

n°41

Mai

2011

TRANSPORT

Les véhicules électriques en perspective Analyse coûts-avantages et demande potentielle

ÉCONOMIE ET ÉVALUATION



Présent
pour
l'avenir

**Collection « Études et documents »
du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable
(SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)**

Directrice de la publication : Françoise Maurel

Auteurs : Stéphanie Depoorter (CGDD) et Pierre-Marie Assimon (stagiaire AgroParisTech, Master « Economie du développement durable, de l'environnement et de l'énergie » - EDDEE)

Contact : Stéphanie Depoorter et Olivier Teissier
Stephanie.depoorter@developpement-durable.gouv.fr
Olivier.teissier@developpement-durable.gouv.fr

Date de publication : Mai 2011

Ce document n'engage que ses auteurs et non les institutions auxquelles ils appartiennent.
L'objet de cette diffusion est de stimuler le débat et d'appeler des commentaires et des critiques.

SOMMAIRE

Introduction	2
PARTIE I.....	3
Bilan coûts-avantages des véhicules électriques par rapport à différents véhicules thermiques.....	3
Résumé.....	3
1. Cadre et hypothèses de l'étude	4
1.1. Eléments de contexte.....	4
1.1.1. L'objectif du « facteur 4 ».....	4
1.1.2. La réduction des émissions dans les transports : trois leviers d'action.....	4
1.1.3. Un contexte favorable au développement du marché des véhicules électriques.....	5
1.1.4. Présentation des véhicules rechargeables et de la batterie	5
1.2. Méthodologie et hypothèses générales de l'étude	6
1.2.1. Une comparaison entre véhicules thermiques et véhicules électriques à performances et usages comparables.....	6
1.2.2. Le développement du marché des véhicules électriques	8
1.1.3. Le choix du taux d'actualisation.....	8
2. Coûts totaux de possession	9
3. Les coûts liés au déploiement du réseau d'infrastructures de recharge	15
4. Bilan des coûts externes.....	20
4.1. Coût des émissions de CO ₂	20
4.2. Coût des polluants locaux.....	22
4.3. Valorisation du bruit.....	24
4.4. Bilan des externalités	25
5. Analyse coûts-avantages comparative des véhicules électriques	26
PARTIE II.....	31
Développement des véhicules électriques et mobilité des usagers :	31
Analyse de la demande potentielle à partir de l'Enquête Nationale Transports Déplacements (ENTD 2008)	31
Résumé.....	31
1. Cadre de l'étude, présentation de l'Enquête Nationale Transports Déplacements	32
1.1. Caractéristiques des véhicules électriques étudiés	32
1.2. Présentation de l'ENTD	32
2. Les perspectives de développement des véhicules électriques au regard des résultats de l'ENTD	33
2.1. Les véhicules à disposition des ménages	33
2.2. Les distances parcourues au cours d'une journée	33
2.3. Les origines-destinations et motifs des déplacements locaux.....	37
2.4. Répartition horaire des déplacements au cours d'une journée	40
2.5. Disponibilité de places de stationnement.....	44
3. Couverture potentielle des déplacements par les véhicules électriques	45
3.1. Couverture potentielle des déplacements et des kilomètres parcourus.....	45
3.2. Parc potentiel de véhicules électriques.....	47
3.3. Bilan économique de la conversion d'une partie du parc en véhicules électriques	49
ANNEXES	52
ANNEXE 1 : Coûts totaux de possession pour un véhicule particulier	52
ANNEXE 2 : Les infrastructures de recharge nécessaires aux véhicules d'entreprise.....	53
ANNEXE 3 : Coûts du CO ₂ et coûts des polluants par phase du cycle de vie du véhicule.....	54
ANNEXE 4 : Coûts de la tonne de CO ₂ évitée.....	55
ANNEXE 5 : Analyse de sensibilité.....	56
ANNEXE 6 : Typologie des zones urbaines.....	57
Références bibliographiques	58

Introduction

Dans un contexte où le secteur des transports est responsable du tiers des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) d'origine énergétique en France, un plan national a été établi avec pour ambition de développer à grande échelle les véhicules automobiles électriques, qui incluent les véhicules tout électrique et les véhicules hybrides rechargeables. La pénétration de ces véhicules en France, sous réserve que leur énergie de propulsion provienne d'une électricité peu émettrice de carbone, est l'une des solutions avancées pour « décarboner » le secteur des transports, en couvrant les déplacements à courte distance assurés par les véhicules particuliers et utilitaires légers. A l'horizon 2020, ce sont 2 millions de véhicules électriques qui devraient être mis en circulation, selon les objectifs du plan gouvernemental. Un tel développement nécessitera le déploiement d'infrastructures de charge des batteries ; le plan prévoit la mise en place de 4 millions de prises dans le secteur privé, à domicile ou en entreprises, et 400 000 prises mises à disposition en voirie ou en parkings publics.

La présente étude s'inscrit dans ce contexte et propose de fournir des éléments chiffrés pour évaluer la diffusion à grande échelle de véhicules électriques et analyser la demande potentielle de ces véhicules. L'étude ne prétend pas fournir une évaluation exhaustive du plan gouvernemental ni décrire la faisabilité d'un déploiement de véhicules électriques, mais vise à donner certains éclairages *ex-ante*. Il s'agit de disposer de quelques pistes d'analyse, dans un cadre encore mouvant où les perspectives de développement sont de l'ordre du scénario prospectif.

Les résultats obtenus doivent être interprétés avec prudence : au-delà des nombreuses hypothèses émises et des scénarios élaborés, de nombreux aspects n'ont pu être abordés, faute de connaissances ou de données disponibles. Parmi ces aspects, on compte : les émissions de CO₂ lors des phases de production et de fin de vie d'un véhicule, l'extraction et le recyclage des matières premières et des éléments chimiques nécessaires à la conception des batteries, le bilan environnemental dans des pays tiers, l'indépendance énergétique ou encore l'impact du déploiement des véhicules électriques en termes d'emplois.

Le lecteur trouvera dans une première partie une analyse coûts-bénéfices du développement de véhicules électriques à partir des coûts estimés et des avantages espérés à l'horizon 2020. Dans une seconde partie, l'étude cherche à identifier une demande potentielle de véhicules électriques sur la base de l'enquête nationale transports déplacements (ENTD 2008) qui fournit des résultats récents sur la mobilité des français.

PARTIE I

Bilan coûts-avantages des véhicules électriques par rapport à différents véhicules thermiques

Résumé

Un plan national pour le développement des véhicules tout électrique et hybrides rechargeables a été lancé en octobre 2009. Ce plan vise un objectif de mise en circulation de 400 000 véhicules électriques (ou véhicules électriques rechargeables) à l'horizon 2015 et de 2 millions à l'horizon 2020.

La nouvelle génération de véhicules électriques devrait apparaître sur le marché automobile dès 2011. Elle inclut :

- le **véhicule tout électrique** qui fonctionne uniquement à partir d'une batterie rechargeable sur le secteur, de 100 à 150 kilomètres d'autonomie ;
- le **véhicule hybride rechargeable** qui dispose de deux énergies de propulsion : une batterie rechargeable sur le secteur et un moteur thermique traditionnel.

La présente étude est une évaluation qui met en regard, en 2010 et à l'horizon 2020, l'ensemble des coûts et des avantages estimés de la mise sur le marché de véhicules électriques, en remplacement des véhicules à motorisation « classique ». Les coûts évalués prennent en compte le coût total de possession d'un véhicule pour un particulier (achat, entretien, carburant ou électricité, batterie) et le coût de développement des infrastructures de recharge, qu'elles soient installées à titre privé ou public. Pour les infrastructures de recharge, le plan national prévoit la mise en place de 4,4 millions de prises à l'horizon 2020, dont 4 millions à domicile ou en entreprise, et 400 000 en voirie ou sur des parkings publics.

Les avantages pris en compte pour la collectivité sont la réduction des émissions de CO₂, de polluants locaux et de bruit. L'étude intègre à la fois les émissions produites lors de la circulation des véhicules, et lors de la phase de production des batteries et de l'énergie (carburant ou électricité). Le passage d'un véhicule classique à un véhicule électrique permet une réduction des émissions de CO₂ pour autant que le mode de production électrique soit faiblement émetteur de gaz à effet de serre. Le mix énergétique français, peu carboné hors période de pointe, présente un avantage significatif comparativement au mix moyen européen.

