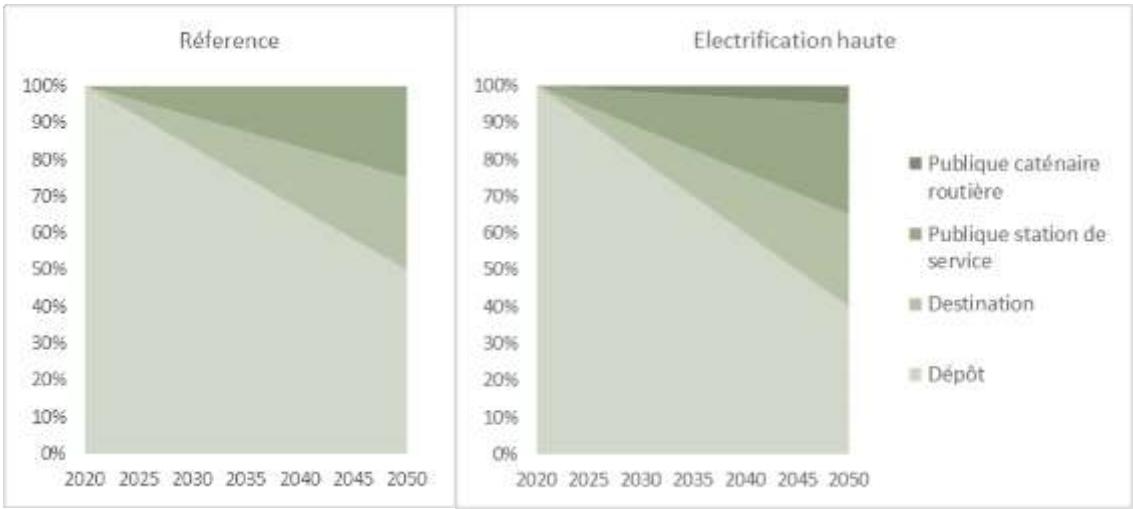


Figure 50 : Hypothèses d'évolution des fréquences de connexion des camions électriques à 2050

5.6 Les caractéristiques des batteries de camions électriques

L'évolution de la capacité des batteries des camions électriques est susceptible d'avoir des effets significatifs sur le système électrique. D'une part, la capacité des batteries conditionnera le rythme de déploiement des camions électriques ainsi que les segments les plus propices pour l'électrification. Plus l'autonomie des camions sera importante, plus les camions avec des missions longue distance seront électrifiés. Ceci aura un impact sur le développement des infrastructures de recharge très haute puissance en autoroute et les appels de puissance de recharge. D'autre part, la taille des batteries conditionne la fréquence de connexion des camions, notamment pour le segment urbain qui pourrait avoir des comportements de recharge moins fréquents avec l'augmentation de la taille des batteries. Une fréquence de connexion moins importante permettrait aux exploitants des flottes de réduire les coûts de développement des infrastructures de recharge dans leurs dépôts (en raison de la diminution des bornes utilisées par jour). Ceci aura un impact sur la courbe de charge des véhicules, qui serait en moyenne moins pointue mais plus longue.

Si les principes techniques de l'électrification des poids lourds sont similaires à ceux des voitures, la taille et le poids plus importants augmentent considérablement les obstacles à l'utilisation de batteries en remplacement des moteurs à combustion interne. En conséquence, le développement des camions électriques sera largement impacté par les évolutions technologiques en matière de densité d'énergie (en Wh/kg) [35].

Comme pour les véhicules électriques légers, la plupart des batteries pour camions électriques utilisent aujourd'hui les technologies au lithium (lithium-ion, lithium polymère et lithium fer phosphate) [31]. Afin de réduire les couts de production et d'avoir une offre versatile pour répondre aux différents segments de camions, la solution adoptée par plusieurs constructeurs est d'équiper les camions de plusieurs blocs de batteries, avec des capacités énergétiques unitaires de l'ordre de 50 kWh.

