

MARS
2022

ÉCO-CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE MOBILITÉ COMPRENANT VÉHICULES TOUT-ÉLECTRIQUES ET RÉSEAU DE RECHARGE

Une analyse multi-perspective basée
sur un modèle de simulation de la
mobilité longue distance

RAPPORT FINAL
PRC 20.1 EcoSD

ADEME

Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

En partenariat avec :



REMERCIEMENTS

Comité de pilotage :

Flore Vallet (IRT SystemX et CentraleSupélec)

Julien Garcia (Stellantis)

CITATION DE CE RAPPORT

Julien BALTAZAR, Flore VALLET, Julien GARCIA. 2022. Éco-conception d'un système de mobilité comprenant véhicules électriques et réseau de recharge : une analyse multi-perspective basée sur un modèle de simulation de la mobilité longue distance – Rapport final. 71 pages.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat :

Étude réalisée par Julien Baltazar, Flore Vallet et Julien Garcia
pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche collaboratif EcoSD 20.1

TABLE DES MATIERES

Résumé.....	5
1. Enjeux scientifiques et techniques du projet.....	7
2. Planning détaillé et livrables.....	7
3. Livrable 0 : Synthèse de l'atelier de lancement du projet.....	8
3.1. Objectifs de l'atelier.....	8
3.2. Restitution qualitative : enjeux relatifs au développement d'un réseau de recharge électrique.....	9
3.2.1. L'usage des systèmes de recharge des véhicules électriques	9
3.2.2. La technologie et la conception des systèmes de recharge	9
3.2.3. Le contexte d'usage des batteries de VE	9
3.2.4. La technologie et la conception des batteries	9
3.2.5. Le développement de la mobilité électrique sur un territoire et les perspectives d'évolution et de transformation	10
3.3. Propositions de cadrage de l'étude.....	10
4. Extrait du livrable 1 : Contexte de la mobilité électrique	11
4.1. Contexte environnemental.....	11
4.1.1. Le secteur du transport et les véhicules thermiques.....	11
4.1.2. Le véhicule électrique à batterie	11
4.2. Contexte industriel	12
4.2.1. Le véhicule électrique	12
4.2.1.1. L'essor de la mobilité électrique	12
4.2.1.2. Le marché mondial	12
4.2.1.3. Le marché français	13
4.2.2. Les infrastructures de recharge	13
4.3. Les performances des BEV et le verrou des trajets longues distances	14
4.3.1. L'autonomie.....	15
4.3.2. La vitesse de recharge	16
4.4. La sociologie de l'utilisateur de mobilité.....	16
4.4.1. L'adoption des BEV	17
4.4.2. Le comportement des usagers de VE.....	18
4.5. Bilan et positionnement	19
4.5.1. Synthèse	19
4.5.2. Problématique	19
4.5.3. Cadre d'étude	20
5. Livrable 2 : Simulation d'un système de mobilité électrique longue distance	21
5.1. Méthodologie	21
5.1.1. Définition du simulateur	21
5.1.2. La modélisation de la demande.....	22

5.1.2.1.	Les flux de mobilité sur un axe routier	22
5.1.2.1.1.	La description de l'axe routier	22
5.1.2.1.2.	Le calcul de besoin de recharge et comportement de l'utilisateur	23
5.1.2.1.3.	La modélisation de la demande par origines-destinations	24
5.1.2.2.	La description de la mobilité électrique sur le territoire	27
5.1.3.	L'évaluation des performances à l'échelle territoriale	28
5.1.3.1.	Le nombre de bornes en usage	28
5.1.3.2.	Les indicateurs de temps de trajets	29
5.1.3.3.	Les impacts environnementaux	30
5.1.3.3.1.	Généralités	30
5.1.3.3.2.	Calculs d'impacts	30
5.2.	Principaux résultats	33
5.2.1.	Cas d'étude : mobilité sur l'autoroute A6	33
5.2.2.	Résultats pour la mobilité électrique sur l'A6 en 2025	33
5.2.2.1.	Hypothèses supplémentaires	33
5.2.2.2.	Résultats	35
5.2.2.2.1.	La distribution des bornes à installer	35
5.2.2.2.2.	La comparaison de performances pour différents véhicules et comportements d'utilisateur	35
5.2.2.2.3.	L'évaluation des impacts environnementaux	37
5.2.3.	Résultats complémentaires : étude de sensibilité	38
5.2.3.1.	Puissance des bornes	38
5.2.3.2.	Puissance maximale de recharge des véhicules	39
5.2.3.3.	Capacité des batteries	40
5.2.3.4.	Densité du réseau d'infrastructures de recharge	41
5.2.3.5.	Synthèse des résultats	42
5.2.4.	Prévision du besoin de bornes et d'électricité à l'horizon 2030	42
6.	Discussion et formulation des recommandations	44
6.1.	Apports méthodologiques et limites du modèle	44
6.2.	Discussion sur les résultats	45
6.3.	Formulation des recommandations	46
7.	Conclusion	50
	Références bibliographiques	52
	Index des tableaux et figures	54
	Sigles et acronymes	56
	Annexes	57

Résumé

La mobilité électrique est en plein développement et répond notamment aux objectifs contre le changement climatique et contre les pollutions urbaines. Effectivement, l'électrification des véhicules permet sous condition de réduire les émissions de polluants et les nuisances sonores.

En outre, malgré ce potentiel clairement identifié, les ventes de véhicules tout-électriques restent encore minoritaires car leur adoption à plus grande échelle est limitée par des verrous sociaux, technologiques et économiques. Cette étude s'intéresse à l'un deux : la mobilité longue distance des véhicules tout-électriques. Son objectif est de s'intéresser au système de mobilité qui inclut véhicules, infrastructures de recharge et usagers sur un territoire pour développer une réflexion globale permettant de saisir les enjeux liés aux contraintes d'autonomie, de vitesse de recharge et de densité du réseau de recharge.

La méthode appliquée pour effectuer ce travail se décompose en trois étapes. Un atelier avec 17 participants a permis de définir les problématiques et les axes de recherche liés au sujet d'étude. Puis, une analyse de la littérature a été réalisée pour décrire la situation actuelle de la mobilité électrique. Ensuite, un simulateur a été développé pour simuler des flottes de véhicules sur un axe autoroutier et pour comparer les performances du système dans différentes cas d'usage et différents scénarios d'évolution.

Au terme de ce projet, plusieurs apports méthodologiques ont été identifiés grâce à la prise en compte de la diversité de véhicules et de comportement et à la mise en œuvre d'une évaluation environnementale. De plus, la conclusion de cette étude détaille des recommandations et des perspectives pour dimensionner les batteries et les réseaux de recharges, des préconisations de bonnes pratiques pour les usagers et des suggestions d'éclairages plus généraux sur la mobilité.

Les conclusions principales sont les suivantes. Tout d'abord, les BEV disposent de performances pour la mobilité longue distance qui sont contraignantes par rapport aux véhicules thermiques et qu'ils dépendent d'infrastructures encore peu développées. De plus, il y a des caractéristiques très variables au sein des différentes gammes de BEV, notamment pour les batteries. Comme les perspectives d'évolutions technologiques à l'horizon 2030 sont prometteuses mais incertaines, il est important de s'intéresser aux usages des BEV pour qu'ils soient adoptés à plus large échelle. D'une part, réduire la vitesse de circulation sur autoroute permettrait de réduire les écarts de performance entre les différents types de véhicules. Cela favoriserait les BEV et ralentirait la course aux batteries à haute capacité même si l'acceptabilité de la mesure est incertaine. D'autre part, favoriser les bonnes pratiques lors de l'usage et de la recharge est un levier important pour maximiser les performances du système. En parallèle, développer l'intermodalité et explorer le potentiel de systèmes tels que la recharge dynamique ou les prolongateurs sont des alternatives importantes pour pouvoir développer des BEV sobres et pertinents, avec des capacités de batterie adaptées aux besoins moyens.

Abstract

Electric mobility is growing accordingly to the climate change and urban pollution mitigation objectives. Indeed, vehicle electrification could reduce greenhouse gas and other pollutant emissions.

However, battery electric vehicles are still a tiny share of vehicle sales despite this potential because social, technological, and economic barriers limit the adoption rate. This study deals with one of them: long-distance mobility. The objective is to analyse a mobility system including vehicles, charging infrastructures, and users on a territory to develop global insights of the stakes linked to the range, charging speed, and infrastructure network density.

This work was divided into three steps. A workshop with 17 participant has been organised to define the issues of long-distance mobility and the research axis for the study. Then, the current situation of electric mobility has been examined by a literature review. Finally, a simulator has been developed to simulate the vehicle fleets on a highway and compare the system performances in different use cases and diverse evolution scenarios.

At the end of the project, some methodological contributions have been identified, such as considering the vehicle and behaviour diversity and assessing the environmental impacts of long-distance mobility. Furthermore, the conclusion of this study details outlooks for battery and infrastructure network dimensioning, recommendations of good practices for users, and broader suggestions about mobility.

The main conclusions are the following. First, there are significant performance gaps for long-distance trips between conventional vehicles and BEVs of different ranges. BEVs also depend on charging infrastructures that are still in development. Because technological perspectives are promising but uncertain, it is essential to care about the usage of BEVs, so they become more adopted. On the one hand, reducing driving speed on the highways would reduce performances gaps. It would favour BEVs and slow down the race for high-performance batteries, but the measure's acceptance is uncertain. On the other hand, encouraging good practices during the usage and charges is an important lever to maximise the system performance. Developing intermodality and exploring the potential of systems such as dynamic charging or battery extenders are essential alternatives to developing sober and relevant BEVs, with capacities of batteries adapted to the average needs.

Les travaux de ce PRC ont été valorisés grâce à la publication d'un article de synthèse. Il a été présenté le 28 mars 2022 lors de la conférence internationale **CIRP Design 2022**.

J. BALTAZAR, F. VALLET, J. GARCIA, A model for long-distance mobility with battery electric vehicles: a multi-perspective analysis.

1. Enjeux scientifiques et techniques du projet

Ce projet de recherche collaboratif (PRC) 20.1 « Éco-conception d'un système d'infrastructures de recharge et de véhicules électriques dans une logique territoriale d'usages de mobilité » est co-financé par le réseau EcoSD (Éco-conception de Systèmes pour un Développement durable) et l'ADEME. Ce projet est porté par le Laboratoire de Génie Industriel de l'école CentraleSupélec – Université Paris-Saclay et par le groupe Stellantis. Dans ce PRC, nous proposons de s'intéresser à un système complexe composé d'un territoire, des véhicules électriques (VE) et des infrastructures de recharge qui s'y déploient ainsi que des usages de mobilité électrique. En première approche, il s'agit de s'intéresser aux choix de conception de ce système en étudiant la mobilité longue distance des véhicules tout-électriques car il s'agit d'un verrou majeur à leur adoption.

Effectivement, la relative difficulté pour effectuer des trajets longs en véhicule électrique à batterie (BEV, *Battery Electric Vehicles*) est due à la gestion de l'autonomie qui est limitée par rapport aux véhicules à moteur à combustion interne conventionnels (ICEV, *Internal Combustion Engine Vehicles*). Pour pouvoir étudier finement les enjeux associés, nous proposons de s'intéresser à la caractérisation du triplet incluant les BEV et leurs batteries (technologie, dimensionnements) ; le réseau de recharge (technologie, dimensionnements, densité) ; les usagers de mobilité électrique (comportement de conduite, gestion de l'autonomie). L'objectif est de **proposer une méthodologie pour comparer différentes stratégies territoriales de déploiement de la mobilité électrique en étudiant les interactions entre le triplet véhicules - réseau de recharge - usagers et les performances de la mobilité longue distance puis de proposer des préconisations pour l'électrification du parc automobile**. Les performances du système modélisé peuvent être évaluées à travers différents indicateurs comme un indicateur de satisfaction des attentes des usagers, les impacts environnementaux, la quantité d'infrastructures à installer, etc.

Par rapport aux études qui concernent la localisation des infrastructures de recharge électrique, l'originalité est d'adopter une approche systémique qui considère la mobilité électrique dans sa globalité en s'intéressant aux leviers d'action de l'ensemble des parties prenantes : constructeurs automobiles, gestionnaires d'infrastructures de recharge, usagers de la mobilité, gestionnaires d'autoroutes, etc. De plus, l'objectif est également de développer une réflexion multicritère pour pouvoir quantifier tous les compromis réalisés grâce aux différents indicateurs. Enfin, il s'agit également d'intégrer à l'étude une évaluation environnementale à l'échelle du système complexe avec une approche sur cycle de vie et multicritère, c'est-à-dire, au-delà des émissions de gaz à effet de serre.

2. Planning détaillé et livrables

Le Tableau 1 présente le planning du projet de recherche. Il se décompose en quatre phases ayant chacune des livrables attendus. Le responsable de chaque phase y est précisé et peut être présenté avec les autres participants de la phase.

Tableau 1 : Planning du PRC détaillé par phase et présentation des objectifs des livrables

	Débuts des phases et fins	Livrables produits	Responsable et participants actifs
PHASE 0 : Atelier de cadrage du projet	Novembre 2020	Livrable 0 : Synthèse de l'atelier de lancement du projet	Flore Vallet Julien Garcia et participants de l'Annexe A
PHASE 1 : État de l'art	Février 2021		
1.1. Synthèse du contexte des véhicules électriques du point de vue industriel, technique et environnemental	Mars 2021	Livrable 1 : État de l'art et formulation de la problématique de recherche	Julien Baltazar Julien Garcia Flore Vallet
1.2. Synthèse des études sociologiques sur les attentes des consommateurs vis-à-vis de la mobilité électrique et des comportements de leurs usagers			
1.3. Synthèse des approches existantes pour la conception de réseaux de recharge et pour l'évaluation environnementale territoriale			

PHASE 2 : Construction de la méthode et premiers résultats	Mars 2021		
2.1. Définition de la méthode combinant offre, demande et indicateurs de performances en se basant sur la bibliographie			
2.2. Expérimentation sur un territoire simple (autoroute) mettant en jeu différentes capacités de batterie, puissances de recharge, densités de bornes, etc.			
2.3. Rédaction d'un rapport intermédiaire	10 juin 2021	Livrable 2 : Rapport intermédiaire et synthèse	Julien Baltazar Julien Garcia Flore Vallet
PHASE 3 : Expérimentation et réalisation d'outil	Juillet 2021		
3.1. Raffinement de la méthode et réalisation d'un outil open source			
3.2. Présentation des résultats au séminaire de recherche n° 50, édition Jeunes chercheurs	6 octobre 2021		Julien Baltazar
3.3. Écriture d'un article et présentation lors d'une conférence	28 mars 2022	Livrable 3 : Article publié et présenté pour la conférence CIRP Design 2022	Julien Baltazar Julien Garcia Flore Vallet
3.4. Rédaction du rapport final et fin du PRC	30 mars 2022	Livrable 4 : Rapport final et Synthèse	Julien Baltazar Julien Garcia Flore Vallet

3. Livrable 0 : Synthèse de l'atelier de lancement du projet

Rédaction du livrable : Flore Vallet

Au lancement du projet de recherche, un atelier a été organisé avec différents membres du réseau EcoSD afin d'identifier des questionnements relatifs l'éco-conception du système comprenant les véhicules électriques et le réseau de recharge sur un territoire. Cette première partie est un compte-rendu de ce premier rendez-vous d'exploration qui a permis de dégager des axes d'études.

3.1. Objectifs de l'atelier

L'atelier de deux heures s'est déroulé en ligne le 13/11/20 en présence de 17 participants et de deux animateurs de projet (cf. Annexe A). Parmi les 17 participants, 11 se sont plus particulièrement exprimés (notés P1 à P11 par la suite).

La partie exploratoire a été organisée autour de deux thématiques principales pour lesquelles les participants ont partagé leurs idées par écrit au moyen du module conversationnel de Teams, puis les ont exposées et discutées oralement. Nous avons clôturé la session par un tour de table des attentes et messages-clés de la part des participants.

L'interrogation de départ était la suivante : « Quels enjeux / verrous / idées identifiez-vous au regard des deux sujets suivants ? »

1. Batteries et recharge de véhicules électriques

Exemples : Quel compromis environnemental « capacité de la batterie / infrastructure de recharge » ?
Quid de l'intérêt des recharges dynamiques ?

2. Utilisateurs de mobilité électrique et territoires

Exemples : Quelle prise en compte de la demande, et donc du comportement des usagers dans les études de conception/d'éco-conception des systèmes (batterie et recharge) de véhicules électriques ?
Quelles problématiques environnementales posées par la conception de systèmes (batterie et recharge) pour les aménageurs du territoire ?

Un codage de premier niveau a été effectué pour l'ensemble des propositions apportées en mode conversationnel sur Teams par les intervenants Pi et les animateurs A1 et A2. Les quatre macro-thématiques **Véhicules et batteries, Infrastructures de recharges, Usages et Territoires** ont été croisées pour obtenir les 5 enjeux thématiques suivants sous forme de **questions problématiques** le plus souvent.

3.2. Restitution qualitative : enjeux relatifs au développement d'un réseau de recharge électrique

3.2.1. L'usage des systèmes de recharge des véhicules électriques

- La nécessité de recharger un véhicule à batterie électrique est-elle un frein pour les usagers, et si oui dans quelle mesure (P1) ? Quelle est la capacité des usagers des VE de recharger les véhicules à la maison ou au travail (P3) ?
- On peut également se demander si les usages réels au niveau de la recharge de véhicule électrique sont identiques aux usages attendus (par exemple en ce qui concerne le respect du niveau bas de la charge de la batterie qui doit a priori déclencher l'action de recharge). (A1)
- Dans le cas de l'utilisation sur autoroute, comment faut-il organiser en amont les files d'attente et quel est le flux optimal de véhicules? (P10). L'ordre de grandeur espéré est de 5 à 15 minutes d'attente pour 30 minutes de charge.
- Comment envisager les systèmes de charge dynamique et de tels développements ne pourraient-ils pas occasionner de risques de santé publique ? (P4)

3.2.2. La technologie et la conception des systèmes de recharge

- Quelle est la faisabilité technologique de la recharge dynamique des batteries (sur routes connectées) et à quelle échéance temporelle cela est-il envisageable (P1) ?
- Quelle est la différence d'infrastructures entre solutions à hydrogène et avec batteries rechargeables ? (P11). Comment qualifier la disponibilité et interopérabilité des infrastructures : temps de recharge, d'attente, densité du réseau, adaptabilité du réseau aux différents types de véhicules, etc. (P5) ? La réparabilité des systèmes de recharge est-elle envisageable ?
- L'évaluation d'impacts environnementaux liés aux bornes de recharge varie avec l'utilisation d'énergie renouvelable ou issue du mix électrique national (A2).
- Quel est le modèle économique du fournisseur de bornes de recharge ? Ce modèle est-il uniquement lié aux bornes ou à des produits ou services dérivés ? (P3)

3.2.3. Le contexte d'usage des batteries de VE

- Dans le cas où les autorités procèderaient à une régulation des usages (en imposant des vitesses plus faibles par exemple), cela permettrait-il d'adapter le dimensionnement des batteries ? (P4)
- Peut-on faire un lien entre le comportement de conduite des usagers et le phénomène de vieillissement des batteries ? Comment modéliser pour l'usage de batteries partagées ? (P5)

3.2.4. La technologie et la conception des batteries

- Par analogie avec la remorque ou le coffre de toit, on peut envisager la conception d'un système de batterie annexe vu comme un accessoire pour s'adapter à un usage ponctuel qui nécessite une grande capacité de chargement. Ce système serait proposé en location pour les trajets concernés et nécessiterait une filière de gestion *ad hoc* (P4). C'est la philosophie de la solution de batterie sur remorque de 60 kWh (ou *Battery as a Service*) développée par la start-up EP Tender (P9), voir Figure 1.
- Comment l'autonomie des batteries varie-t-elle en fonction d'un usage en cycle urbain ou extra urbain ? (P2)

- A des fins comparatives, peut-on évaluer les avantages et inconvénients de ces 4 solutions : véhicules électriques à batteries rechargeables, véhicules électriques hybrides rechargeables, charge dynamique sur route, batterie remplaçable (type EP-Tender) ? (P3)



Figure 1 : Exemple de batterie sur remorque : EP-Tender¹

3.2.5. Le développement de la mobilité électrique sur un territoire et les perspectives d'évolution et de transformation

- Le choix d'un cas d'étude concernant l'usage des VE sur des autoroutes pose question : quel est l'intérêt du développement des véhicules électriques sur des autoroutes par rapport à un développement au niveau urbain (P5, P2) ? Dans le cas de déplacements impliquant plusieurs modes (intermodalité), quelles seraient les interactions avec les autres systèmes de transport participant à la mobilité (P3) ? Les bornes de recharge sur autoroutes doivent-elles être installées au niveau des stations essence ou peut-on envisager d'autres possibilités (P7) ?
- Sur un territoire, comment articuler les différentes offres des fournisseurs de mobilité électrique et des technologies concurrentes (station services essences, pile à combustible...) (P2) ? Plus largement, cela ouvre la question de la transformation et de l'adaptation des infrastructures existantes (stations-service par exemple) ainsi que l'évolution du rôle des différents acteurs avec le développement des usages de VE (P8).
- Enfin les participants soulignent l'importance d'examiner les effets d'un déploiement de la technologie VE sur l'augmentation conséquente de la demande (P6), sur l'épuisement des ressources minérales (P1), sur le réseau électrique (P5).

3.3. Propositions de cadrage de l'étude

Deux pistes de travail ont finalement émergé de cet atelier de lancement collectif.

1. Un volet d'optimisation proche du sujet de départ, avec **dimensionnement des batteries et des stations de recharge en fonction de la demande de mobilité sur un territoire** et évaluation des impacts environnementaux potentiels associés. Différents périmètres de complexité variable ont été envisagés : autoroute, petite zone géographique comme le plateau de Saclay avec plusieurs autoroutes, zone urbaine intermodale. Pour des raisons de temps, la mobilité longue distance sur autoroute est privilégiée pour la suite des travaux.
2. Un volet plus exploratoire de **scénarisation des futurs usages de mobilité électrique**, qui propose des hypothèses sur l'évolution de la mobilité et de la part électrique (au plan national, territorial, à une échéance à préciser). La réflexion pourra se porter sur la proposition de solutions de systèmes (batteries, recharge) en cycle de vie : batterie en location, remplacement batterie ou véhicule, réparabilité des batteries et stations de recharge; transformation d'infrastructures existantes pour la recharge, réutilisation de stations, partenariats structurants à développer et modèles d'affaires associés...

¹ EP Tender. <https://eptender.com/> [consulté le 2021/06]

4. Extrait du livrable 1 : Contexte de la mobilité électrique

Rédaction du livrable : Julien Baltazar

Cette partie décrit l'état actuel de la mobilité électrique et ses perspectives. De plus, elle met l'accent sur les éléments clefs permettant de penser la mobilité longue distance et donc de comprendre l'intérêt de cette étude et les choix qui y ont été faits. Ainsi, nous nous intéressons ici au contexte environnemental, au contexte industriel puis aux performances des véhicules à batterie (BEV) et enfin à la sociologie de leurs usagers.

4.1. Contexte environnemental

4.1.1. Le secteur du transport et les véhicules thermiques

La mobilité individuelle et les véhicules particuliers reposent essentiellement sur les moteurs à combustion interne et le pétrole. Ainsi, ils sont une cause importante d'impacts environnementaux. En France, les activités de transport routier ont été la source d'émission de 127 Mt de CO₂ eq en 2019, ce qui représente 29 % des émissions de gaz à effet de serre internes dans le pays ([CITEPA, 2020](#)). Donc, cela contribue significativement au dérèglement climatique ([IPCC, 2014](#)), mais d'autres problèmes sont causés par les voitures à moteur à combustion interne (ICEV) :

- Tout d'abord, différents dommages à la santé humaine sont causés par les gaz toxiques et les particules, dont les oxydes d'azote, or 52 % de ces derniers sont issus du transport routier ([CITEPA, 2020](#)).
- Ensuite, le bruit, qui est majoritairement causé par le trafic dans les villes européennes, comporte des risques pour la santé humaine. Or, cette pollution sonore provient en grande partie des systèmes de propulsion des ICEV ([EEA, 2014](#)).
- Enfin, les ICEV sont dépendants des approvisionnements en carburants alors que l'Union européenne importe 96 % de son pétrole en 2018. Le secteur du transport est alors vulnérable à la variabilité de la disponibilité de l'offre et des prix du marché ([Cambridge Econometrics, 2020](#)).

Dans ce contexte, différents pays cherchent à limiter les émissions et les impacts du transport en changeant les usages et les technologies utilisées, notamment en développant des alternatives aux véhicules conventionnels. Une des options considérées est l'usage de BEV : ils reçoivent beaucoup de soutien et d'investissements ([IAE, 2020](#), ch. 2). À l'échelle internationale, les enjeux sont cruciaux. La rapidité de la croissance du parc automobile dans les pays émergents et l'explosion de la demande en mobilité risquent de provoquer une forte hausse des rejets de polluants et des conséquences environnementales désastreuses. Il y a donc une urgence de mettre au point rapidement des solutions de mobilité permettant de faire décroître substantiellement les impacts environnementaux ([Obadia, 2015](#)).

4.1.2. Le véhicule électrique à batterie

Les BEV, comme les véhicules à hydrogène, sont dits « zéro-émission » à l'échappement, c'est-à-dire, sans émission de CO₂ ou d'autres polluants lorsqu'ils sont en train de rouler (hors pièce d'usure). Sous certaines conditions sur la provenance de l'électricité, leur développement pourrait permettre une forte réduction des émissions de GES (Gaz à Effet de Serre) et des autres polluants liés aux transports.

Intrinsèquement, **la transition vers ce type de véhicule électrique (VE) admet un risque de transfert d'impact** de l'émission des ICEV actuels vers la production d'énergie électrique pour les VE et, a priori, sur leurs phases de fabrication et de fin de vie. Ainsi, différentes études ont été réalisées pour quantifier ces transferts en suivant les principes de la méthode ACV (Analyse sur Cycle de Vie) définie par les normes ISO 14040 et 14044 ([AFNOR, 2016a](#) ; [AFNOR, 2016b](#)). L'ACV donne un cadre pour la réalisation d'études environnementales multicritères qui considèrent la totalité du cycle de vie du véhicule, c'est-à-dire, de la fabrication à la fin de vie. En 2012, l'ADEME a réalisé une étude comparative entre différents types de véhicules. Les véhicules sont supposés avoir une durée de vie de 150 000 km en France et les BEV ont une batterie de 24 kWh. Les résultats montrent que les BEV

émettent 9 t CO₂ eq sur cycle de vie. C'est 60 % de moins que les ICEV équivalents qui émettent 22 t CO₂ eq (ADEME et al., 2013). De plus, l'étude identifie que la fabrication de la batterie cause 35 % des émissions de GES des BEV et la production de l'électricité en cause 26 %. Plus récemment, l'étude de Hill et al. (2020) estime qu'un BEV en France d'une durée de vie de 225 000 km ayant une batterie de 58 kWh émet **quatre fois moins de GES** que son équivalent thermique essence sur cycle de vie.

Dans le cadre de ces études et concernant l'unique critère du changement climatique, le BEV apparaît plus performant que l'ICEV. En revanche, les deux études précisent que ce résultat est très **dépendant du mix électrique du pays** dans lequel le véhicule électrique est rechargé. Effectivement, en France, le bilan de GES d'un BEV est avantageux notamment car l'électricité utilisée provient d'un mix électrique basé en grande partie sur du nucléaire. Effectivement, l'électricité produite en France en 2019 a généré en moyenne 60,7 g CO₂ eq/kWh contre 420 g CO₂ eq/kWh en moyenne en Union Européenne en 2014².

Comme **la batterie prend une place significative dans les bilans ACV**, la maîtrise des impacts environnementaux liés à leurs cycles de vie est primordiale. Par exemple, comme la production des batteries demande beaucoup d'énergie et qu'elles proviennent aujourd'hui majoritairement de d'Asie, un levier important pour réduire leurs impacts est l'amélioration de l'efficacité des procédés et la production de batterie à partir de mix énergétiques décarbonés (IEA, 2020, ch. 4).

Enfin, les résultats d'ACV des BEV sont ici calculés en excluant les impacts environnementaux des infrastructures de recharge, ce qui constitue une limite à ces études.

4.2. Contexte industriel

4.2.1. Le véhicule électrique

4.2.1.1. L'essor de la mobilité électrique

Depuis le début des années 2010, un essor de la mobilité électrique a pu être observé dans le monde. Effectivement, le nombre de BEV et de PHEV (véhicules hybrides rechargeables) croît rapidement : il y en avait environ 17 000 en 2010 contre 7,2 millions en 2019 (IEA, 2020, ch. 1).

Ceci se justifie notamment par **le soutien des gouvernements** (subventions, création d'infrastructures, informations aux consommateurs, etc.) et par **les contraintes de limitations d'émissions de polluants**. Effectivement, au cours des dernières années, les instances politiques et les constructeurs automobiles se sont de plus en plus penchés sur l'électrification des véhicules, car cela est vu comme une opportunité de décarbonation importante comme décrit dans la partie 4.1.2.

Par exemple en Union Européenne, les constructeurs sont soumis aux objectifs de la Commission Européenne stipulant que les émissions moyennes du parc de voitures particulières neuves doivent être réduites de 15 % en 2025 puis de 37,5 % en 2030 par rapport à 2021³. Ensuite, il peut également avoir des objectifs à l'échelle des états : par exemple en France, l'interdiction de la vente des voitures à énergie fossile carbonée est prévue pour 2040⁴. Enfin, il y a aussi **la multiplication des restrictions locales** pour les transports comme dans les ZFE (Zones à Faibles Émissions) qui apparaissent dans les villes européennes afin de réduire les pollutions dans les zones urbaines ; ces mesures tendent à être de plus en plus contraignantes, par exemple la zone de Paris devrait être uniquement autorisée aux véhicules « zéro-émission » à partir de 2030 (ADEME et al., 2020). Ainsi, tout ce contexte pousse fortement aux constructeurs à développer les technologies alternatives.

4.2.1.2. Le marché mondial

À l'échelle mondiale, les régions les plus dynamiques vis-à-vis de la mobilité électrique en 2019 sont la Chine, l'Europe et les États-Unis qui représentent respectivement 47 %, 25 % et 20 % du parc électrique mondial (IEA, 2020, ch. 1). Cependant, les véhicules particuliers électriques sont aujourd'hui une petite fraction des voitures en circulation, c'est-à-dire, moins de 1 % à l'échelle mondiale, mais ils pourraient en représenter 7 à 12 % en 2030 selon les scénarios étudiés par l'IEA (2020). Il y a en

² ADEME. Base Carbone. www.bilans-ges.ademe.fr/fr/ [consulté le 2021/05]

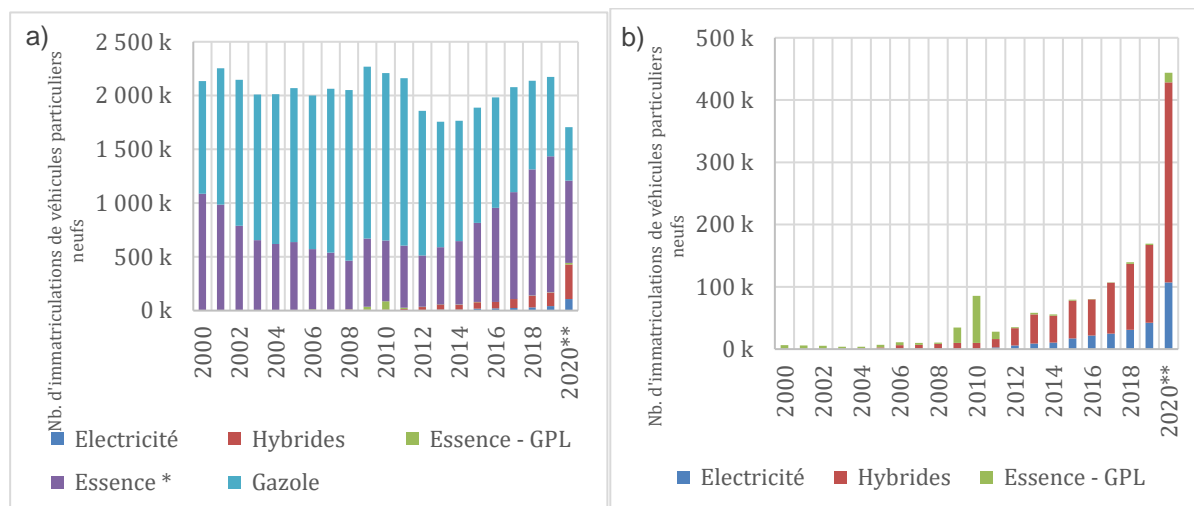
³ Commission Européenne. Régulation (EU) 2019/631. 2019. Disponible à l'adresse : ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/regulation_en

⁴ Ministère de la transition écologique. Loi d'orientation des mobilités. 2019. Disponible à l'adresse : www.ecologie.gouv.fr/loi-dorientation-des-mobilites

revanche des exceptions locales comme en Norvège où 13 % des véhicules étaient déjà électriques en 2019 (IEA, 2020, ch. 1).