A l'horizon 2020, le véhicule hybride rechargeable présente un bilan positif et celui du véhicule tout électrique se rapproche de l'équilibre. Le coût de la batterie reste un enjeu majeur à court moyen terme pour la compétitivité du véhicule électrique. Le développement d'une dynamique de marché à moyen terme devrait permettre une réduction significative de ce coût. Un soutien public à l'achat de véhicules électriques paraît justifié pour la collectivité pour assurer le décollage de la filière.

Le plan gouvernemental de développement des véhicules tout électrique et hybrides affiche un objectif de 400 000 véhicules à l'horizon 2015 et 2 millions en 2020. L'évaluation d'un tel plan est nécessaire pour mesurer sa rentabilité socio-économique au regard des contraintes du développement durable et définir le degré d'accompagnement des pouvoirs publics.

L'analyse coûts-bénéfices est une méthode de calcul économique qui intègre dans un même bilan les coûts et les avantages d'un projet. La présente étude cherche à mettre en œuvre cette méthode pour le cas des véhicules électriques, en évaluant les gains environnementaux et les coûts pour la collectivité d'un remplacement de véhicules thermiques par des véhicules électriques tel que prévu par les objectifs du plan national. Il s'agit de mener une étude comparative et prospective, en mettant en regard les coûts et avantages estimés pour 2010 et 2020.

L'étude intègre notamment le risque climatique dans le bilan par l'intermédiaire de la valeur tutélaire de la tonne de dioxyde de carbone (CO₂) émise et valorise également la pollution locale et le bruit évités par un véhicule électrique. La prise en compte de l'actualisation permet un parallèle pertinent entre différents projets d'investissement à différentes époques, et se révèle indispensable notamment pour comparer des coûts d'investissement et de fonctionnement étalés dans le temps.

Cette première partie s'articule de la manière suivante : après un rappel du contexte et de la méthodologie et des hypothèses générales prises en compte dans l'étude, un bilan coûts-avantages pour un usager du passage d'un véhicule thermique à un véhicule électrique sera proposé, en 2010 et en 2020, sur la base des estimations des coûts de possession, du coût de déploiement des infrastructures de charge électrique et des avantages environnementaux.

1. Cadre et hypothèses de l'étude

1.1. Éléments de contexte

1.1.1. L'objectif du « facteur 4 »

Selon les estimations fournies par le quatrième rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), la température globale moyenne pourrait s'élever de 1 à 6°C d'ici la fin du 21^e siècle. L'enjeu global d'une limitation des émissions de gaz à effet de serre, notamment le dioxyde de carbone (CO₂), est reconnu. L'accord de Copenhague signé à l'issue de la 15^e Conférence des Parties (COP 15) de la Convention-Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC) de décembre 2009 a retenu un objectif de limitation de la hausse des températures de 2°C, et il est à l'origine d'engagements « à géométrie variable » selon les pays (De Perthuis, *et al.*, 2010). L'Europe s'est fixée un objectif de réduction des émissions de CO₂ de 20 % (par rapport à 1990) d'ici 2020, et la France vise une réduction des émissions de 75 % à l'horizon 2050, soit une réduction de « facteur 4 ».

Face à des objectifs aussi ambitieux, une réelle rupture à la fois comportementale, organisationnelle et technologique s'avère nécessaire. Le secteur des transports, responsable de plus du tiers des émissions de CO₂ d'origine énergétique en France, apparaît comme un secteur clé dans le cadre d'une stratégie nationale de type « facteur 4 ». Ce secteur fait partie des deux secteurs, avec le bâtiment (tertiaire ou résidentiel), qui ont décrit une tendance à la hausse des émissions depuis 1990 en France (Teissier & Meunier, 2008). Il nécessite donc une action volontariste à court terme pour atteindre les objectifs de long terme.

Parmi les instruments mis à disposition des différents acteurs économiques impliqués, on cite principalement la recherche et l'innovation technologique, l'investissement dans les infrastructures, une meilleure tarification de leur usage, ou encore une évolution des comportements.

1.1.2. La réduction des émissions dans les transports : trois leviers d'action

Les trois principaux leviers identifiés pour réduire les émissions des transports sont : (1) l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules, (2) la maîtrise de la demande, et (3) le développement de carburants alternatifs (Teissier & Meunier, 2008).

1) Alors que l'efficacité énergétique des véhicules est un levier efficace, sa mise en place est très progressive, notamment du fait d'un taux de renouvellement lent du parc des véhicules dans les marchés stabilisés. De 2003 à 2007 (avant la mise en place du dispositif de « bonus-malus » écologique), les émissions moyennes des véhicules particuliers neufs sont passées de 155 gCO₂/km à 149 gCO₂/km (CGDD, 2010).

2) Au sujet de la demande de mobilité, les différentes enquêtes disponibles (enquêtes nationales transports et déplacements) révèlent une tendance à la hausse de la mobilité des français dans le temps, avec un nombre de déplacements quotidiens relativement stable de 1982 à 2008 (autour de 3,2 déplacements quotidiens par personne), mais un nombre de déplacements croissant (de 163,6 millions de déplacements locaux par jour de semaine en 1982 à 176,7 millions en 2008) (CETE Nord Picardie).

3) C'est au niveau du troisième levier d'action que les véhicules tout électrique et hybrides rechargeables peuvent intervenir. L'énergie électrique offre la perspective d'une énergie n'émettant aucun gaz à effet de serre au niveau du véhicule lors de sa circulation. En revanche, la production de cette énergie électrique est source d'émissions. Il convient donc de prendre en compte les émissions sur la totalité de la durée de vie d'un véhicule, de sa création à son recyclage, en passant par la production et la consommation de l'énergie utilisée. Les véhicules électriques sont donc effectivement peu émetteurs si leurs batteries sont rechargées à partir d'une électricité faiblement « carbonée ».

1.1.3. Un contexte favorable au développement du marché des véhicules électriques

Alors que quelques tentatives expérimentales de développement du véhicule électrique ont échoué en France dans les années 1990, le contexte semble en 2010 particulièrement favorable au développement des véhicules tout électrique et hybrides rechargeables de nouvelle génération. Ce contexte se caractérise par :

- une prise de conscience globale des enjeux environnementaux ;
- des efforts de recherche et développement qui ont permis une amélioration technique des performances des batteries (autonomie, ergonomie, interface, cycles de charge/décharge) ;
- une volonté de développement des constructeurs automobiles ;
- une volonté politique nationale et internationale d'incitation au développement du marché (groupe de travail « Livre Vert sur les infrastructures de recharge » en France (2010), Plan national de développement pour l'électromobilité en Allemagne (2008), communication de la Commission européenne sur la mise en place d'une stratégie européenne pour les véhicules propres et économes en énergie (2010), etc).

Les véhicules tout électrique et hybrides rechargeables sont l'une des réponses possibles pour engager une transition énergétique vers des technologies à plus faible consommation d'énergie, et une plus grande indépendance énergétique (rapport du Groupe La Poste, 2008).

1.1.4. Présentation des véhicules rechargeables et de la batterie

Le véhicule tout électrique fonctionne uniquement à partir de la décharge d'une batterie rechargeable sur le secteur. Le véhicule hybride rechargeable dispose de deux modes de propulsion : une batterie rechargeable, et un moteur thermique. Le moteur thermique est activé lorsque les batteries sont épuisées ou au-delà d'une certaine vitesse (Groupe PSA, 2010). Plusieurs configurations sont possibles, selon le degré d'intégration et de couplage entre les deux moteurs.

Les constructeurs ont lancé la commercialisation de véhicules tout électrique et hybrides rechargeables dès 2010 et d'autres s'apprêtent à suivre en 2011. Une dizaine de modèles de véhicules tout électrique proposés par des constructeurs français devraient apparaître d'ici 2011, et les premiers modèles d'hybrides rechargeables seront commercialisés en 2012. Les autonomies des modèles tout électrique proposés s'étendent de 100 à 150 km.