La capacité des batteries dépend du type de desserte (plus petites pour les courtes distances) et du poids (besoin de plus d'autonomie car la consommation augmente avec le poids). La Figure 51 montre un état de l'art des tailles des batteries des camions électriques (annoncés ou en cours de production).

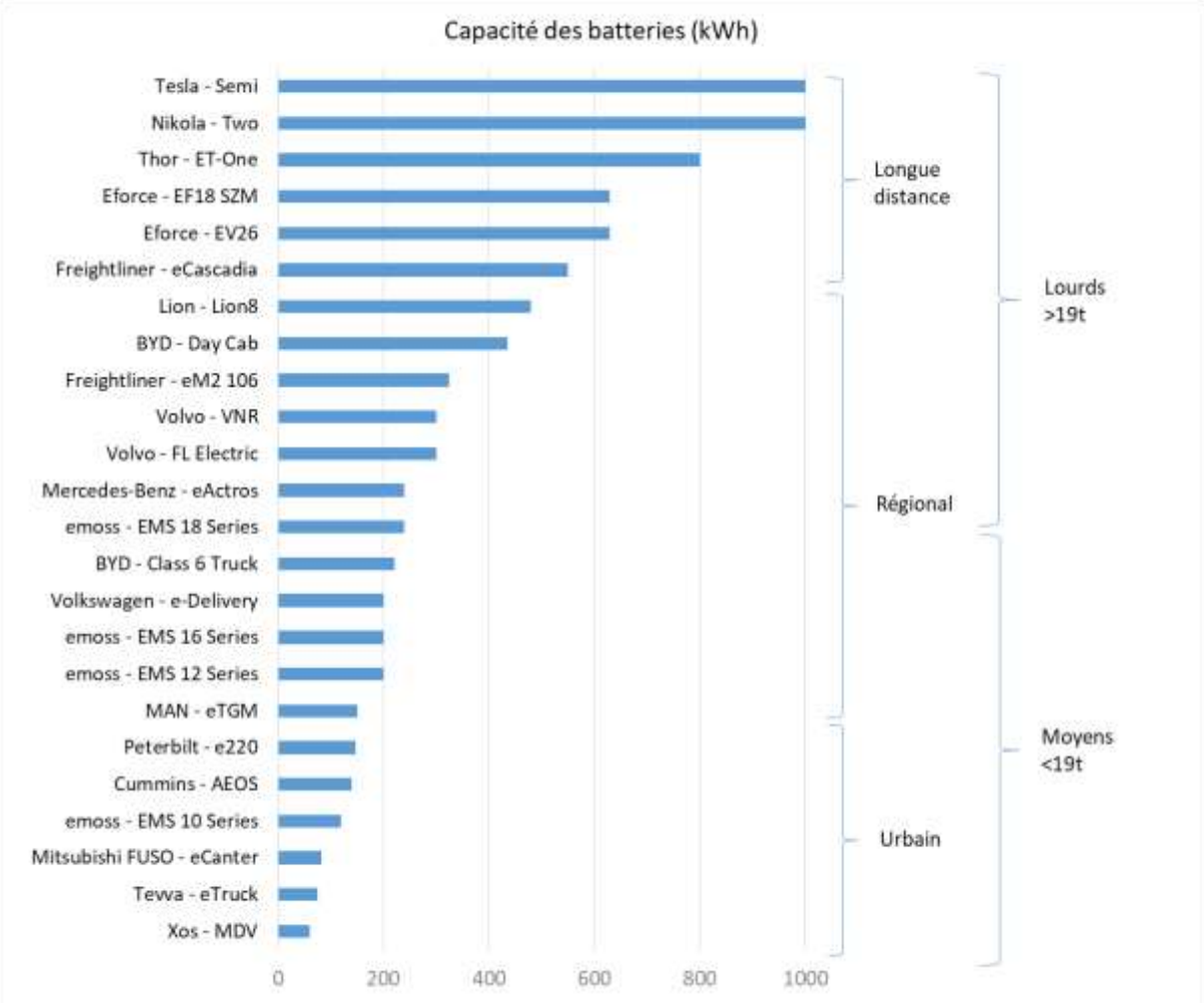


Figure 51 : Capacité des batteries des camions électriques à batterie annoncés ou en cours de production. Source [34]