4.2.1.3. Le marché français

Aujourd'hui, la France ne fait pas exception : **la part de VE est minoritaire** comme le montre la Figure 2a qui dénombre le nombre annuel d'immatriculations de véhicules particuliers neufs en fonction de type de source d'énergie. Effectivement, en 2019, seules 2 % de ces immatriculations étaient des BEV. En revanche, le marché est en forte croissance d'après la Figure 2b et, en 2020, la part d'immatriculation de BEV atteint les 6,3 %. En revanche, cette hausse se justifie notamment par l'augmentation provisoire des subventions et par l'élargissement provisoire des conditions pour pouvoir en bénéficier lors de la seconde moitié de l'année 2020. Le gouvernement a proposé cet avantage pour la vente de 200 000 VE dans le cadre de la relance de l'industrie automobile après la crise du Covid-19⁵.



*dont superéthanol à partir de 2017

Figure 2 : Évolution du nombre annuel d'immatriculation de véhicules particuliers neufs en France a) pour toutes les sources d'énergie et b) pour les sources d'énergies alternatives⁶

4.2.2. Les infrastructures de recharge

Le nombre de points de recharge en France est encore limité à l'échelle de la métropole. En revanche, la Figure 3 qui représente l'évolution des nombres de points de recharge particuliers, privés et publics montre que la croissance est soutenue. De plus, la loi impose des objectifs ambitieux pour suivre et dynamiser la croissance du parc automobile électrique français. L'objectif d'atteindre 100 000 points de charge ouverts au public d'ici fin 2021⁷ n'a pas été atteint : il n'y en avait que 54 000 au 4^{ème} trimestre. Au plus long terme, le gouvernement vise 7 millions de points de charge publics et privés d'ici 2030⁸ (contre 892 000 au 4^{ème} trimestre de 2021).

⁵ Ministère de la transition écologique. Plan de soutien à l'automobile pour une industrie verte et compétitive. 2020. Disponible à l'adresse : www.ecologie.gouv.fr/plan-soutien-lautomobile

⁶ Mise en forme : auteur. Graphiques construits à partir des données issues de a) et de b) pour les données 2020** :

a) SDES (Service des Données et Études Statistiques). Données sur les immatriculations des véhicules. 2021.

www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-sur-les-immatriculations-des-vehicules [consulté le 2021/05]

b) SDES. Motorisations des véhicules légers neufs - Émissions de CO2 et bonus écologique - Décembre 2020. 2021.

www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/motorisations-des-vehicules-legers-neufs-emissions-de-co2-et-bonus-ecologique-decembre-2020-0 [consulté le 2021/05]

⁷ Ministère de la transition écologique. Plan de soutien à l'automobile pour une industrie verte et compétitive. 2020. Disponible à l'adresse : www.ecologie.gouv.fr/plan-soutien-lautomobile

⁸ Ministère de la transition écologique. Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte. 2015. Disponible à l'adresse : www.ecologie.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte

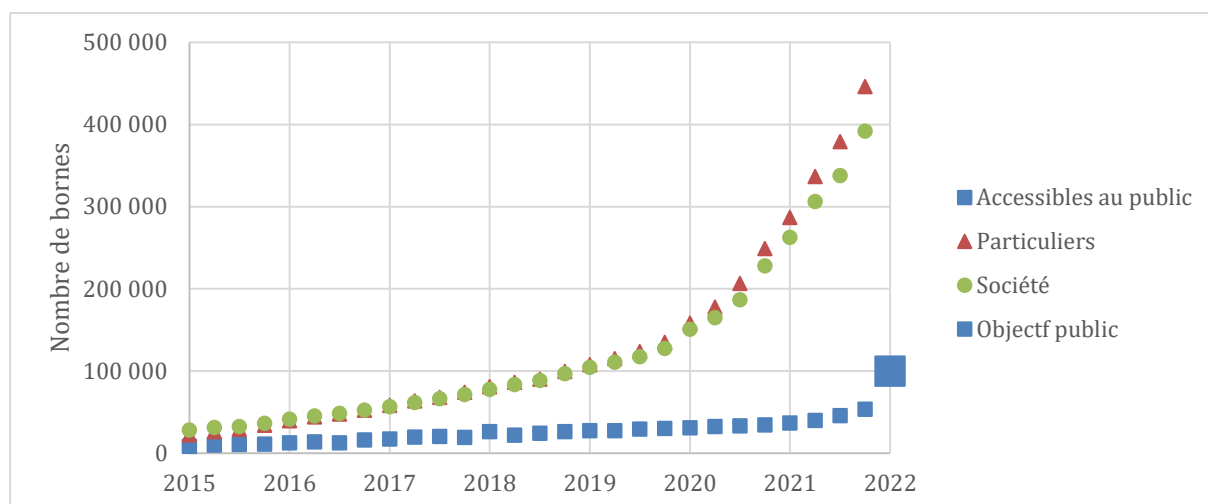


Figure 3 : Évolution du nombre de bornes en France destinées au public, installées chez le particulier ou dans les sociétés⁹

Les points de charge ouverts au public sont majoritairement d'une puissance inférieure ou égale à 22 kW, soit 91 % en mars 2022 en France (AVERE, 2022). Les bornes sont généralement installées sur initiative des collectivités locales mais s'y ajoutent celles qui sont installées à proximité des grands axes de circulation et des autoroutes par des acteurs privés (grande distribution, pétroliers pour les stations-services, concessions automobiles, opérateurs d'autopartage et sociétés de parkings) ; les bornes de recharge rapide le long du réseau autoroutier sont principalement installées par Izivia (filiale d'EDF) et par les constructeurs automobiles (Ionity, Tesla par ex.) (Enedis, 2019). L'Annexe B montre le positionnement des bornes de recharge sur l'ensemble des aires d'autoroutes françaises et illustre cette diversité de gestionnaire de bornes. On observe également que le réseau de recharge est encore très peu dense même s'il est parfois possible de sortir de l'autoroute pour trouver des bornes de recharge rapide à proximité des échangeurs¹⁰. Enfin, en France, la recharge est généralement soit facturée au kWh (comme Tesla et anciennement Ionity) soit au temps d'occupation de la borne ou à un mix des deux.

Aujourd'hui, réaliser des trajets longs en BEV en utilisant des recharges rapides reste compliqué. Effectivement, une grande majorité des bornes de recharge Izivia a été désactivée à cause de problèmes techniques¹¹, une partie des chargeurs rapides de Tesla ne sont accessibles qu'aux véhicules de la marque et la recharge de véhicules sur le réseau Ionity est plus chère pour les véhicules qui ne sont pas issus des marques du consortium (BMW, Mercedes-Benz, Ford, Audi, Porsche et Hyundai).

4.3. Les performances des BEV et le verrou des trajets longues distances

Par la nature des BEV et dans l'état actuel des innovations technologiques, certaines de leurs performances sont significativement différentes de celles des ICEV. Au-delà des aspects environnementaux, les BEV disposent de certains avantages non négligeables comme le fait qu'ils soient plus silencieux ou qu'ils aient de meilleures dynamiques de conduite, notamment grâce aux couples de démarrage importants. En outre, **l'offre actuelle des BEV sur le marché n'est pas en mesure d'être un substitut exact des ICEV** pour plusieurs raisons étudiées dans cette partie.

Un des verrous actuellement identifiés pour les BEV est que **les usagers souhaiteraient pouvoir bénéficier d'une autonomie et d'une vitesse de recharge comparables à celles des ICEV** pour certains trajets de longues durées qui peuvent être occasionnels (Hui, 2017). Pour répondre à ce besoin, l'industrie mobilise des batteries de hautes capacités pour leurs véhicules et développe un réseau de recharge dense et puissant avec différents partenaires. D'une part, les modèles de BEV

⁹ Mise en forme : auteur. Les données sur le nombre de bornes sont issues de la plateforme ouverte des données publiques françaises. ENEDIS. Nombre total de points de charge. www.data.gouv.fr/fr/datasets/nombre-total-de-points-de-charge/ [consulté le 2022/03]

¹⁰ Il est possible de visualiser ces stations sur des sites tels que ChargeMap.

¹¹ P. SCHWOERER. Charge rapide : Izivia supprime 90% du réseau Corri-Door. 28 février 2020. <https://www.automobile-propre.com/breves/charge-rapide-izivia-supprime-70-du-reseau-corri-door/> [consulté le 2021/05]

récents ont des capacités de batteries de 50 kWh en moyenne (e208, e2008, Zoé R110) mais allant jusqu'à 86 kWh (Audi e-tron GT) voir 100 kWh (Tesla Model S). D'autre part, les technologies de chargeurs rapides DC (à courant continu) de puissance supérieure à 50 kW connaissent un développement rapide et certaines permettent d'atteindre jusqu'à 350 kW en pointe. Comme la batterie est la cause d'une partie significative des impacts des BEV, ce type d'exigences issues de l'expérience des technologies de voitures thermiques demande des dimensionnements importants et amplifie donc les impacts environnementaux des BEV.

4.3.1. L'autonomie

Tout d'abord, **pour les usages standards en milieu urbain et péri-urbain, l'autonomie pour les BEV ne semble pas problématique.** Par exemple, les véhicules Renault Twingo ZE de Renault (segment A : urbaine, batterie 22 kWh) et e208 de Peugeot (segment B : citadine polyvalente, batterie 50 kWh) présentent des autonomies sur cycle mixte WLTP (procédure d'essai mondiale harmonisée pour les véhicules légers) de 190 km et de 340 km respectivement. Ces autonomies semblent suffisantes pour satisfaire les trajets journaliers habituels tels que les allers-retours domicile-travail à condition de choisir un véhicule avec une taille de batterie correspondant à ses besoins. En dehors de l'usage par des particuliers, ils peuvent aussi être adaptés pour constituer une flotte de véhicule d'une entreprise comme pour la Poste ou Engie ou même pour des flottes de véhicules plus lourds tels que des bus ou des bennes à ordures.

En revanche, **l'autonomie chute avec la vitesse** à laquelle la voiture roule comme le montre les caractéristiques vitesse-autonomie de la Figure 4. Cette chute est justifiée la forte hausse de la consommation énergétique causée par les pertes aérodynamiques. Donc, la portée d'un BEV peut être limitante pour les longs trajets à haute vitesse comme ceux réalisés sur autoroute à 130 km/h par exemple. Par exemple, l'e208 effectuant un trajet de plusieurs heures peut circuler seulement pendant 1h à 130 km/h avant de devoir faire un recharge d'environ 25 min donc ceci ne correspond pas au comportement usuel d'un utilisateur d'ICEV. Généralement, si l'usager suit les recommandations minimales du site gouvernemental de la sécurité routière, il aura tendance à faire une pause de 20 min toutes les deux heures environ. Une batterie d'environ 110 kWh permet d'atteindre cette autonomie en considérant les consommations des véhicules d'aujourd'hui.

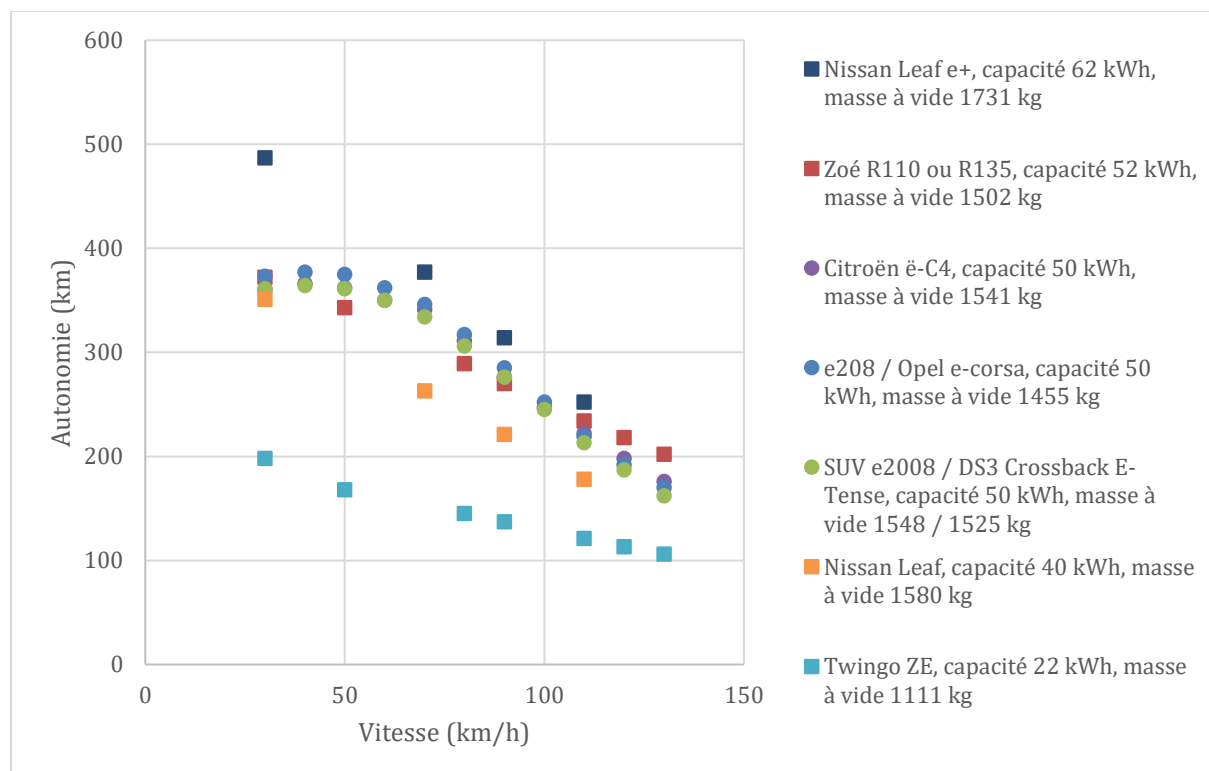


Figure 4 : Comparaison de l'autonomie de véhicules de Stellantis et du groupe Renault en fonction de la vitesse de circulation, sans chauffage ni climatisation et à température extérieure fixée à 20°C¹²

¹² Mise en forme : auteur. Les données sur l'autonomie sont issues de simulateurs proposés sur les sites des constructeurs Peugeot, Opel, DS, Citroën, Renault et Nissan.

De plus, il faut noter que les autonomies montrées ici concernent des véhicules avec des batteries neuves, or **leur potentiel de recharge diminue au fur et à mesure des cycles** de charge et de décharge. **Les autonomies dépendent également du dynamisme de conduite de l'utilisateur et de la température** car le froid dégrade les performances de la batterie et peut engendrer une consommation supplémentaire pour la climatisation ou le chauffage de l'habitacle ([Faria et al., 2013](#) ; [Delos Reyes et al., 2016](#)).

4.3.2. La vitesse de recharge

Ensuite, il y a un autre frein actuellement et il concerne **la vitesse de la recharge lors des trajets longs** : recharger la batterie d'une voiture électrique prend plus de temps que de remplir le réservoir d'une voiture thermique. La Figure 5 indique les temps de recharge estimés pour la Zoé selon la technologie utilisée et elle montre que l'usage de la voiture électrique demande plus de flexibilité dans son usage à cet égard.

Pour la recharge usuelle, il est possible d'utiliser n'importe quelle prise domestique de 2,3 kW, mais comme le montre l'exemple de la Zoé, une recharge à cette puissance dure environ une journée. Mais, elle peut être substituée par des prises renforcées de type « Green-up » de 3,7 kW ou par des « Wallbox » (monophasées 7,4 kW ou triphasées 11 ou 22 kW) si chargeur fourni avec le véhicule supporte ces puissances de charge. En revanche, même avec une prise de 22 kW, la recharge dure environ 2h, or il est difficile d'imaginer un trajet long où une recharge de 2h est nécessaire toutes les heures de trajet.

Ainsi, il y a également des **chargeurs rapides en courant continu de puissance supérieure à 50 kW**. Des recharges rapides sont donc possibles généralement sur les aires d'autoroute, les parkings de covoiturage ou de centres commerciaux par exemple. Cette puissance est plus adaptée pour les trajets longs et il existe des chargeurs pouvant atteindre jusqu'à 350 kW en pointe. En revanche, la puissance de recharge est limitée par la puissance admissible par le véhicule ; par exemple, les véhicules Zoé, e208, Tesla Model S et Audi e-tron GT sont respectivement limités à une recharge de 50 kW, 100 kW, 200 kW et 270 kW.

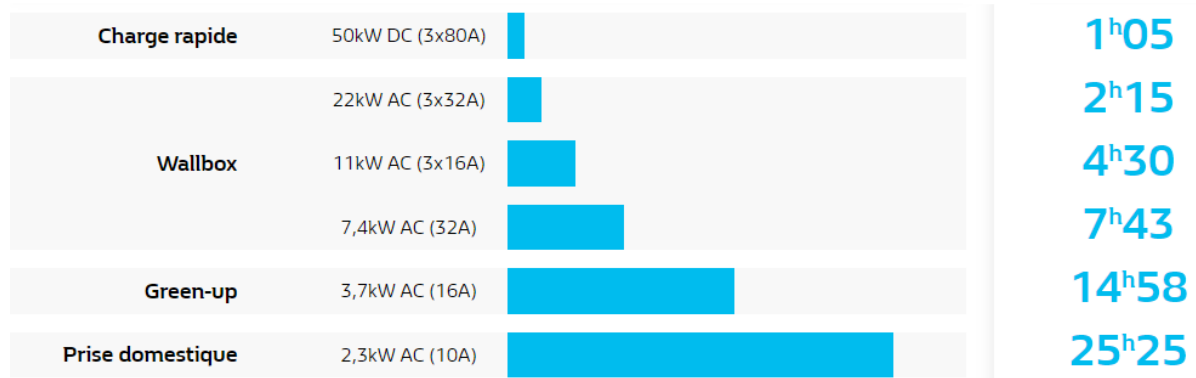


Figure 5 : Temps de recharge estimés selon la technologie de recharge utilisée pour une recharge de 0 % à 80 % des batteries de 52 kWh de la Zoé R110 ou R135 ayant un chargeur embarqué de 22 kW maximum¹³

Finalement, s'il est souhaité de pouvoir atteindre un rythme de cycles de 2h de circulation à 130 km/h puis de 20 min de pause qui était mentionné précédemment, alors il est nécessaire de développer d'avantage le réseau de recharge rapide et les performances de recharge des véhicules. Typiquement, si on considère une batterie de 110 kWh (atteignant 2h d'autonomie à 130 km/h) qui peut être rechargée en 20 min, alors la puissance de recharge moyenne doit être de 230 kW (et 320 kW en pointe).

4.4. La sociologie de l'utilisateur de mobilité

Pour pouvoir penser la mobilité électrique de demain, il est nécessaire de **placer les usagers de BEV au cœur de la réflexion**. Effectivement, il est capital d'analyser les usages de mobilité pour mieux comprendre les comportements des usagers, leurs choix en tant que consommateurs et leurs manières de s'approprier la technologie. Ceci permet de déterminer ce que les usagers attendent de la

¹³ Le graphique provient directement du site du constructeur. Renault. Autonomie, batterie et recharge, Renault Zoé e-tech électrique. www.renault.fr/vehicules-electriques/zoe/batterie-recharge.html [consulté le 2021/03]

mobilité, les actions à réaliser pour privilégier la transition vers l'électrique et de prévoir ce que doit devenir le VE pour qu'il soit largement adopté. C'est notamment en répondant aux besoins attendus et réels des consommateurs que le marché de l'automobile électrique pourra croître fortement et qu'il sera possible d'atteindre les objectifs environnementaux. Ainsi, pour [Hui \(2017\)](#), il est important pour la santé et la dynamique du marché que le consommateur soit réellement intégré et considéré dans les réflexions sur les véhicules, les aménagements ainsi que sur les politiques associées. Effectivement, dans les études sociotechniques de transition, son importance a malheureusement tendance à être minimisée alors qu'il est nécessaire que tous les acteurs du changement soient coordonnés pour le réaliser.

4.4.1. L'adoption des BEV

Aujourd'hui, **les BEV n'ont pas atteint le stade de maturité technologique** et sont choisis par des consommateurs qu'il est généralement possible d'identifier à des innovateurs ou à des premiers adeptes selon la courbe de diffusion de l'innovation de Rogers ([Laurischkat et al., 2016](#)). **Une plus large acceptabilité est conditionnée par les évolutions technico-économique mais également par l'évolution de la perception du VE par les consommateurs.** Il est donc important de déterminer les causes et les freins à l'adoption du VE pour mieux appréhender leurs intentions et leurs attentes pour la mobilité ainsi que pour mieux considérer les scénarios de pénétration des VE. Le Tableau 2 propose une liste de paramètres influents sur le choix d'un potentiel acquéreur de véhicule électrique.

Tableau 2 : Description de paramètres influents sur le choix ou le refus d'adopter un véhicule électrique

Élément influent sur le choix éventuel d'un VE	Argument positif	Arguments négatifs
Envisager d'acheter un VE demande que le consommateur réalise des évaluations rationnelles pour juger les avantages et inconvénients par rapport aux véhicules conventionnels (Rezvani et al., 2015 ; Anfinen et al., 2019).	<ul style="list-style-type: none"> — Un VE peut s'avérer rentable économiquement, apporte un certain confort de la conduite (ex. : bruit, accélération) et a une maintenance réduite. — Potentiellement, un BEV peut parfaitement convenir aux besoins du consommateur notamment s'il recherche un véhicule secondaire ou s'il n'effectue pas de trajets longs (Hui, 2017 ; Jensen et al., 2013). Par ailleurs, comme les VE sont actuellement plutôt des petites voitures (segment A ou B), l'acquisition d'un VE est adaptée pour ceux qui visent ce gabarit de voiture (Jensen et al., 2013). 	<ul style="list-style-type: none"> — La gestion de l'autonomie et de la recharge peut être compliquée si le consommateur ne dispose pas de possibilités de recharge à domicile ou au travail. De plus, la mobilité longue distance est limitée et dépendante des infrastructures publiques.
Juger de la pertinence d'investir dans un VE demande un certain temps de réflexion et d'analyse ainsi que des efforts pour se renseigner auprès des vendeurs ou d'autres utilisateurs qui conseillent et témoignent de leurs expériences (amis, famille, en ligne sur les forums par exemple) (Anfinen et al., 2019 ; Eskenazi et al., 2017).	<ul style="list-style-type: none"> — Il peut exister un plaisir issu de ces recherches et de cet apprentissage, voir même un certain goût aventureux pour prendre le risque de choisir un VE car cela amène à de la découverte et de l'expérimentation (Eskenazi et al., 2017). 	<ul style="list-style-type: none"> — Tous les consommateurs ne sont pas prêts à effectuer cette démarche donc cela exclue une partie des acheteurs potentiels de VE. — De plus, la maîtrise du numérique a un rôle prédominant pour s'informer et pour gérer la recharge, ainsi Eskenazi et al. (2017) remarquent que ceci met à l'écart une partie de la population qui n'est pas familière avec la technologie, notamment les personnes les plus âgées, qui risquent donc de ne pas adopter le VE.
Souhaiter un VE dépend de la sensibilité environnementale de l'usager et des incitations politiques.	<ul style="list-style-type: none"> — L'individu peut avoir certaines attitudes « pro-environnement » issues d'un sentiment d'obligation morale souvent dépendant de la sensibilité environnementale de la politique de son pays qui souhaite satisfaire les objectifs de réduction de polluants et limiter sa dépendance aux énergies fossiles par exemple (Rezvani et al., 2015). 	<ul style="list-style-type: none"> — À l'inverse, il y a aussi des usagers qui doutent des avantages des VE sur les impacts environnementaux, plus particulièrement dans les pays dont le mix électrique repose sur les énergies fossiles. — Par ailleurs, Hui (2017) souligne que les consommateurs ne sont pas forcément bien informés sur les technologies de véhicules.

	— Sinon, l'adoption de VE peut même être fortement incitée par des politiques : par exemple, des résidents de grandes aires urbaines peuvent choisir des véhicules « zéro-émission » car ce pourrait être le seul type de véhicule autorisé dans certaines zones à faibles émissions comme ça l'est envisagé à Paris pour 2030 (ADEME et al., 2020).	
Posséder un VE peut porter une certaine symbolique sur l'usager et donc peut être vu comme un moyen d'expression de soi-même .	— Effectivement, un VE peut traduire de manière visible les convictions et engagements environnementaux de l'individu ou de signifier le désir de recherche de modernité, d'ouverture et d'être un pionnier (Rezvani et al., 2015).	— En revanche, il peut aussi être vu négativement par certains car le VE peut être associé à un mode de vie « écolo » (on pourrait aussi dire « bobo » en France) (Rezvani et al., 2015). Il peut donc être vu comme étant caractéristique d'un mode de vie trop lent, trop mou voir décroissant à cause des contraintes techniques. Donc, Hui (2017) considère que le VE peut être vu comme un véhicule inférieur, ce qui ferme le marché à certains consommateurs.
Acquérir un VE dont le secteur est en plein essor peut apporter de la satisfaction mais aussi des risques.	— Le consommateur peut vouloir acquérir un VE en ayant la volonté de soutenir et de promouvoir l'innovation (Rezvani et al., 2015). Effectivement, comme les VE sont vus comme très prometteurs mais que leur part est encore insignifiante, il faut bien que le marché se développe pour recevoir plus d'investissements, de permettre les économies d'échelle, etc.	— Cependant, il y peut y avoir à l'inverse une peur de la désuétude car des innovations soutenues impliquent l'arrivée rapide de meilleurs produits sur le marché, ce qui peut aussi impliquer une chute de la valeur des anciens modèles électriques (IEA, 2020 , ch. 1).
L'usager peut également adopté un VE grâce aux émotions ressenties lors de la conduite	— Outre le confort de conduite, l'acheteur d'un VE peut se sentir fier, heureux de sa décision ou moins coupable vis-à-vis de l'environnement (Rezvani et al., 2015 ; Anfinsen et al., 2019). Par exemple, l'usager n'a pas à sentir la « honte » de prendre un véhicule thermique comme il existe la honte de prendre l'avion (<i>flightshame</i>).	

4.4.2. Le comportement des usagers de VE

Outre le fait qu'il faille que le VE convienne aux besoins des potentiels consommateurs et que ces derniers doivent avoir une bonne perception du VE pour l'adopter, **il est aussi nécessaire que la mobilité électrique soit attractive et pertinente pour ceux qui expérimente un VE**. L'étude des comportements des usagers permet de comprendre comment ils s'approprient la technologie électrique, d'analyser la manière dont les limites actuelles influent sur leurs comportements et de vérifier si leurs attentes correspondent aux évolutions prévues et souhaitées par les acteurs de la mobilité électrique.

[Jensen et al. \(2013\)](#) ont étudié les préférences et les attitudes des usages avant puis après avoir expérimenté un BEV urbain (ou mini-citadine, segment A). Cela a permis de comparer les usages attendus que les sondés avaient du VE avec les usages réels constatés après trois mois d'expérience. Ils soulignent que l'autonomie est un facteur critique. Les véhicules testés ayant des capacités de batterie comprises entre 14,5 et 16 kWh, l'autonomie était initialement considérée comme critique et d'autant plus pour les foyers avec un seul véhicule. Puis après l'expérimentation, l'importance perçue par les usagers de l'autonomie double. Ainsi, même si ce type de véhicule n'est pas susceptible de réaliser des trajets longs, il est possible de noter que **la capacité des véhicules à satisfaire les besoins des usagers paraît directement dépendant d'un dimensionnement suffisant de la taille de batterie**.

De plus, **il ne paraît pas acceptable pour les consommateurs que les VE aient des performances techniques de conduite trop limitées** comparées à leurs homologues thermiques. Par exemple, une limitation technique de la vitesse à 120 km/h est initialement mal perçue puis mal vécue par les sondés de [Jensen et al. \(2013\)](#) ; ce serait donc un frein à la demande de véhicule électrique même si cela permet notamment d'augmenter l'autonomie des véhicules et de réduire les coûts économiques et environnementaux.

Ensuite, les limites liées à l'autonomie et à la recharge d'un BEV font que leurs utilisateurs tendent à adapter leurs conduites. [Anfinssen et al. \(2019\)](#) ont interrogé des utilisateurs de VE et certains ont témoigné que leurs conduites étaient devenues plus économiques, notamment grâce aux indications du tableau de bord. De plus, ils prennent l'habitude de programmer le préchauffage des batteries en hiver : ainsi, ils jugent qu'ils ont appris à bien gérer l'autonomie de leurs véhicules ([Anfinssen et al., 2019](#) ; [Eskenasi et al., 2017](#)). **Les usagers modifient leurs comportements de conduite particulièrement pour les trajets longues distances qui sont contraints par l'autonomie et la vitesse de recharge.** [Eskenasi et al. \(2017\)](#) ont observé qu'ils **prennent du temps** pour planifier leurs voyages. Ils peuvent utiliser des planificateurs de trajets pour déterminer les lieux pour effectuer les recharges en les adaptant éventuellement pour que les temps des arrêts coïncident avec les pauses repas ou en les choisissant proches de zones d'intérêts pour des loisirs (visite d'une ville par exemple). Il est également possible de vérifier l'état des bornes grâce à la lecture d'avis d'utilisateurs pour limiter les risques de mauvaises surprises.

Enfin, l'expérience des usagers vis-à-vis des bornes de recharge publiques est très importante à intégrer aux réflexions sur la mobilité électrique. Pour cela, il est possible de se baser sur l'expérience des utilisateurs de VE qui partagent leurs expériences sur les forums ou sur Twitter par exemple. Ainsi, [Eskenasi et al. \(2017\)](#) et [Kühl et al. \(2019\)](#) ont pu y trouver que les usagers se plaignent régulièrement des problèmes pour effectuer les recharges car **le réseau de recharge n'est pas assez dense, qu'il manque d'information sur la disponibilité en temps réel des bornes et qu'elles ne sont pas évidentes à localiser.** Ils indiquent également qu'il y a parfois des bornes mal entretenues ou dysfonctionnelles. Ainsi, il est possible de retenir que, d'après [Eskenasi et al. \(2017\)](#), **les utilisateurs souhaiteraient que des informations dynamiques mises à jour en direct soient accessibles** pour rendre les trajets longues distances moins compliqués et moins risqués.

4.5. Bilan et positionnement

4.5.1. Synthèse

Le véhicule électrique est une technologie clef pour pouvoir atteindre les objectifs environnementaux locaux, régionaux ou globaux. Ainsi, son marché connaît aujourd'hui un intérêt grandissant, les ventes croissent chaque année et les prévisions décrivent une dynamique soutenue. Cependant, si l'on souhaite rendre le succès de l'électrification du parc automobile indépendant du besoin de politiques agressives qui favorisent les VE, il est capital que les acteurs de la mobilité soient capables de **rendre le VE souhaitable à grande échelle tout en relevant ses opportunités de soutenabilité.** Or, la mobilité électrique pose des challenges pour l'ensemble de ses parties prenantes à travers trois verrous majeurs : l'accès courant aux infrastructures de recharge pour les trajets usuels, les facilités pour s'approprier le fonctionnement des VE et des bornes ainsi que la capacité de satisfaire les besoins de mobilité longue distance.

4.5.2. Problématique

Pour les trajets longs qui sont l'objet principal de cette étude, les BEV dépendent d'un dimensionnement suffisant des batteries, d'infrastructures de recharge rapide adaptées et de la bonne gestion de leurs autonomies. Nous proposons donc de concevoir un outil permettant de comparer différentes stratégies de déploiement de la mobilité électrique selon différents critères d'évaluation.

Cet outil repose sur la modélisation du **système complexe formé par les véhicules électriques, leurs usagers, les territoires et leurs infrastructures de recharge.** La complexité de ce dernier est liée aux forts degrés d'interactions entre ces différents sous-systèmes comme le montre la représentation du système de l'Annexe C.

L'objectif est de proposer une méthodologie permettant d'étudier ce système en comparant pour différentes stratégies les impacts environnementaux (dont la réduction est le principal intérêt de la mobilité électrique) et la satisfaction des usagers (qui est verrou majeur pour l'adoption des BEV). Pour

les différents scénarios d'étude, les questions sont alors **quelle est influence entre les choix de dimensionnement des véhicules et des infrastructures, leurs technologies et leurs usages sur les impacts environnementaux et la satisfaction des usagers ?** La méthodologie repose alors sur un simulateur de mobilité électrique permettant d'étudier l'impact de chaque choix sur les performances du système. La Figure 6 reprend schématiquement la problématique ainsi formulée.