La batterie est un accumulateur qui transforme l'énergie chimique en énergie électrique. Cette opération est réversible, contrairement au cas de la pile qui est un accumulateur dont la décharge est irréversible. L'unité composant la batterie est la cellule électrochimique, et la batterie est constituée d'un ensemble de cellules électrochimiques interconnectées (de l'ordre d'une centaine) capables de fournir une énergie et une puissance au niveau de tension désiré.

Le type de batterie le plus utilisé pour les véhicules rechargeables est la batterie de technologie lithium-ion. Certains véhicules fonctionnent sur la base d'une technologie lithium-chlorure de nickel ou sodium. Ces choix de technologies résultent de contraintes élevées pour intégrer la batterie au véhicule : il s'agit de fournir l'énergie et la puissance nécessaires à la propulsion du véhicule tout en limitant le volume et la masse de la batterie. Les technologies de type lithium-ion sont celles qui, dans l'état actuel des connaissances, permettent d'obtenir des énergies et puissances massiques et volumiques les plus élevées (groupe de travail « Livre Vert », 2010).

En plus des cellules électrochimiques, la batterie est composée de capteurs, d'un système de refroidissement, de systèmes de contrôle et d'un sectionneur assurant la sécurité électrique, qui nécessitent une maîtrise technique élaborée.

1.2. Méthodologie et hypothèses générales de l'étude

1.2.1. Une comparaison entre véhicules thermiques et véhicules électriques à performances et usages comparables

L'évaluation effectuée dans cette étude consiste en la réalisation du bilan coûts-avantages pour un usager de passer d'un véhicule thermique à un véhicule électrique en 2010 et 2020. La méthode repose sur la comparaison entre véhicules thermiques et véhicules électriques à performance et usage équivalents. Ainsi, on considère que le véhicule tout électrique est une alternative au véhicule à essence ou au véhicule diesel à usage « urbain » et que le véhicule hybride rechargeable présente une alternative à un véhicule diesel de type routier ou multiusage. Les déplacements de type « urbains » regroupent les trajets en ville (ville centre et banlieue) mais surtout les déplacements effectués dans le périurbain où l'usage de la voiture particulière est plus développé et les transports collectifs moins performants.

Cadre de l'analyse coûts-avantages

Référence	Projet
Véhicule essence urbain →	Véhicule électrique
Véhicule diesel urbain →	Véhicule électrique
Véhicule diesel routier →	Véhicule hybride rechargeable

Source : CGDD

► Les performances des véhicules

Les caractéristiques des 5 types de véhicules sont les suivantes :

- un **véhicule à essence**, de type citadin, de petit volume, qui consomme 4,8 L/100 km et qui émet en cycle normalisé (cycle européen « New European Driving Cycle », NEDC¹) 115 gCO₂/km ;
- un **véhicule diesel urbain**, de petit volume, qui consomme 4,2 L/100 km pour une émission de 110 gCO₂/km en cycle normalisé ;
- un **véhicule tout électrique**, de consommation moyenne de 0,2 kWh/km (sur une année), avec une batterie de type lithium-ion de 25 kWh de capacité, soit une autonomie de 100-150 km ;
- un **véhicule diesel « routier »**, de plus grosse cylindrée et de consommation supérieure : 5,8 L/100 km pour une émission de 155 gCO₂/km en cycle normalisé ;
- un **véhicule hybride rechargeable** disposant de : (1) une batterie de type lithium-ion de capacité 6 kWh qui lui permet d'avoir une autonomie d'environ 25 à 35 km et (2) un moteur dont les performances environnementales sont proches de celles du moteur diesel « routier » ; on suppose que ce véhicule utilise à peu près à part égale ses deux énergies de propulsion.

Pour 2020, on prend en compte une amélioration des performances des différents véhicules en termes de consommation et d'émission de polluants. On estime ainsi, en accord avec les objectifs fixés dans le cadre européen, que les véhicules représentatifs disponibles présenteront les profils suivants :

- le véhicule à essence sera supposé consommer 3,7 L/100 km, soit une émission de 90 gCO₂/km ;
- le véhicule diesel urbain sera supposé consommer 3,1 L/100km, soit 85 gCO₂/km ;
- on ne prend en compte l'amélioration des performances du véhicule tout électrique que dans la baisse du coût de la batterie, mais on reste avec des performances kilométriques identiques à 2010 (soit une batterie de 25 kWh autorisant une autonomie de 100-150 km) ;

¹ La mesure des émissions est réalisée durant un cycle de conduite normalisé de 20 minutes, comprenant une phase de conduite en ville, et une phase de conduite plus rapide de type « route ». La vitesse moyenne au cours du cycle est de 33 km/h.

- le véhicule diesel routier sera supposé consommer 4,7 L/100km, soit 125 gCO₂/km ;
- pour le véhicule hybride, enfin, on prendra en compte les mêmes améliorations de performances que pour le véhicule tout électrique et le véhicule diesel routier, selon le type d'énergie de propulsion utilisé.

Bilan des hypothèses de performances retenues

Performances	Véhicule essence	Diesel urbain	Véhicule électrique	Diesel routier	Véhicule hybride rechargeable
2010 : Consommation	4,8 L/100 km	4,2 L/100 km	0,2 kWh/km	5,8 L/100 km	mix
2010 : Emissions de CO ₂ en circulation (gCO ₂ /km)	115	110	0	155	78
2020 : Consommation	3,7 L/100 km	3,1 L/100 km	0,2 kWh/km	4,7 L/100 km	mix
2020 : Emissions de CO ₂ en circulation (gCO ₂ /km)	90	85	0	125	63

Source : CGDD

Les innovations technologiques restent cependant dépendantes de nombreux facteurs externes (conjoncture, etc.) et revêtent donc un certain degré d'incertitude.

► Les kilomètres parcourus

L'ensemble des calculs de l'étude repose sur une durée de vie du véhicule de 15 ans et les kilométrages annuels suivants :

Hypothèses de durées de vie et de kilométrages retenues

Performances	Véhicule essence	Diesel urbain	Véhicule électrique	Diesel routier	Véhicule hybride rechargeable
Durée de vie (ans)	15	15	15	15	15
Kilométrage annuel (km/an)	13 000	13 000	13 000	16 000	16 000

Source : CGDD

Ces chiffres correspondent aux performances moyennes publiées par la Commission des Comptes des Transports Nationaux (CCTN). Les véhicules à usage « urbain », c'est-à-dire parcourant l'essentiel de leurs déplacements en agglomération et en couronne périurbaine, roulent environ 13 000 km/an. Cette distance annuelle est supérieure à celle effectuée par les véhicules à motorisation essence mais elle est pertinente pour les véhicules tout électrique. Le parcours quotidien correspondant (45 km par jour sur 290 jours) est cohérent avec les derniers résultats de l'Enquête Nationale Transports Déplacements (ENTD) 2008 (cf. partie II) qui indiquent que près des $\frac{3}{4}$ des déplacements domicile-travail (aller-retour) sont inférieurs à 40 km. Les véhicules à usage « routier » ou interurbain, c'est-à-dire effectuant certains déplacements en ville et certains déplacements d'une ville à l'autre, sur route ou autoroute, effectuent quant à eux près de 16 000 km/an. Pour ces derniers, on fait l'hypothèse que 50 % des déplacements se font en ville et 50 % sur routes interurbaines.