Afin d'établir des hypothèses à l'horizon 2050, le tableau ci- montre la taille moyenne des batteries des camions électriques actuels. Pour les systèmes avec alimentation par caténaire, RTE propose de retenir une hypothèse de taille moyenne de batterie correspondant à 25% de celle d'un camion du même segment (soit une hypothèse d'utilisation de la caténaire sur environ 75% du trajet en moyenne).

L'évolution de la taille des batteries va dépendre de l'augmentation de la densité énergétique et de la réduction des coûts qui en découle. Les produits chimiques avancés à l'état solide peuvent atteindre des densités énergétiques de 300-400 Wh/kg, et des produits chimiques encore plus avancés (tels que

le Lithium-Air) peuvent atteindre des densités aussi élevées que 1000 Wh/kg ou plus [35]. En 2019, la densité énergétique et le coût moyen des batteries lithium était de l'ordre de 250 kWh/kg et 156 $/kWh, avec des perspectives en 2030 de 400 kWh/kg et 62 $/kWh [36].

Tableau 11 : Capacité moyenne des batteries des camions électriques en 2020 en fonction du type de desserte et du poids. Source [31]

Type de mission	PTAC	Capacité moyenne des batteries (kWh)
Urbain (<150 km)	<19t	100
Régional (150-500 km)	<19t	200
Régional (150-500 km)	>19t	350
Longue distance (>500km)	>19t	800
Longue distance avec caténaire (>500km)	>19t	200

L'augmentation de la taille des batteries des camions ne suivra probablement pas la même tendance que pour les véhicules légers. L'optimisation logistique du transport de marchandises fait que les trajets des camions sont bien connus à l'avance. Les opérateurs chercheront un compromis entre autonomie, coût du véhicule (qui dépend de la taille des batteries) et durée de recharge des véhicules.

Pour ces raisons, à l'horizon 2050, RTE propose de retenir une hypothèse d'augmentation maîtrisée de la taille des batteries des camions par rapport à celles observées aujourd'hui, avec des différences par segment. Les segments de livraison urbaine et régionale subiront une évolution modérée du fait que les tailles des batteries actuelles sont souvent suffisantes pour leurs parcours. La taille des batteries du segment long distance pourrait subir une augmentation plus importante à condition d'une diminution de la densité énergétique pour ne pas pénaliser l'autonomie ni la capacité de charge des marchandises.

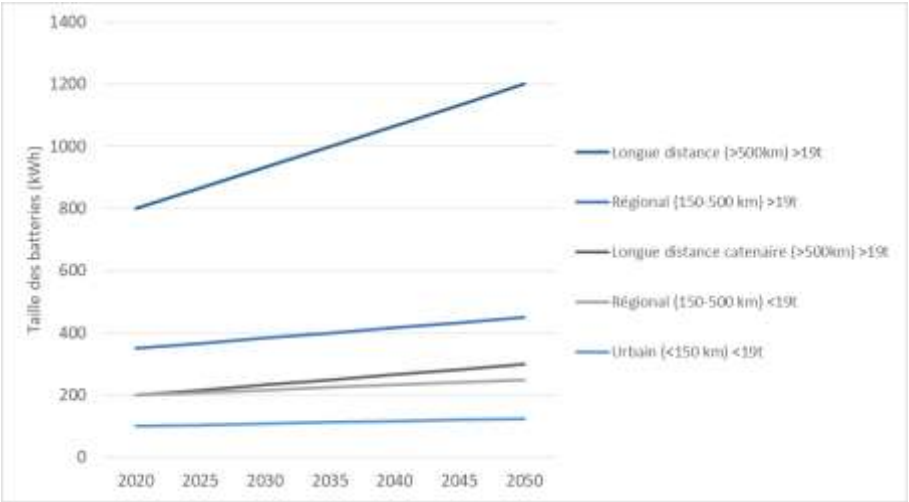


Figure 52 : Hypothèses d'évolution de la taille moyenne des batteries des camions électriques par segment