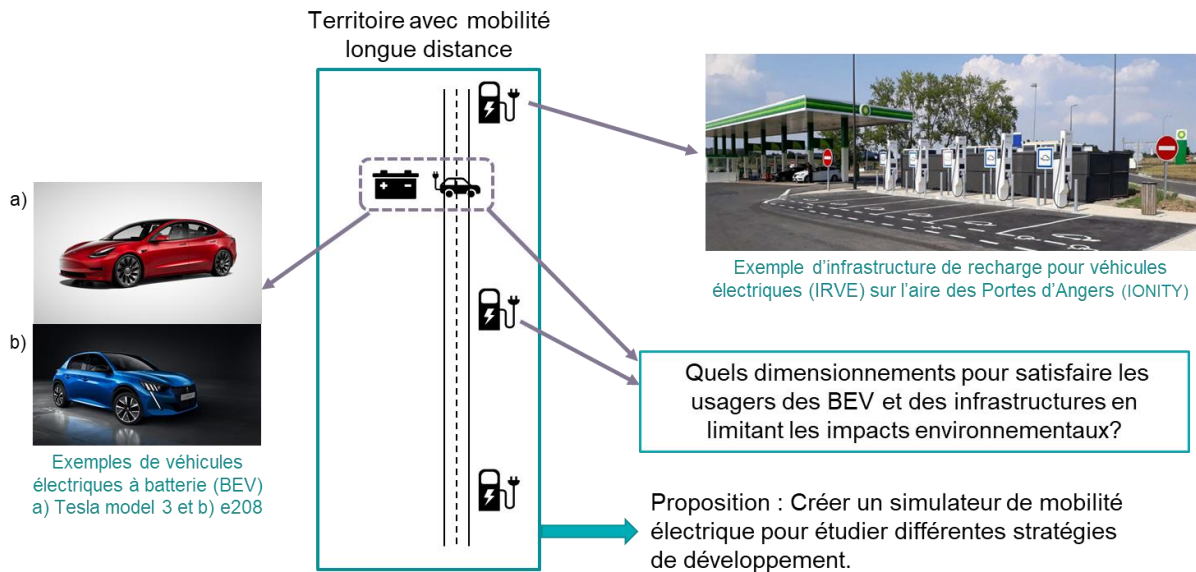


Figure 6 : Description initiale du problème de recherche traité dans ce PRC : la conception d'un système complexe de mobilité électrique

4.5.3. Cadre d'étude

Certes, le dimensionnement d'un véhicule peut être pensé à l'échelle de ce seul véhicule et de son usager. Cependant, il existe une diversité importante dans les types de véhicules mais aussi dans le comportement de leurs usagers. Donc, une étude à l'échelle d'un seul véhicule ne permet de considérer cette hétérogénéité. De plus, le réseau d'infrastructure n'est pas conçu et implanté pour un seul véhicule mais plutôt pour un territoire car il est partagé par tous les usagers de mobilité y circulant. Ainsi, comme nous nous intéressons ici à des stratégies de déploiement et à différents usages de mobilité, il est donc nécessaire d'adopter un regard à la hauteur de l'ensemble du système, c'est-à-dire, le territoire. Dans le cadre de la mobilité longue distance, **notre méthodologie est donc cadrée à l'échelle d'un axe routier ou autoroutier.**

Ensuite, cette vision systémique et globale a l'avantage de **pouvoir inclure le point de vue de multiples parties prenantes aux considérations effectuées.** La réflexion à l'échelle territoriale permet donc d'inclure les choix des concepteurs de véhicules électriques, les comportements d'un ensemble d'usagers et des gestionnaires des infrastructures, mais également les propriétaires des aires d'autoroute, les gestionnaires des aires d'autoroute. Chaque point de vue a des considérations différentes et le Tableau 3 décrit des exemples de paramètres d'entrée ou de sortie du simulateur pertinents pour un acteur donné.

Tableau 3 : Description des paramètres d'entrée et de sortie du simulateur de mobilité électrique et de leurs dépendances par rapport aux différents parties prenantes de la mobilité (en gris clair : élément non traité à ce jour)

Point de vue	Paramètres d'entrée	Paramètres de sortie
Usager	<ul style="list-style-type: none"> — Trafic actuel et à venir — Parc de BEV dans le parc pour chaque modèle existant — Gestion de l'autonomie des VE — Besoins particuliers de mobilité (nature du trajet, contrainte de temps) 	<ul style="list-style-type: none"> — Temps de trajet total (circulation, attente et recharge) — Fréquence des arrêts — Flexibilité dans les possibilités de recharge — Coût de la recharge (et coût véhicule)
Gestionnaire	<ul style="list-style-type: none"> — Puissance des recharges — Densité du réseau (stations équipées et nombre de bornes par station) — Technologie de recharge (bornes ou recharge dynamique) 	<ul style="list-style-type: none"> — Temps d'arrêt sur les stations — Pics de la demande de puissance — Impacts environnementaux des infrastructures (ici, l'évaluation est incomplète) — Coût d'installation et d'exploitation des bornes

Constructeur de VE	<ul style="list-style-type: none"> — Dimensionnement des BEV — Technologie des batteries — Services de mobilité type extension de batterie 	<ul style="list-style-type: none"> — Impacts environnementaux des BEV — Impact sur la durée de vie des batteries de la recharge rapide
---------------------------	---	--

5. Livrable 2 : Simulation d'un système de mobilité électrique longue distance

Rédaction du livrable : Julien Baltazar

Pour pouvoir développer une réflexion quantitative sur le futur de la mobilité électrique longue distance, la proposition a été de concevoir un simulateur de mobilité électrique permettant de comparer des stratégies de déploiement. Ainsi, cette partie consiste à décrire la méthodologie qui a été appliquée et à montrer quelques résultats du simulateur. Ces derniers ont permis la formulation de quelques recommandations pour la conception du système de mobilité détaillées en partie 5.2.4.

5.1. Méthodologie

Pour comparer différentes stratégies de déploiement, un simulateur de mobilité électrique longue distance a été réalisé. Il a la particularité d'être basé sur une reconstitution des flux origine-destination afin de mieux identifier la longueur des trajets réalisés car le besoin d'infrastructures de recharge en est directement dépendant. De plus, le simulateur permet de tenir compte de la diversité des BEV dans le parc automobile et de leurs usages. Enfin, différents indicateurs sont détaillés afin d'évaluer les performances du système à l'échelle du territoire considéré.

5.1.1. Définition du simulateur

Le simulateur est basé sur **une modélisation fine d'un axe routier et du parc de BEV** actuel et futur afin de pouvoir générer des recommandations pertinentes. Sa particularité est qu'il peut permettre la comparaison de différentes stratégies de conception des véhicules et des infrastructures et l'évaluation de l'influence des comportements des utilisateurs. Il vise également à proposer une vision prospective pour prendre en compte le fort dynamisme du système étudié.

Le développement d'un outil de simulation a été privilégié par rapport à d'autres solutions pour faciliter l'implémentation des comportements d'usagers et pour éviter certains problèmes de convergence. Le simulateur a été codé en Python mais, pour en faciliter l'usage, les paramètres sont importés depuis un fichier Excel et les résultats sont exportés dans un autre fichier Excel. Ce fonctionnement est justifié dans le cadre du projet collaboratif par la volonté de créer un outil compréhensible et utilisable par tous, même par ceux n'ayant pas de connaissances sur la modélisation, la simulation ou l'optimisation ou n'ayant pas l'habitude d'utiliser Python. Les étapes de construction du simulateur et la liste des principaux résultats qu'il peut fournir sont résumés sur la Figure 7. Les paramètres d'entrées et de sorties du modèle sont synthétisés en Annexe D.

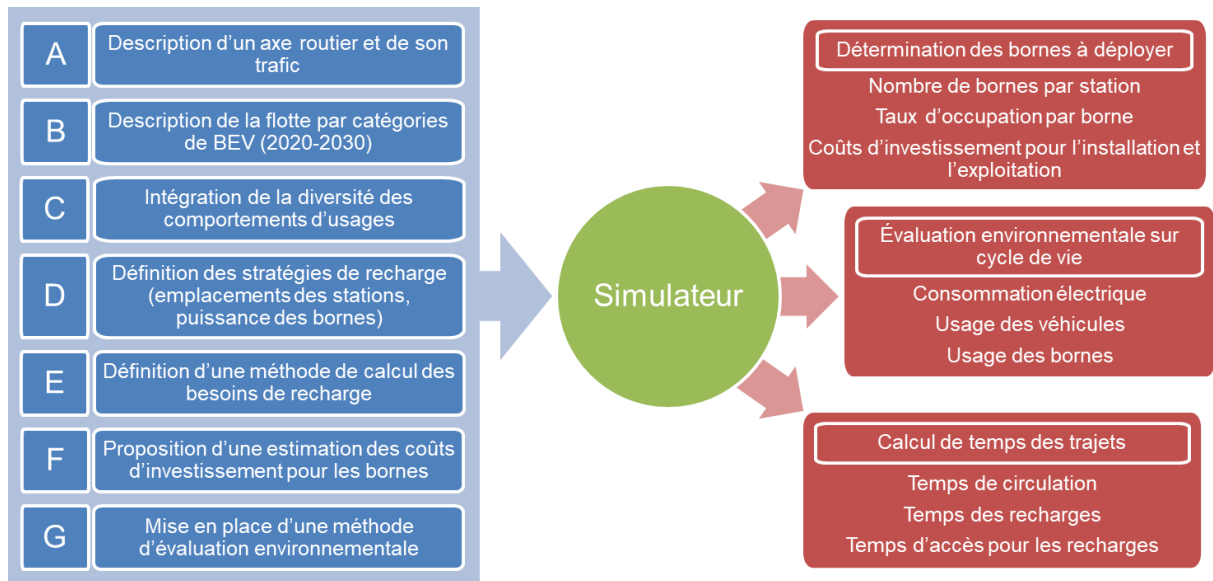


Figure 7 : Description des sept étapes de conception du simulateur et liste des principaux résultats déterminés lors d'une simulation

5.1.2. La modélisation de la demande

La première étape de la modélisation consiste à définir les trajets effectués par les usagers de véhicules électriques afin d'en déduire leurs besoins de recharge. La première section de cette partie détaille la méthode pour calculer les besoins de recharge d'un véhicule, la deuxième s'intéresse à l'étude du trafic dans sa globalité et la dernière détaille la composition du parc de véhicules qui circule.

5.1.2.1. Les flux de mobilité sur un axe routier

Les besoins de recharge d'un BEV sont directement dépendant du trajet qu'il réalise. Or, celui-ci peut être décrit simplement par un déplacement entre une origine et une destination, c'est-à-dire, entre un échangeur d'entrée et un échangeur de sortie lorsque qu'on étudie un seul axe routier. L'objectif est donc de modéliser le territoire, de définir une loi régissant la demande de recharge puis de déterminer les flux de trafic entre chaque origine-destination.

5.1.2.1.1. La description de l'axe routier

Un axe routier est composé de deux voies distinctes pour chaque sens de circulation. Pour la suite, ils seront distingués selon l'ordre des Points de Repère routier (PR) : par exemple, pour l'A6 entre Paris et Lyon qui a son origine à Paris (borne 0), le sens PR croissant correspond à Paris vers Lyon alors que le sens PR décroissant correspond à Lyon vers Paris.

Chaque voie dispose d'un certain nombre d'entrée, de sortie et de stations de recharge potentielles. Une représentation d'une voie est proposée en Figure 8 avec des entrées e_i , des sorties s_j et des stations a_k ; ces éléments sont numérotés dans l'ordre croissant des PR. Parfois, les échangeurs ne sont pas complets donc il peut y avoir une entrée ou une sortie pour un sens de circulation mais pas dans l'autre. Sur une autoroute, les stations de recharges sont généralement les aires de service ou de repos mais cela peut également être une station en dehors de l'autoroute à proximité d'un échangeur (comme sur le parking d'un hôtel ou d'un centre commercial, sur un parking de covoiturage ou sur une station service).

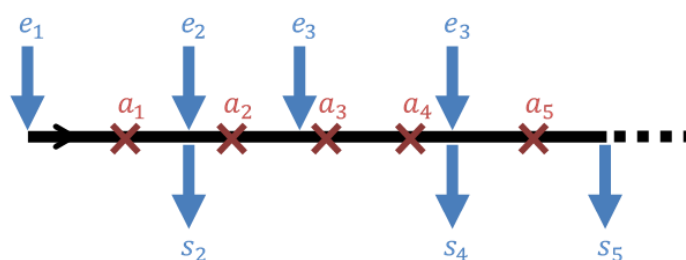


Figure 8 : Exemple de voie d'un axe routier correspondant au sens de circulation des PR croissants

5.1.2.1.2. Le calcul de besoin de recharge et comportement de l'utilisateur

Ensuite, pour chaque trajet possible entre une origine et une destination, le simulateur détermine les stations où la recharge devrait avoir lieu. Le lieu de la recharge dépend directement de l'autonomie du véhicule ou plutôt de la portée effective du véhicule D_{lim} telle que calculée par l'Éq. 1. La portée effective permet de tenir compte du fait qu'un usager n'utilise jamais entièrement la batterie. Effectivement, un véhicule n'atteint jamais les 0 % d'état de charge car un automobiliste garde de la marge pour éviter la panne. De plus, lors des recharges rapides, les batteries sont rarement chargées jusqu'à 100 % car **les fin de recharges sont significativement plus lentes** comme le montre les courbes de charge de la Figure 9 pour deux bornes de puissance différentes. Effectivement, pour une recharge à 50 kW, la puissance de charge chute après que la batterie ait atteint environ 80 % d'état de charge (SoC, *State of Charge*). Plus la puissance de la recharge est élevée, plus cette chute intervient rapidement : par exemple, pour une recharge à 150 kW, la puissance diminue dès que le SoC dépasse 25 %.

$$D_{lim} = \frac{E_{bat} \cdot (SoC_{max} - SoC_{min})}{C_{moy}} \quad \text{Éq. 1}$$

Avec :

D_{lim} , la portée effective du véhicule (en km) ;

E_{bat} , la capacité de la batterie (en kWh) ;

SoC_{max} , l'état de charge (SoC, *State of Charge*) maximal de la batterie qui est atteint à la fin des recharges ;

SoC_{min} , l'état de charge minimal acceptable lors de l'usage de la batterie ;

C_{moy} , la consommation moyenne sur le trajet (en kWh/km).

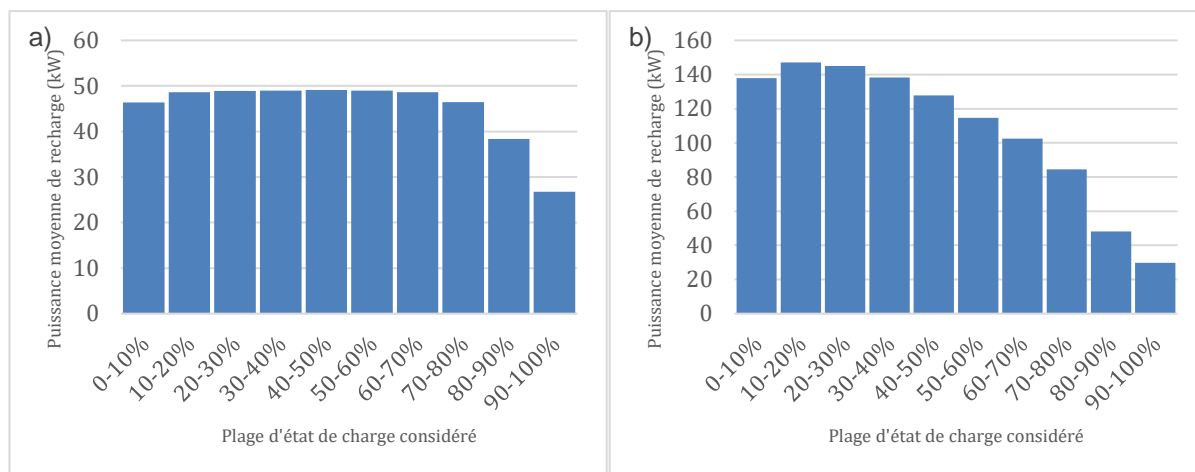


Figure 9 : Puissance de recharge en fonction de l'état de charge de la batterie pour une recharge de a) 50 kW et b) de 150 kW (données moyennes pour plusieurs véhicules¹⁴)

Le comportement des usagers peut donc être considéré en modifiant les paramètres de l'Éq. 1 liés à la consommation et à l'état de charge. En particulier, il est possible de considérer différents états de charge initiaux pour les véhicules rentrant sur l'axe routier. Il est également possible d'imposer un état de charge minimal à avoir lorsque le véhicule sort de l'axe routier afin qu'il puisse terminer son voyage. En revanche, il est difficile de caractériser la partie du trajet réalisée en dehors de l'axe routier considéré. Une des limites de cette modélisation est que le simulateur considère que l'état de charge après la recharge d'un véhicule est toujours égal à sa valeur maximale SoC_{max} , indépendamment de la distance qu'il reste à parcourir.

À partir de cette définition du comportement d'usagers, **les lieux de recharge pour un trajet donné peuvent être déterminés en établissant que la recharge a lieu à la station précédant la limite d'autonomie**. La Figure 10 donne un exemple pour un trajet entre une entrée e_1 et une sortie s_5 : le véhicule entrant en s_1 va atteindre sa limite d'autonomie entre a_2 et a_3 donc il sera rechargé à la plus proche station en amont de cette limite, c'est-à-dire a_2 .

¹⁴ Traitement des données et mise en forme : auteur. Ces graphiques ont été créés à partir des courbes de charge de différents véhicules fournies par l'opérateur de stations de recharge rapide Fastned. Fastned. Chargeur ultra-rapide >150 kW. <https://support.fastned.nl/hc/fr/articles/115015420127-Chargeur-ultra-rapide-150-kW> [consulté le 2021/05]

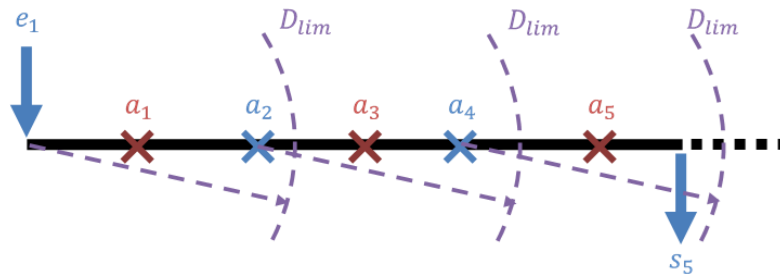


Figure 10 : Détermination des lieux de recharge pour le trajet 1-5 à partir du calcul de la portée effective D_{lim}

Lors d'une charge, la puissance de recharge est calculée et le temps de la recharge ainsi que le temps d'occupation de la borne sont déduits. La puissance moyenne de la recharge dépend de la puissance maximale de recharge qui correspond à la puissance de la borne minorée par la puissance admissible par le véhicule. La puissance moyenne dépend également de l'état de charge au début de la recharge et de l'état de charge à la fin de la recharge. La méthode de calcul a été établie en se basant sur des données de Fastned. Elles proviennent de mesures de la puissance au cours de la recharge de différents véhicules et en utilisant des bornes de puissances différentes. Lors de leur analyse, **d'importantes hétérogénéités de profils de recharge ont été observées selon les types de véhicules**. Selon les modèles, la puissance moyenne de recharge entre 10 % et 90 % d'état de charge (par exemple) est significativement plus faible que la puissance maximale. Ces écarts sont représentés en Annexe E pour une vingtaine de modèles de véhicules. Dans le simulateur, le profil de recharge ne dépend pas du véhicule considéré car des données moyennées sont utilisées pour simplifier le modèle. Ce profil de recharge moyen a été déterminé en étudiant chaque plage de 10 % d'état de charge une à une. Pour chaque plage, une régression linéaire des puissances de recharge mesurées pour l'ensemble des véhicules a été effectuée. La Figure 11 présente la synthèse de cette caractérisation puissance – état de charge qui est utilisée dans le simulateur.

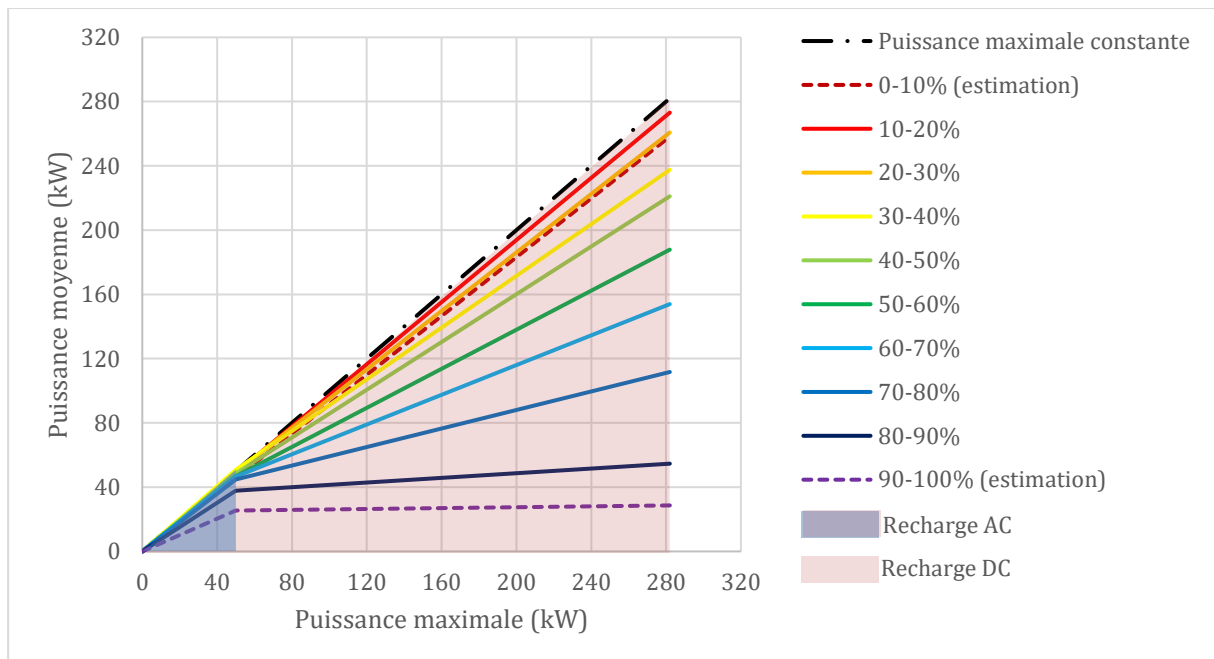


Figure 11 : Caractéristique permettant de calculer la puissance de la recharge à un état de charge donné en fonction de la puissance maximale de la recharge¹⁵

5.1.2.1.3. La modélisation de la demande par origines-destinations

À ce stade, il est possible de déterminer les besoins de recharge pour chaque trajet origine-destination. L'étape suivante est **la détermination des flux de véhicules réalisant chaque trajet à partir des mesures de trafic**. La représentation de ces flux entre chaque entrée et sortie de route peut se faire dans une matrice origine-destination M telle que présentée en Éq. 2.

¹⁵ Traitement des données et mise en forme : auteur. Ces graphiques ont été créés à partir des courbes de charge de différents véhicules fournies par l'opérateur de stations de recharge rapide Fastned. Fastned. Chargeur ultra-rapide >150 kW. <https://support.fastned.nl/hc/fr/articles/115015420127-Chargeur-ultra-rapide-150-kW> [consulté le 2021/05]

Sens de circulation des
PR croissants ($i > j$)

$$M = \begin{pmatrix} 0 & m_{12} & m_{13} & & & \\ m_{21} & 0 & m_{23} & \dots & & \\ m_{31} & m_{32} & 0 & & & \\ \vdots & \vdots & & \ddots & & \\ \vdots & & & & 0 & \\ & & & & & 0 \\ & & & & & & 0 \end{pmatrix}$$

Sens de circulation des
PR décroissant ($i > j$)

Éq. 2

Avec :

m_{ij} , le flux de véhicules réalisant le trajet de l'entrée i et la sortie j (en véhicules/unité de temps).

Cependant, il n'existe pas de données directes de trafic par origine-destination : il n'y a que des mesures de trafic à certains points de mesure donnés. Ainsi, une méthodologie a été mise en place pour estimer les flux origine-destination à partir des données de trafic en effectuant certaines hypothèses. La structure de la méthode est présentée en Figure 12.

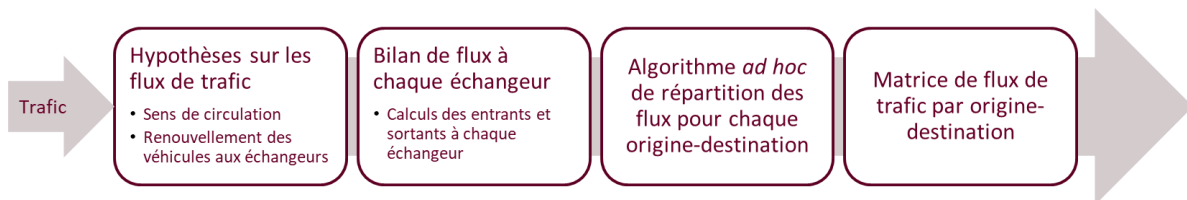


Figure 12 : Étapes de la méthode établie pour évaluer la matrice origine-destination à partir des données brutes de mesure de trafic

Répartition du trafic par sens de circulation :

Les données de trafic ne distinguent pas toujours le trafic selon les sens de circulation. Ainsi, pour simplifier, cette méthode générique utilise en entrée des données agrégées pour les deux sens. La répartition entre chaque sens de circulation se fait selon certaines hypothèses.

D'abord, par défaut, il est supposé que, tout au long de la route, 50 % des véhicules circulent dans un sens et 50 % dans l'autre. En réalité, c'est effectivement ce qui est mesuré en moyenne journalière, hebdomadaire, mensuelle ou annuelle. La Figure 13a montre avec un exemple que le trafic journalier mesuré pendant un mois est toujours proche des 50 %. En revanche, cette hypothèse n'est pas adaptée si on souhaite simuler le trafic avec un pas horaire ou plus court. La Figure 13b expose des mesures au pas horaire et révèle que le trafic peut-être jusqu'à 4 fois plus important dans un sens que dans l'autre. Ici, le jour considéré correspond à un samedi d'été et il y a de nombreux départs en direction du sud au petit matin. Ce type de phénomène est important à considérer pour dimensionner les infrastructures de recharge car les aires de services accessibles par un des deux côtés peuvent être significativement plus sollicitées lors de ces pics de trafic.

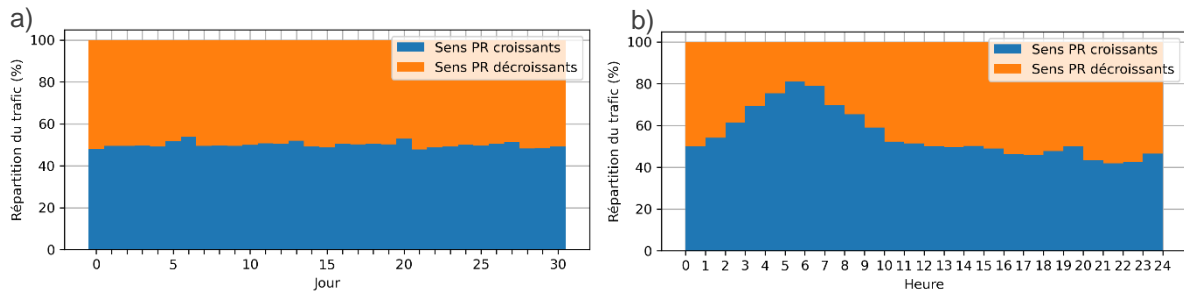


Figure 13 : Répartition du trafic entre les deux sens de circulation de l'A7 (autoroute entre Lyon et Marseille) au point de mesure du PR 7,913 proche de Saint-Fons a) en juillet 2018 avec un pas journalier et b) le 21 juillet 2018 avec un pas horaire¹⁶

Bilan de flux aux échangeurs :

Une fois la répartition entre chaque sens de circulation effectuée, il est nécessaire de **déterminer le flux de véhicules entrants et sortants à chaque nœud de la route**, c'est-à-dire, à chaque échangeur ou bifurcation. Le problème est illustré par le schéma de la Figure 14 : connaissant le trafic en amont et en aval d'un échangeur, quel est le flux de véhicules entrant et quel est le flux de véhicules sortant ?

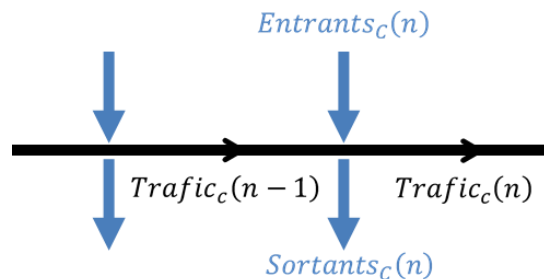


Figure 14 : Schéma décrivant les flux entrants et sortants à un nœud routier, c'est-à-dire, un échangeur

Dans le cas où il n'y a qu'une entrée ou qu'une sortie à un échangeur, par conservation, le flux de véhicules entrants ou sortants est égal à la différence entre le flux aval et amont de l'échangeur comme décrit dans l'Éq. 9 de l'Annexe F.

En revanche, dans le cas où l'échangeur est complet, c'est-à-dire qu'il admet une entrée **et** une sortie pour le sens de circulation considéré, l'équation de conservation n'est pas suffisante pour déterminer les entrants et les sortants : il y a deux inconnues mais une seule équation. Il y a donc une infinité de solutions : par exemple, si les flux amont et aval sont égaux, il est aussi bien possible qu'aucun véhicule ne sorte et ne rentre, mais il est aussi possible qu'une partie des véhicules soit renouvelée.

Ainsi, le calcul du flux sortant ou entrant à chaque échangeur est calculé par la manière présentée en Éq. 10 de l'Annexe F. Elle introduit **un facteur moyen de renouvellement R** qui représente le taux moyen de véhicules remplacés à chaque échangeur complet. Pour un facteur de renouvellement $R = 0$, aucun véhicule n'est renouvelé alors que pour $R = 100\%$, tous les véhicules sortent et autant de véhicules rentrent à chaque échangeur.

Le choix de la valeur de ce paramètre de renouvellement a été effectué à partir de données fournies par APRR/AREA. Les véhicules qui sont passés aux barrières de péage pleine voie de l'A6 (aux PR 50 et 427) lors de la semaine du 15 septembre 2018 ont en moyenne réalisés des trajets sur l'A6 de 180 km. Cette valeur est obtenu par le simulateur pour un facteur de renouvellement $R = 6,6\%$ qui est alors la valeur retenue par défaut dans le simulateur.

Matrice origine-destination :

À ce stade, les flux de véhicules entrants et sortants à chaque échangeur peuvent être déterminés pour chaque sens de circulation, la question restante concerne donc la nature des trajets

¹⁶ Traitement des données et mise en forme : auteur. Ces graphiques ont été créés à partir de données fournies par la DIRCE (DIRECTION des Routes du Centre-Est).

effectués : comment relier les véhicules à chaque flux entrant et sortant pour **constituer la matrice de flux origine-destination** définie précédemment (Éq. 2) ?

Pour répondre à cette question, un algorithme de distribution *ad hoc* a été développé. Il parcourt un sens de circulation donné et, à chaque sortie j qu'il rencontre, il calcule le flux de véhicules et provenant de l'entrée i (m_{ij}) en effectuant le produit du flux de véhicules sortants à la sortie j avec la proportion de véhicules provenant de l'entrée i parmi tous les véhicules présents en amont de l'échangeur. Le calcul est donc celui proposé en Éq. 3 et le remplissage de la matrice est détaillé avec un exemple en Annexe G. Les résultats obtenus sont identiques à ceux donnés par la méthode d'*iterative proportional fitting* testée avec la librairie python ipfn, mais la méthode *ad hoc* développée a l'avantage d'être plus rapide (car non itérative). En revanche, elle s'applique aux axes routiers mais ne peut pas être utilisée dans le cas d'un réseau routier complet.

$$m_{ij} = \text{Sortants}_s(j) \frac{\text{Trafic}_s(j-1, i)}{\sum_i \text{Trafic}_s(j-1, i)} \quad \text{Éq. 3}$$

Avec :

$\text{Trafic}_s(j-1, i)$, le flux de véhicules provenant de l'entrée i sur le segment entre la sortie $j-1$ et la sortie j (en véhicules/unité de temps).

5.1.2.2. La description de la mobilité électrique sur le territoire

Après avoir décrit la mobilité sur le territoire considéré et proposé une méthode pour déterminer les flux origines-destinations, l'objectif est maintenant de s'intéresser aux **véhicules électriques qui composent en partie la flotte de véhicules** circulant sur l'axe routier. Compte-tenu de la diversité des modèles de véhicules électriques commercialisés depuis les débuts de la mobilité électrique, le simulateur se base sur une **modélisation des BEV en les agrégeant par catégorie**.

Les catégories sont construites à partir du parc de véhicules vendus au premier trimestre de l'année 2021. Le nombre d'immatriculation et les caractéristiques principales des véhicules qui sont pertinentes pour cette étude sont détaillés en Annexe H. Elle présente les capacités de leurs batteries, les puissances maximales de leurs recharges, leurs consommations à 120 km/h et à 20°C et leurs masses à vide.

Comme montré sur la Figure 15a, les BEV représentaient 0,37 % du parc de véhicules au 1^{er} janvier 2020¹⁷. Pour modéliser le parc actuel de BEV, une extrapolation de la description des véhicules de 2021 est appliquée à l'échelle de l'ensemble du parc du BEV. La Figure 15b montre alors la répartition des BEV par catégorie.

Dans le contexte de la mobilité longue distance, il est difficile de généraliser le parc global de BEV en France à la flotte de BEV circulant sur une autoroute. Effectivement, une partie des BEV ont des autonomies très limitées car ils sont adaptés à des usages urbains et il s'agit souvent du véhicule secondaire d'un foyer. Ainsi, **une part des BEV de plus faible autonomie est exclue de la flotte modélisée** pour le simulateur de mobilité longue distance comme proposé en Figure 15c. Bien que ce phénomène soit réel, nous identifions **un manque de données pour mieux quantifier ces parts de véhicules ne réalisant peu ou pas de trajets longs**. Par estimation, l'exclusion concerne :

- La totalité de la catégorie « Urbaine » qui a une autonomie effective de 30 min de circulation à 120 km/h pour une durée de recharge de 30 min.
- 50 % de la catégorie « Inférieure » (55 min et 25 min respectivement).
- 25 % de la catégorie « Moyenne » (70 min et 22 min).
- 0 % de la catégorie « Luxe » ou « Supérieure » (100 min et 18 min).