Pour le véhicule hybride, on suppose un fonctionnement de type thermique pour les trajets interurbains et un fonctionnement sur la batterie pour les trajets urbains. On considère ainsi que le véhicule hybride rechargeable utilise pour 50 % la propulsion à partir des batteries et pour 50 % la motorisation thermique. L'analyse de l'Enquête Nationale Transports Déplacements (ENTD) 2008 (cf. partie II) semble plutôt montrer que, en moyenne, les déplacements urbains courts ne représentent que 30 à 40 % des déplacements totaux. On choisit néanmoins de conserver un taux d'usage en mode électrique plus élevé pour les raisons suivantes :

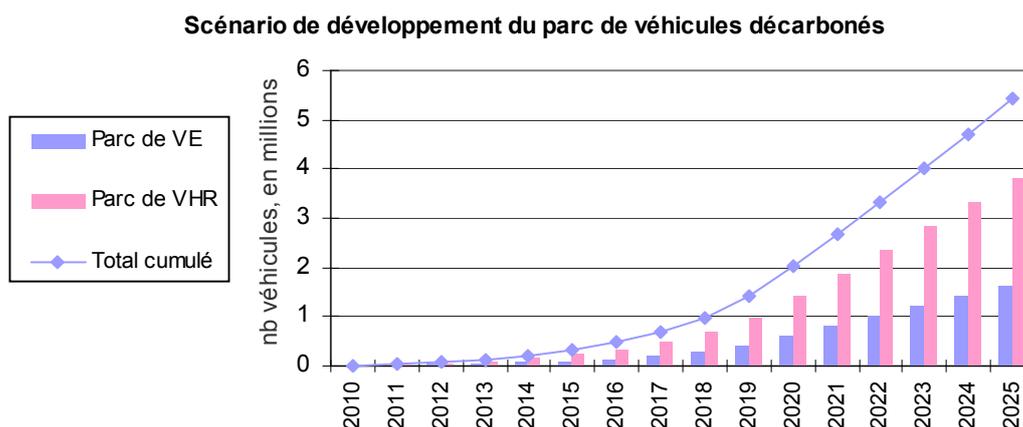
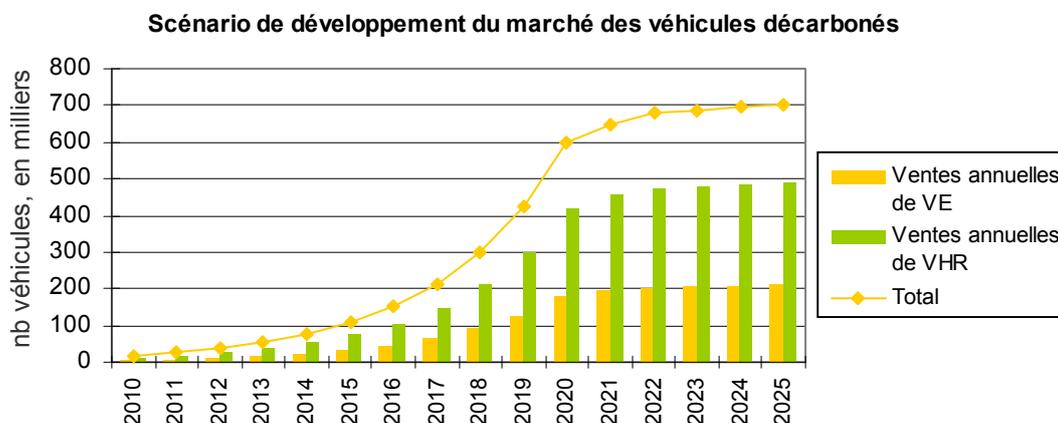
1. On peut supposer que l'acquéreur d'un véhicule hybride rechargeable aura un comportement favorisant, s'il en a la possibilité, une conduite en mode électrique.
2. Une charge de la batterie en cours de journée pour certains véhicules aura tendance, en moyenne, à relever le taux d'utilisation du mode électrique.

Une meilleure appréhension de cette hypothèse sera possible lors de l'apparition sur le marché des premiers modèles d'hybrides rechargeables.

On considère que le kilométrage moyen parcouru par an est identique entre 2010 et 2020.

1.2.2. Le développement du marché des véhicules électriques

Le scénario de développement retenu dans la présente étude est conforme aux objectifs du plan gouvernemental, soit 2 millions de véhicules électriques à l'horizon 2020². Il a été construit sur la base d'une pénétration progressive de ces véhicules dans le marché automobile, lente en début de période, puis, s'accroissant à partir de 2015/2016 : des hypothèses de 7,5 % des ventes en 2016, 30 % des ventes en 2020 et 35 % à terme sont prises en compte.



Source : scénario CGDD

1.1.3. Le choix du taux d'actualisation

L'actualisation permet l'évaluation d'un même bien ou des services qu'il rend à différents instants dans le temps. La valeur actuelle reflète ainsi, à la date du calcul par exemple, un coût ou un bénéfice disponible à une échéance de n années. La valeur actuelle d'un bien ou d'un service est d'autant plus faible que l'échéance est éloignée, du fait de la préférence pour le présent et de l'aversion au risque. Pour un bien ou service d'une valeur de A à l'année n et un taux d'actualisation i , la valeur actuelle de ce bien ou service est : $A/(1+i)^n$.

Dans la présente étude, il s'agit le plus souvent d'actualiser l'ensemble des coûts d'usage d'un véhicule pendant sa durée de vie (15 ans), en sommant ces coûts et en les rapportant à l'année d'achat (2010 ou 2020).

Le rapport Lebègue (Commissariat Général du Plan, 2005) recommande un taux d'actualisation de base (réel, hors prime de risque) de 4 % pendant 30 ans, puis une décroissance de ce taux les années suivantes jusqu'à un plancher fixé de 2 %. Au vu

² Voir les dossiers de presse du 1^{er} octobre 2009 : « Lancement du plan national pour le développement des véhicules électriques et hybrides rechargeables » et du 13 avril 2010 : « Avancées du plan de développement des véhicules électriques et hybrides », Jean-Louis Borloo et Christian Estrosi.

des échéances de la présente étude, de l'ordre de la quinzaine d'années, le taux d'actualisation est fixé à 4 % pour l'ensemble des calculs.

Au-delà d'éventuels avantages en termes de réduction d'émissions de CO₂, les véhicules électriques offrent l'opportunité d'une baisse des émissions de polluants locaux en phase de circulation et une baisse du bruit émis par le véhicule circulant. Pour évaluer de façon adéquate si ces innovations potentielles des véhicules électriques peuvent compenser les coûts engendrés par ces véhicules, il s'agit de modéliser, à partir des hypothèses générales décrites précédemment la concurrence entre électricité et carburants liquides, dans le cas d'une diffusion à grande échelle des véhicules tout électrique et hybrides rechargeables.

2. Coûts totaux de possession

Cette partie a pour objectif de comparer le coût total de possession (*Total cost of ownership, TCO*) des différents types de véhicules étudiés pour un usager particulier. Ce coût intègre tous les éléments constitutifs du produit manufacturé pour l'utilisateur, de son achat à son utilisation.

Les coûts de possession calculés prennent en compte l'intégralité des coûts associés à l'achat et l'usage du véhicule par le consommateur, fiscalité comprise, c'est-à-dire :

- le coût d'achat du véhicule ;
- pour les véhicules tout électrique et hybride, le coût d'achat de la batterie ;
- les coûts associés à l'entretien du véhicule, incluant les frais d'assurance, les frais de réparation, les péages et les autres frais d'entretien du véhicule ;
- le coût de l'énergie utilisée pour le fonctionnement du véhicule (carburant ou électricité).

Les hypothèses prises en compte sont les suivantes :

1. Concernant le coût d'achat du véhicule :

- Les prix des véhicules sont estimés sur la base des prix de modèles classiques, sans option. Pour les véhicules urbains (le véhicule à essence, le diesel urbain et le véhicule électrique) les prix correspondent à des petites berlines de la gamme dite des « compactes », tandis que pour les véhicules routiers (le diesel routier et l'hybride rechargeable), il s'agit de prix pour des automobiles de la gamme dite des « familiales ».
- Ce coût d'achat inclut la carrosserie et la motorisation. Dans le cas du véhicule tout électrique et de l'hybride, le coût de la batterie n'est pas pris en compte dans ce coût d'achat.
- On fait l'hypothèse que le véhicule tout électrique de ville coûte 1 500 € de moins qu'un véhicule à essence citadin de même volume (hors achat de la batterie), un véhicule hybride rechargeable 3 000 € de plus qu'un véhicule diesel routier de même gabarit. Les surcoûts des véhicules « classiques » et hybrides proviennent des coûts liés à la motorisation, plus complexe et d'autant plus pour l'hybride du fait de la technologie mixte.
- Pour le véhicule hybride, le coût d'achat est supposé diminuer de 5 000 € entre 2010 et 2020 grâce aux progrès techniques attendus. Pour les autres véhicules, le coût est considéré le même en début et en fin de période.

2. Concernant le coût de la batterie :

Le coût de la batterie est délicat à estimer car le marché est émergent et il est encore plus difficile à projeter. Le coût de la batterie est estimé aujourd'hui à 800 € par kWh de puissance disponible, en cohérence avec les dires d'industriels. Ces derniers estiment que les innovations, l'apprentissage et la production de masse devraient permettre d'atteindre un prix de 300 €/kWh en 2020. Ces hypothèses de coûts à l'horizon 2020, plutôt optimistes, servent de base aux calculs présents.