5.7 Puissances de recharge des camions électriques

D'un point de vue du système électrique, la puissance de recharge va avoir un impact sur le niveau des appels de puissance des recharges non pilotées (dans les centres de livraison et dans les axes routiers) et sur la possibilité de pilotage des recharges dans les dépôts de camions. Avec des puissances plus

élevées, les infrastructures de recharge des axes routiers nécessiteront des développements et raccordements spécifiques. Les dépôts de camion peuvent tirer avantage des puissances élevées afin de pouvoir placer la recharge pendant les créneaux horaires sur lesquels l'électricité est la moins chère car les contraintes de durée de recharge seront moindres.

Avec des batteries d'une capacité d'environ 100 - 200 kWh pour les camions moyens et jusqu'à environ 1000 kWh pour les camions lourds, les camions électriques ont des exigences plus élevées pour recharger l'énergie des infrastructures que les voitures particulières afin de les recharger dans un délai raisonnable compatible avec leur exploitation commerciale. Par exemple, la charge complète d'un camion à batterie de 300 kWh prend six heures avec une charge rapide en courant continu à 50 kW. Les camions électriques existants utilisent principalement des dépôts privés pour la recharge [32]. Les poids lourds et les camions d'autres tailles ayant une longue autonomie nécessiteront une puissance plus élevée que les chargeurs actuels et doivent être installés le long des couloirs de transport. Pour les camions lourds avec des missions longue distance, les constructeurs annoncent des modèles avec des batteries d'une taille estimée à près de 1 000 kWh. Les points de recharge pour ce type de camions nécessiteront des puissances entre 500 kW et 1 MW pour recharger les batteries pendant les pauses des chauffeurs routiers, dans des délais raisonnables (<1h).

Les stations de recharge pour camions peuvent atteindre un taux d'utilisation élevé car une grande partie du trafic de fret routier à longue distance se concentre sur un nombre limité des principaux corridors de transport. Cette concentration peut créer des besoins supplémentaires de raccordement au réseau électrique. Ces stations seront placées soit dans les stations de service (à l'équivalent des stations de service pour poids lourds aujourd'hui) ou dans les plateformes de distribution, ce qui permettrait de recharger la batterie des camions pendant les périodes de charge et décharge des marchandises. Du caractère limité des pauses et des opérations de charge et décharge, ce type de recharges électriques ne sera probablement pas flexible.

Les recharges en fin de trajet, au dépôt, auront des besoins de puissance moindre (50 – 100 kW) du fait d'un temps plus important pour la recharge complète [32] . Ce type de recharge peut être décalé, ce qui représente une flexibilité supplémentaire pour le système électrique.

Les camions avec des recharges dynamiques par caténaire peuvent avoir des besoins de similaires à la puissance maximale d'un moteur électrique (de l'ordre de 350 kW par camion [31] , voir plus s'il faut assurer en plus la recharge des batteries (500 kW). Vis-à-vis du système électrique, cela peut créer des appels de puissance même profil que le trafic routier. Ces recharges ne présenteront pas une source de flexibilité pour le système électrique.