¹⁷ Ministère de la Transition écologique. 37,2 millions de voitures en circulation en France. 21 septembre 2021. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/382-millions-de-voitures-en-circulation-en-france> [consulté le 2021/05]

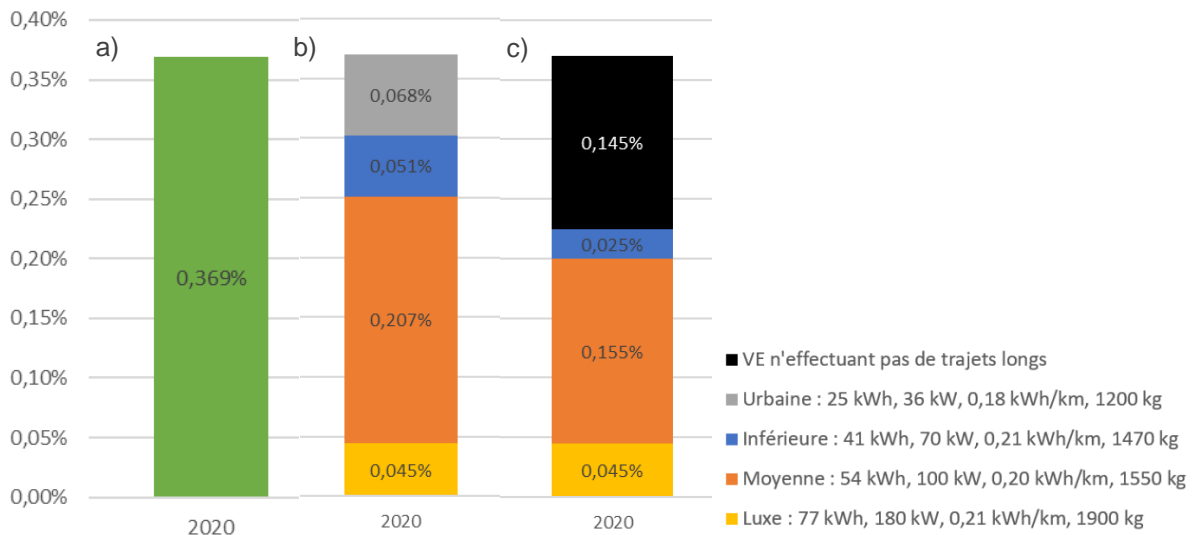


Figure 15 : a) Part de BEV par rapport à l'ensemble des véhicules immatriculés au premier trimestre 2021, b) décomposition par catégorie de véhicules et c) part de BEV estimés effectuer des trajets longs et décomposition par catégorie

Grâce à cette modélisation du parc et à partir du trafic moyen de véhicules entre une origine et une destination donnée, il est directement possible de déduire le trafic d'une catégorie particulière de BEV selon l'Éq. 4.

$$m_{ij}^V = P^V m_{ij} \quad \text{Éq. 4}$$

Avec :

m_{ij}^V , le flux de véhicules appartenant à la catégorie de BEV V réalisant le trajet de l'entrée i et la sortie j (en véhicules/unité de temps) ;

P^V , la part d'une catégorie de BEV V dans le parc automobile.

5.1.3. L'évaluation des performances à l'échelle territoriale

Maintenant que la modélisation de la demande a été expliquée, cette partie vise à présenter les indicateurs de performance. Ils permettent l'évaluation et la comparaison de différentes stratégies et scénarios de déploiement de la mobilité électrique. La méthode proposée calcule notamment le nombre de bornes installées sur le territoire, le temps de trajet incluant circulation et recharge et les impacts environnementaux. Cette partie détaille les méthodes appliquées pour quantifier chacun d'eux.

5.1.3.1. Le nombre de bornes en usage

Le premier indicateur présenté est le **nombre de bornes en usage**. Cet indicateur dépend directement de la part de BEV dans le parc, de la puissance choisies pour les bornes et leur répartition parmi les stations de recharge prédéfinies. Ce paramètre est particulièrement intéressant pour les gestionnaires des stations de recharge car il permet de prévoir le nombre d'infrastructure avec une estimation des coûts d'installation et d'opération.

Le nombre de bornes à installer sur un territoire ne dépend pas du trafic moyen, mais plutôt du trafic maximal qui va générer le besoin extrême en infrastructures de recharge. Pour cela, il est nécessaire d'étudier les périodes les plus exigeantes pour le réseau de recharge du territoire. La Figure 16 montre le trafic mesuré en un point de mesure de l'A7 durant l'année 2018 : les périodes de fortes influences sont lors des vacances scolaires d'avril, d'été ou de Noël ou lors des week-ends longs comme à la Pentecôte. D'après l'étude des données de deux points de mesure de trafic sur l'A7, **le trafic horaire dans un sens donné peut atteindre lors de ces périodes jusqu'à 3 fois la valeur moyenne annuelle**. De plus, cette hausse du trafic correspond à une hausse de la mobilité longue distance : par exemple, les week-ends d'été, il y a peu de trafic lié aux activités professionnelles mais plus de trafic lié aux chassés-croisés des départs et des retours de vacances. D'après des données fournies sur l'A6 par APRR/AREA, il est possible d'estimer que **les trajets lors d'un samedi d'été sont environ 1,6 fois plus longs qu'en moyenne**. Ainsi, en cumulant les deux effets, **les besoins de recharge lors des pics de demande sont estimés à 4,8 fois supérieurs aux besoins moyens annuels**. Cette valeur est considérée par défaut dans le simulateur.

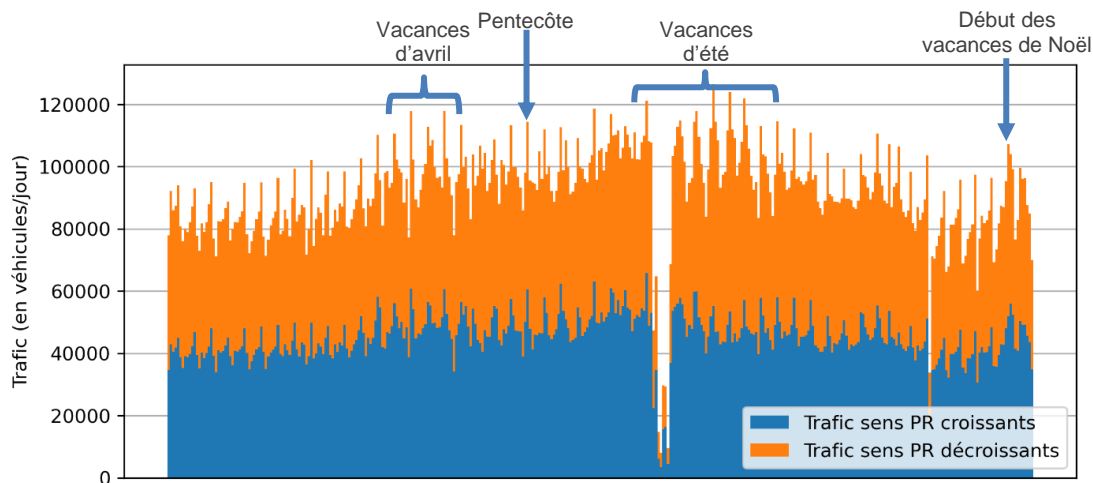


Figure 16 : Répartition du trafic journalier entre les deux sens de circulation de l'A7 (autoroute entre Lyon et Marseille) au point de mesure du PR 16,834 proche de Communay en 2018¹⁸

Une fois que le nombre de bornes est déterminé, les coûts d'installation et les coûts d'exploitation sont évalués. Le graphique de la Figure 17 montre les estimations de coûts de trois types de bornes basées sur le rapport du [Ministère de la transition écologique \(2021\)](#). Les coûts principaux pour les bornes de recharge rapide sont le coût de la borne et le coût de l'abonnement d'électricité. En gardant les coûts fixes constants et en effectuant une régression linéaire pour les coûts variables, une estimation des coûts de bornes de toute puissance est réalisée. Une borne de 175 kW coûte alors environ 200 000 € sur 10 ans d'exploitation. Enfin, le plan France Relance permet de bénéficier d'aides à hauteur de 30% des coûts d'installation dans le cas général¹⁹.

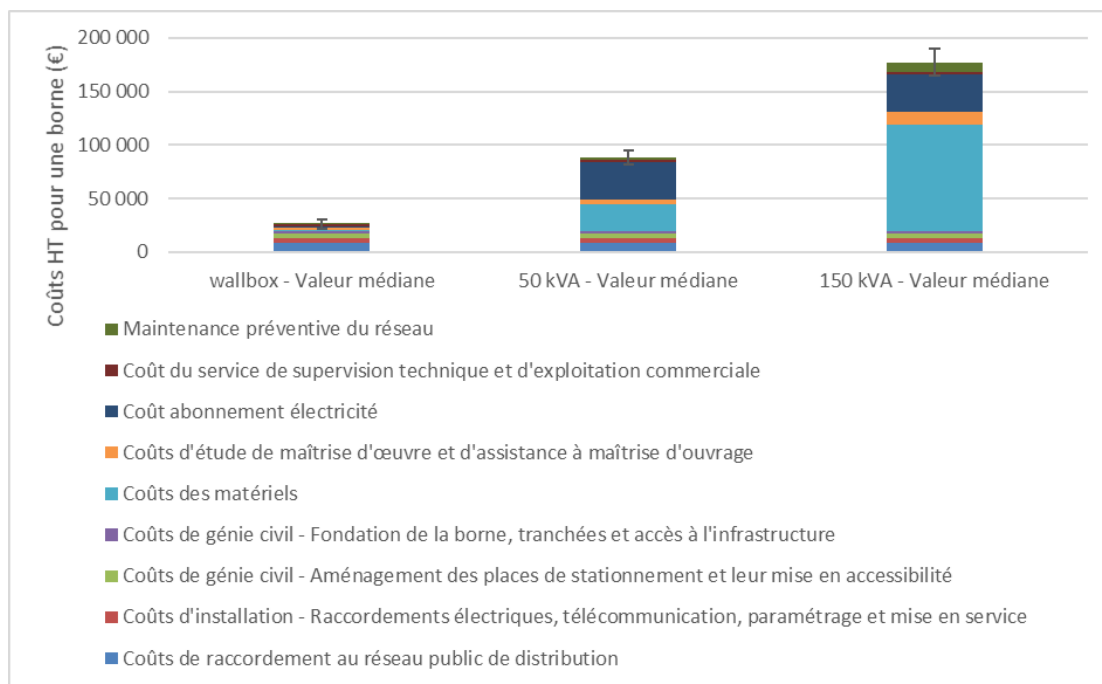


Figure 17 : Coûts d'installation et d'exploitation de bornes type Wallbox (7 à 22 kVA), 50 kVA et 150 kVA pour 10 ans d'exploitation²⁰

5.1.3.2. Les indicateurs de temps de trajets

¹⁸ Traitement des données et mise en forme : auteur. Ces graphiques ont été créés à partir de données fournies par la DIRCE (Direction des Routes du Centre-Est).

¹⁹ ASP. Déploiement des bornes de recharge pour véhicules électriques : la gestion de l'aide de l'Etat est confiée à l'ASP. Avril 2021. <https://www.asp-public.fr/deploiement-des-bornes-de-recharge-pour-vehicules-electriques-la-gestion-de-laide-de-letat-est> [consulté le 2021/06]

²⁰ Mise en forme : auteur. Données du [Ministère de la transition écologique \(2021\)](#)

Le deuxième type d'indicateur concerne **les temps de trajets**. Effectivement, les temps nécessaires pour effectuer des trajets en BEV sont plus longs que s'ils étaient effectués en ICEV dès lors qu'ils nécessitent au moins une recharge. Ainsi, les temps de parcours sont importants à considérer lorsqu'on s'intéresse à la mobilité électrique. Dans le simulateur, il est supposé qu'il n'y a jamais de file d'attente pour se charger mais **4 minutes sont supposées nécessaires pour mettre en place chaque recharge** (ceci inclut le temps pour accéder à la station, se garer, gérer le lancement et la fin de sa recharge et quitter l'aire de service).

Comme la méthode proposée se base sur une simulation à l'échelle d'un parc de BEV sur un territoire, elle évalue les performances à cette même échelle. Ainsi, l'indicateur de temps proposé dans l'Éq. 5 permet de calculer pour un groupe de véhicules **le temps de trajet moyen**.

$$TTM^V = \frac{\sum_{i,j} m_{ij}^V |d_{ij}| t_{trajet,ij}^V}{\sum_{i,j} m_{ij}^V |d_{ij}|} \quad \text{Éq. 5}$$

Avec :

TTM^V , le temps de trajet moyen pour les véhicules V (en h);

m_{ij}^V , le flux de véhicules V réalisant le trajet de l'entrée i et la sortie j (en véhicules/unité de temps) ;

d_{ij} , la distance entre l'échangeur i et l'échangeur j (en km);

$t_{trajet,ij}^V$, le temps nécessaires pour qu'un véhicule V effectue le trajet entre l'échangeur i et l'échangeur j (en h).

5.1.3.3. Les impacts environnementaux

5.1.3.3.1. Généralités

Enfin, les derniers indicateurs sont **les indicateurs environnementaux**. Leur évaluation dépend du parc de VE (taille, proportion par modèle et caractéristiques des modèles), des comportements de conduite et de gestion de recharge de leurs usagers et de la stratégie de placements de bornes.

Pour la suite, les potentiels d'impacts environnementaux estimés sont parfois désignés comme impacts environnementaux par faciliter le langage. En cohérence avec la portée de l'étude, les impacts environnementaux sont quantifiés à l'échelle du territoire. L'unité fonctionnelle retenue est la suivante : **« Permettre la mobilité des usagers de véhicules particuliers électriques sur un territoire autoroutier durant une unité de temps »**. La mobilité évaluée est uniquement la mobilité électrique pour comparer différentes stratégies et horizons de leur déploiement. Les évaluations effectuées s'inscrivent dans la logique de l'Analyse sur Cycle de Vie (ACV) en tenant compte de l'ensemble du cycle des systèmes (de la fabrication à la fin de vie) et en s'intéressant à différents potentiels d'impacts. Les impacts étudiés et les méthodes de caractérisation utilisées sont listés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Potentiels d'impacts évalués et méthodes de caractérisation utilisées

Impact environnemental évalué	Méthode utilisée	Abréviation	Unité
Potentiel de changement climatique (à 100 ans)	CML 2001 - Aug. 2016	GWP100	kg CO2 eq.
Potentiel d'acidification		AP	kg SO2 eq.
Potentiel de création d'ozone photochimique		POCP	kg Ethene eq.
Potentiel d'eutrophisation		EP	kg Phosphate eq.
Épuisement des ressources abiotiques		ADPe	kg Sb eq.
Épuisement des métaux	ReCiPe 2016 v1,1 Midpoint (H)	MD	kg Cu eq.
Demande en énergie primaire	Cumulative energy demand	PED	MJ

5.1.3.3.2. Calculs d'impacts

Le simulateur de mobilité électrique permet d'évaluer pour la circulation sur le territoire de l'ensemble de la flotte de véhicules électriques (VE) déclarés :

- La distance parcourue par l'ensemble des VE durant la période considérée (en km) ;
- La consommation d'électricité de la flotte durant la période considérée (en kWh) ;
- L'énergie fournie par les infrastructures de recharge rapide durant la période considérée (en kWh) ;

- Le nombre minimal de bornes sur le territoire satisfaisant la demande de mobilité électrique, en tenant compte des périodes de forte affluence.

À partir de ces calculs et des données ACV liés à la consommation d'électricité, à l'usage des véhicules et des bornes de recharge, il est possible de calculer les impacts liés à la circulation sur l'axe routier. Les hypothèses majeures sont listées sur la Figure 18. Les données liées aux BEV sont fournies par Stellantis et tiennent compte de la fabrication du véhicule (extraction, approvisionnement), des opérations d'assemblage, de la logistique amont (fournisseurs vers usine) et aval (usine vers concessionnaires), de la maintenance et de la fin de vie (avec approche *cut off*). Les batteries sont produites en Chine.

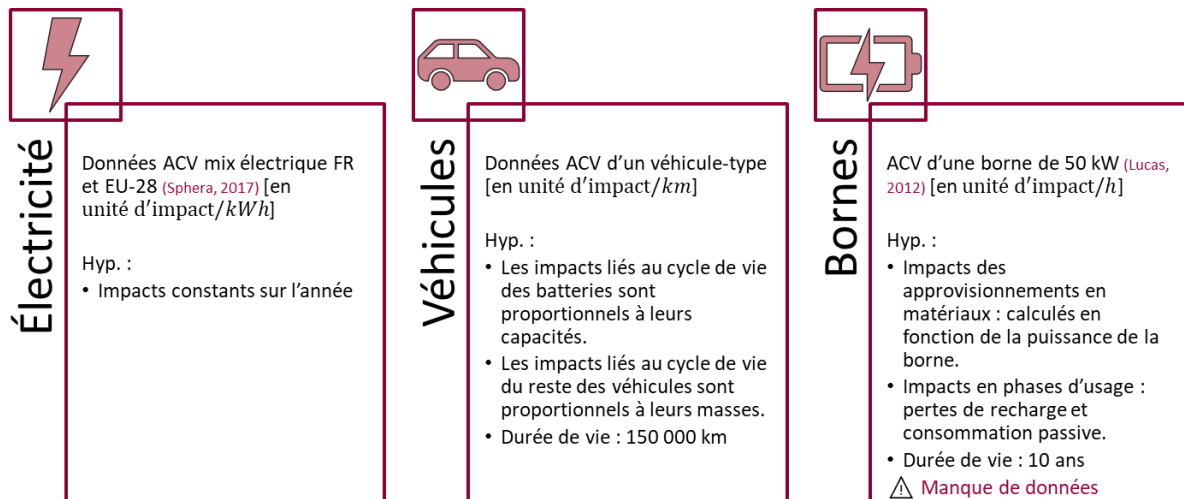


Figure 18 : Hypothèses majeures de l'évaluation environnementales réalisée

Comme indiqué dans la figure précédente, **les données environnementales liées aux infrastructures de recharge sont difficilement trouvables**. Trois études qui donnent du détail sur leurs cycles de vie ont été repérées dans la littérature (Nansai et al., 2001 ; Lucas et al., 2012 ; Zhang et al., 2019). Une synthèse des éléments qui y sont communiqués est présentée dans l'Annexe I. Il est possible d'en tirer les constats suivants :

1. Dans la littérature, il y a peu d'études récentes s'intéressant aux impacts environnementaux des infrastructures de recharge rapide et aucune sur les bornes de recharge ultra-rapide (150+ kW) qui nécessitent des moyens de refroidissement plus poussés.
2. Ces études donnent parfois des résultats sans indiquer la puissance et le courant maximal de la borne considérée. Or, les masses des bornes, et donc leurs impacts, dépendent directement de ces paramètres d'après les données recueillies chez les différents constructeurs (cf. Figure 19).
3. Les frontières du système de station de recharge peuvent être définies de manières différentes. Par exemple, dans l'étude de Lucas et al., 2012, les constructions auxiliaires à la borne sont incluses alors que les autres se limitent à la borne *stricto sensu*, ce qui induit notamment des besoins de matériaux significativement plus importants (notamment le béton).
4. Les trois études mentionnées ne donnent pas de résultats multicritères car les potentiels d'impacts évalués se limitent au changement climatique et à la consommation d'énergie primaire. De plus, toutes les phases du cycle de vie ne sont pas toujours considérées comme le transport, l'installation ou la maintenance.
5. Il est difficile de se projeter quant à la durée de vie de ces systèmes et quant à la phase de fin de vie compte tenu du caractère novateur des recharges rapides.

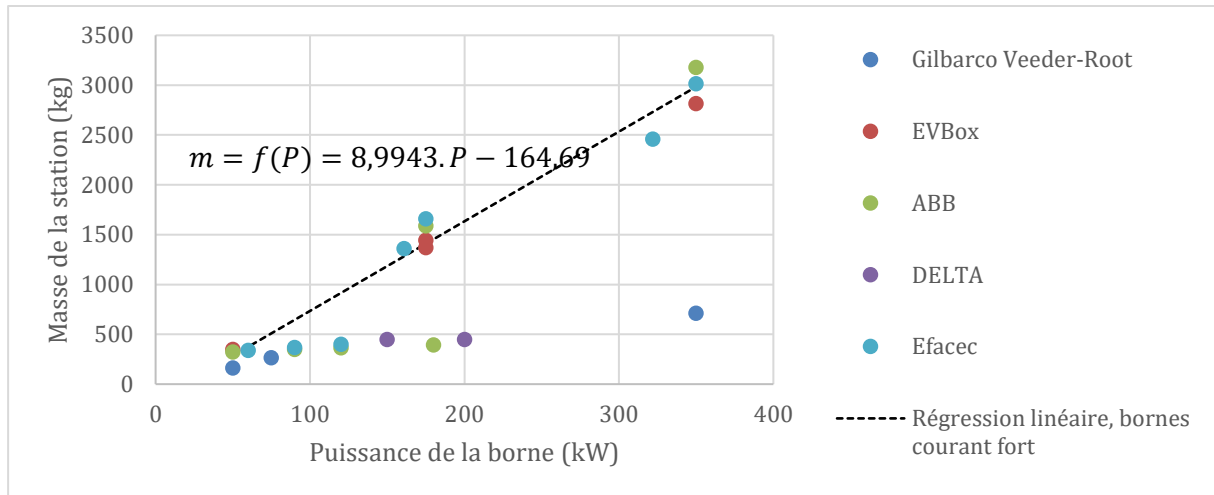


Figure 19 : Lien entre masse et puissance des bornes de recharge ≥ 50 kW de différents constructeurs

Pour obtenir des résultats pour tous les potentiels d'impacts qui sont considérés dans notre étude, des calculs d'ACV des phases d'approvisionnement en matériaux ont été effectués avec Gabi en se basant sur les inventaires des trois études. Pour la suite, les données d'inventaire fournies par l'étude de [Lucas et al. \(2012\)](#) sont retenues parce que l'inventaire proposé est le plus complet et qu'il tient compte des besoins de matériaux pour toutes les constructions auxiliaires à la borne.

À partir de cette évaluation, les impacts d'une borne de puissance > 50 kW sont déduits en se basant sur la formule de l'Éq. 6 qui a été élaborée à partir des données de masse et de puissance des bornes admettant les plus forts courants.

$$ie_{i,borne} = f(P_{borne}) \frac{ie_{i,référence}}{f(P_{référence})} \quad \text{Éq. 6}$$

Avec :

$ie_{i,borne}$, impact environnemental i de la borne considérée ;

P_{borne} , la puissance de la borne considérée ;

f , la fonction de régression définie en Figure 19 ;

$ie_{i,référence}$, impact environnemental de la borne de référence ;

$P_{référence}$, la puissance de la borne de référence [50 kW pour [Lucas et al. \(2012\)](#)].

Compte tenu des explications précédentes, **pour les résultats qui suivent, seuls les impacts des infrastructures liés à l'approvisionnement en matériaux et à la phase d'usage (pertes lors des recharges et consommation en veille des stations) sont évalués.**

Les potentiels d'impacts environnementaux pour chaque flotte de véhicules sont calculés par l'Éq. 7 (hors pertes et consommation en veille des stations).

$$IE_i^V = \frac{d^V}{d_{UF}} \left(\frac{m^V}{m_{véhicule}} ei_{i,véhicule} + \frac{C^V}{C_{batterie}} ei_{i,batterie} \right) + E^V \cdot ei_{i,élec} + N_{borne} \frac{ie_{i,borne}}{T_{borne}} \quad \text{Éq. 7}$$

Avec :

IE_i^V , impact environnemental annuel i causé par la circulation des véhicules V sur l'autoroute (en « unité de l'impact i »/an, noté UI/an) ;

d^V , distance cumulée parcourue en un an sur l'autoroute par l'ensemble des véhicules V (en km) ;

d_{UF} , durée de vie du BEV de référence (en km) ;

m^V , masse d'un véhicule V (en kg) ;

$m_{véhicule}$, masse du véhicule de référence (en kg) ;

$ei_{i,véhicule}$, impact environnemental annuel i du véhicule de référence en excluant les impacts liés à la consommation d'électricité et à la batterie (en UI) ;

C^V , capacité de la batterie d'un véhicule V (en kWh) ;

$C_{batterie}$, capacité de la batterie du véhicule de référence (en kWh) ;

$ei_{i,batterie}$, impact environnemental annuel i de la batterie du véhicule de référence (en UI) ;

E^V , électricité consommée par l'ensemble des véhicules V en un an (en kWh/an) ;

$ei_{i,elec}$, impact environnemental i induit par la consommation d'un kWh d'électricité (en UI/kWh) ;
 N_{borne} , nombre de bornes installées sur l'autoroute ;
 $ie_{i,borne}$, impact environnemental induit par l'approvisionnement de matériaux pour la fabrication et l'installation d'une borne (en UI) ;
 T_{borne} , durée de vie d'une borne (en année).

5.2. Principaux résultats

Pour pouvoir donner des recommandations d'éco-conception du système de mobilité, nous proposons de s'intéresser à un cas d'étude : l'autoroute A6. Des résultats de simulations pour plusieurs scénarios de mobilité sont proposés ici jusqu'à l'horizon 2030.

5.2.1. Cas d'étude : mobilité sur l'autoroute A6

L'A6 est l'autoroute qui relie Paris et Lyon : elle est particulièrement intéressante pour l'étude pour plusieurs raisons. Tout d'abord, c'est une des autoroutes les plus fréquentées de France et elle a un trafic soumis à de forts pics d'influence lors des vacances scolaires ou des week-ends longs. De plus, elle relie deux grandes villes par une route de 456 km. Ainsi, l'A6 est pertinente pour étudier la mobilité longue distante.

Les données de trafic de l'A6 utilisées sont des données annuelles datant de l'année 2018²¹. Les mesures de trafic de l'année 2018 sont montrés en Figure 20 : les données étant disponibles uniquement pour les sections entre les PR 34,8 et 447, nous ne modélisons que cette partie de l'autoroute, qui fait 412,2 km. Nous ne disposons pas de données de trafic sur l'ensemble de l'A6 pour des pas de temps plus courts que l'année.

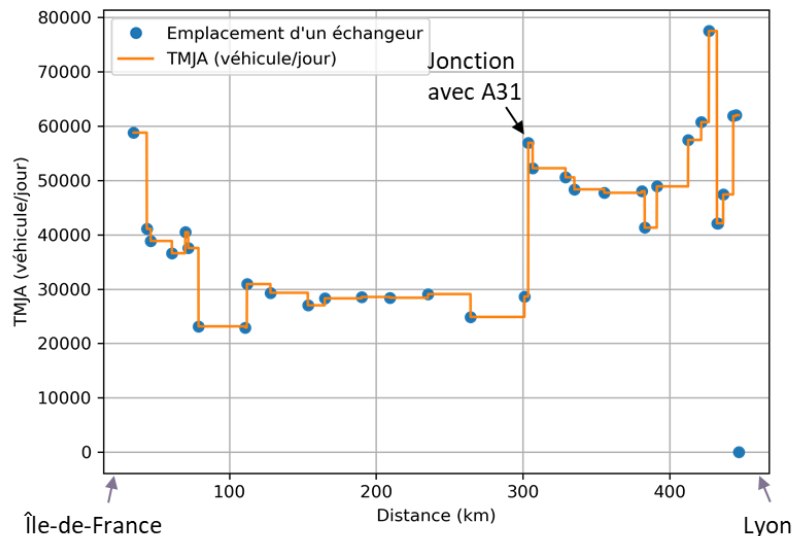


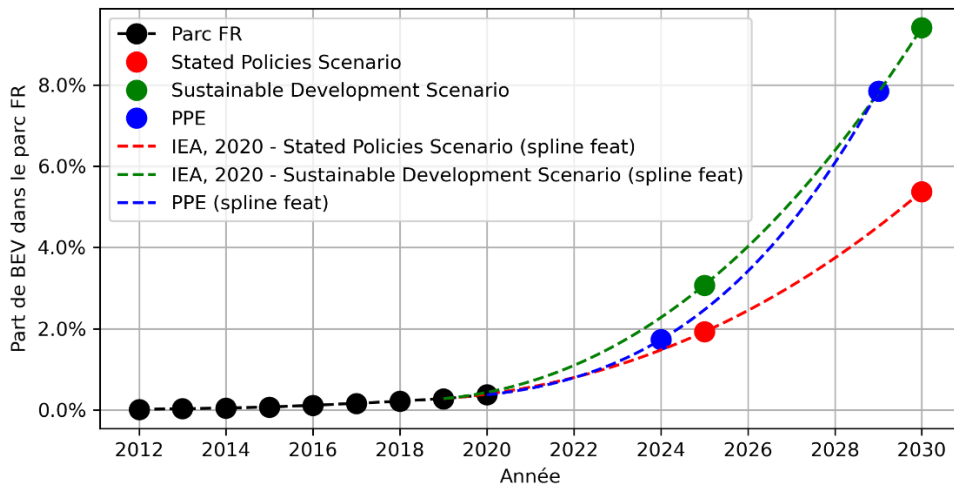
Figure 20 : Moyennes journalières du trafic au cours de l'année 2018 (TMJA) sur l'autoroute A6 entre Paris et Lyon avec détail des emplacements des échangeurs

5.2.2. Résultats pour la mobilité électrique sur l'A6 en 2025

5.2.2.1. Hypothèses supplémentaires

²¹ Mise en forme : auteur. Les mesures de trafic annuel sur les routes et autoroutes françaises sont issues de la plateforme ouverte des données publiques françaises. Ministère de la Transition écologique. Trafic moyen journalier annuel sur le réseau routier national. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/trafic-moyen-journalier-annuel-sur-le-reseau-routier-national/> [consulté le 2021/05]

Le simulateur de mobilité électrique à l'échelle territoriale qui est proposé permet d'estimer la mobilité électrique future et ses performances. Pour cela, il est nécessaire de s'appuyer sur les scénarios de développement des véhicules électriques pour déterminer la croissance attendue des parcs de VE. Pour le cas d'étude, nous nous basons sur les estimations de l'[IAE \(2020\)](#). La Figure 21 montre la croissance attendue du parc de BEV en France. Les objectifs de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie²² (PPE) y apparaissent également et sont du même ordre de grandeur.



Le *Stated Policies Scenario* (SPS) est basé sur les politiques et réglementations que les gouvernements ont mis en place ainsi que les effets attendus des objectifs et des stratégies annoncés. Le *Sustainable Development Scenario* (SDS) repose sur l'accès universel à l'énergie, la réduction significative des émissions de polluants et la satisfaction des Accords de Paris.

Figure 21 : Part de BEV dans le parc automobile français et estimation de sa croissance jusqu'en 2030 d'après une adaptation de l'auteur des scénarios mondiaux de l'[IAE \(2020\)](#) et des objectifs de la PPE

Les bornes présentes sur le territoire sont supposées être de **175 kW** ce qui correspond à la puissance typique des bornes de recharge rapide installées sur autoroute aujourd'hui. De plus, elles sont supposées **installées uniquement sur les aires de services** de l'A6, donc il n'y en a pas sur les aires de repos. Le trafic entre 2020 et 2030 est supposé identique à celui de 2018 (cf. Figure 20), effectivement son évolution n'est pas considérée car elle dépend des stratégies de mobilité non traitées et de scénarios sociologiques non étudiés ici.

La flotte de véhicules simulée est supposée composée des BEV tels qu'ils sont aujourd'hui commercialisés jusqu'à 2024 inclus ; ensuite, des évolutions technologiques et d'usage ont été estimées à partir d'entretiens avec des experts automobiles de Stellantis et de sources bibliographiques ([Huss & Weingerl, 2020](#) ; [IAE, 2020](#)). Les évolutions des caractéristiques du parc par rapport aux valeurs références de 2021 sont détaillées dans l'Annexe J pour deux scénarios. L'augmentation de la vitesse de circulation est justifiée par le fait qu'avec l'augmentation des puissances de recharge et de la réduction de la consommation, il va devenir plus efficace de rouler rapidement avec les BEV. Effectivement, aujourd'hui, il n'y a très peu de gain à rouler à 130 km/h en termes de temps de trajet car le gain de temps de circulation est presque compensé par l'augmentation du temps de recharge et rouler à 130 coûte également plus cher (cf. les résultats de la partie 5.2.2.2.2). La comparaison des temps de trajets en fonction de la vitesse pour les véhicules de 2021 et de 2030 sont présentés en Annexe L.

Les définitions de la gestion des états de charge appliquée à chaque type de véhicules est détaillée sur le Tableau 5. Effectivement, les véhicules arrivant sur l'autoroute ont des états de charge initiaux différents selon d'où ils viennent et le voyage qu'ils entreprennent. De plus, les usagers sont plus ou moins stressés par l'autonomie donc certains chargent plus tôt que d'autres. Les consommations des véhicules sont supposés 25 % supérieures aux estimations de consommation réelle basées sur le protocole WLTP²³ qui avaient été présentés en Annexe H : ceci vise à prendre en compte d'éventuelles surconsommations causées par la température, le vent, la pluie ou le dénivelé par exemple.