- Pour le véhicule hybride, il faut ajouter un coût fixe associé à la gestion thermique et aux interfaces électroniques entre le moteur thermique et la batterie. On considère qu'on a donc pour l'hybride un surcoût de batterie correspondant à environ 30 % du coût de la batterie.
- On suppose dans ces calculs que la durée de vie de la batterie est égale à la durée de vie du véhicule. Néanmoins, selon une étude récente, la durée de vie de la batterie est estimée à une dizaine d'années, soit 1 000 cycles de recharge pour le véhicule tout électrique, et 2000 à 2500 cycles pour le véhicule hybride (ETCACC Technical Paper, 2009). Prendre une seconde batterie reviendrait à augmenter son prix unitaire. Pour compenser, on a retenu un prix relativement élevé en 2010 (800 €/kWh) mais en supposant qu'il suffit d'une seule batterie sur l'ensemble de la vie du véhicule.

3. Concernant les frais d'entretien (assurance, contrôle technique, garagiste, etc.) :

- On considère que le coût annuel représente un pourcentage constant du coût d'achat : 14 % du coût d'achat pour le véhicule à essence et 9 % pour le véhicule diesel routier. Ces pourcentages s'inspirent de coûts moyens d'entretien pour un véhicule essence et diesel de référence (ADEME). Pour les autres véhicules, les coûts d'entretien en absolu sont supposés les mêmes pour la même gamme de véhicules). On suppose ainsi que l'entretien annuel est le même pour le véhicule essence, l'électrique et le diesel urbain d'une part (soit 1 700 € par an) et le même pour le diesel routier et le véhicule hybride d'autre part (soit 2 020 € par an). Dans le calcul, le coût d'entretien n'est donc pas discriminant entre les différentes filières.
- Les frais d'entretien sont considérés identiques pour les estimations de 2010 et 2020.

4. Concernant le coût de l'énergie :

- Les prix du carburant sont estimés à 1,37 €/L pour l'essence (SP95) et 1,22 €/L pour le diesel en 2010. Ces prix reflètent les prix à la pompe actuels à partir d'une moyenne sur les années 2007, 2008, 2009 et 2010. Ils incluent la TIPP, la TVA et une taxe carbone (voir les hypothèses sur la fiscalité, paragraphe 3.1).
- Pour 2030, les prix des carburants (en €2010) sont estimés à 1,85 €/L pour l'essence et 1,80€/L pour le diesel, dans l'hypothèse d'un prix du baril à 100 € à l'horizon 2030 et d'un coût de la tonne de CO₂ à 100 € également à cette même échéance.
- Le prix de l'électricité est fixé à 0,1 €/kWh en 2010³, avec un taux de croissance annuel constant de 0,4 %. Ce prix comprend la Contribution au Service Public de l'Électricité (CSPE), la taxe locale sur l'électricité (TLE) et la TVA. On estime que pour l'utilisateur, l'électricité est exonérée de fiscalité « carbone ».

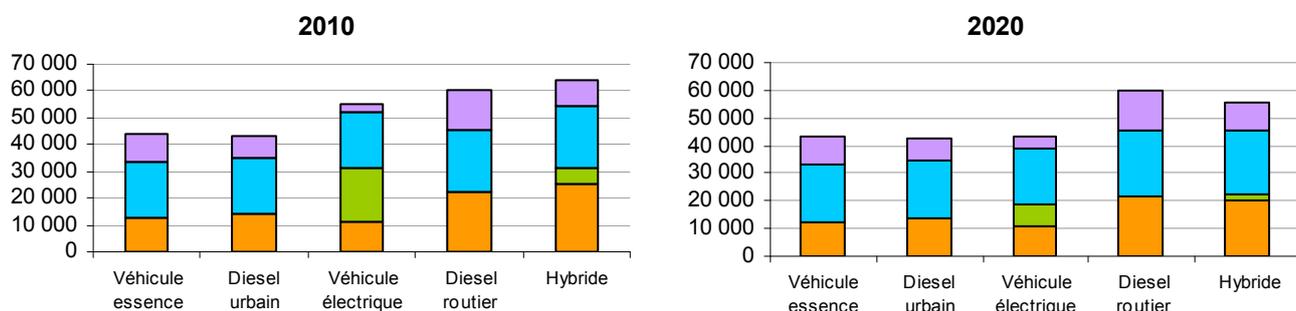
5. Concernant les taxes :

- Dans un souci de simplification, on considère que la TIPP reste identique en 2010 et en 2020.
- La taxe locale sur l'électricité (TLE) est fixée à 11 % du prix de l'électricité. Le taux de taxe est considéré identique en 2010 et en 2020.
- Même si la mise en œuvre d'une taxe Carbone est à l'heure actuelle reportée à une date ultérieure indéfinie, on la calcule à titre illustratif dans cette partie. Elle est fixée comme une écotaxe optimale, à hauteur des émissions de chaque véhicule (et de leurs projections d'émissions en 2020), en suivant les recommandations du rapport Quinet (soit un coût du CO₂ de 32€/t en 2010 pour atteindre 100€/t en 2030, avec un taux de croissance post 2030 de 4 %). La taxe Carbone s'élève ainsi à 56 €/t en 2020.
- La taxe sur la Valeur Ajoutée (TVA) est fixée à 19,6 %. Elle s'applique sur tous les postes de coût : à l'achat, sur la batterie, sur l'énergie (combustible ou électricité) et sur la TIPP.

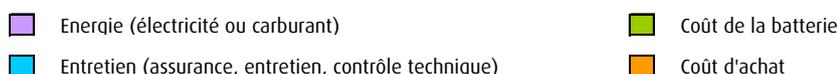
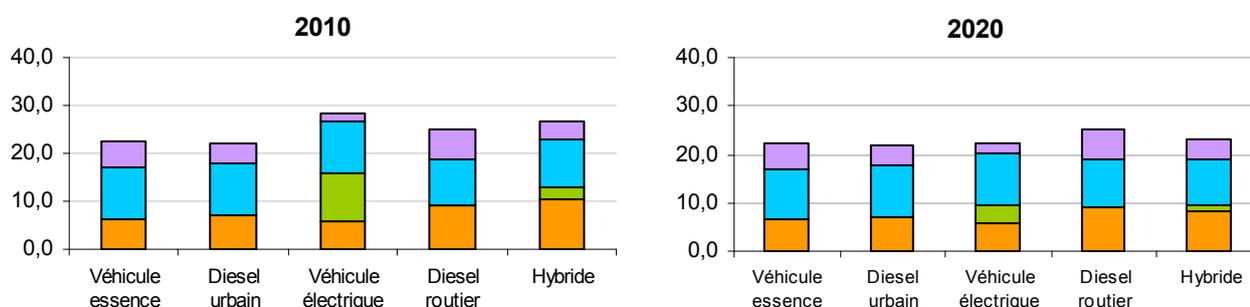
³ Le coût marginal serait en réalité sensiblement plus faible ; ce facteur joue toutefois assez peu sur les résultats.