Tableau 12 : Hypothèses de puissance des points de recharge pour camions à l'horizon 2050

	Type de recharge			
Type de mission	**Dépôt**	**Destination**	**Publique**	**Caténaire**
Urbain (<150 km)	50 - 100		100 - 350	
Régional (150-500 km)	50 - 100	100 - 350	350 - 1000	150 - 500
Longue distance (>500km)	100 - 350	100 - 350	350 - 1000	150 - 500

5.8 Consommations unitaires des camions

En 2018, la consommation unitaire moyenne d'un camion en France était de 33,7 litres de gazole/100 km [4] . Les ambitions de la SNBC de la France ont comme objectif pour 2050 de réduire la consommation des poids lourds d'environ 40% par rapport aux consommations de 2015.

Tableau 13 : Consommation du parc de poids lourds. Source : Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat

	Parc neuf			Parc roulant		
	2015	**2030**	**2050**	**2015**	**2030**	**2050**
Consommation						
Thermiques diesel (l/km)	33	25.8	20	33.9	29.4	21
GNV (kg/100km)	27	21	14.5	27	22.4	15.1
Electrique (kWh/100km)	197	163	118	197	168	126
Variation par rapport à 2015						
Thermiques diesel (l/km)		-22%	-39%		-13%	-38%
GNV (kg/100km)		-22%	-46%		-17%	-44%
Electrique (kWh/100km)		-17%	-40%		-15%	-36%

Le Tableau 13 montre les consommations moyennes des camions par technologie, tout segment confondu. Cette consommation dépend du poids et de la vitesse des déplacements des véhicules. Ainsi, les camions de taille moyenne avec des dessertes urbaines auront une moindre consommation que les camions lourds avec un profil de déplacement longue distance. Le Tableau 14 montre la consommation moyenne affiché par les constructeurs [31] . Ces valeurs sont très inférieures de ceux affichés par la SNBC et des estimations dans la littérature [37] [38]. L'écart pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs : les conditions de conduite réelle (accélérations, routes en pente) sont plus consommatrices que celles des tests d'homologation des constructeurs ; l'utilisation de chauffage et climatisation peut avoir un impact important sur la consommation.

Tableau 14 : Consommation en 2020 affiché par les constructeurs et par la SNBC des camions du parc roulant en fonction du poids et du type de desserte. Source [31] et Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat

Type de mission	PTAC	Consommation moyenne test constructeur (source [31]) (kWh/100 km)	Consommation moyenne conduite réelle (estimation SNBC) (kWh/100 km)
Urbain (<150 km)	<19t	80	126
Régional (150-500 km)	<19t	100	158
Régional (150-500 km)	>19t	120	189
Longue distance (>500km)	>19t	137	216
Camion moyen	*NA*	***118***	***186***

Afin de faire des projections à long terme, on considère les consommations affichées par la SNBC comme celles en conditions de conduite réelle. L'hypothèse réduction de consommation de 38% à 2050 par rapport à 2015 s'applique à tous les segments (urbain, régional et longue distance).