²² Ministère de la transition écologique et solidaire. Stratégie française pour l'énergie et le climat — Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2023 2024-2028. 2019. Disponible à l'adresse : <https://www.ecologie.gouv.fr/programmes-pluriannuelles-lenergie-ppe>

²³ D'après les différences constatées sur le modèle Peugeot e-208 grâce au simulateur du constructeur. Peugeot. L'autonomie de votre véhicule électrifié. <https://www.peugeot.fr/electrique-et-hybride/rouler-en-electrique/autonomie.html> [consulté le 2021/06]

Tableau 5 : Définition des comportements des utilisateurs à travers la répartition de la gestion des états de charge

Proportion	État de charge initial	État de charge minimal	État de charge minimal à la sortie de la route	État de charge maximal
25 %	80 %	10 %	20 %	80 %
25 %		15 %		
15 %	60 %	10 %		
15 %		15 %		
10 %	40 %	10 %		
10 %		15 %		

5.2.2.2. Résultats

L'objectif de cette partie est d'exposer différents types de résultats tels que définis en partie 5.1.3 : le nombre de bornes, les temps de trajets, les impacts environnementaux et la consommation d'électricité. Les simulations effectuées pour cette partie ont été réalisées pour l'horizon 2024.

5.2.2.2.1. La distribution des bornes à installer

Un des intérêts du simulateur est qu'il **permet de déterminer le positionnement des bornes et d'estimer leurs taux d'occupation moyen et maximal**. Ce sont des informations particulièrement utiles pour les gestionnaires d'autoroute ou du réseau électrique.

Pour le scénario SPS 2024, la Figure 22 expose les besoins de bornes prédits par le simulateur pour chaque aire de service. 76 bornes de 175 kW sont utilisées et le taux d'occupation moyen est de 17 %. Ce facteur est fortement dépendant du facteur d'affluence défini en partie 5.1.3.1. Ainsi, un moyen simple pour réduire les besoins d'infrastructures est de réduire l'écart entre le trafic maximal et le trafic moyen.

Par ailleurs, la répartition des bornes sur les stations-services montre une certaine variabilité selon la localisation de la station considérée : le nombre de bornes par aire est compris entre 1 et 6. En général, plus une aire est distante de l'aire suivante, plus ses besoins de recharge sont importants car elle accumule toutes les recharges des véhicules qui ont leurs limites de portée effective entre cette aire et la suivante.

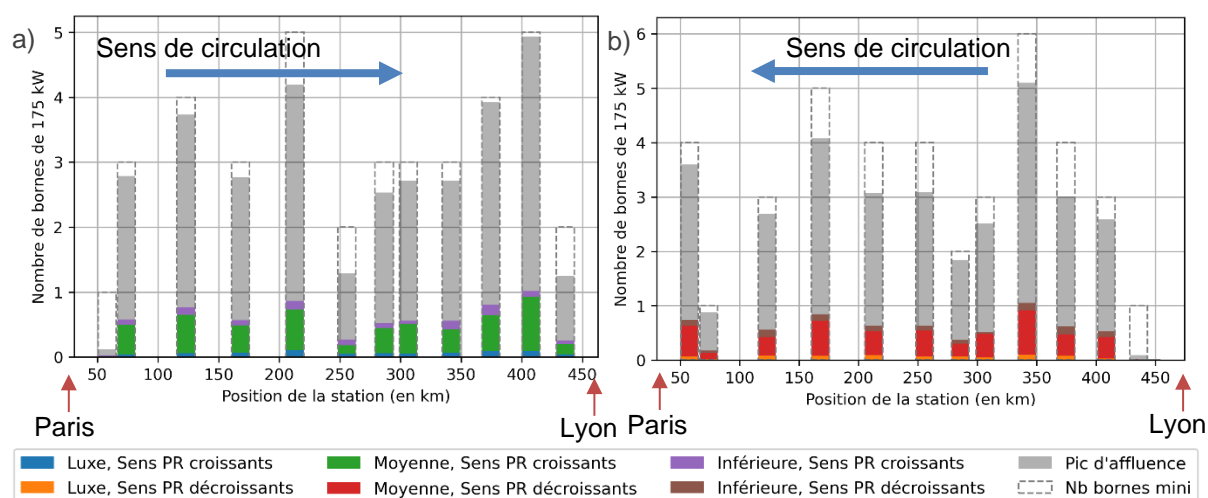


Figure 22 : Nombre de bornes et leurs taux d'occupation moyens et maximal par aire de service a) du côté PR croissants et b) du côté PR décroissants

5.2.2.2.2. La comparaison de performances pour différents véhicules et comportements d'utilisateur

Le deuxième intérêt du simulateur est de **pouvoir comparer les temps de trajets de différents véhicules et avec différents comportements d'usage**. Les temps de trajet sont un critère majeur pour l'adoption des BEV par les automobilistes et les différences entre les gammes de véhicules est important pour les constructeurs vis-à-vis de leurs études de marché.

La Figure 23 compare les temps de trajet moyen de différents véhicules simulés sur l'autoroute. Si les véhicules circulent à 130 km/h, ils effectuent l'ensemble des trajets simulés avec un temps de circulation moyen de 1h21. Ce qui les différencie, c'est le nombre d'arrêts et le temps passé sur les aires de services. Pour les conducteurs de véhicules thermiques effectuant une pause de 20 min toutes

les 2h de circulation, le temps de trajet moyen est de 1h33 (donc, en moyenne, les conducteurs font 12 min de pause). Pour comparer, le temps moyen pour effectuer ces trajets est de 1h58 pour le BEV moyen d'aujourd'hui (soit 37 min de temps de recharge en moyenne). En plus de souligner cet **écart entre véhicule thermique et véhicule électrique**, cette figure permet aussi d'**identifier les inégalités entre les BEV moyens et les BEV de la catégorie « Supérieure »**. Effectivement, ces derniers ont un temps moyen de trajet de 1h43 seulement (ils nécessitent en moyenne 22 min de temps de recharge) et sont donc significativement plus rapides.

Pour se projeter dans le futur et tenir compte des évolutions technologiques, les temps de trajet sont également calculés à l'horizon 2030. La Figure 23 montre que les temps de trajet devraient pouvoir être significativement réduits grâce à l'augmentation des autonomies et des vitesses de recharge. Les véhicules les plus haut-de-gamme pourraient même atteindre des temps de trajet similaires à ceux des ICEV s'ils peuvent bénéficier de l'utilisation d'infrastructures admettant des puissances de recharge de 350 kW.

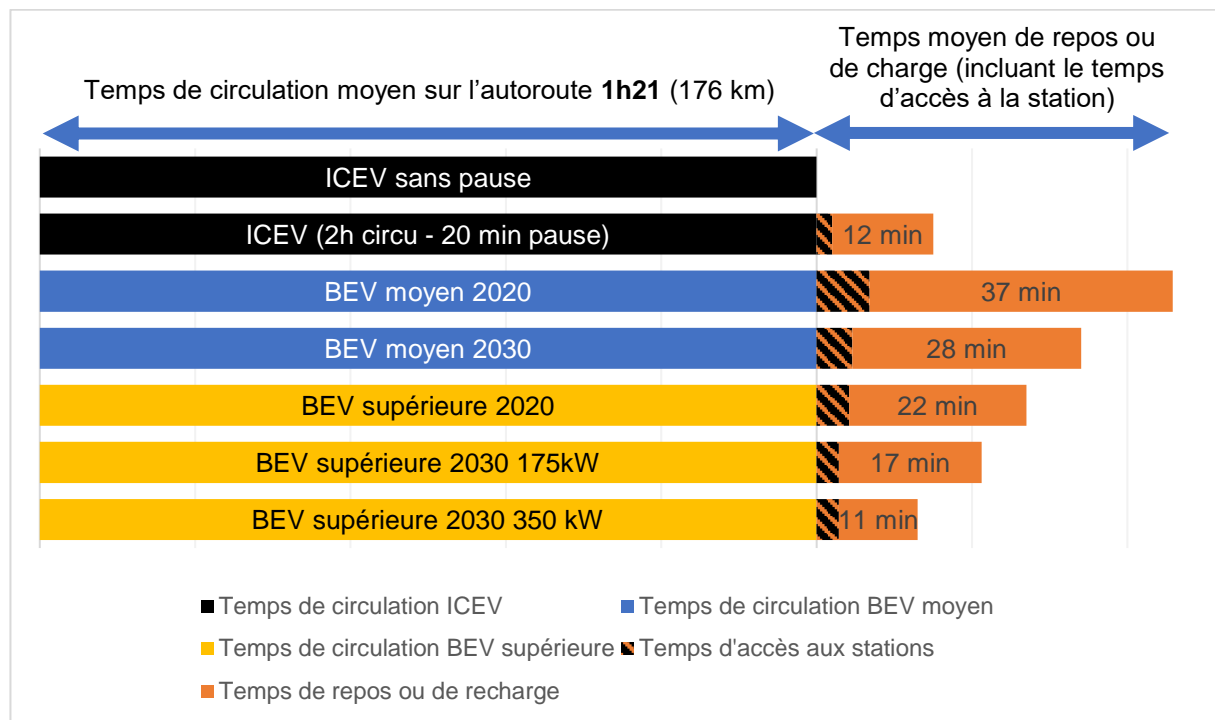


Figure 23 : Comparaison des temps de trajet pour différents types de véhicules en décomposant le temps de circulation à 130 km/h et le temps de pauses ou des recharges

L'analyse des temps de trajet moyen permet par ailleurs d'identifier que **le comportement de l'utilisateur a un impact significatif sur les temps de trajet**. La Figure 24 montre l'effet du choix de la vitesse : en moyenne sur l'ensemble des BEV, circuler à 110 au lieu de 130 km/h augmente le temps de trajet total de seulement 4 % car l'augmentation du temps de circulation (+15 min) est en partie compensée par la diminution du temps de recharge (-10 min). Cela dit, cette stratégie a donc l'inconvénient de réduire le temps de repos aux stations. En revanche, circuler plus lentement permet de réduire la consommation d'électricité de 22 %, les coûts de recharge et le nombre de bornes nécessaires par 29 %. L'évolution du nombre de bornes nécessaires en fonction de la vitesse de circulation est présentée en Annexe K. D'après la Figure 24, pour un véhicule « Supérieur », les écarts de temps de trajet sont plus marqués selon la vitesse choisie.

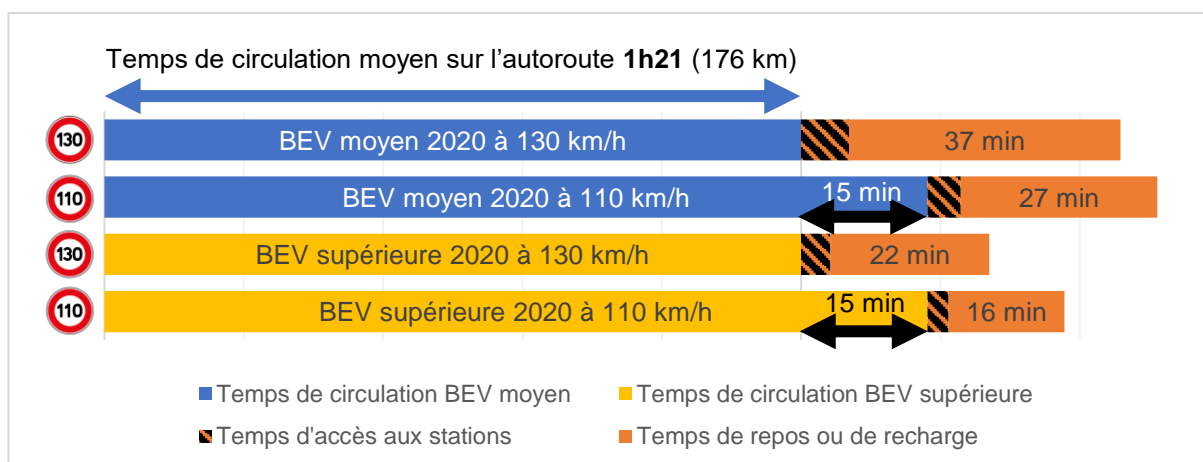


Figure 24 : Temps de trajet moyen en fonction de la vitesse de circulation de la flotte et du type de véhicule considéré
Enfin, **les conducteurs de BEV devraient réaliser des recharges plus courtes mais plus fréquentes** s'ils souhaitent diminuer leurs temps de trajet moyen. La Figure 25 illustre qu'arrêter sa recharge à 80 % d'état de charge plutôt qu'à 100 % réduit le temps de trajet moyen de 7 % (-9 min). À l'échelle de l'axe routier, ce gain de temps de recharge permet de gagner en efficacité et de diminuer le nombre de bornes nécessaire de 23 %.

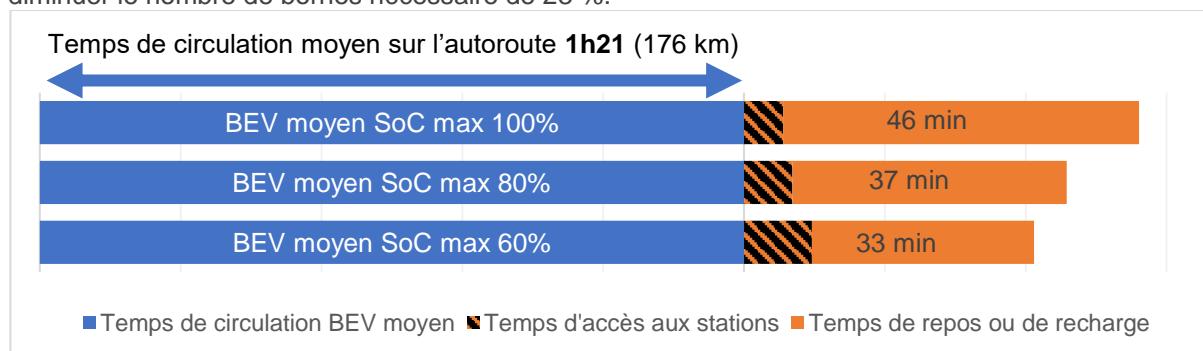


Figure 25 : Évaluation de l'effet du choix de la durée des charges sur les temps de trajets pour un BEV moyen de 2020

5.2.2.2.3. L'évaluation des impacts environnementaux

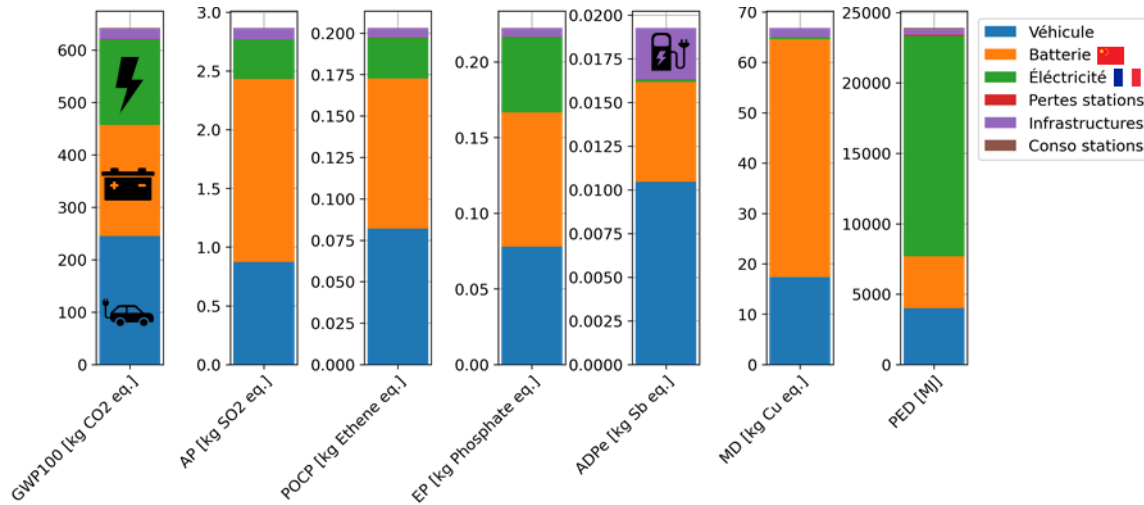
Ensuite, le simulateur permet de **réaliser une évaluation des potentiels d'impacts environnementaux de la mobilité électrique sur le territoire**. C'est une étude qui intéresse l'ensemble des acteurs qui cherchent à réduire leurs impacts. Pour le scénario SPS 2024, la Figure 26 montre les potentiels évalués en une heure moyenne de circulation et la répartition entre les différentes sources d'impacts évaluées.

Tout d'abord, la répartition des sources d'impacts sont significativement différentes selon le potentiel considéré. **Les batteries, qui sont au cœur de nos réflexions, prennent une place conséquente pour 6 des 7 indicateurs de potentiels d'impacts évalués**, ce qui est en accord avec la littérature. Les batteries sont donc un objet d'attention particulier pour l'éco-conception du système de mobilité électrique. La volonté de développer des capacités à forte capacité est dû aux besoins liés à la longue distance, ainsi **la maîtrise des impacts sur cycle de vie des batteries semble être une priorité**, particulièrement si la stratégie est d'augmenter encore davantage les capacités de ces batteries.

De plus, les résultats suggèrent que les infrastructures de recharge génèrent peu d'impacts par rapport aux autres sources. Effectivement, elles dépassent 10 % de contribution relative seulement pour le critère d'épuisement des ressources abiotiques à cause des besoins de cuivre. Cependant, il faut noter que seulement l'approvisionnement en matériaux ont été évalués, faute de données. Ainsi, tous les impacts relatifs à la fabrication, à la distribution, à l'installation, à la maintenance et à la fin de vie des bornes ne sont pas calculés. Enfin, on remarque que les pertes liées aux rendements de la recharge rapide et à la consommation passives des bornes sont négligeables.

Ensuite, la consommation d'électricité est une source minoritaire d'impacts pour 6 des 7 indicateurs évalués. Ceci se justifie par le fait que la France ait un mix électrique faiblement basé sur les énergies fossiles. Si le mix électrique est le mix moyen européen, les impacts liés à l'électricité y sont nettement plus importants (hors catégories d'impacts liés à la demande en matériaux ou en

énergie) : par exemple, le potentiel total d'émission de gaz à effet de serre est 68 % plus élevé. Pour comparer, les résultats de simulation pour un mix électrique de l'Union européenne sont présentés en Annexe M. Ceci met en évidence **l'importance de disposer d'un mix électrique décarboné** lorsqu'un territoire souhaite développer la mobilité électrique.



GWP100, global warming potential (100-year horizon) EP, eutrophication potential
 AP, acidification potential ADPe, abiotic depletion potential
 POCP, photochemical ozone creation potential MD, metal depletion

Figure 26 : Impacts environnementaux générés par les BEV sur l'A6 en une heure moyenne de circulation à l'horizon 2024 (mix électrique français) en incluant les impacts dus à l'usage des véhicules, à la consommation d'électricité induite, des pertes lors des recharges rapides et la consommation passive des bornes.

Enfin, les simulations permettent de mettre en évidence que **la réduction de la vitesse de circulation a une influence sur la consommation d'électricité** et donc sur les impacts associés. Cependant, cet effet est dépendant du mix considéré : si les conducteurs roulent à 110 km/h au lieu de 130 sur l'autoroute, les émissions de gaz à effet de serre diminuent d'environ 7 % avec un mix français ou de 13 % avec un mix européen.

5.2.3. Résultats complémentaires : étude de sensibilité

Le simulateur de mobilité électrique à l'échelle territoriale qui est proposé a pour intérêt de pouvoir comparer différentes stratégies de déploiement de la mobilité électrique en étudiant l'influence de différents paramètres sur les performances du système. Dans cette partie, nous nous intéressons aux effets de différents choix de conception appliqués à l'ensemble d'une flotte théorique de BEV pour comparer leurs effets sur les performances du système de mobilité électrique. Les hypothèses par défaut pour toutes les simulations qui suivent sont décrites dans le

Tableau 6 : Paramètres de simulation par défaut pour les tests de sensibilité

Part de BEV parmi les véhicules circulant sur l'A6	0,85 %
Vitesse de circulation	120 km/h
État de charge maximal	80 %
Puissance des infrastructures de recharge	175 kW
Mix électrique	Français

5.2.3.1. Puissance des bornes

La puissance des bornes installées est un des paramètres majeurs pour la conception de la mobilité électrique. Ainsi, les graphiques suivants présentent son influence sur le système pour des bornes de puissance comprises entre 50 kW et 200 kW.

La Figure 27 montre que **l'augmentation de la puissance des bornes induit une baisse du nombre de bornes nécessaires** pour satisfaire les besoins de recharge de la même flotte. De plus, ceci permet également de **réduire les temps de recharge**. Effectivement, ceci se justifie par le fait que si une borne est plus puissante, alors elle est susceptible de charger plus de véhicules en un même temps donné ; ainsi, il y a besoin de moins de bornes et les temps de recharge sont plus courts. **La**

seule condition est que les véhicules rechargés aient une puissance admissible suffisante. Ainsi, comme dans la flotte modélisée 69 % des véhicules sont de la catégorie « moyenne » ayant une puissance de recharge maximale de 100 kW (cf. 5.1.2.2), alors les temps de recharge et le nombre de bornes ne diminuent que très peu au-delà de 100 kW.

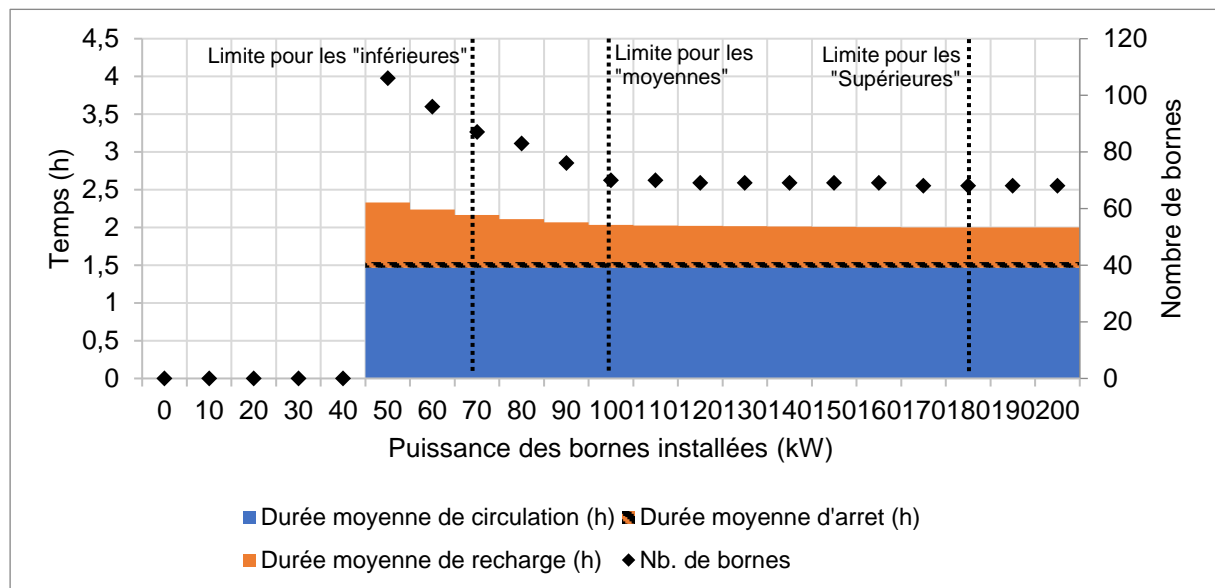


Figure 27 : Influence de la puissance des bornes installées sur le territoire sur le nombre de bornes nécessaires et le temps de trajet moyen

Les bornes installées en France aujourd’hui sont généralement capables de délivrer du 175 kW. Or, la puissance maximale admissible par le BEV moyen en France est de 95 kW en 2021. Ainsi, les infrastructures de recharge sont surdimensionnées par rapport à l’usage moyen pour permettre aux véhicules de gamme supérieure de se recharger à plus haute puissance et de prévoir les évolutions techniques des futurs BEV. Effectivement, d’après l’Annexe J déjà mentionnée et qui présentent deux scénarios de prospective, les BEV de 2030 pourraient se recharger à 140 kW, voir 190 kW, sous réserve d’infrastructures adaptées.

5.2.3.2. Puissance maximale de recharge des véhicules

Comme cela a été montré dans la partie précédente, la puissance de recharge est un paramètre fondamental pour le dimensionnement du système. Or, il dépend également de la **puissance admissible par les véhicules** de la flotte. Ainsi, la Figure 28 montre l’influence qu’aurait une augmentation de ce facteur sachant que, pour un facteur allant de 1 à 2, la puissance admissible moyennée sur l’ensemble de la flotte passe de 95 kW à 190 kW.

Dans le cas où les bornes sont de 175 kW, l’augmentation de la puissance admissible permet de réduire le nombre de bornes nécessaires et de réduire les temps de recharge. Cette tendance s’estompe au facteur 1,8 car, à partir de cette valeur, les véhicules de la gamme « moyenne » admettent des puissances supérieures à 175 kW mais les infrastructures sont incapables de leur les donner. La Figure 28 effectue la comparaison avec le cas où uniquement des bornes de 350 kW sont déployées. Les gains en temps de recharge et en nombre de bornes sont peu significatifs à l’échelle de la flotte entière. Effectivement, seuls les véhicules « Luxe » bénéficient de ces infrastructures plus performantes avant d’attendre le facteur 1,8. Au-delà, les véhicules « Moyen » en profitent également et les gains deviennent plus apparents.

Compte-tenu des résultats présentés dans cette section et la précédente, **installer des bornes de 175 kW aujourd’hui paraît cohérent** par rapport aux performances des véhicules actuels et de ceux qui devraient se développer d’ici 2030. **Développer une minorité d’infrastructures de 350 kW** pour que les véhicules les plus haut-de-gamme puissent en profiter peut être envisagé. En revanche, cela pose un problème d’organisation : il faut pouvoir s’assurer que les bornes en question soient bien utilisées en priorité par les véhicules pour lesquels elles sont utiles. Des coûts différenciés selon la puissance délivrée par les bornes est une solution envisageable pour éviter les erreurs d’occupation mais cela peut-être problématique si de nombreux véhicules « Moyens » souhaitent se recharger au

même moment à la même station. Effectivement, pour des vitesses de recharge identiques, tous les véhicules ne seraient pas rechargés au même prix.

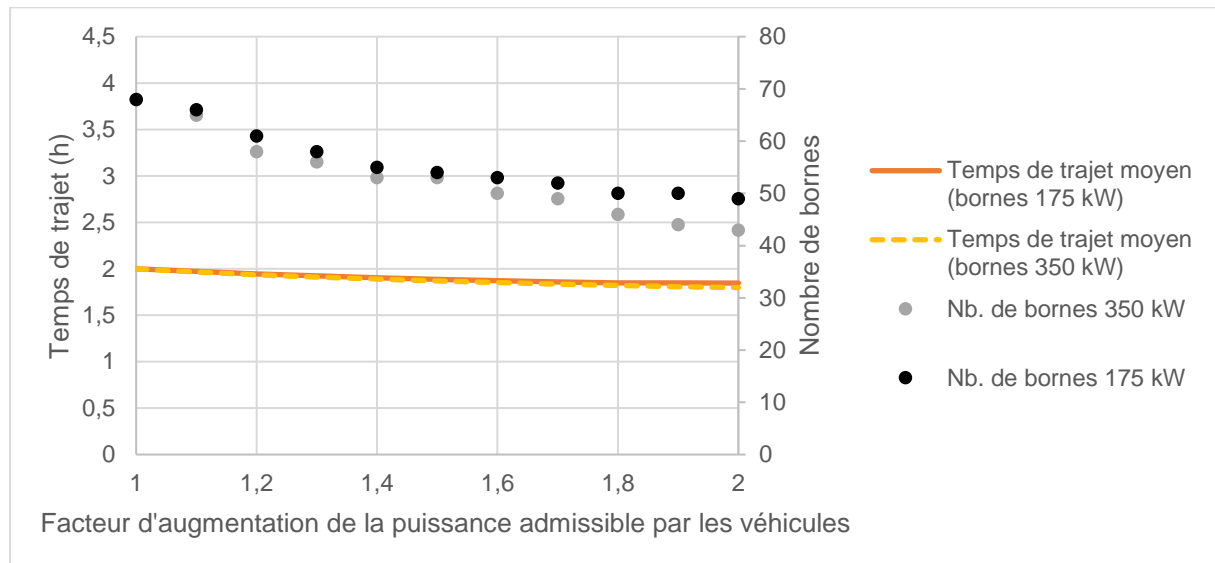


Figure 28 : Influence de l'augmentation de la puissance de recharge maximale des véhicules (en supposant la puissance des bornes suffisante) sur le nombre de bornes et sur les temps passés à recharger en comparant si des bornes de 175 kW ou de 350 kW sont installées

5.2.3.3. Capacité des batteries

Outre la puissance de recharge, la capacité des batteries est un paramètre dimensionnant pour le système de mobilité. De la même manière que pour la partie précédente, la Figure 29 montre l'influence qu'aurait une augmentation de ce facteur sachant que, pour un facteur allant de 1 à 2, la capacité moyenne des batteries de voiture passe 50 kWh à 100 kWh.

Augmenter la capacité des batteries permet de réduire les besoins de recharge sur le territoire et les temps moyens passés à recharger car cela diminue le nombre de recharges nécessaires pour certains trajets et augmente donc notamment la part de trajets nécessitant aucune recharge. Effectivement, un doublement de la capacité des batteries des véhicules induit une baisse du nombre de recharges moyen par trajet de 62 %.

Cependant, compte-tenu du modèle et de la modélisation de la gestion des états de charge, il y a un certain biais minimisant l'influence de la hausse de la capacité de batterie. Effectivement, tous les paramètres définissant le comportement de gestion de l'état de charge sont exprimés en pourcentage de la capacité totale de la batterie. Or, c'est un choix de modélisation contestable. Par exemple, l'état de charge lors de l'arrivée des véhicules sur l'autoroute est de 80 %, 60 % ou 40 %, cela signifie que pour les véhicules « Moyens », ils ont effectué environ 20, 60 ou 100 km depuis la dernière recharge. En revanche, les véhicules « Luxe » ont effectué environ 20, 90 ou 145 km d'après cette même définition. Ainsi, cette distribution d'état de charge initiale n'est pas harmonisée selon les différentes capacités de batteries et donc ce ne sont pas exactement les mêmes parcours totaux qui sont comparés. Il serait intéressant de tester l'influence d'un autre choix de modélisation avec un distribution kilométrique pour les trajets antécédents plutôt qu'une distribution d'états de charge.

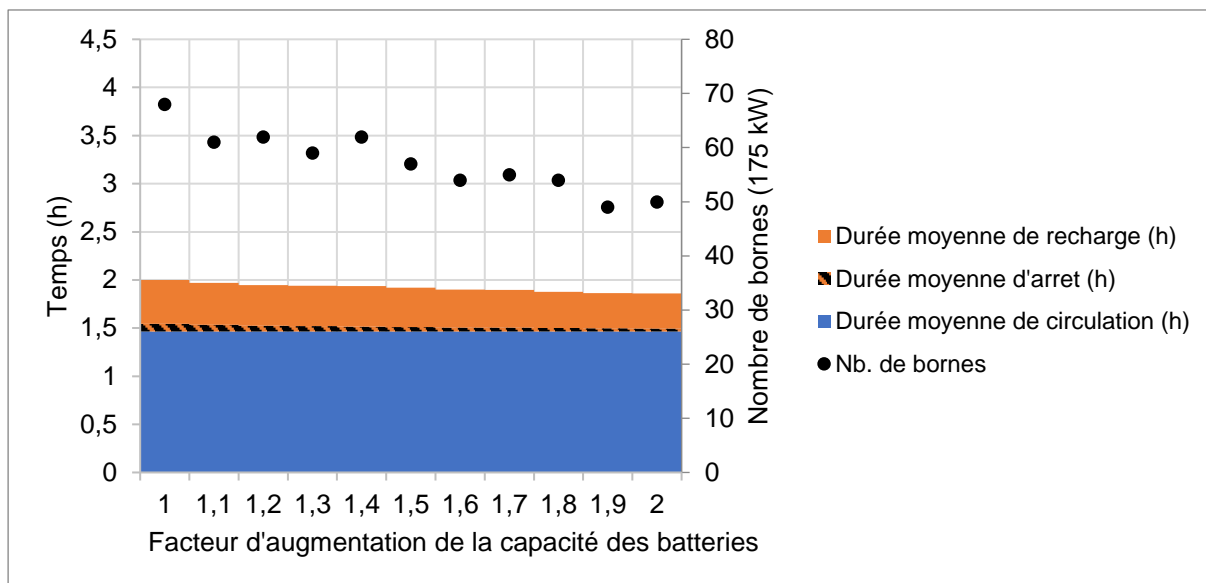
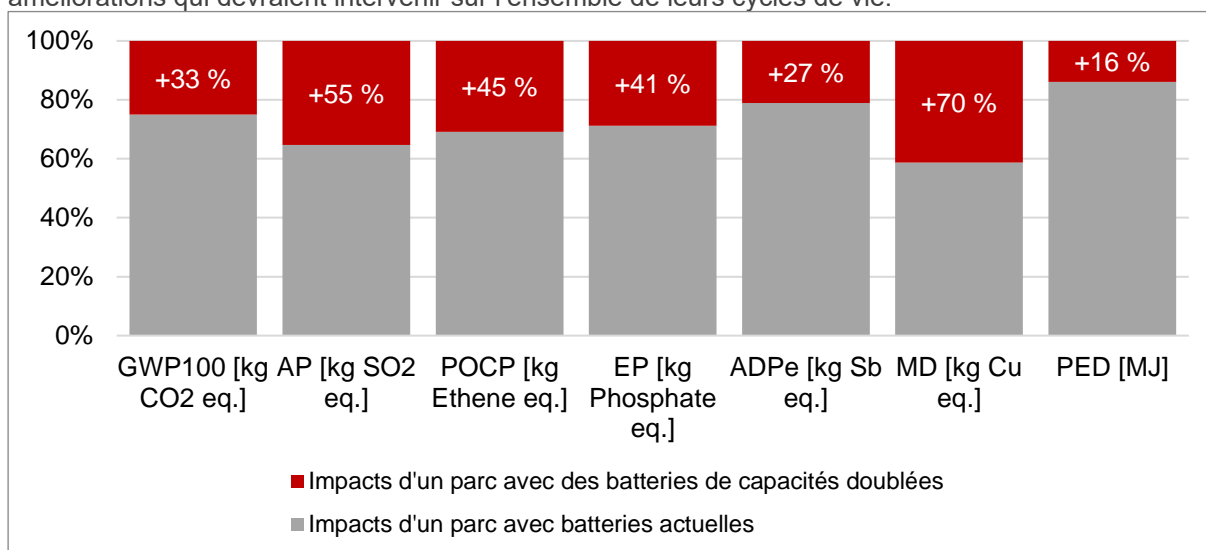


Figure 29 : Influence de l'augmentation de la capacité des batteries sur le nombre de bornes et le temps de trajet moyen

Enfin, cette section a montré qu'augmenter les tailles des batteries permettait de limiter les besoins de recharge et de réduire les temps de trajets moyens, cette stratégie admet **un contrecoût sur les impacts environnementaux des véhicules qui peut être évalué par le simulateur**. Ainsi, la Figure 30 montre les conséquences environnementales significatives causées par la multiplication par deux des capacités de batteries du parc. Effectivement, la Figure 26 avait montré que la batterie était la cause d'une partie significative des impacts du BEV. En revanche, l'évolution des impacts environnementaux des batteries Li-ion est très dépendante des changements technologiques et des améliorations qui devraient intervenir sur l'ensemble de leurs cycles de vie.