Sur la base des hypothèses décrites précédemment, les coûts totaux de possession s'établissent entre 45 000 € et 65 000 € par véhicule. Ils sont décomposés par type de véhicule et par poste dans les graphiques suivants :

Coût de possession du véhicule (€)



...au km (c€/km)

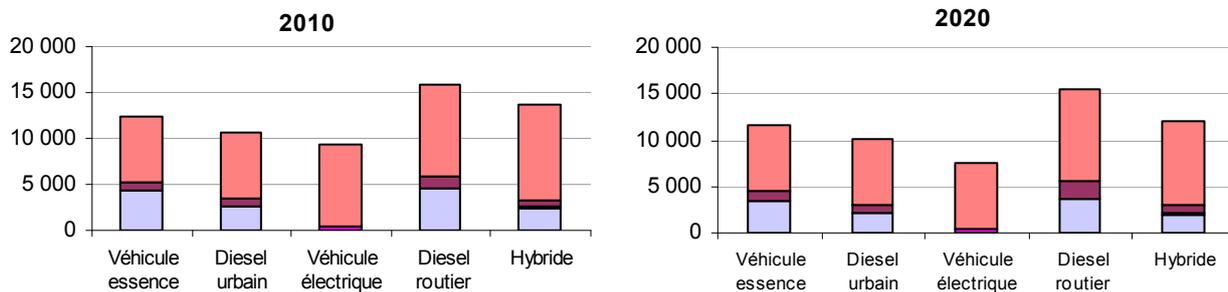


Source : calculs CGDD

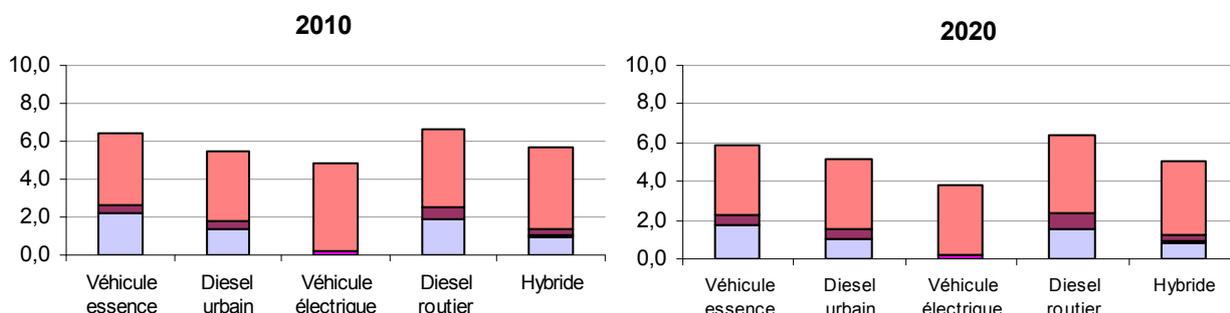
En 2010, le coût de la batterie pénalise fortement le véhicule tout électrique, rendant son coût de possession près de 1,3 fois supérieur à celui des véhicules thermiques équivalents. Pour le véhicule hybride, le surcoût à l'achat (carrosserie, motorisation et batterie) est partiellement compensé par le moindre coût de l'énergie, le rendant ainsi quasiment aussi concurrentiel que son équivalent thermique dès le début de la période. Entre 2010 et 2020, les évolutions de coût sont principalement dues à l'accroissement du prix des énergies, à l'amélioration des performances, à la baisse du coût de la batterie et à la baisse du surcoût initial lié à l'hybridation. Cette forte réduction de la batterie en 2020 améliore fortement la compétitivité des véhicules tout électrique : le coût de possession d'un véhicule tout électrique est du même ordre que celui d'un véhicule essence ou diesel « urbain » (environ 22 c€/km) ; pour le véhicule hybride, ce coût est même inférieur à celui du diesel « routier » (23 c€/km contre 25 c€/km).

Les coûts de possession calculés ci-dessus prennent en compte les taxes supportées par l'utilisateur : Taxe Intérieure de consommation sur les Produits Pétroliers (TIPP), Taxe Locale sur l'Électricité (TLE), Taxe Carbone (prévisionnelle) et Taxe sur la Valeur Ajoutée (TVA). Les taxes représentent 20 à 30 % du coût de possession du véhicule pour un particulier. Elles se répartissent comme suit par type de véhicule :

Montant des taxes pour un véhicule particulier (€)



...au km (c€/km)



Source : calculs CGDD

La TVA est la taxe qui pèse le plus lourd pour un particulier, et notamment pour le propriétaire d'un véhicule tout électrique en début de période. Néanmoins, la moindre taxation de l'électricité (TLE) par rapport aux carburants d'origine pétrolière (TIPP) compense le surcoût lié à la TVA. Ainsi, en 2020, la réduction du coût de la batterie rend le véhicule tout électrique le plus avantageux au niveau fiscal. Au regard des kilomètres parcourus, c'est le véhicule essence qui supporte la fiscalité la plus lourde (autour de 6 c€/km).

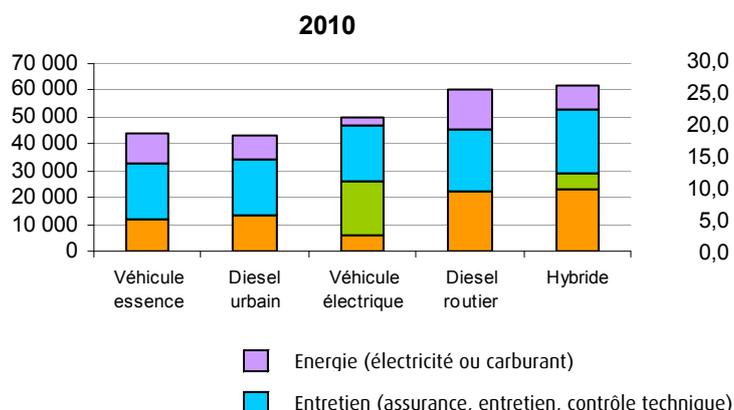
Il est à noter, par ailleurs, que les progrès technologiques favorisant une moindre consommation unitaire des véhicules à motorisation thermique implique une perte de recettes de TIPP pour l'Etat en 2020. Ces pertes pourraient être compensées par les recettes d'une taxe carbone de l'ordre de 56 €/t de CO₂.

Cette fiscalité, supportée par les ménages, offre très peu d'avantages en 2010 à posséder un véhicule électrique, dont le surcoût pourrait constituer un frein au développement du marché. C'est pourquoi, l'Etat a mis en place une subvention à l'achat, via le dispositif de bonus-malus. Le bonus malus automobile est un dispositif assis sur les émissions de CO₂ des véhicules particuliers neufs. Une subvention est accordée à l'achat de véhicules neufs faiblement émetteurs alors que les véhicules fortement émetteurs sont taxés à l'occasion de leur première immatriculation. Le barème pour les 5 véhicules étudiés est le suivant :

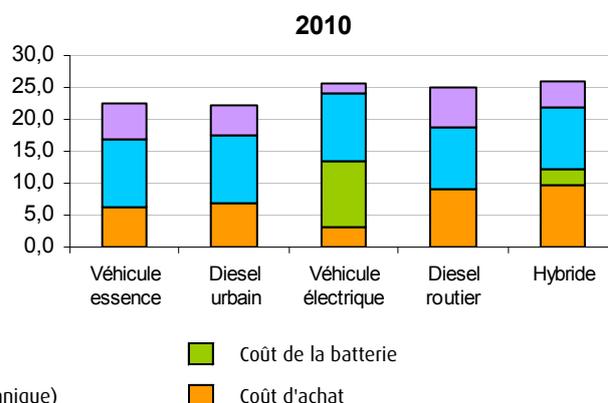
	Véhicule essence	Diesel urbain	Véhicule électrique	Diesel routier	Véhicule hybride rechargeable
Emissions (gCO ₂ /km)	115	110	0	155	78
Montant de la prime en 2011	0	400	5 000	0	2 000
Montant de la prime en 2010	500	500	5 000	0	2 000

Les coûts de possession prenant en compte les primes de bonus sont détaillés pour 2010 dans les graphiques ci-dessous. On considère l'hypothèse que les aides à l'achat octroyées en 2011 prennent fin en 2020, après une baisse progressive des primes.

Coût de possession du véhicule (€)



... au km (c€/km)



Source : calculs CGDD

Malgré la prime de bonus, les véhicules tout électrique demeurent plus coûteux que leurs équivalents thermiques. En revanche, le coût de possession du véhicule hybride s'approche de celui du véhicule diesel routier.

Sous réserve d'une fiscalité adaptée, les entreprises pourraient constituer un marché de développement privilégié pour les véhicules électriques et plus particulièrement tout électrique : usage quotidien intensif, tournées programmées et aires de stationnement disponibles pour déployer les infrastructures de recharge nécessaires.

La fiscalité des entreprises est complexe et distingue deux catégories de véhicules : les véhicules particuliers et les véhicules utilitaires⁴. Ces deux types de véhicules sont soumis à des règles fiscales différentes (récupération de la TVA, amortissement, taxe sur les véhicules de société). La fiscalité des véhicules utilitaires n'est pas abordée ici ; seule la fiscalité des véhicules particuliers à usage professionnel est présentée pour permettre la comparaison avec celle des véhicules des ménages décrite précédemment. Toutefois, une étude complémentaire serait nécessaire pour comparer les différentes règles fiscales applicables et envisager leur impact sur le développement du marché des véhicules électriques en entreprise. L'encadré suivant présente une approche très simplifiée de la fiscalité appliquée à un véhicule particulier à usage professionnel.