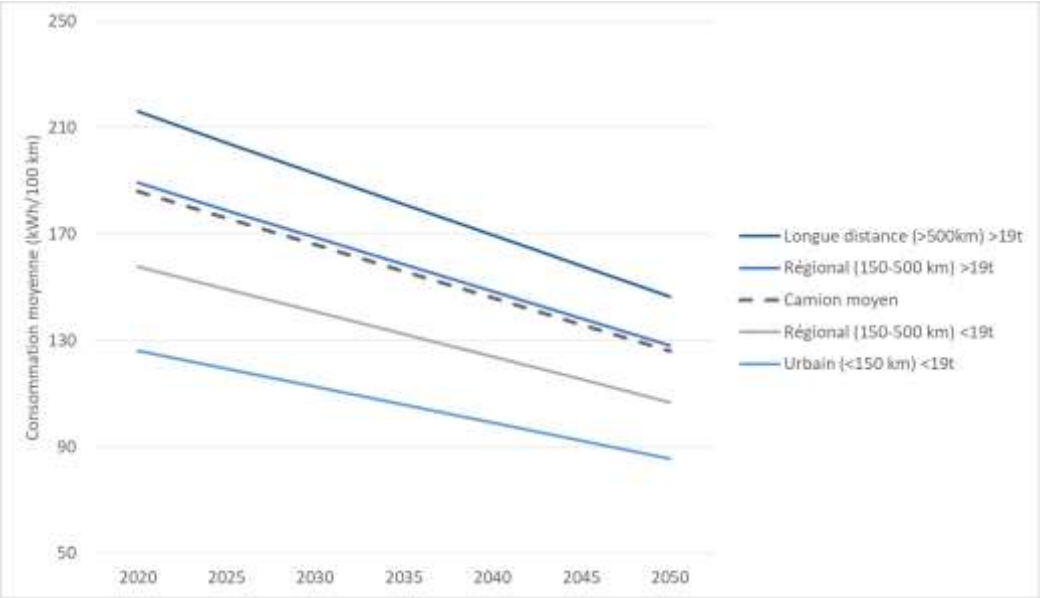


Figure 53 : Hypothèses d'évolution de la consommation moyenne des camions électriques à l'horizon 2050

5.9 Comportements de mobilité des camions

Pour modéliser les appels de puissance liés à la recharge des camions électriques, il est nécessaire de connaître la répartition journalière des distances parcourues ainsi que les moments de connexion au système électrique (périodes de recharge des véhicules).

Les comportements de mobilité seront différents en fonction du segment de camion. Selon l'enquête TRM [39] , un camion rigide réalisant un transport de marchandises de proximité[11] parcourt en moyenne 39 200 km/an. Les camions interurbains[12] parcourent 51 500 km/an. Concernant les tracteurs routiers, ils parcourent 64 200 km/an pour le transport de proximité et 73 300 km/an pour le transport interurbain.

Le transport de marchandises interurbain est composé par deux segments de camions : régionaux et longue distance. Le Comité national routier réalise des enquêtes sur l'activité longue distance du transport routier de marchandises, opérée par des entreprises françaises en compte d'autrui. Dans la dernière enquête sur la famille de camions des ensembles articulés (tracteurs + semi-remorques) exploités en longue distance, il apparaît que ces véhicules parcourent annuellement 115 320 km, avec une moyenne journalière de 504 km pour 228,8 jours d'exploitation par an.

[11] Transport routier de fret à caractère urbain ou de proximité, consistant à enlever ou à livrer des marchandises, emballées ou non, lors de déplacements de courte durée.
[12] Transport routier de fret, régulier ou non, interurbain, sur longue distance et international

Tableau 15 : Conditions d'exploitation des véhicules articulés exploités en longue distance

Distance annuelle moyenne par véhicule	115 320 km
Distance journalière moyenne	504 km
Distance moyenne d'une relation	468 km
Vitesse moyenne	65,9 km/h
Durée d'exploitation du véhicule par an	228,8 jours
Temps d'attente d'un véhicule au chargement	1,53 h
Temps d'attente d'un véhicule au déchargement	1,52 h
Taux de kilométrage en charge	86,7 %
Taux de chargement sur parcours en charge	87,4 %

Les déplacements des camions peuvent être divisés en deux types : tournée et trace directe. Une tournée est un parcours comportant plus de deux points de livraison ou d'enlèvement de marchandises. Une trace directe quant à elle est un parcours effectué d'une origine à une destination sans arrêt intermédiaire, pour effectuer deux opérations (un enlèvement à l'origine et une livraison à la destination).

Les travaux sur la mobilité des camions électriques dans le cadre du Bilan prévisionnel long terme ont comme ambition la représentation fine des comportements de mobilité des différents types de desserte. La suite des travaux a comme objectif d'analyser les enquêtes de mobilité disponibles et modéliser les déplacements des camions en France (véhicules nationaux et étrangers qui circulent en France).

Les contributions et retours des participants à la concertation devront permettre une meilleure prise en compte des particularités de chaque segment du transport routier des marchandises.