GWP100, global warming potential (100-year horizon) EP, eutrophication potential
 AP, acidification potential ADPe, abiotic depletion potential
 POCP, photochemical ozone creation potential MD, metal depletion

Figure 30 : Conséquences sur les impacts environnementaux liés à la circulation des BEV sur le territoire de la multiplication par deux des capacités de batterie (détail des abréviations des impacts)

5.2.3.4. Densité du réseau d'infrastructures de recharge

Enfin, le dernier paramètre de conception étudié est la densité du réseau de recharge. La Figure 31 montre **l'effet d'installer des bornes sur toutes les stations de repos et de service par rapport en installer uniquement sur les aires de service**. Le premier constat est que **cela ne diminue pas significativement le temps de trajets moyen**. En outre, la deuxième observation est que cela **réduit un peu le nombre moyen de recharges par trajet** car le choix de la station de recharge est plus flexible. Enfin, le dernier effet de cette stratégie est que **le besoin de bornes augmente** pour couvrir l'ensemble des aires de repos alors que le taux d'occupation des bornes diminue fortement.

La densification du réseau de recharge n'apparaît pas comme étant une priorité. Disposer de bornes de puissance adaptée à chaque aire de service semble être un premier maillage intéressant compte-tenu de la demande actuelle et projetée pour les quelques prochaines années.

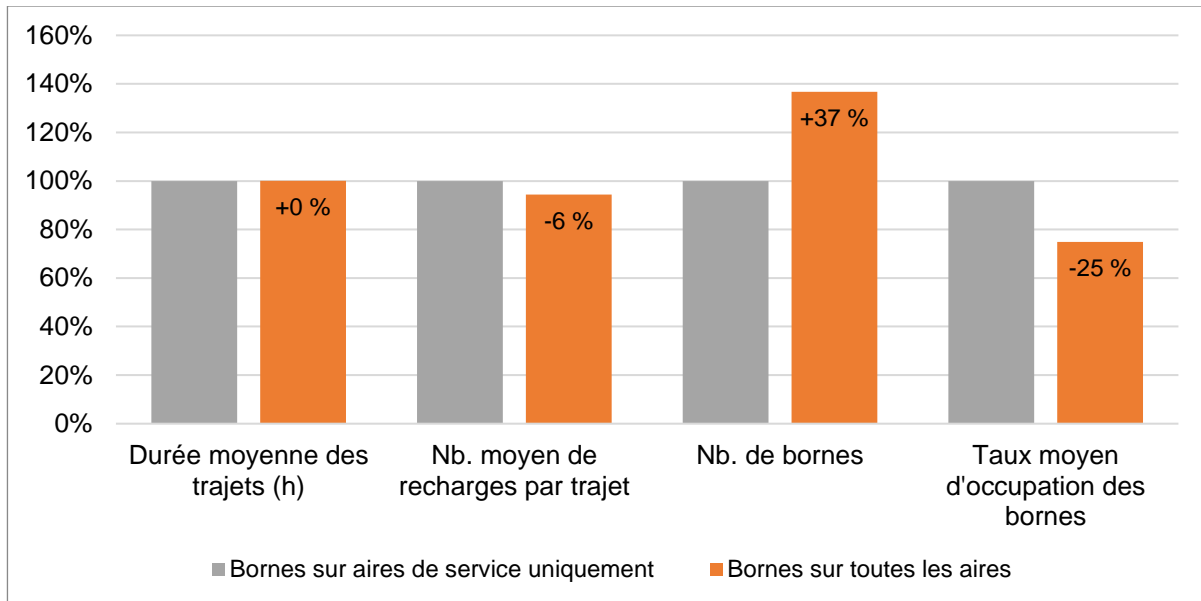


Figure 31 : Effet de l'installation des bornes sur toutes les aires au lieu de seulement sur les aires de service

5.2.3.5. Synthèse des résultats

Le simulateur a permis de comparer les performances d'un système de mobilité électrique en fonction de certains choix de conception. Quelques résultats ont été présentés précédemment dont une synthèse est proposée en Tableau 7. Certains effets ont pu être évalués mais **il manque des données concernant les potentiels d'impacts environnementaux des infrastructures de recharge.**

En pratique, il faut noter qu'à technologie égale, la capacité des batterie est proportionnelle à la puissance admissible lors des recharge. L'étude séparée de ces deux paramètres admet donc des limites.

Tableau 7 : Synthèse qualitative des effets de certains choix de conception sur quelques indicateurs de performance

	Nombre de bornes installées	Temps de trajet moyen	Fréquence moyenne des recharges	Impacts environnementaux estimés (BEV, électricité, infrastructures)
Augmentation de la puissance des bornes	Diminution (si les véhicules peuvent bénéficier de cette augmentation)	Diminution (si les véhicules peuvent bénéficier de cette augmentation)	Aucun effet	Faible augmentation
Augmentation de la puissance maximale de recharge des véhicules	Diminution (si les bornes sont de puissances suffisantes)	Diminution (si les bornes sont de puissances suffisantes)	Aucun effet	Non quantifié
Augmentation des capacités des batteries	Diminution	Diminution	Diminution	Augmentation
Densification du réseau de recharge	Augmentation	Aucun effet	Faible diminution	Faible augmentation

5.2.4. Prévision du besoin de bornes et d'électricité à l'horizon 2030

À partir des scénarios SPS et SDS de pénétration des BEV dans le parc automobile décrits en Figure 21 et des estimations de changement technologique présentés dans l'Annexe J, des simulations pour chaque année entre 2020 et 2030 ont été réalisées. Les bornes installées sont de 175 kW et les stations de recharge correspondent à chaque aire de service. La Figure 32 montre les évolutions des besoins de bornes pour les 4 scénarios.

Tout d'abord, le nombre de bornes à installer sur le territoire dépend directement du scénario de pénétration considéré. Il est possible de comparer les estimations du simulateur aux objectifs pour 2023 formulés par le gouvernement dans le plan France Relance²⁴. Ce dernier annonce que, d'ici le 1er janvier 2023, toutes les aires de service seront équipées de stations avec au moins deux points de recharge à 150 kW minimum. Dans le cas de la section de l'A6 qui est modélisée, France Relance imposerait donc la présence d'au moins 50 bornes sur les stations service de l'A6. Quant à lui, le simulateur estime qu'entre 53 et 67 bornes sont nécessaires sur l'A6 en 2023, ce qui correspond à un investissement de 8 à 10 M€ environ. Les 50 bornes minimum à installer d'après France Relance correspondent aux besoins estimés par les simulations. **L'ordre de grandeur du nombre minimal de bornes à installer avant 2023 d'après France Relance paraît donc cohérent par rapport aux besoins estimés par le simulateur.**

De plus, à l'horizon 2030, le nombre de bornes à placer dépend du scénario de pénétration et du scénario d'évolution technologique. En cas de forte évolution technologique, le besoin de bornes est légèrement réduit car cette hypothèse induit des recharges moins nombreuses et plus rapides. À l'horizon 2030, les estimations sont comprises entre 158 et 281 bornes sur l'A6 modélisée.

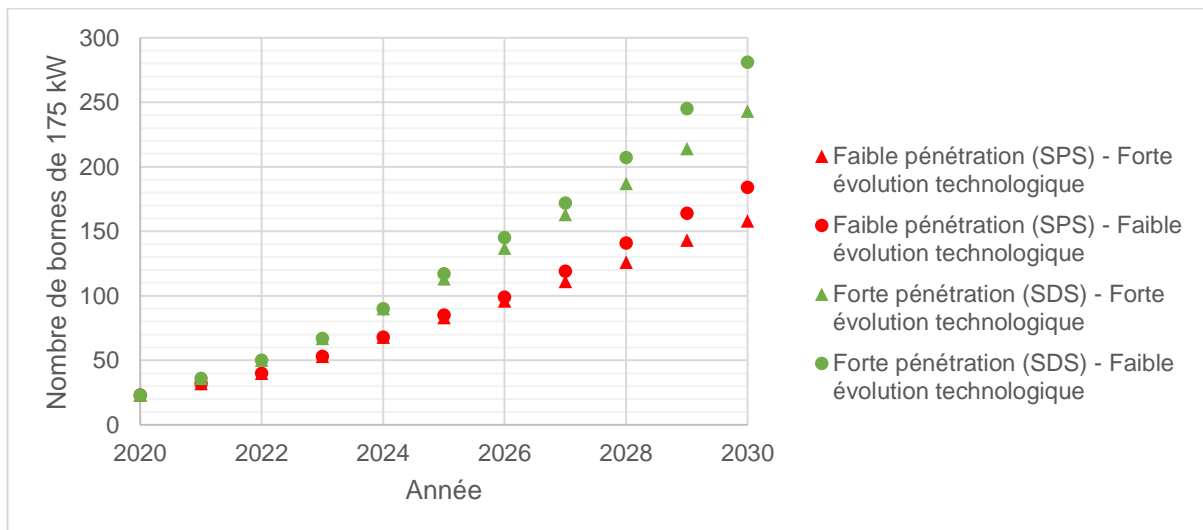


Figure 32 : Évolution du nombre de bornes de 175 kW nécessaires sur l'autoroute A6 entre 2020 et 2030 selon 4 scénarios

Pour estimer le besoin national de nombre de bornes sur le réseau autoroutier concédé, l'Éq. 8 propose une généralisation en pondérant par la longueur et le trafic moyen. Ceci permet d'estimer qu'en 2023, il devrait avoir un besoin total s'élevant à 872 bornes, soit 2,4 bornes par station service en moyenne, ce qui est cohérent avec les objectifs de France Relance. Installer ces bornes demande un investissement évalué à 133 M€. À l'horizon 2030 et en faisant une moyenne pour les 4 scénarios, il devrait y avoir un besoin de plus de 3100 bornes sur le réseau, soit entre 8 et 9 bornes par stations en moyenne.

$$N_{borne}^{total} = N_{A6} \frac{L^{total}}{L_{A6}} \frac{Trafic_{moyen}}{Trafic_{A6}} \quad \text{Éq. 8}$$

²⁴ Ministère de l'économie des finances et de la relance, Accompagnement du déploiement des bornes de recharge rapide pour les véhicules. 15/02/2021. Disponible à l'adresse : <https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/accompagnement-deploiement-bornes-recharge-rapide-vehicules-electriques>

Avec :

N_{borne}^{total} , estimation du nombre total de bornes à installer sur l'ensemble du réseau autoroutier concédé en France ;

N_{borne}^{A6} , nombre de bornes à installer sur la section de l'A6 modélisée ;

L^{total} , longueur totale du réseau autoroutier concédé en France (9158 km en 2018²⁵) ;

L^{A6} , longueur de la section de l'A6 modélisée (412 km).

$Trafic_{moyen}$, trafic moyen sur le réseau d'autoroutes concédées en France (24k véhicules/jour en 2018²⁶) ;

$Trafic_{A6}$, trafic moyen sur la section de l'A6 modélisée (37k véhicules/jour) ;

Note : il y avait 364 stations services sur le réseau autoroutier concédé en France en 2018²⁵.

Le Tableau 8 présente une synthèse des estimations réalisées pour le nombre de bornes, les coûts d'investissement pour leur installation et la consommation électrique dans les stations-services de l'A6 modélisée et du réseau autoroutier concédé en 2023 et en 2030.

Tableau 8 : Estimation du nombre de bornes, des coûts d'investissement cumulés pour leur installation et de la consommation électrique dans les stations-services de l'A6 modélisée et du réseau autoroutier concédé en 2023 et en 2030

		Nombre de bornes à installer	Coûts d'investissement	Consommation d'électricité annuelle dans l'ensemble des stations-services
A6 modélisée	2023	60	9,1 M€	7,2 GWh
	2030	219	33 M€	36 GWh
Réseau autoroutier concédé	2023	872	133 M€	104 GWh
	2030	3151	479 M€	522 GWh

6. Discussion et formulation des recommandations

6.1. Apports méthodologiques et limites du modèle

L'étude des véhicules électriques à batterie (BEV) a été structurée en trois temps. Tout d'abord, un atelier de lancement du projet de recherche a été effectué pour identifier des axes de réflexion sur le sujet (cf. partie 3). Puis, une étude bibliographique a permis de décrire le contexte environnemental et industriel d'aujourd'hui (voir 4.1 et 4.2) et de caractériser les verrous sociotechniques à l'adoption des BEV (voir 4.3 et 4.4). La mobilité longue distance étant contraignante avec ces véhicules, il a été choisi de proposer une analyse spécifique à ce sujet (cf. 4.5). Un simulateur de mobilité sur autoroute a été conçu pour évaluer les performances actuelles et futures des BEV, comparer différents modèles de véhicules, étudier l'influence du comportement des usagers et de prévoir les besoins d'infrastructures. Cet outil de simulation a été construit en proposant différents **contributions méthodologiques par rapport à ce qui a été observé dans la littérature scientifique** (cf. l'article publié pour la conférence CIRP Design 2022).

En particulier, des données de trafic ont été nécessaires pour faire des recommandations précises sur le système considéré, mais elles ont du être adaptées aux besoins de la modélisation en effectuant certaines hypothèses. La méthode présentée en 5.1.2.1 pour **calculer les flux d'origines-destinations à partir des mesures de trafic ont été utiles pour déterminer la longueur des trajets réalisés** et pour ensuite en déduire les besoins de recharge à chaque station. L'analyse complémentaire du trafic a permis de calibrer le modèle et d'identifier que la réduction du trafic en période d'affluence est une solution efficace pour réduire le besoin d'infrastructure. Effectivement, pour favoriser l'adoption des BEV, les réseaux sont dimensionnés en fonction de la demande maximale qui a typiquement lieu lors des week-ends d'été. Ainsi, réduire les pics où la demande est maximale permet de diminuer d'autant le nombre de bornes nécessaires.

De plus, le modèle propose de **considérer une diversité d'états de charge lors de l'entrée des BEV sur l'autoroute** pour prendre en compte les déplacements réalisés antérieurement (cf. 5.1.2.2). Ceci permet d'obtenir une distribution équilibrée des besoins de recharge sur les différentes stations (cf. 5.2.2.2.1). En revanche, il y a eu un manque de données pour construire cette distribution.

²⁵ ASFA, Chiffres-clés 2018. Disponible à l'adresse [consulté le 29/03/2022] : https://www.autoroutes.fr/FCKeditor/UserFiles/File/ASFA_Chiffres_Cles18.pdf

²⁶ ASFA, Chiffres-clés 2019. Disponible à l'adresse [consulté le 29/03/2022] : [https://www.autoroutes.fr/FCKeditor/UserFiles/File/RA_ASFA_WEB\(1\).pdf](https://www.autoroutes.fr/FCKeditor/UserFiles/File/RA_ASFA_WEB(1).pdf)

Le choix de modélisation est une limite du modèle car ce dernier est basé sur une distribution d'états de charge initiaux plutôt que d'une distribution de kilomètres parcourus avant l'entrée sur l'autoroute. Se baser sur une distribution kilométrique aurait l'avantage d'être indépendant des capacités de batteries (cf. explication en 5.2.3.3) et donc plus réaliste : le choix de modélisation par distribution d'état de charge défavorise légèrement les véhicules avec des grandes capacités. Il y a les mêmes problèmes vis-à-vis de la modélisation du stress de l'autonomie (*range anxiety*) et de l'état de charge minimal acceptable lors de la sortie d'autoroute qui permet de prendre en compte l'autonomie nécessaire pour pouvoir finir chaque trajet après la sortie de l'autoroute. Il aurait été intéressant de comparer les résultats de simulation en fonction du choix de modélisation retenu.

Ensuite, **la définition des caractéristiques de différents modèles de véhicules** (en 5.1.2.2) **et la mise en place de différents indicateurs de performance du système de mobilité** (détaillés en 5.1.3) ont permis de comparer les performances de ces véhicules pour différents comportements d'usage (5.2.2.2.2). Par ailleurs, le simulateur utilise **une méthode du calcul** présentée en 5.1.2.1.2 **pour déterminer la puissance de charge en fonction de la puissance de la borne, de la puissance admissible par le véhicule et de l'état de charge initial et final**. C'est une contribution importante car elle a permis d'obtenir des résultats intéressants concernant la gestion de la fréquence des recharges (cf. 5.2.2.2.2).

Puis, une évaluation environnementale pour estimer les impacts sur cycle de vie liés à la circulation des BEV sur l'autoroute a été définie. Ceci a notamment permis **d'évaluer l'influence de la vitesse de circulation sur différentes catégories d'impacts** (5.2.2.2.3) et de réaliser qu'il y a un **réel manque de données pour caractériser l'inventaire de cycle de vie des infrastructures de recharge rapide** (5.1.3.3.2).

Enfin, par construction du modèle, le nombre de bornes sur le territoire est déterminé à partir du trafic horaire maximal au cours de l'année. Ainsi, il est supposé qu'il y a toujours des bornes disponibles dès qu'un BEV s'arrête à une station service. **Le modèle ne considère donc ni file d'attente, ni d'éventuels cas où des bornes sont hors service**.

6.2. Discussion sur les résultats

Dans le contexte actuel du développement de la mobilité longue distance des BEV, les batteries à haute capacité et à forte puissance de recharge et les réseaux d'infrastructures de recharge connaissent un fort développement. L'objectif de ce rapport est de faire un état de la situation actuelle et de prévoir les besoins et les performances de ces BEV. Les recherches dans la littérature et les résultats du simulateur permettent d'évaluer les conditions de maturité des BEV pour la mobilité longue distance de demain.

Le premier constat est que **réaliser des trajets longs avec des BEV à la même vitesse qu'avec des ICEV est extrêmement exigeant pour les véhicules et les infrastructures**. Effectivement, à cause de la durée des recharges, il y a **des écarts de temps de trajet significatifs entre les ICEV et les différentes gammes de BEV** (cf. partie 5.2.2.2.2). Ceci représente l'émergence potentielle d'**une nouvelle forme d'inégalité de mobilité**. À l'horizon 2030, seuls les véhicules haut-de-gamme devraient être capables d'avoir des performances similaires aux ICEV, à condition qu'ils disposent d'infrastructures de très forte puissance (par exemple, 350 kW). À l'inverse, il paraît assez pénalisant de faire des trajets longs avec des BEV anciens et bas-de-gamme.

Dans la continuité, les résultats des simulations de la section 5.2.2.2.2 ont **démontré l'influence significatif du comportement des conducteurs sur les performances** du système de mobilité. D'une part, **faire des recharges plus courtes mais plus fréquentes permet de réduire les temps de trajets** car la puissance des recharges se dégrade au cours de la charge. Cela permet également de réduire l'occupation des bornes et, donc, les besoins globaux d'infrastructures. D'autre part, **réduire la vitesse de circulation permet de réduire la consommation d'électricité et les besoins de recharge et d'infrastructures**. En dehors des véhicules haut-de-gamme, ce ralentissement de la vitesse de circulation n'augmente que légèrement les temps de trajet totaux car les temps de recharge diminuent. Ainsi, développer de bonnes pratiques lors de la recharge et maîtriser les vitesses de circulation des voitures permettraient de réduire les inégalités entre les différents modèles thermiques et électriques et de diminuer les besoins d'infrastructures. Cependant, diminuer la vitesse de circulation sur autoroute aurait d'autres conséquences non étudiées ici.

Ensuite, la littérature scientifique établit le potentiel qu'admettent les BEV pour réduire les émissions de polluants grâce à l'approche d'analyse de cycle de vie (cf. 4.1.2). L'évaluation mise en

place dans le simulateur a permis de souligner l'importance de réduire les sources fossiles dans les mix électriques et de confirmer **l'impact significatif des batteries sur différents indicateurs environnementaux** (cf. partie 5.2.2.2.3). Or, compte-tenu de la volonté de favoriser l'adoption des BEV pour réduire les pollutions causées par le secteur du transport, il y a une dynamique d'augmentation des performances des batterie. Il faut alors prendre garde au risque que les impacts environnementaux de ces dernières croissent d'autant. La production de batteries demande en effet des quantités d'énergie et de matériaux critiques importantes. Il semble donc être une **priorité d'améliorer l'efficacité de l'ensemble des phases du cycle de vie des batteries** : de l'extraction des matériaux à la fin de vie. **Réduire la vitesse de circulation sur autoroute pourrait également limiter la course aux batteries à hautes performances.**

Pour le long terme, surdimensionner les batteries pour être capable de réaliser des longues distances paraît questionnable. Effectivement, les trajets longs représentent une minorité des trajets effectués par un conducteur de voiture moyen. Il semble que **les usages de mobilité longue distance pourraient être à reconsidérer** selon les potentiels des futures évolutions de technologies et de services. Il y a par exemple des possibilités d'émergence de nouvelles batteries, de la recharge dynamique pendant la circulation, de l'échange de batterie ou de prolongateur d'autonomie d'appoint (évoqués en partie 3.2). En parallèle de la recherche et de l'expérimentation sur ces thématiques, développer et prévoir des solutions de transport multimodales et intermodales est une priorité pour certains cas, particulièrement pour les territoires à proximité des grands centres urbains.

6.3. Formulation des recommandations

L'étude qui est détaillée dans ce rapport permet de répondre à certaines interrogations et de formuler certaines recommandation vis-à-vis du développement de la mobilité longue distance avec les BEV. Cette partie vise à lister les éclairages apportés par les réflexions qui ont été menées au cours de la réalisation de ce projet de recherche. Cette partie est organisée sous forme de plusieurs questions qui permettent de se positionner à plusieurs échelles de réflexion : celle du véhicule, de l'usager et de la station, celle de l'axe routier, celle du parc automobile et du territoire complet.

1. Quelles performances de BEV faut-il viser pour la longue distance pour les prochaines années ?

En 2021, les BEV vendus avaient une capacité de batterie de 50 kWh en moyenne et une puissance admissible pour la recharge de 95 kW en moyenne. En considérant une consommation en condition réelle légèrement dégradée, ceci permet de rouler en faisant des cycles de 1h05 de circulation à 120 km/h avec 25 min de pause. Pour comparer, les conducteurs de véhicules thermiques qui suivent les recommandations de la sécurité routière effectuent des cycles de 2h de circulation à 130 km/h et de 20 min de pause. **Il y a donc d'importantes inégalités entre les conducteurs de véhicules thermiques et de BEV vis-à-vis de la mobilité longue distance.** Ceci est un frein pour l'adoption des BEV. De plus, il y a également des écarts d'autonomie et de vitesse de charge importants entre les BEV de différentes gammes. Pour réduire ces inégalités et pour que les BEV atteignent les mêmes temps de trajet que les véhicules thermiques, il faudrait :

- **Augmenter la capacité des batteries et les performances des recharges.** À consommation identique, des batteries de l'ordre de 110 kWh, rechargeable à 230 kW en moyenne (320 kW en pointe environ) seraient nécessaires pour atteindre le rythme de cycle 2h de circulation à 130 km/h et de 20 min de pause. Ceci correspond à doubler les capacités des batteries par rapport à la moyenne des BEV de 2021. Comme la puissance de recharge est globalement proportionnelle à la capacité de la batterie (à technologie égale), il suffirait d'améliorer légèrement les performances de recharge pour satisfaire cette exigence.
- **Réduire la consommation des BEV.** C'est un levier d'action important pour atteindre l'autonomie et la vitesse de charge mentionnée : il est attendu que la consommation diminue grâce à l'optimisation des véhicules (grâce à l'amélioration de la chaîne de conversion entre la batterie et les roues et de l'aérodynamisme des véhicules notamment). Il est difficile d'estimer cette évolution mais entre 2015 et 2025, la réduction de la consommation a été estimée à 25 % ([Huss & Weingerl, 2020](#)). En revanche, **le moyen le plus direct pour diminuer la consommation et de réduire les écarts de performances avec les véhicules thermiques est de limiter la vitesse de circulation.** Avec les consommations de 2021, faire des cycles de 2h de circulation à 110 km/h et de 20 min de pause demande des batteries de 60 kWh, rechargeable à 130 kW en moyenne (170 kW en pointe environ).

En absence d'évolution de la vitesse de circulation et si on considère 11 % de réduction de la consommation des BEV à l'horizon 2030, **le rythme de cycle 2h de circulation à 130 km/h et de 20 min de pause serait atteint avec des batteries d'environ 100 kWh, rechargeable à 210 kW en moyenne (soit, environ 290 kW en pointe)**. Néanmoins, à cet horizon, **cet objectif semble difficilement atteignable**, par exemple, l'[IAE \(2020\)](#) estime que les BEV auront en moyenne seulement 85 kWh de capacité en 2030.

De plus cet tendance à la course aux batteries hautes-performances admet des risques. Il faut bien comprendre que **des batteries avec de tels dimensionnements sont nécessairement plus coûteuses, nécessitent plus de matériaux critiques et d'énergie pour leur production et génèrent globalement plus d'impacts environnementaux**. Les solutions pour limiter ou éviter ceci sont relatives aux possibilités d'évolutions d'efficacité et de technologique et aux changements de comportement d'usage. Effectivement, il est possible que de nouvelles technologies de batteries émergent mais il y a peu de chances qu'elles deviennent industriellement matures à l'horizon 2030. Pour les performances des recharges, il est également possible qu'il y ait des progrès sensibles, notamment en élevant la tension des batteries et en améliorant le refroidissement des composants, mais c'est difficilement prévisible. Ainsi, la mesure la plus efficace est d'adapter les usages de la mobilité longue distance. Comme expliqué précédemment, **circuler plus lentement permet des gains de consommation importants**. Par ailleurs, **il est recommandé aux conducteurs de faire des recharges plus courtes mais plus fréquentes pour gagner en temps de trajet**. Effectivement, lors de recharges rapides, la puissance chute lorsque l'état de charge de la batterie augmente. Cette stratégie est applicable seulement si les usagers ne craignent pas d'avoir des files d'attente trop longues aux stations de recharge.

Pour limiter la course aux performances pour les batteries, il y a d'éventuelles alternatives qui peuvent être intéressantes. L'échange de batterie, l'utilisation d'extendeur d'autonomie, la recharge dynamique au cours de la circulation sont des pistes qui peuvent être intéressantes à développer et à expérimenter même si elles ne sont pas matures aujourd'hui. **Développer l'intermodalité** pour utiliser les BEV uniquement pour les courtes distances semble également pertinents, surtout à proximité des centres urbains qui disposent des hubs ferroviaires importants.

2. Quelles bornes devraient être installées sur les autoroutes ?

La caractéristique principale pour les points de charge est la puissance de sortie. Elle est à dimensionner en fonction du parc de BEV. En 2021, le BEV moyen a une puissance de recharge maximale de 95 kW et les modèles haut de gamme atteignent en moyenne 180 kW. Cette caractéristique va probablement évoluer dans les prochaines années grâce aux évolutions technologiques et à l'augmentation des capacités des batteries. À l'horizon 2030, ces puissances pourraient être multipliées par 1,5 voir par 2. Le BEV moyen atteindrait donc dans le cas extrême 190 kW et le BEV haut-de-gamme environ 360 kW.

Ainsi, compte tenu des produits proposés par les constructeurs de bornes, il vaut mieux **privilégier l'installation d'infrastructures de 175 kW** pour le moment car c'est adapté à la plupart des véhicules d'aujourd'hui et des prochaines années. Conformément à cet avis, le plan France Relance²⁷ impose la présence de bornes d'au moins 150 kW sur les stations services. Comme la durée de vie estimée pour les infrastructures est de l'ordre de 10 ans, cette stratégie permettra d'anticiper les évolutions des performances d'ici 2030. **Disposer d'une minorité de bornes de 350 kW ou prévoir la mise à niveau de certaines bornes pour qu'elle puissent atteindre des puissances supérieure pourrait être utile pour les véhicules haut-de-gamme** des années à venir. Cependant, il faut pouvoir **s'assurer que ces bornes seront en priorité utilisé par les usagers de véhicules pouvant profiter de telles puissances** de recharge pour que ce soit utile.

3. Quelle est la distance à préconiser entre les stations de recharge ?

Les véhicules de 2021 ont une capacité moyenne de 50 kWh. Pour des trajets longs avec une vitesse de circulation de 120 km/h, ceci correspond à une distance maximale de 130 km entre chaque charge. Or, sur le réseau autoroutier concédé, il y a en moyenne une aire de services tous les 50 km (et une aire de repos ou de service tous les 18 km en moyenne). Donc, a priori, **le premier niveau de maillage à réaliser correspond à une station de recharge toutes les deux aires de service pour couvrir le besoin minimal**.

²⁷ Ministère de l'économie des finances et de la relance. Accompagnement du déploiement des bornes de recharge rapide pour les véhicules. 15/02/2021. Disponible à l'adresse : <https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/accompagnement-deploiement-bornes-recharge-rapide-vehicules-electriques>

Le plan France Relance²⁷ annonce que, d'ici le 1er janvier 2023, toutes les aires de service devront être équipées de stations de recharge. Cet objectif peut sembler difficile à atteindre pour un horizon temporel aussi court en sachant que les temps d'étude et de chantier peuvent durer 1 ou 2 ans. Compte-tenu de nos résultats, il faudrait disposer de **4 bornes par aire de service en moyenne à l'horizon 2025**.

Au plus long terme, avoir des bornes de recharge sur certaines aire de repos permettrait d'avoir un réseau plus dense et de limiter le stress lié aux recharges. Effectivement, un usager de BEV peut être inquiet s'il doute de pouvoir atteindre la prochaine aire équipée ou s'il a peur de rater la sortie d'autoroute pour aller faire sa recharge. En revanche, outre la réduction du stress et de la diminution du risque de panne, densifier le réseau de recharge ne semble pas améliorer les performances du système de mobilité car cela demande de placer plus de bornes sans apporter de réductions de temps de trajet.

4. Quels sont les leviers pour réduire les besoins d'infrastructures de recharge ?

À l'horizon 2025, il devrait y avoir environ 1400 bornes sur le réseau autoroutier concédé ce qui correspond à un coût d'investissement cumulé de 210 M€ et à une demande en matériaux importante. Il paraît alors légitime de se demander comment il est possible de réduire ce nombre de borne. Les principaux leviers sont :

- **Réduire le trafic routier.** Diminuer le nombre de véhicules en circulation est un levier fondamental. Ceci peut se produire si la demande de mobilité diminue, si la part modale de transport par voiture diminue et si le taux d'occupation des véhicules augmente. Des leviers d'actions sont donc **la sobriété, le report modal vers le train par exemple, le covoiturage**, etc. Il est également possible de **cibler la réduction du trafic lors des périodes de fortes affluence**. Elles correspondent typiquement aux samedis d'été, aux départs et aux retours de vacances scolaires comme pour la Toussaint ou lors des week-ends liés à des jours fériés (Noël, 1er mai, 8 mai, etc.). Parmi ces pics, ce sont les trajets d'été qui paraissent les plus exigeants pour les infrastructures : le trafic y est 3 fois plus dense qu'en moyenne annuelle et les trajets sont en moyenne environ 1,6 fois plus longs (estimation 2018). Ainsi, une solution pour réduire les besoins d'infrastructure est de **lisser la demande de mobilité lors de ces pics de trafic**. Par exemple, pour l'été, le trafic est particulièrement concentré les samedis car c'est ce qui est généralement le plus pratique pour les congés et pour les réservations de location. Donc, permettre de **diversifier les jours de départs et de retours de vacances** peut permettre une diminution des besoins de bornes. La réduction des pics de besoins de recharge permet également de réduire la surcharge imposée au réseau électrique.
- **Améliorer les performances des véhicules.** Effectivement, réduire la consommation des véhicules permet de réduire les besoins de recharge. De plus, augmenter les capacités des batteries permet de réduire les besoins de recharge car plus de véhicules sont capables de réaliser leurs trajets sans avoir besoin de recharges rapides. Enfin, augmenter les puissances de recharge admissible par les véhicules permet de faire des recharges plus rapides et donc de réduire les durées d'occupation par recharge. Ces leviers d'actions permettent tous de diminuer les besoins d'infrastructures mais, comme ce fut décrit pour la question 1, ils sont tous liés à des évolutions technologiques qui sont incertaines et de moyen terme.
- **Adapter les usages.** Réduire la vitesse de circulation permet de réduire la consommation et donc de réduire le besoin de bornes. Il y a également des bonnes pratiques à développer. Par exemple, il est pertinent de faire des recharges plus courtes mais plus fréquentes comme mentionné en question 1. De plus, il s'agit aussi de faire en sorte que les usagers de BEV utilisent en priorité les bornes de puissance adaptée à leurs véhicules et qu'ils ne bloquent pas l'accès à la borne une fois que leurs recharges sont terminées. Ces comportements d'usage sont assez directs à mettre en œuvre mais sont conditionnés par des conditions d'acceptabilité.