Encadré : Fiscalité pour un véhicule particulier à usage professionnel

La fiscalité des entreprises, qui offre des avantages à l'acquisition ou à la location de véhicules « propres » à travers plusieurs dispositifs (récupération de la TVA sur les carburants alternatifs, exonérations totales ou partielles de la taxe sur les immatriculations, amortissement exceptionnel et exonération partielle de la taxe sur les véhicules de société), ne différencie pas les technologies et, certaines règles fiscales, à l'image des plafonds d'amortissement⁵ ou de la taxation des avantages en nature⁶, peuvent ainsi rendre le véhicule tout électrique moins attractif que son équivalent thermique. A l'inverse, la taxe sur les véhicules de société (TVS) a un impact positif sur le coût de possession des véhicules électriques. Nous détaillerons spécifiquement ici le cas de la TVS. Cette taxe s'applique à tous les véhicules particuliers utilisés à titre professionnel par toute entreprise qui exerce son activité sous forme de société. Parmi les voitures particulières, certaines sont partiellement exonérées, dont les véhicules « non polluants » fonctionnant exclusivement ou non au moyen de l'énergie électrique. Ces véhicules bénéficient d'un allègement de moitié de TVS pendant deux ans (pour les véhicules mis en circulation après le 1^{er} janvier 2007). Le barème appliqué est le suivant (depuis le 1^{er} janvier 2006) :

⁴ Véhicule conçu et aménagé pour transporter des marchandises et/ou des personnes.

⁵ Pour les véhicules les moins polluants (émissions de CO₂ inférieures à 200g/km), la déductibilité des amortissements se fait à hauteur d'un prix d'acquisition plafonné à 18.300 €, pénalisant ainsi fortement le véhicule électrique par rapport au véhicule thermique du fait de la différence des prix d'achat.

⁶ Le coût encore élevé du véhicule électrique a un impact sur le coût de l'Avantage en Nature supporté par le collaborateur et l'entreprise dans le cas d'utilisation de véhicules particuliers pour un usage privé. L'évaluation de cet avantage (9% du prix de la voiture chaque année), taxable au titre des charges sociales et de l'impôt sur le revenu, serait nettement plus important pour un véhicule électrique que pour un véhicule thermique de segment identique. (Source : Observatoire du Véhicule d'Entreprise)

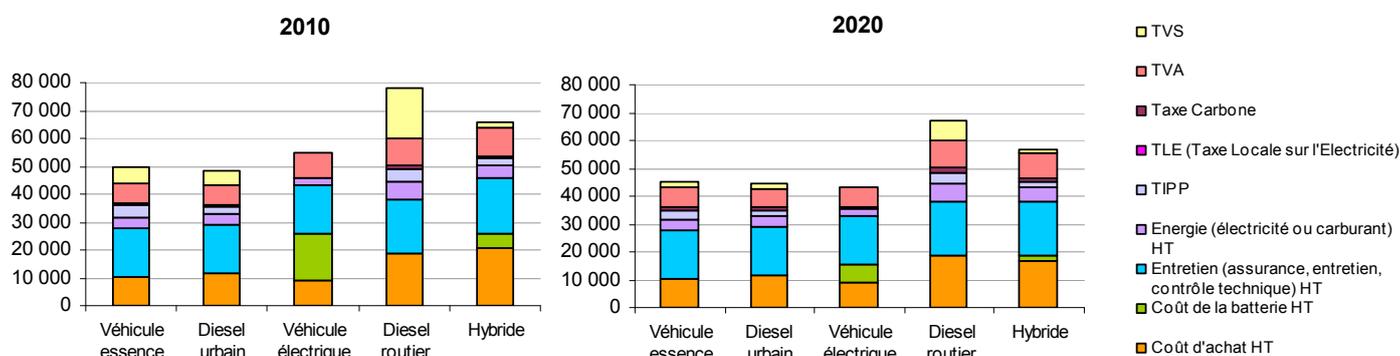
Barème de la TVS appliqué aux véhicules de société

Emission de CO ₂ (g/km)	Tarif applicable par gramme de CO ₂ (€)
≤ 100	2
101 ≤ x ≤ 120	4
121 ≤ x ≤ 140	5
141 ≤ x ≤ 160	10
161 ≤ x ≤ 200	15
201 ≤ x ≤ 250	17
≥ 251	19

Source : Article 1010 du Code Général des Impôts

En appliquant ce barème aux cinq véhicules d'étude, on obtient les résultats suivants (on ne tient pas compte de l'exonération des deux premières années pour les véhicules électrique et hybride, négligeable sur le bilan global) :

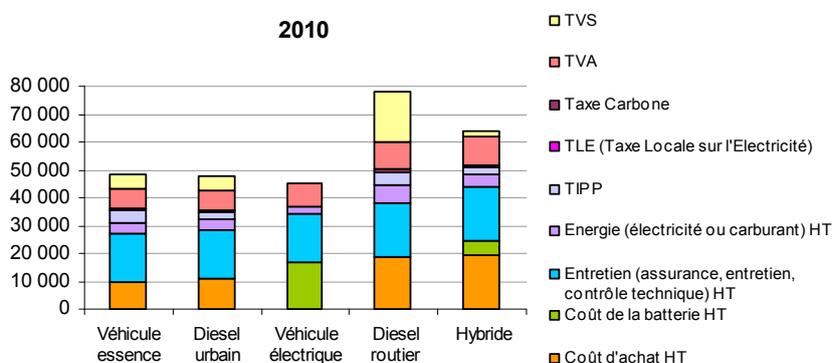
Coût de possession d'un véhicule particulier professionnel (€)



Source : calculs CGDD

La TVS a un impact significatif sur le coût total de possession des véhicules, et notamment pour le véhicule diesel routier en 2010 dont le coût est alourdi de 18 000€ (près d'1/4 du coût total de possession). Pour le véhicule tout électrique, dont les émissions de CO₂/km sont égales à 0, la TVS est nulle. Pour 2020, dans l'hypothèse d'un maintien du barème 2010, qui ne serait pas adapté pour tenir compte des évolutions technologiques, les coûts liés à la TVS se réduiraient fortement du fait de l'hypothèse de baisse d'émission des véhicules thermiques, signifiant une baisse des revenus pour l'Etat.

En prenant en compte le bonus (retranché sur le coût d'achat), le véhicule particulier tout électrique serait dès 2010 plus avantageux pour les professionnels que le véhicule thermique urbain.



3. Les coûts liés au déploiement du réseau d'infrastructures de recharge

Cette partie vise à présenter le surcoût pour les véhicules électriques du développement d'un réseau d'infrastructures de recharge des batteries. Les coûts prennent en compte les dépenses d'investissement et de fonctionnement pour les différents acteurs impliqués et pour tous les types de bornes, individuelles ou mutualisées (parkings et voirie) et normales ou rapides.

Les hypothèses prises en compte concernent les types d'infrastructures, le nombre de points de charge par véhicule et le coût des infrastructures. Par simplification, les infrastructures de recharge sont affectées de façon identique entre véhicule tout électrique et véhicule hybride rechargeable.

Plusieurs types de recharges sont possibles, elles présentent des temps de charge variés mais aussi des coûts énergétiques, environnementaux et d'installation différents. Pour simplifier, on peut retenir la typologie suivante :

1) La charge normale est effectuée sous une puissance de 3 kVA fournie par un courant de 16 ampères monophasé et une tension nominale de 230 V. C'est le mode de charge le moins coûteux car il n'a pas d'incidence sur le dimensionnement du réseau d'alimentation et fait appel exclusivement à des matériels de grande diffusion. Cette technologie est utilisable à la fois pour la charge à domicile, celle en parking ou celle sur la voirie.