6 Références

[1] RTE, «Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique,» 2019. [En ligne]. Available: https://www.rte-france.com/fr/document/enjeux-du-developpement-de-l-electromobilite-pour-le-systeme-electrique.

[2] M. Contestabile, G. Tal et T. Turrentine, Who's driving electric cars, Springer, 2020.

[3] IEA, «Nordic EV Outlook 2018,» 2018. [En ligne]. Available: https://webstore.iea.org/nordic-ev-outlook-2018.

[4] CGDD, «Chiffres clés du transport, édition 2020,» 2020. [En ligne]. Available: https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-03/datalab-66-chiffres-cles-transport-edition-2020-mars2020.pdf.

[5] UTP, «Le parc des véhicules des services urbains au 1er janvier 2018,» 2019. [En ligne]. Available: https://www.utp.fr/sites/default/files/20181121_UTP_Parc_vehicules_services_urbains_1er_janvier_2018_32p.pdf.

[6] European Parliament, «Review of the Clean Vehicles Directive, 4th edition,» 2019. [En ligne]. Available: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/614690/EPRS_BRI(2018)614690_EN.pdf.

[7] UTP, «La directive « Véhicules propres » modifiera-t-elle les prérogatives de la loi « TECV » ?,» 2019. [En ligne]. Available: https://www.utp.fr/system/files/Dpt_AET/1_201911_UTP_NoteTech_DirectiveVehiculesPropres_VF.pdf.

[8] AVERE France, «Les immatriculations de bus électriques bondissent en Europe,» 2020. [En ligne]. Available: http://www.avere-france.org/Site/Article/?article_id=7836&from_espace_adherent=0. [Accès le 12 05 2020].

[9] MTEE, «Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat,» 2020. [En ligne]. Available: https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/scenarios-prospectifs-energie-climat-air. [Accès le 12 05 2020].

[10] ADEME, «Panorama des différentes filières d'autobus urbains,» 2018. [En ligne]. Available: https://www.ademe.fr/panorama-evaluation-differentes-filieres-dautobus-urbains.

[11] T&E, «Electric buses arrive on time,» 2018. [En ligne]. Available: https://www.transportenvironment.org/publications/electric-buses-arrive-time.

[12] TRANSBUS, 2019. [En ligne]. Available: https://www.transbus.org/actualite/actu-2019-11-marches-publics-autocars-electriques.html. [Accès le 04 05 2020].

[13] TRANSBUS, «Autocars à énergie alternative : quelle offre ?,» [En ligne]. Available: https://www.transbus.org/dossiers/autocars-faibles-emissions.html.

[14] VOLVO, «Volvo 7900 électrique. Caractéristiques techniques.,» [En ligne]. Available: https://www.volvobuses.fr/fr-fr/our-offering/buses/volvo-7900-electric/specifications.html. [Accès le 30 04 2020].

[15] Bolloré, «Bluebus 12m,» [En ligne]. Available: https://www.bluebus.fr/node/314. [Accès le 30 04 2020].

[16] HeuliezBus, «GX Élec,» [En ligne]. Available: https://www.heuliezbus.com/fr/GX-ELEC. [Accès le 30 04 2020].

[17] Proterra, «Catalyst electric bus,» [En ligne]. Available: https://www.proterra.com/vehicles/catalyst-electric-bus/. [Accès le 30 04 2020].

[18] UITP, «The impact of electric buses on urban life,» 2019. [En ligne]. Available: https://www.uitp.org/impact-electric-buses-urban-life.

[19] Les Échos, «Les cars interurbains passent aussi à l'électrique,» [En ligne]. Available: https://www.lesechos.fr/partenaires/macif/les-cars-interurbains-passent-aussi-a-lelectrique-1006213. [Accès le 04 05 2020].