Compte-tenu des prévisions du nombre de bornes à installer, le financement des infrastructures est un enjeu important car, pour l'instant, elles sont subventionnées à hauteur d'environ 30 %²⁸ et car « il n'est pas évident qu'une borne sur autoroute soit réellement rentable en tant que telle à moyen et même à long terme » ([Coda Stratégies, 2019](#)). C'est pour cela que Tesla et Ionity financent leurs réseaux grâce à leurs propres ventes de BEV. En outre, d'autres acteurs visent la rentabilité pour leurs

²⁸ ASP. Déploiement des bornes de recharge pour véhicules électriques : la gestion de l'aide de l'Etat est confiée à l'ASP. Avril 2021 [consulté le 2021/06] <https://www.asp-public.fr/deploiement-des-bornes-de-recharge-pour-vehicules-electriques-la-gestion-de-laide-de-letat-est>

bornes ultra-rapide comme certains pétroliers comme Total ou d'autres opérateurs *pure players* comme Fastned.

Enfin, comme il y a un manque de données pour calculer les impacts environnementaux des bornes de recharge, il est nécessaire de prévoir des études d'éco-conception approfondies pour pouvoir caractériser leur cycle de vie et optimiser leur développement.

5. Faut-il réduire la limitation de vitesse sur autoroute pour favoriser la mobilité électrique ?

Comme dit précédemment, à court terme, réduire la vitesse de circulation est la solution la plus efficace pour favoriser l'adoption des BEV, pour diminuer la consommation et les besoins d'infrastructures, pour réduire les inégalités entre les véhicules thermiques et les BEV de différentes gammes et pour atténuer la course aux batteries à haute performance. Pour toutes ces raisons, il paraît difficile de ne pas soutenir ce projet.

Cependant, l'abaissement de la vitesse de circulation est conditionnée à l'acceptabilité sociale qui n'a pas été étudiée dans ce rapport. **Ce type de mesure admet une opposition importante**, observée notamment lors de la limitation à 80 km/h sur une partie de routes nationales. Limiter à 110 km/h la vitesse sur autoroute était une proposition de la convention citoyenne pour le climat²⁹ pour pouvoir réduire la consommation et les émissions des véhicules, mais cette proposition a été déclinée. Peut-être qu'il serait envisageable de **proposer une solution plus mesurées**. Par exemple, la vitesse pourrait être réduite à 120 km/h seulement ou bien à 110 km/h mais uniquement pendant 5 ans. Il serait également possible de **cibler la réduction de vitesse pour les véhicules les plus polluants**. Mais, il faudrait pouvoir établir si ceci n'est trop difficile à mettre en œuvre ou trop injuste.

En pratique, les vitesses sur autoroute sont mesurées par la Sanef. En 2019, la vitesse moyenne des véhicules légers était de 129 km/h (138 km/h sur la voie de gauche) et 43 % des véhicules roulaient au-dessus de 130 km/h (dont 4 % au-dessus de 150 km/h)³⁰. Ainsi, à défaut de changer la réglementation, **plus de sobriété dans la conduite des usagers pourrait être imposé par des contrôles plus stricts et plus systématiques**. Cela pourrait améliorer le sentiment de justice vis-à-vis de la vitesse réelle et pourrait inciter certains conducteur à consommer moins d'énergie et à s'orienter vers une mobilité électrique plus lente.

6. Comment améliorer l'expérience des usagers de BEV effectuant des recharges rapides ?

Les constructeurs automobiles installant et gérant les infrastructures de recharge favorisent la recharge pour leurs propres véhicules. Cette stratégie liée à leurs modèles économiques n'est pas souhaitable pour l'acceptabilité des BEV par les consommateurs. **L'uniformisation de l'accès, des coûts et des modes de paiements permettrait de simplifier l'usage des bornes** et rendre le réseau de recharge plus efficace, moins exigeant en matériaux et moins couteux.

Par ailleurs, comme mentionné dans la partie 2.4.2, les utilisateurs considèrent qu'il est nécessaire de **développer rapidement un outil permettant de savoir si les bornes d'une station sont utilisables et disponibles de manière dynamique, quel que soit son gestionnaire**. Effectivement, si un usager arrive à une aire de recharge en voulant se recharger mais que toutes les bornes sont occupées, il n'aura pas forcément assez d'autonomie pour aller jusqu'à la prochaine station et sera donc forcé d'attendre. Cet outil permettrait alors de réduire le stress lié à l'autonomie et de diminuer les temps de trajet en optimisant les files d'attente.

Enfin, les gestionnaires des autoroutes et des aires doivent **anticiper les changements de comportements des usagers s'arrêtant sur les aires pour recharger leurs BEV**. Effectivement, avec l'essor attendu des véhicules électriques, il est attendu qu'une partie des automobilistes s'arrêtent plus fréquemment et plus longtemps sur les stations. Il peut donc être pertinent d'anticiper le développement d'activités pour améliorer leurs expériences de la recharge.

7. Quel avenir pour la mobilité électrique longue distance en France ?

Dans l'état actuel, la mobilité longue distance est relativement compliquée pour les usagers de BEV, même s'il y a moins de difficultés pour les véhicules haut de gamme. Effectivement, l'autonomie à haute vitesse est limitée, les vitesses de recharge sont insuffisantes pour atteindre des temps de trajet proches de ceux obtenus en véhicule thermique et le réseau de recharge est encore très incomplet et difficile d'usage. Les perspectives d'amélioration techniques sont limitées à l'horizon 2030 et il est osé

²⁹ Proposition PT3.1

³⁰ Sanef. Dossier de presse — Résultats de l'observatoire Sanef des comportements. 8^{ème} édition, juillet 2019. Disponible à l'adresse : <https://www.groupe.sanef.com/fr/journalistes/dossiers-presse>

de pouvoir imaginer que les BEV pourront bientôt être utilisés de la même manière qu'un véhicule thermique, sauf peut-être pour les BEV les plus hauts de gamme. Il est clair que **les pratiques de mobilité longue distance vont être modifiées** avec le développement forcé des BEV. L'avenir des hybrides rechargeables, qui permettent d'éviter les problèmes d'autonomie, est par ailleurs incertain car leurs performances vis-à-vis des objectifs de décarbonation, de dépollution, de réduction de consommation de pétrole sont limitées.

Un problème identifié en question 1 est que la généralisation des BEV risque de faire apparaître des inégalités dans les usages des particuliers. Effectivement, les performances de BEV sont significativement dépendantes de la gamme de véhicule et donc de leurs prix. L'achat d'un BEV est encore un investissement conséquent aujourd'hui malgré les aides existantes. **Les personnes moins favorisées dans les zones peu desservies en transport en commun seront donc a priori significativement moins mobiles qu'aujourd'hui s'ils perdent accès aux véhicules thermiques et s'ils ne peuvent pas se permettre des BEV haut-de-gamme.**

8. Qu'en est-il des poids-lourds électriques et du fret ?

Les problèmes de taille de batterie, de temps de recharge et d'infrastructures se posent également pour les autres types de véhicules comme les camions de fret par exemple. Les futurs poids-lourds électriques nécessiteraient des bornes de recharge de puissance comprises entre 350 kW et 1 MW ([IEA, 2020](#)). Pour le futur du fret, les principales perspectives de décarbonation peuvent s'axer vers le développement du fluvial et du ferroviaire à condition de disposer d'infrastructures suffisantes mais les camions électriques peuvent aussi être une solution. Cependant, ils nécessitent soit de **mobiliser des batteries importantes et des bornes ultra-rapides**, soit de **disposer de moyens de recharge au cours de la circulation** (induction, rail, caténaire) ou soit de **les utiliser exclusivement pour les premiers ou derniers kilomètres en complément d'autres modes de transport (intermodalité)**.

La mobilité hydrogène des transports est aussi une option qui est considérée mais il ne faut pas oublier que la mobilité n'est pas l'objectif premier pour la filière de l'hydrogène décarboné. Effectivement, le plus urgent semble être le remplacement de l'hydrogène carboné utilisé aujourd'hui dans différents secteurs industriels (raffinerie, production d'ammoniac, de méthanol et chimie, métallurgie, etc.). En revanche, son utilisation pour les transports lourds dont notamment les camions ou la marine marchande pourrait être pertinente mais des études sont toujours en cours ([ADEME, 2019](#)).

Il existe donc un vrai besoin d'améliorer la complémentarité entre les différents modes de transport routier-fluvial-ferroviaire pour maximiser le potentiel de décarbonation du secteur du transport. En revanche, cela pose de nombreux enjeux de **compétitivité** et d'organisation de la logistique et cela exige *a priori* des **renforcements des infrastructures** existantes (canaux, ponts, tunnels, rails, plateforme multimodales, etc.) ou de nouvelles créations.

7. Conclusion

La mobilité électrique est en plein développement et répond notamment aux objectifs contre le changement climatique et contre les pollutions urbaines. Effectivement, l'électrification des véhicules permet sous condition de réduire les gaz à effet de serre émis sur l'ensemble de leurs cycles de vie, de limiter les émissions de polluants lors de la circulation et de réduire les nuisances sonores. La mobilité électrique est alors soutenue par différents pays et par les constructeurs automobiles qui sont soumis aux évolutions des législations.

En outre, malgré ce potentiel clairement identifié, les ventes de véhicules tout-électriques restent encore minoritaires car **il existe encore un certain nombre de verrous sociaux, technologiques et économiques qui limitent son adoption** à plus large échelle. Le coût d'achat élevé des véhicules, les disponibilités incertaines de solutions de recharge et la difficulté de réaliser des trajets de longue distance ont été identifiés comme étant limitant.

Cette étude s'est alors particulièrement intéressé à **la mobilité longue distance des véhicules tout-électriques**. Effectivement, compte-tenu des contraintes d'autonomie, de vitesse de recharge et de densité du réseau de recharge, il paraît nécessaire de **déterminer comment les performances du système de mobilité comprenant véhicules, infrastructures de recharge et usagers évoluent en fonction des paramètres de conception et de décision**.

Les recherches effectuées pour répondre à cette problématique se sont structurées en trois axes. Tout d'abord, il y a eu un atelier avec 17 participants pour identifier les enjeux principaux. Puis, une étude bibliographique a été réalisée pour décrire la situation actuelle. Ensuite, **un simulateur de mobilité électrique à l'échelle d'un axe routier** a été conçu afin de pouvoir comparer différentes flottes de véhicules, différents comportements d'usage et différents scénarios d'évolution du système. La modélisation réalisée permet de **comparer dans différentes situations les performances du système de mobilité** en évaluant certains indicateurs comme le nombre de bornes à installer, les temps de trajet moyen, les potentiels d'impacts environnementaux, etc. Les situations testées peuvent être basées sur différents choix de paramètres d'entrée comme la puissance des bornes, la densité du réseau de recharge, la vitesse de circulation, la fréquence des recharges, le scénario de prévision des évolutions technologiques, etc.

Le développement du simulateur a apporté un certain nombre d'**apports méthodologiques**. Il est basé sur une **reconstitution des trajets origine-destination** à partir de données de trafic et propose une analyse complémentaire pour **identifier les périodes de forte affluence**. De plus, une **méthode pour le calcul de la vitesse de recharge a été proposée pour prendre en compte la chute de la puissance de charge en fonction de l'état de charge**. Ensuite, le simulateur a permis de comparer différents véhicules et comportements d'usagers : même si leur modélisation admet certaines limites, ceci a permis de **mettre en évidence les inégalités de mobilité** entre les véhicules thermiques et les différentes gammes de véhicules tout-électriques ainsi que de **quantifier l'influence significative du comportement des usagers** sur les performances globales du système de mobilité. Enfin, la mise en place d'une évaluation environnementale pour l'étude de la mobilité des BEV est important pour pouvoir quantifier les transferts d'impacts. L'étude a permis de confirmer l'importance de **disposer d'un mix électrique faiblement fossile pour accentuer les bénéfices des BEV. Les batteries sont également une source d'impact environnementaux importants** et il faut les limiter surtout si les capacités continuent à augmenter. Enfin, des recherches bibliographiques ont mis en évidence **le manque de données pour caractériser l'inventaire de cycle de vie des infrastructures de recharge rapide**.

L'ensemble des réflexions qui ont structuré l'étude de la mobilité longue distance a permis de dégager certaines **recommandations pour optimiser son déploiement**. Ces recommandations sont proposées à différentes échelles de la réflexion sur la mobilité électrique et visent par exemple les performances souhaitées pour les batteries, les types de bornes à installer, la densité du réseau à privilégier, le rôle de la réglementation de la vitesse de la circulation et les moyens pour limiter les besoins d'infrastructures.

Le constat est que **les BEV disposent de performances pour la mobilité longue distance limitantes par rapport aux véhicules thermiques** et qu'ils dépendent d'infrastructures encore peu développées. De plus, les caractéristiques des batteries sont très variables selon les gammes de BEV. Comme **les perspectives d'évolutions technologiques à l'horizon 2030 sont prometteuses mais incertaines**, il est important d'étudier les usages pour que le BEV soit adopté à large échelle. **Réduire la vitesse de circulation sur autoroute permettrait de réduire les écarts de performance entre les différents types de véhicules**. Cela favoriserait les BEV et ralentirait la course aux batteries à haute capacité mais l'acceptabilité de la mesure est incertaine. **Favoriser les bonnes pratiques lors de l'usage de BEV et d'infrastructures de recharge** est un levier important pour maximiser les performances du système de mobilité électrique. En parallèle, **développer l'intermodalité** et explorer le potentiel de systèmes tels que la recharge dynamique ou les prolongateurs sont des leviers importants pour pouvoir développer des BEV sobres, avec des capacités de batterie adaptées aux besoins moyens.

Les travaux de ce PRC ont été valorisés grâce à la publication d'un article de synthèse. Il a été présenté le 28 mars 2022 lors de la conférence internationale **CIRP Design 2022**.

J. BALTAZAR, F. VALLET, J. GARCIA, A model for long-distance mobility with battery electric vehicles: a multi-perspective analysis.

Références bibliographiques

- ADEME et al. 2013** : ADEME, Gingko21, PE international, Elaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques. 2013. Disponible à l'adresse : www.ademe.fr/elaboration-selon-principes-acv-bilans-energetiques-emissions-gaz-a-effet-serre-autres-impacts-environnementaux
- ADEME, 2019** : ADEME, Hydrogène : analyse des potentiels industriels et économiques en France. 2019. Disponible en ligne à l'adresse : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/etude-h2_potentiel_industriel_economique-2020-rapport.pdf
- ADEME et al., 2020** : ADEME, Rincenc Air, M. POUPONNEAU, B. FORESTIER, F. CAPE, Les zones à faibles émissions (Low Emission Zones) à travers l'Europe : déploiement, retours d'expériences, évaluation d'impacts et efficacité du système. 2020. Disponible à l'adresse : <https://www.ademe.fr/zones-a-faibles-emissions-low-emission-zones-lez-a-travers-leurope>
- AFNOR, 2006a** : AFNOR NF EN ISO 14040, Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Organisation for Standardization. 2006.
- AFNOR, 2006b** : AFNOR NF EN ISO 14044, Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. International Organisation for Standardization. 2006.
- Anfinsen et al., 2019** : M. ANFINSEN, VA. LAGESEN, M. RYGHGAUG, Green and gendered? Cultural perspectives on the road towards electric vehicles in Norway. Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 71, 2019, pp. 37–46.
- AVERE, 2022** : AVERE France, Baromètre national des infrastructures de recharge ouvertes au public – Mars 2022. 2022. Disponible sur le site AVERE : http://www.avere-france.org/Site/Category/?arborescence_id=247
- Cambridge Econometric, 2020** : Cambridge Econometric, Oil Dependency in the EU. May 2020, Cambridge, United-Kingdom.
- CITEPA, 2020** : CITEPA. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format Secten. Juin 2020. Disponible avec les données complémentaires à l'adresse : www.citepa.org/fr/2020-co2e/
- Coda Stratégies, 2019** : Coda Stratégies, Analyses infrastructures de recharge pour véhicule électrique. 2019. Disponible à l'adresse : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2019-07-Rapport-IRVE.pdf>
- Delos Reyes et al., 2016** : JRM. DELOS REYES, RV. PARSONS, R. HOEMSEN, Winter Happens: The Effect of Ambient Temperature on the Travel Range of Electric Vehicles. IEEE, Transactions on vehicular technology, vol. 65, n° 6, 2016.
- EEA, 2014** : EEA (European Environment Agency), Noise in Europe 2014. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. Disponible à l'adresse : <https://www.eea.europa.eu/publications/noise-in-europe-2014>
- Enedis, 2019** : Enedis, Enedis, partenaire de la mobilité électrique - Rapport sur l'intégration de la mobilité électrique dans le réseau public de distribution d'électricité. Novembre 2019.
- Eskenazi et al., 2017** : M. ESKENAZI, M. PIERRE, V. BOUTUEIL, C. ESCOFFIER, Could digitization emancipate electric mobility? Network and Communication Studies, NETCOM, vol. 31, 2017, n° 3–4, pp. 403–430.

- Faria et al., 2013** : R. FARIA, P. MARQUES, P. MOURA, F. FREIRE, J. DELGADO, AT. DE ALMEIDA, Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy*, vol. 24, 2013, pp. 271–287.
- Hill et al., 2019** : N. HILL, D. CLARKE, L. BLAIR, H. MENADUE, Circular Economy Perspectives for the Management of Batteries used in Electric Vehicles – Final Project Report by Ricardo Energy & Environment for the JRC. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019. Disponible à l'adresse : <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/circular-economy-perspectives-management-batteries-used-electric-vehicles>
- Hui, 2017** : A. HUI, Understanding the positioning of “the electric vehicle consumer”: variations in interdisciplinary discourses and their implications for sustainable mobility systems. *Applied Mobilities*, 2017.
- Huss & Weingerl, 2020** : A. HUSS, P. WEINGERL, JEC Tank-To-Wheels report v5: Passenger cars — Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020. Disponible à l'adresse : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC117560>
- IEA, 2020** : IEA (International Energy Agency), Global EV Outlook 2020 – Entering the decade of electric drive? 2020. Disponible à l'adresse : <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>
- IPCC, 2014** : IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, RK. PACHAURI and LA. MEYER (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. Disponible à l'adresse : <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Jensen et al., 2013** : AF. JENSEN, E. CHERCHI, SL. MABIT, On the stability of preferences and attitudes before and after experiencing an electric vehicle. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 25, 2013, pp. 24–32.
- Kühl et al., 2019** : N. KÜHL, M. GOUTIER, A. ENSSLEN, P. JOCHEM, Literature vs. Twitter: Empirical insights on customer needs in e-mobility. *Journal of Cleaner Production*, vol. 213, 2019, pp. 508–520.
- Laurischkat et al., 2016** : K. LAURISCHKAT, A. VIERTELHAUSEN, D. JANDT, Business Models for Electric Mobility. *Procedia CIRP*, vol. 47, 2016, pp. 483–488.
- Lucas et al., 2012** : A. LUCAS, R.C. NETO, C.A. SILVA, Impact of energy supply infrastructure in life cycle analysis of hydrogen and electric systems applied to the Portuguese transportation sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, 2012, pp. 10973–10985.
- Ministère de la transition écologique, 2021** : Ministère de la transition écologique, Schémas directeurs pour les infrastructures de recharge pour véhicules électriques. Mai 2021.
- Nansai et al., 2001** : K. NANSAI, S. TOHNO, M. KONO, M. KASAHARA, Y. MORIGUCHI, Life-cycle analysis of charging infrastructure for electric vehicles. *Applied Energy*, vol. 70, 2001, pp. 251–265.
- Obadia, 2015** : A. OBADIA, Le stockage de l'énergie électrique : une dimension incontournable de la transition énergétique, avis du Conseil économique social et environnemental. *Journal officiel de la République Française*, mandature 2010-2015 - séance du 9 juin 2015. 2015. Disponible à l'adresse : www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/154000390.pdf
- Rezvani et al., 2015** : Z. REZVANI, J. JANSSON, J. BODIN, Advances in consumer electric vehicle adoption research: A review and research agenda. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 34, 2015, pp. 122–136

Index des tableaux et figures

Tableaux

Tableau 1 : Planning du PRC détaillé par phase et présentation des objectifs des livrables	7
Tableau 2 : Description de paramètres influents sur le choix ou le refus d'adopter un véhicule électrique	17
Tableau 3 : Description des paramètres d'entrée et de sortie du simulateur de mobilité électrique et de leurs dépendances par rapport aux différents parties prenantes de la mobilité (en gris clair : élément non traité à ce jour).....	20
Tableau 4 : Potentiels d'impacts évalués et méthodes de caractérisation utilisées	30
Tableau 5 : Définition des comportements des utilisateurs à travers la répartition de la gestion des états de charge.....	35
Tableau 6 : Paramètres de simulation par défaut pour les tests de sensibilité.....	38
Tableau 7 : Synthèse qualitative des effets de certains choix de conception sur quelques indicateurs de performance	42
Tableau 8 : Estimation du nombre de bornes, des coûts d'investissement cumulés pour leur installation et de la consommation électrique dans les stations-services de l'A6 modélisée et du réseau autoroutier concédé en 2023 et en 2030	44

Figures

Figure 1 : Exemple de batterie sur remorque : EP-Tender	10
Figure 2 : Évolution du nombre annuel d'immatriculation de véhicules particuliers neufs en France a) pour toutes les sources d'énergie et b) pour les sources d'énergies alternatives	13
Figure 3 : Évolution du nombre de bornes en France destinées au public, installées chez le particulier ou dans les sociétés	14
Figure 4 : Comparaison de l'autonomie de véhicules de Stellantis et du groupe Renault en fonction de la vitesse de circulation, sans chauffage ni climatisation et à température extérieure fixée à 20°C	15
Figure 5 : Temps de recharge estimées selon la technologie de recharge utilisée pour une recharge de 0 % à 80 % des batteries de 52 kWh de la Zoé R110 ou R135 ayant un chargeur embarqué de 22 kW maximum.....	16
Figure 6 : Description initiale du problème de recherche traité dans ce PRC : la conception d'un système complexe de mobilité électrique.....	20
Figure 7 : Description des sept étapes de conception du simulateur et liste des principaux résultats déterminés lors d'une simulation	22
Figure 8 : Exemple de voie d'un axe routier correspondant au sens de circulation des PR croissants	22
Figure 9 : Puissance de recharge en fonction de l'état de charge de la batterie pour une recharge de a) 50 kW et b) de 150 kW (données moyennes pour plusieurs véhicules).....	23
Figure 10 : Détermination des lieux de recharge pour le trajet 1-5 à partir du calcul de la portée effective <i>D_{lim}</i>	24
Figure 11 : Caractéristique permettant de calculer la puissance de la recharge à un état de charge donné en fonction de la puissance maximale de la recharge	24
Figure 12 : Étapes de la méthode établie pour évaluer la matrice origine-destination à partir des données brutes de mesure de trafic.....	25
Figure 13 : Répartition du trafic entre les deux sens de circulation de l'A7 (autoroute entre Lyon et Marseille) au point de mesure du PR 7,913 proche de Saint-Fons a) en juillet 2018 avec un pas journalier et b) le 21 juillet 2018 avec un pas horaire.....	26
Figure 14 : Schéma décrivant les flux entrants et sortant à un nœud routier, c'est-à-dire, un échangeur	26
Figure 15 : a) Part de BEV par rapport à l'ensemble des véhicules immatriculés au premier trimestre 2021, b) décomposition par catégorie de véhicules et c) part de BEV estimés effectuer des trajets longs et décomposition par catégorie.....	28

Figure 16 : Répartition du trafic journalier entre les deux sens de circulation de l'A7 (autoroute entre Lyon et Marseille) au point de mesure du PR 16,834 proche de Communay en 2018	29
Figure 17 : Coûts d'installation et d'exploitation de bornes type Wallbox (7 à 22 kVA), 50 kVA et 150 kVA pour 10 ans d'exploitation	29
Figure 18 : Hypothèses majeures de l'évaluation environnementales réalisée	31
Figure 19 : Lien entre masse et puissance des bornes de recharge $\geq 50 \text{ kW}$ de différents constructeurs	32
Figure 20 : Moyennes journalières du trafic au cours de l'année 2018 (TMJA) sur l'autoroute A6 entre Paris et Lyon avec détail des emplacements des échangeurs	33
Figure 21 : Part de BEV dans le parc automobile français et estimation de sa croissance jusqu'en 2030 d'après une adaptation de l'auteur des scénarios mondiaux de l'IAE (2020) et des objectifs de la PPE.....	34
Figure 22 : Nombre de bornes et leurs taux d'occupation moyens et maximal par aire de service a) du côté PR croissants et b) du côté PR décroissants	35
Figure 23 : Comparaison des temps de trajet pour différents types de véhicules en décomposant le temps de circulation à 130 km/h et le temps de pauses ou des recharges	36
Figure 24 : Temps de trajet moyen en fonction de la vitesse de circulation de la flotte et du type de véhicule considéré	37
Figure 25 : Évaluation de l'effet du choix de la durée des charges sur les temps de trajets pour un BEV moyen de 2020.....	37
Figure 26 : Impacts environnementaux générés par les BEV sur l'A6 en une heure moyenne de circulation à l'horizon 2024 (mix électrique français) en incluant les impacts dus à l'usage des véhicules, à la consommation d'électricité induite, des pertes lors des recharges rapides et la consommation passive des bornes.	38
Figure 27 : Influence de la puissance des bornes installées sur le territoire sur le nombre de bornes nécessaires et le temps de trajet moyen.....	39
Figure 28 : Influence de l'augmentation de la puissance de recharge maximale des véhicules (en supposant la puissance des bornes suffisante) sur le nombre de bornes et sur les temps passés à recharger en comparant si des bornes de 175 kW ou de 350 kW sont installées	40
Figure 29 : Influence de l'augmentation de la capacité des batteries sur le nombre de bornes et le temps de trajet moyen	41
Figure 30 : Conséquences sur les impacts environnementaux liés à la circulation des BEV sur le territoire de la multiplication par deux des capacités de batterie (détail des abréviations des impacts	41
Figure 31 : Effet de l'installation des bornes sur toutes les aires au lieu de seulement sur les aires de service	42
Figure 32 : Évolution du nombre de bornes de 175 kW nécessaires sur l'autoroute A6 entre 2020 et 2030 selon 4 scénarios.....	43

Annexes

Annexe A : Participants à l'atelier de lancement du PRC (animateurs en gras)	57
Annexe B : Emplacements des bornes de recharge rapide en service et en projet sur les aires d'autoroutes en France.....	58
Annexe C : Représentation technique du système complexe de mobilité électrique incluant l'ensemble des interactions entre les différentes caractéristiques de ses sous-systèmes	59
Annexe D : Paramètres d'entrée et de sortie du simulateur de mobilité électrique conçu.....	60
Annexe E : Comparaison entre la puissance maximale et la puissance moyenne pour des recharges entre 10 et 90 % d'état de charge et pour différents véhicules	61
Annexe F : Algorithme de calcul des flux de véhicules entrants et sortants à chaque échangeur de l'axe considéré.....	62
Annexe G : Exemple d'un calcul des flux de trafic dans une matrice origine-destination à partir des flux entrants et sortants à chaque échangeur selon l'algorithme <i>ad hoc</i>	63
Annexe H : BEV les plus immatriculés au premier trimestre de 2021 et leurs principales caractéristiques techniques	64
Annexe I : Synthèse des études proposant des ACV de stations de recharge	65
Annexe J : Évolutions prévues dans les BEV vendus jusqu'en 2030 selon deux scénarios	66
Annexe K : Estimation du nombre de bornes nécessaires sur l'A6 à l'horizon 2024 et du temps de trajet moyen en fonction de la vitesse de circulation des BEV.....	67

Annexe L : Comparaison des temps de trajets moyens en fonction de la vitesse de circulation pour a) les BEV actuels rechargés sur des bornes de 175 kW et b) les BEV de 2030 (scénario de forte évolution technologique) rechargés sur des bornes de 175 kW 68

Annexe M : Impacts environnementaux moyens annuels causés en une heure de circulation en incluant les impacts dus à l'usage des véhicules, à la consommation d'électricité induite, à l'approvisionnement en matériaux pour les bornes, aux pertes lors des recharges rapides et à la consommation passive des bornes (mix électrique de l'Union Européen des 28)..... 69

Sigles et acronymes

AC	<i>Alternative current</i> (courant alternatif)
ACV	Analyse sur Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
ADPe	<i>Depletion of Abiotic Resources – Elements</i> (déplétion des ressources abiotiques)
AFNOR	Association Française de normalisation
AP	<i>Acidification Potential</i> (Potentiel d'acidification)
APRR	Autoroute Paris-Rhin-Rhône
AREA	Société des Autoroutes Rhône-Alpes
ASFA	Association des Sociétés Françaises d'Autoroutes
ASP	Agence de Services et de Paiement
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> (véhicule électrique à batterie)
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique
DC	<i>Direct current</i> (courant continu)
DIRCE	Direction des Routes du Centre-Est
EcoSD	Eco-conception de Systèmes pour un Développement durable
EEA	<i>European Environment Agency</i> (AEE, Agence Européenne pour l'Environnement)
EP	<i>Eutrophication Potential</i> (potentiel d'eutrophisation)
GES	Gaz à Effet de Serre
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (Potentiel de réchauffement climatique)
ICEV	<i>Internal Combustion Engine Vehicle</i> (véhicule à moteur à combustion interne)
IEA	<i>International Energy Agency</i> (AIE, Agence Internationale de l'Énergie)
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organisation internationale de normalisation)
MD	<i>Metal Depletion</i> (déplétion des métaux)
PED	<i>Primary Energy Demand</i> (demande d'énergie primaire)
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i> (véhicule électrique hybride rechargeable)
POCP	<i>Photochemical Ozone Creation Potential</i> (potentiel de création d'ozone photochimique)
PPE	Programmation Pluriannuelle de l'Énergie
PR	Point de Repère routier
PRC	Projet de Recherche Collaborative
Sanef	Société des autoroutes du Nord et de l'Est de la France
SDES	Service des Données et Études Statistiques
SoC	<i>State of Charge</i> (état de charge de la batterie)
VE	Véhicule électrique
WLTP	<i>Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures</i> (procédure d'essai mondiale harmonisée pour les véhicules légers)
ZFE	Zone à Faible Émission (LEZ, <i>Low Emission Zone</i>)

Annexes

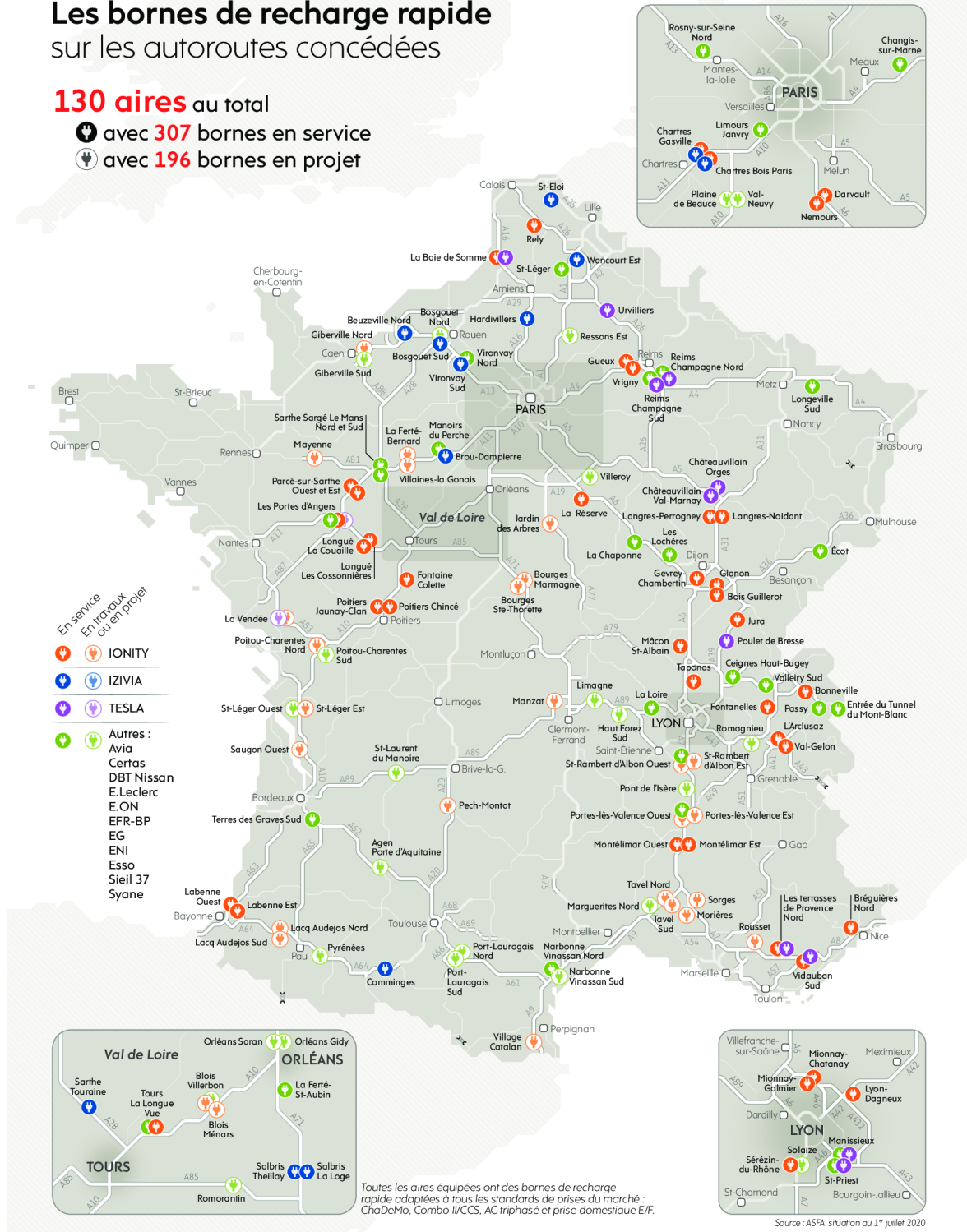
Annexe A : Participants à l'atelier de lancement du PRC (animateurs en gras)