[20] HeuliezBus, «GX 337 électrique. Spécifications techniques.,» [En ligne]. Available: https://www.heuliezbus.com/fr/vue/produits/bus/GX-ELEC/FT_GX337_ELEC.pdf. [Accès le 2020 05 04].

[21] Baguette Stefan, ADL, «Entry points for cities – electric buses,» 2018. [En ligne]. Available: https://www.changing-transport.org/wp-content/uploads/TCC-Week_Stefan-Baguette-Electric-Buses.pdf.

[22] HeuliezBus, «GX 437 électrique. Spécifications techniques.,» [En ligne]. Available: https://www.heuliezbus.com/fr/vue/produits/bus/GX-ELEC/FT_GX437_ELEC.pdf. [Accès le 05 05 2020].

[23] Volvo, «Volvo opportunity charging system,» [En ligne]. Available: https://www.volvobuses.se/content/dam/volvo/volvo-buses/master/bre/our-offering/documents/Fact%20sheet%20Opportunity%20Charging%20System%20EN%202015_00733.pdf. [Accès le 05 05 2020].

[24] ABB, «The electric bus – range is a matter of perspective,» [En ligne]. Available: https://new.abb.com/news/detail/40849/the-electric-bus-range-is-a-matter-of-perspective. [Accès le 05 05 2020].

[25] InsideEV, «China Is Developing New GB/T Fast Charging Standard At 900 kW,» [En ligne]. Available: https://insideevs.com/news/338620/china-is-developing-new-gb-t-fast-charging-standard-at-900-kw/. [Accès le 05 05 2020].

[26] ELIPTIC, «Policy Recommendations : electrification of public transport in cities,» [En ligne]. Available: https://eliptic-project.eu/news/launch-eliptic-policy-recommendations.

[27] Ministère de la transition écologique et solidaire, «Enquête nationale transports et déplacements (ENTD) 2008,» [En ligne]. Available: https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-nationale-transports-et-deplacements-entd-2008.

[28] Arafer, «Rapport annuel. Marché du transport par autocar et gares routières,» 2018. [En ligne]. Available: http://www.arafer.fr/wp-content/uploads/2019/07/rapport_annuel_trv_2018.pdf.

[29] ACEA, «Medium and heavy trucks over 3.5 t new registrations by fuel type in the European Union,» ACEA, Brussels, 2020.

[30] Transport & Environment : European Federation for Transport and Environment, «Do gas trucks reduce emissions?,» Transport & Environment, Brussels, 2019.

[31] ICCT, «Estimating the infrastructure needs and costs for the launch of zero-emission trucks,» ICCT, Washington, 2019.

[32] European Federation for Transport and Environment, «Recharge EU trucks: time to act !,» Transport & Environment, Brussels, 2020.

[33] Comité National Routier, «Enquête longue distance 2018,» Comité National Routier, Paris, 2019.

[34] ICCT, «Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles,» International Council on Clean Transportation, Washington, 2017.

[35] IEA, «The future of trucks : Implications for energy and the environment,» IEA Publications, Paris, 2017.

[36] BloombergNEF, «Electric Vehicle Outlook 2020,» BloombergNEF, London, 2020.

[37] T. Earl, L. Mathieu, S. Cornelis, S. Kenny, C. C. Ambel et J. Nix, «Analysis of long haul battery electric trucks in EU,» chez *8th Commercial Vehicle Workshop*, Graz, 2018.

[38] I. Mareev, J. Becker et D. Sauer, «Battery Dimensioning and Life Cycle Costs Analysis for a Heavy-Duty Truck Considering the Requirements of Long-Haul Transportation,» *Energies* , vol. 55, n° %11, 2018.

[39] Service des données et études statistiques, *Enquête sur l'utilisation des véhicules de transport routier de marchandises (TRM),* Paris: MTES, 2018.

[40] «Yutong ICE 12,» [En ligne]. Available: https://www.buildersbuses.net/public/6.ft-yutong-ice-12-elec-2016.pdf. [Accès le 04 05 2020].