NOM	Prénom
BEN HAMIDA	Amira
BERGER	Nicolas
BOUBAKR	Rahmani
BEN REJEB	Helmi
BOUILLASS	Ghada
BOUTER	Anne
CAPOMACCIO	Anne-Laure
GALL	Tjark
GARCIA	Julien
GROSJEAN	Gaston
GUYON	Olivier
PEREZ-LOPEZ	Paula
PERRY	Nicolas
PRADEL	Maryliss
RICHET	Sophie
TERNEL	Cyprien
TYL	Benjamin
VALLET	Flore
VIDAL	Fabrice

Les bornes de recharge rapide sur les autoroutes concédées

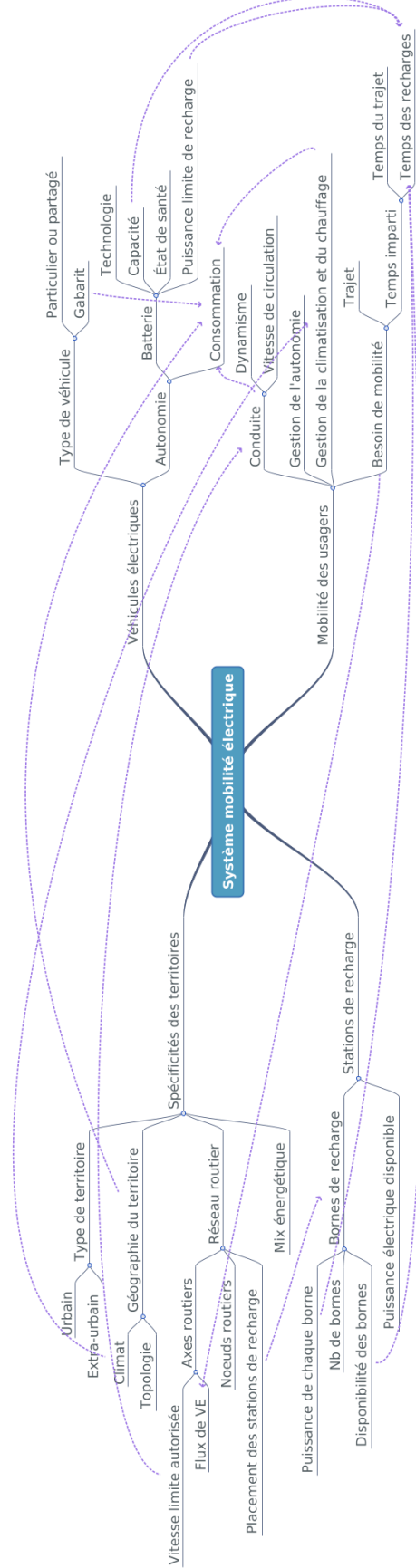
130 aires au total

- 🟢 avec **307** bornes en service
- 🟡 avec **196** bornes en projet



³¹ ASFA (Association des Sociétés Françaises d'Autoroutes). Les bornes de recharge rapide sur les autoroutes concédées. 1er juillet 2020. www.autoroutes.fr/fr/bornes-recharge.htm [consulté le 2021/05]

Annexe C : Représentation technique du système complexe de mobilité électrique incluant l'ensemble des interactions entre les différentes caractéristiques de ses sous-systèmes

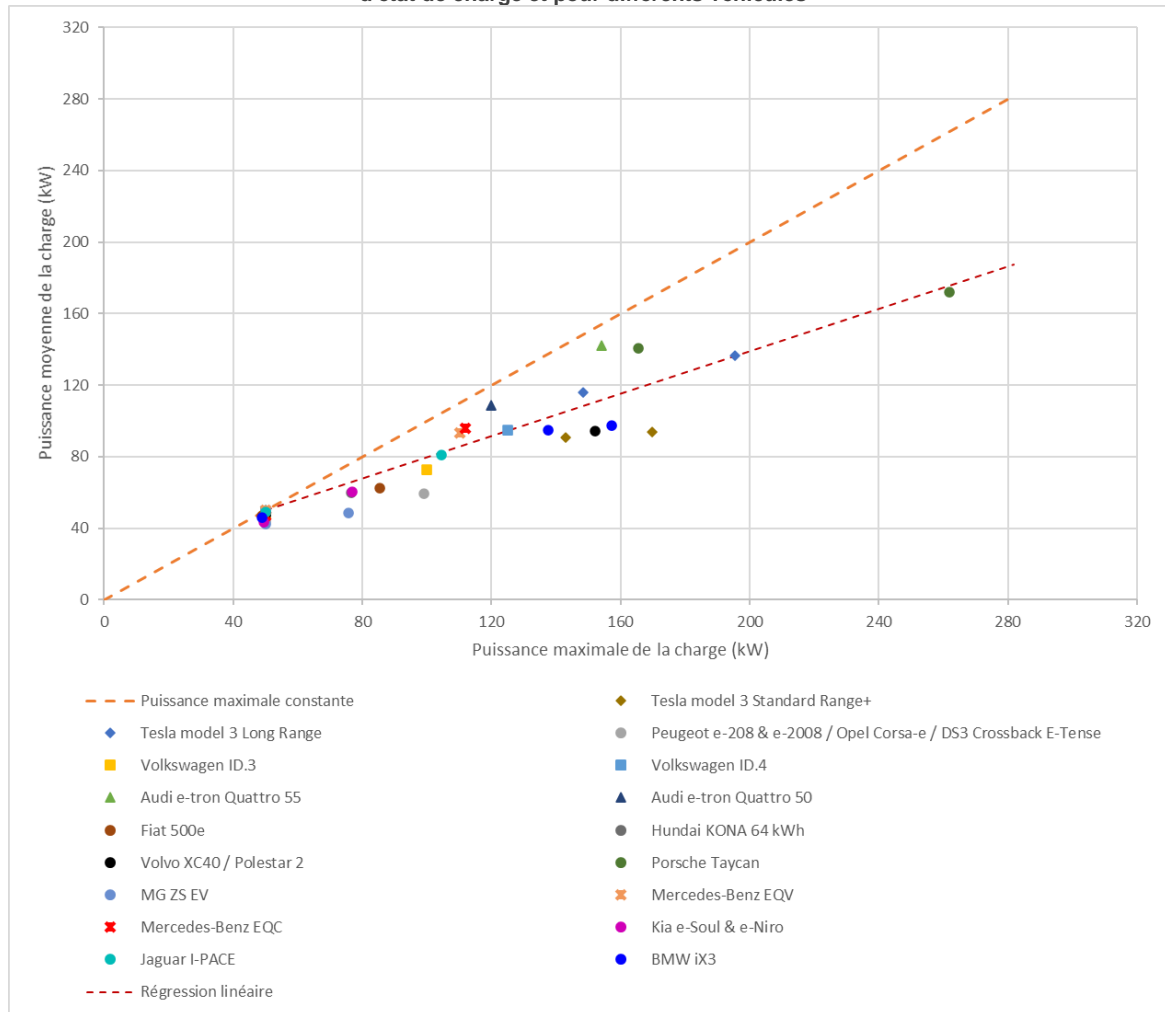


Annexe D : Paramètres d'entrée et de sortie du simulateur de mobilité électrique conçu

Paramètre d'entrée	Variable liée	Nature
Axe routier	Position des échangeurs et leurs natures (partiel ou complet)	Fixe (cas d'étude : A6)
	Position des aires d'autoroute et leurs natures (repos ou service)	
	Temps nécessaire pour accéder et quitter la station et gérer la recharge	Fixe (4 min)
Trafic	Trafic moyen journalier annuel entre chaque échangeur	Fixe (cf. Figure 20)
	Taux de répartition par sens de circulation	Fixe (cf. 5.1.2.1.3)
	Taux de renouvellement des véhicules à chaque échangeur complet	
	Facteur d'affluence	Fixe (cf. 5.1.3.1)
Description BEV	Proportion du BEV considéré dans la flotte de voitures circulant sur la route	Variable (cf. Figure 15 et scénarios Figure 21)
	Vitesse de circulation	Variable (cf. Figure 15 et scénarios Annexe J)
	Consommation	
	Capacité de la batterie	
	Puissance maximale admissible lors de la recharge	Fixe (cf. Figure 15 et batteries supposées de 0,14 kWh/kg)
Masse à vide hors batterie du BEV		
Intégration du comportement des usagers	Gestion de l'état de charge	Variable (valeurs de base dans le Tableau 5)
Description de la stratégie de recharge	Aires désignées comme stations de recharge	Fixe (stations = aires de service, sauf en partie 5.2.3.4)
	Puissance des bornes installées sur toutes les stations	Variable
Données environnementales	Données de résultats d'ACV d'un véhicule type de Stellantis	Fixe (cf. 5.1.3.3.2)
	Données d'ACV du mix électrique	Fixe (mix français)
	Données d'ACV de la phase d'approvisionnement en matériaux pour les bornes de recharge	Fixe (cf. 5.1.3.3.2)

Paramètres de sortie	Variable liée
Évaluation de la mobilité par couple {modèle de BEV + comportement}	Distance parcourue en un an
	Énergie électrique consommée en un an
	Énergie électrique rechargée sur les stations de l'axe considéré en un an
	Temps de trajet moyen
	Part moyenne du temps de trajet passée à recharger
	Part moyenne du temps de trajet passée à circuler
	Nombre moyen de recharges par trajet
Dimensionnement de chaque station	Nombre de bornes
	Masses des bornes installées
	Coûts d'investissement pour l'installation et l'exploitation des bornes installées
	Taux d'occupation
Potentiels d'impacts environnementaux	Cf. Tableau 4

Annexe E : Comparaison entre la puissance maximale et la puissance moyenne pour des recharges entre 10 et 90 % d'état de charge et pour différents véhicules³²



³² Traitement des données et mise en forme : auteur. Ces graphiques ont été créés à partir des courbes de charge de différents véhicules fournies par l'opérateur de stations de recharge rapide Fastned. Fastned. Chargeur ultra-rapide >150 kW. <https://support.fastned.nl/hc/fr/articles/115015420127-Chargeur-ultra-rapide-150-kW> [consulté le 2021/05]

Annexe F : Algorithme de calcul des flux de véhicules entrants et sortants à chaque échangeur de l'axe considéré

Si l'échangeur n dispose uniquement d'une entrée *ou* d'une sortie dans le sens de circulation s considéré, alors :

Si $Trafic_s(n-1) < Trafic_s(n)$:

$$Entrants_s(n) = Trafic_s(n) - Trafic_s(n-1)$$

$$Sortants_s(n) = 0$$

Éq. 9

Sinon :

$$Entrants_s(n) = 0$$

$$Sortants_s(n) = Trafic_s(n-1) - Trafic_s(n)$$

Avec :

$Trafic_s(n)$, le flux de véhicules dans le sens de circulation s et en aval de l'échangeur n (en véhicules/unité de temps) ;

$Entrants_s(n)$, le flux de véhicules entrants à l'échangeur n dans le sens s de l'axe routier (en véhicules/unité de temps) ;

$Sortants_s(n)$, le flux de véhicules sortants à l'échangeur n dans le sens s de l'axe routier (en véhicules/unité de temps).

Si l'échangeur n dispose d'une entrée *et* d'une sortie dans le sens de circulation s considéré, alors :

Si $Trafic_s(n-1) < Trafic_s(n)$:

$$Entrants_s(n) = Trafic_s(n) - Trafic_s(n-1) + R \cdot \min(Trafic_s(n-1), Trafic_s(n))$$

$$Sortants_s(n) = R \cdot \min(Trafic_s(n-1), Trafic_s(n))$$

Éq. 10

Sinon :

$$Entrants_s(n) = R \cdot \min(Trafic_s(n-1), Trafic_s(n))$$

$$Sortants_s(n) = Trafic_s(n-1) - Trafic_s(n) + R \cdot \min(Trafic_s(n-1), Trafic_s(n))$$

Avec :

R , facteur moyen de renouvellement aux échangeurs.

Annexe G : Exemple d'un calcul des flux de trafic dans une matrice origine-destination à partir des flux entrants et sortants à chaque échangeur selon l'algorithme *ad hoc*

	Sorties <i>j</i> :	1	2	3	4	5	6	7		
Entrées <i>i</i> :									Entrants à i :	Restants à la sortie 3 :
1			20						100	100-20
2									10	10
3									10	10
4									10	10
5									10	10
6									10	10
7									0	0
	Sortants à <i>j</i> :	0	20	20	20	20	20	60		
	Sorties <i>j</i> :	1	2	3	4	5	6	7		
Entrées <i>i</i> :									Entrants à i :	Restants à la sortie 3 :
1			20	$20 - \frac{80}{80+10}$					100	80
2				$20 \frac{10}{80+10}$					10	10
3									10	10
4									10	10
5									10	10
6									10	10
7									0	0
	Sortants à <i>j</i> :	0	20	20	20	20	20	60		
	Sorties <i>j</i> :	1	2	3	4	5	6	7		
Entrées <i>i</i> :									Entrants à i :	Restants à la sortie 4 :
1			20	18	$20 - \frac{62}{62+8+10}$				100	62
2				2	$20 \frac{8}{62+8+10}$				10	8
3					$20 \frac{10}{62+8+10}$				10	10
4									10	10
5									10	10
6									10	10
7									0	0
	Sortants à <i>j</i> :	0	20	20	20	20	20	60		
	Sorties <i>j</i> :	1	2	3	4	5	6	7		
Entrées <i>i</i> :									Entrants à i :	
1			20	18	15	13	11	22	100	
2				2	2	2	1	3	10	
3					3	2	2	4	10	
4						3	2	5	10	
5							3	7	10	
6								10	10	
7									0	
	Sortants à <i>j</i> :	0	20	20	20	20	20	60		

Sommes des lignes de la matrice égales aux totaux d'entrants à chaque échangeur et sommes des colonnes égales aux totaux de sortants à chaque échangeur (aux arrondis près, appliqués pour la lisibilité de l'exemple)

Annexe H : BEV les plus immatriculés au premier trimestre de 2021 et leurs principales caractéristiques techniques³³

Véhicule	Modèle	Capacité batterie (kWh)	Puissance recharge maximale (kW)	Consommation à 120km/h et à 20°C (kWh/km) ³⁴	Masse à vide mini véhicule (kg)	Nb. d'immatriculations ³⁵
TESLA MODEL 3	Autonomie Standard Plus	57	170	0,18	1645	5763
	Grande autonomie ou Performance	77	195	0,20	1853	
PEUGEOT E-208		50	100	0,20	1455	4497
RENAULT ZOE	R110/R135	52	50	0,20	1475	3606
RENAULT TWINGO ZE		22	22	0,17	1111	2294
KIA E-NIRO	136 ch, 39,2 kWh	42	77	0,22	1592	1942
	204 ch, 64 kWh	67	77	0,22	1737	
FIAT 500 ELECTRIQUE	57 kW (95 ch), 23,7 kWh	23,7	50	0,19	1290	1865
	70 kW (118 ch), 42 kWh	42	85	0,20	1365	
PEUGEOT E-2008		50	100	0,22	1548	1315
HYUNDAI KONA	39 kWh	39,2	55	0,20	1535	1184
	64 kWh	64	77	0,20	1685	
VOLKSWAGEN ID.3	City	45	100	0,19	1500	1030
	Life, Business, Family, Tech ou Max	58	100	0,21	1805	
	Tour	77	125	0,21	1934	
NISSAN LEAF	LEAF	40	50	0,21	1580	851
	LEAF e+	62	100	0,24	1731	
MINI COOPER SE		32,6	50	0,19	1440	817
OPEL CORSA		50	100	0,21	1455	693
DS3 CROSSBACK E TENSE		50	100	0,24	1500	516
CITROEN E-C4		50	100	0,20	1541	446
VOLKSWAGEN E-UP		33,2	50	0,19	1200	422
VOLKSWAGEN ID.4	City ou Style	52	100	0,23	1966	422
	Life, Business, Family, Tech ou Max	77	125	0,22	2124	
SMART FORTWO EV		18,5	22	0,20	985	380
BMW I3		42	50	0,18	1320	348
DACIA SPRING		27,4	30	0,18	970	325
SEAT MII		36,8	40	0,21	1200	246
KIA SOUL EV		33	77	0,22	1480	237
MG ZS EV		44,5	76	0,26	1491	189
AUDI E-TRON	50 Quattro	71	120	0,29	2370	117
	55 Quattro ou S	95	154	0,32	2505	
Autres						984
TOTAL des immatriculations de 2021						30489

³³ Les caractéristiques techniques sont soit issues directement des sites ou documentations des constructeurs, soit des fiches techniques issus des pages des véhicules sur <https://www.automobile-propre.com/voiture-electrique/#modeles-voitures-electriques>

³⁴ Les consommations sont issues des estimations d'autonomie basées sur les consommations WLTP d'Automobile propre. Automobile propre. Simulateur d'autonomie (version bêta). <https://www.automobile-propre.com/simulateur-autonomie-voiture-electrique/> [consulté le 2021/05]

³⁵ Automobile propre. Chiffres de vente & immatriculations de voitures électriques en France. 2021. <https://www.automobile-propre.com/dossiers/chiffres-vente-immatriculations-france/> [consulté le 2021/05]

Annexe I : Synthèse des études proposant des ACV de stations de recharge

Study	Nansai et al., 2001	Lucas et al., 2012	Zhang et al., 2019
Source		EFACEC	China Electric Vehicle Charging
Type	"Level 2 charging station"	"Quick charger 43kVA AC or 50kW DC"	"Public DC charger 60-360 kW DC"
System boundary	Charger and stand (here, storage battery is excluded) : production , transportation and installation	Charger and auxiliary building material	Electronic shell, connector (or plug) and cable, transformer, contactor, and resistor ; Electric energy consumption of the manufacturing stage ; Relative waste discharge
Material :			
Copper (kg)	91	206	12
Aluminium	51	34	10
Iron (kg)		228	81
Concrete (kg)		2400	
Stainless	473	90	114
PVC (kg)		12	
ABS, Glass fibre, PVC (kg)		380	
Rubber (kg)			12
Characteristics			
Lifetime (ans)		12	12
Efficiency during charge			85-95%
Impacts environnementaux			
Energy		59500 MJeq 0,09-0,14 (min-max) MJeq/km	1,62 MJeq/kWh
GHG	3,97 Mg-C	2900 kg CO ₂ eq 4,9-7,0 (min-max) kg CO ₂ eq/km	112 gCO ₂ eq/kWh
Notes			The use stage (electricity loss) causes most of the environmental impacts

Annexe J : Évolutions prévues dans les BEV vendus jusqu'en 2030 selon deux scénarios

		Vitesse des véhicules (en km/h)	Facteur d'évolution de la consommation	Facteur d'augmentation des capacités de batterie	Facteur d'augmentation des puissances des recharges
Forte évolution technologique	2020	120	1	1	1
	2021				
	2022				
	2023				
	2024				
	2025	121,5	0,9883	1,05	1,1667
	2026	123	0,9767	1,1	1,3333
	2027	124,5	0,965	1,15	1,5
	2028	126	0,9533	1,2	1,6667
	2029	127,5	0,9417	1,25	1,8333
2030	129 ³⁶	0,93 ³⁷	1,3 ³⁸	2 ³⁹	
Faible évolution technologique	2020	120	1	1	1
	2021				
	2022				
	2023				
	2024				
	2025	121,5	1	1,025	1,0833
	2026	123	1	1,05	1,1667
	2027	124,5	1	1,075	1,25
	2028	126	1	1,1	1,333
	2029	127,5	1	1,125	1,417
2030	129 ³⁶	1 ³⁷	1,15 ³⁸	1,5 ³⁹	

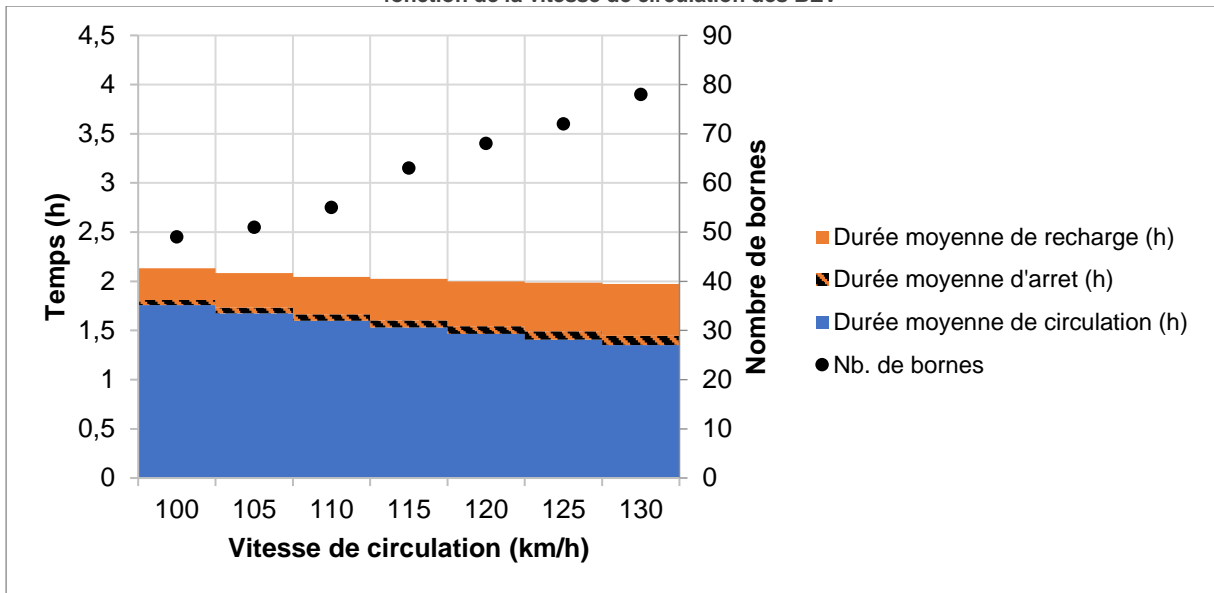
³⁶ La Sanef a observé que la vitesse moyenne des véhicules légers est de 129 km/h. Sanef. Dossier de presse — Résultats de l'observatoire sanef des comportements. 8^{ème} édition, juillet 2019. Disponible à l'adresse : <https://www.groupe.sanef.com/fr/journalistes/dossiers-presse>

³⁷ D'après un entretien avec des experts automobiles, des progrès sont possibles pour diminuer la consommation des BEV. Le rapport de [Huss & Weingerl \(2020\)](#) estime à 28 % cette réduction entre les BEV de 2025 par rapport à ceux de 2015 (consommations évaluées sur cycle NEDC).

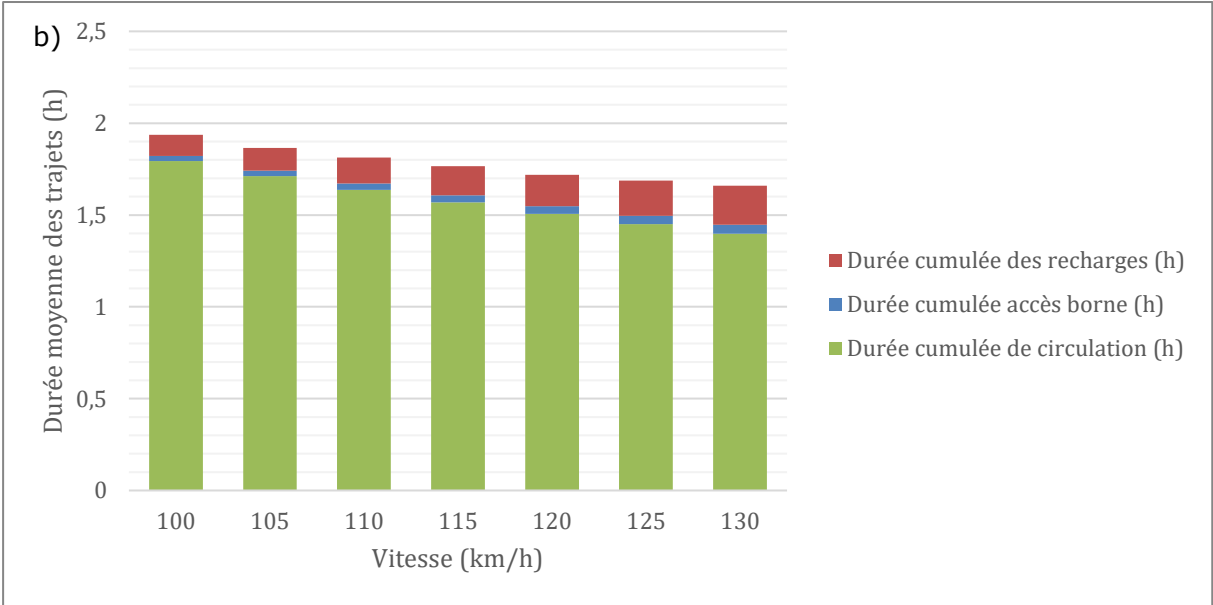
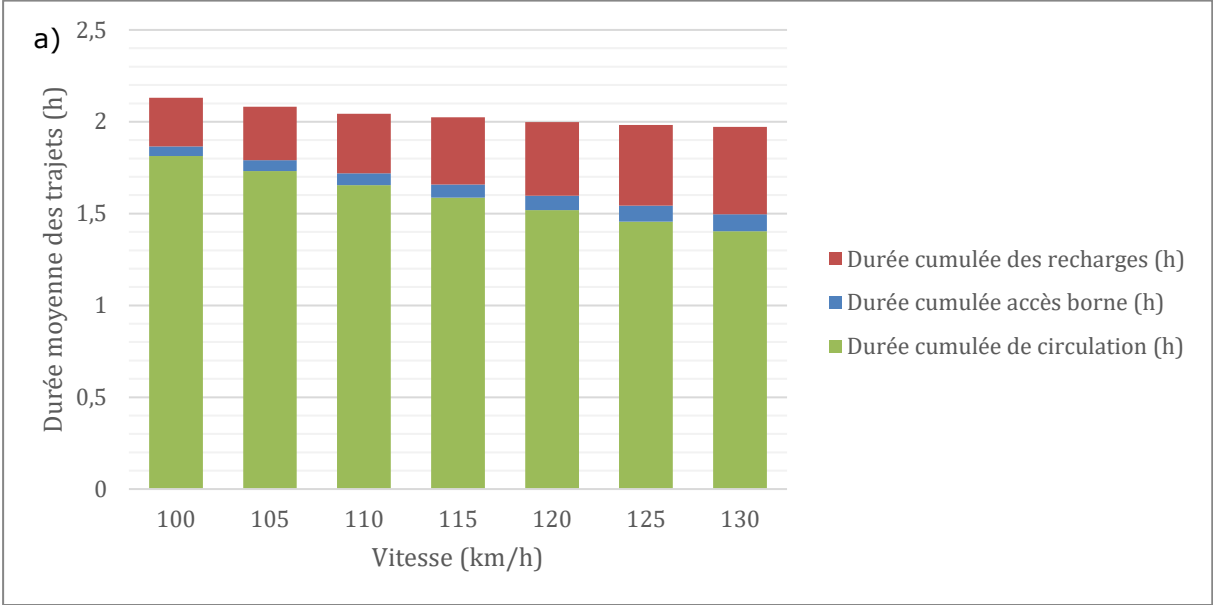
³⁸ D'après l'[IAE \(2020\)](#), les BEV de 2030 auraient des tailles de batterie comprises entre 70 et 80 kWh, contre 50 kWh environ en moyenne français au premier trimestre 2021. Selon un entretien avec des experts automobiles, une étude interne prévoit des BEV ayant en moyenne des batterie 15 % plus importantes.

³⁹ D'après un entretien avec des experts automobiles, les BEV de 2030 pourraient se recharger à des puissances jusqu'à 2 fois plus importantes qu'aujourd'hui à capacité de batterie considérée constante.

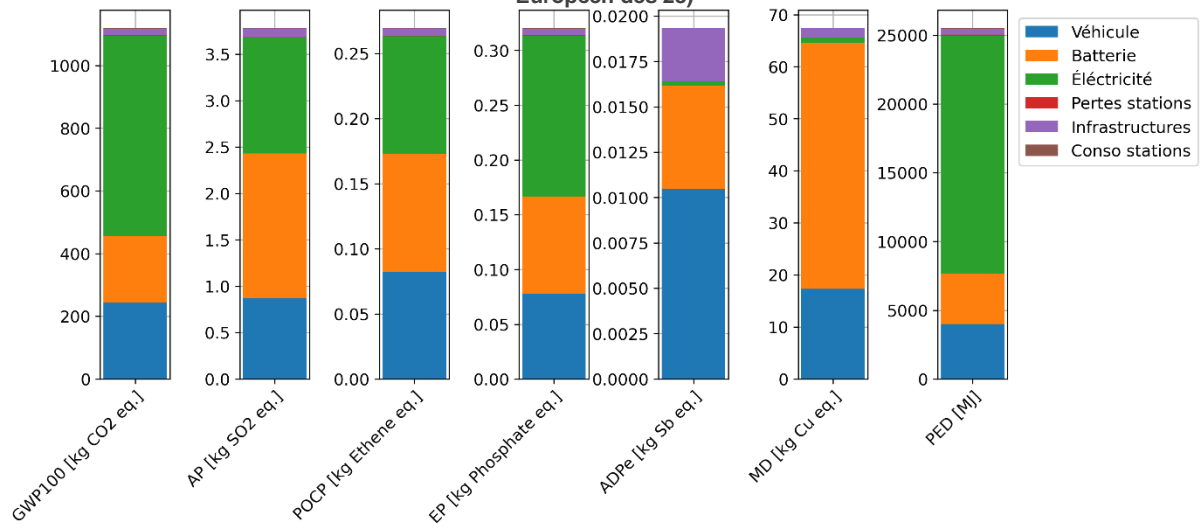
Annexe K : Estimation du nombre de bornes nécessaires sur l'A6 à l'horizon 2024 et du temps de trajet moyen en fonction de la vitesse de circulation des BEV



Annexe L : Comparaison des temps de trajets moyens en fonction de la vitesse de circulation pour a) les BEV actuels rechargés sur des bornes de 175 kW et b) les BEV de 2030 (scénario de forte évolution technologique) rechargés sur des bornes de 175 kW



Annexe M : Impacts environnementaux moyens annuels causés en une heure de circulation en incluant les impacts dus à l'usage des véhicules, à la consommation d'électricité induite, à l'approvisionnement en matériaux pour les bornes, aux pertes lors des recharges rapides et à la consommation passive des bornes (mix électrique de l'Union Européen des 28)



L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.





ÉCO-CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE MOBILITÉ COMPRENANT VÉHICULES TOUT- ÉLECTRIQUES ET RESEAU DE RECHARGE

La mobilité électrique est en plein développement et répond notamment aux objectifs contre le changement climatique et contre les pollutions urbaines. En outre, les ventes de véhicules tout-électriques restent encore minoritaires car leur adoption à plus grande échelle est notamment limitée par la mobilité longue distance.

Une étude globale du système de mobilité qui inclut véhicules, infrastructures et usagers est proposée pour permettre de saisir les enjeux liés aux contraintes d'autonomie, de vitesse de recharge et de densité du réseau de recharge. Un simulateur a été développé pour évaluer et comparer les performances du système dans différentes situations d'usage.

Cette étude de la mobilité longue distance formule des recommandations pour dimensionner les batteries et les réseaux de recharges, préconise des bonnes pratiques pour les usagers et suggère quelques éclairages plus généraux sur la mobilité.

En quoi la mobilité longue-distance est une barrière pour l'adoption des véhicules tout-électriques ?

*Quels sont les dimensionnements de batterie et les usages à préconiser ?
Quels sont les besoins pour les réseaux de recharge ?*

Éclairage par une analyse multicritère