2) La charge rapide nécessite une puissance comprise entre 20 et 50 kW. On distingue généralement des bornes semi-rapides (pour une charge dite « accélérée ») de 23 kVA et des bornes rapides de 43 kVA. Cette technologie permet la recharge de 80 % de la capacité d'une batterie de 25 kWh en 25 minutes avec 43 kVA de puissance. L'impact de cette technique sur la durée de vie de la batterie lithium-ion n'est pas encore bien cerné. EDF précise que ce type de charge n'est pas adapté aux véhicules hybrides. A la différence de la charge normale, cette technologie n'est utilisable qu'en parkings collectifs, sur la voirie ou en stations dédiées.

D'autres processus sont imaginés, comme l'échange de batterie, opération qui aurait lieu dans des stations dédiées, pour un temps d'échange de l'ordre de cinq minutes. Si certains pays misent sur ce système (projet *Better Place* en Israël, Danemark), il semble que sa viabilité économique et technique reste à prouver. On ne tient pas compte de tels projets dans l'étude prospective présente car un développement significatif de cette technique à court terme en France est peu vraisemblable.

Le scénario de développement des infrastructures de recharge retenu correspond à un scénario vraisemblable au vu du développement escompté du marché des véhicules tout électrique et hybrides. Il comporte principalement des points de charge normale (93 %), vu la proportion importante de véhicules hybrides dans le parc automobile global et quelques points de charge semi-rapide à 23 kVA pour certains parkings d'entreprises et de grandes surfaces (7 % des points de charge). Le plan gouvernemental insiste sur le fait que la « grande majorité des prises relèveront de la sphère privée », et dès 2012, les constructions d'immeubles (bureaux et habitations) avec parking intégreront obligatoirement des prises de recharge. Les bornes seront également obligatoires dans tous les parkings d'immeubles de bureaux d'ici 2015.

Le plan ministériel fournit les objectifs d'installation d'infrastructures de recharge suivants, équivalents à 2,2 points par véhicule :

En milliers d'unités	2015	2020	2025
Prise Domicile Travail	900	4 000	9 000
Voie / Parking - charge normale	60	340	750
Voie / Parking - charge rapide	15	60	150
Total	975	4 400	9 900

Source : Dossier de presse du 13 avril 2010

Le calibrage retenu dans notre étude s'inspire des travaux du groupe de travail chargé de la mise en œuvre d'un livre vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public. La démarche du groupe de travail est d'associer à un véhicule un point de charge principal, et des points de charge secondaires supplémentaires, dans un rôle de réassurance. Cette correspondance « un véhicule électrique = un point de charge principal » assure une disponibilité du point de charge pour le principal utilisateur pour permettre une recharge longue pendant la nuit. Dans notre scénario, on opte pour à un ratio de 1,1 points de charge disponibles par véhicule rechargeable. La décomposition par lieu de charge est présentée dans le tableau suivant. Ce choix moins ambitieux que le plan ministériel initial vise à minimiser le coût de l'infrastructure et à rechercher des effets de foisonnement.

Calibrage retenu pour le nombre de points de charges par véhicule

Lieu de charge principal	Nombre de bornes disponibles par véhicule électrique (électrique ou hybride)	Lieux de charge secondaires	Nombre de bornes disponibles par véhicule électrique (électrique ou hybride)	Nombre total de bornes disponibles par véhicule électrique (électrique ou hybride)
Stationnement principal privé - particuliers	0,60			0,60
Stationnement principal privé - entreprises	0,20 (*)			0,20
Stationnement principal - parking public	0,10	Stationnement secondaire - parking public	0,04	0,14
Stationnement principal - voirie	0,10	Stationnement secondaire - voirie	0,04	0,14
		Stationnement secondaire - espaces privés (hypermarchés, hôtels, etc.)	0,025	0,025
		Lieu dédié pour la charge rapide (43 kVA)	0,003	0,003
TOTAL				1,1

(*) cf. annexe

Source : scénario groupe de travail « Livre Vert »

Le coût des infrastructures englobe le coût de l'investissement, le coût du raccordement et les coûts de maintenance. Les coûts d'investissement dépendent du type de prise et de la localisation. Les coûts de maintenance sont considérés en termes de pourcentage du coût d'investissement. Il est fixé à 3 % du coût d'investissement quel que soit le type de prise. Ces différents coûts sont supportés par plusieurs types d'acteurs :

- les ménages ;
- les entreprises privées (on y distingue les entreprises de gestion de parkings privés) ;
- les collectivités locales (supportant le coût d'investissement et une partie du coût du raccordement des bornes publiques disposées en voirie) ;
- ERDF, la filiale de distribution d'EDF gestionnaire du réseau de distribution (supportant une partie des coûts de raccordement).

Les coûts unitaires indiqués par EDF et retenus par le groupe de travail sur le Livre vert sur les infrastructures de recharge figurent dans le tableau suivant :

Coûts unitaires pris en compte par type de prise (€)

Coûts unitaires en € ₂₀₁₀	Coût d'investissement	Coût de raccordement	Maintenance (en pourcentage du coût d'investissement)
Prise domicile ou travail (3 kVA)	500	0	3 %
Voirie - charge normale (3 kVA)	4 200	300	3 %
Voirie - charge semi-rapide (23 kVA)	6 500	1 300	3 %
Parking - charge normale (3 kVA)	3 400	300	3 %
Parking - charge semi-rapide (23 kVA)	5 700	1 300	3 %
Lieu dédié - charge rapide (43 kVA)	55 000	inclus	3 %

Source : EDF, groupe de travail « Livre Vert »

Le coût de raccordement au réseau électrique de toute nouvelle prise installée est partagé entre ERDF et le demandeur (propriétaire de résidence, gestionnaire de parking privé ou gestionnaire du domaine public). Dans le cas présent, on considère

que les prises installées chez les particuliers ou en entreprises ne nécessitent pas de raccordement supplémentaire (le raccordement existe déjà) tandis que les bornes sur la voirie ou sur des parkings publics nécessitent un nouveau raccordement. Le coût sera alors supporté par ERDF et par la collectivité locale ou l'entreprise gestionnaire du parking. ERDF participe à hauteur de 40 % et le demandeur à hauteur de 60 %. Dans les coûts présentés ici, on fait l'hypothèse que les bornes sont systématiquement raccordées par groupe de 12, ce qui permet d'optimiser les coûts de raccordement.

Les coûts de raccordement retenus dans ces calculs sont relativement élevés ; ils incluent notamment les coûts de génie civil. Ces coûts dépendent de nombreux facteurs géographiques et dépendent du modèle économique retenu. Ainsi la configuration des bornes, le nombre de prises disponibles par station, la proximité géographique d'un réseau de raccordement sont des facteurs qui vont moduler ces coûts. ERDF donne une fourchette d'un coût de raccordement de 94 € à 527 € pour les bornes de charge normale (3 kVA) et entre 401 € et 2 234 € par borne de charge semi-rapide (23 kVA).

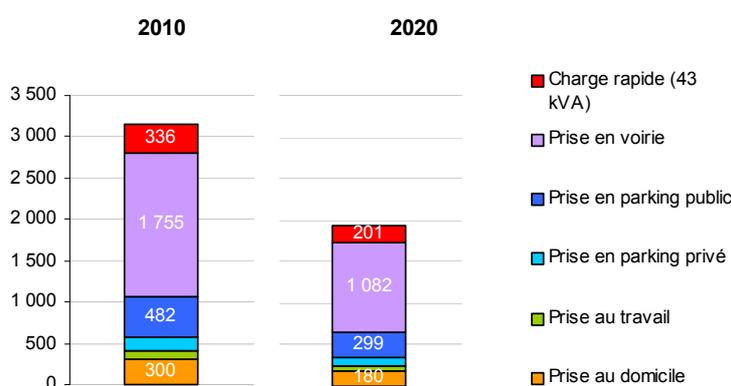
Les infrastructures installées en parkings publics sont supposées gérées à 50 % en concession (par des gestionnaires de parkings) et à 50 % en régie (par les collectivités locales), conformément aux recommandations du groupe de travail sur le Livre vert.

Les bornes de charge rapide ne sont affectées à aucun acteur dans la mesure où leur mode de gestion n'est pas encore clairement défini.

Une hypothèse de baisse du coût d'investissement de 5 %/an est envisagée.

Sur la base de ces hypothèses, on peut estimer le coût des infrastructures par véhicule, décomposé par lieu de charge dans le graphique suivant :

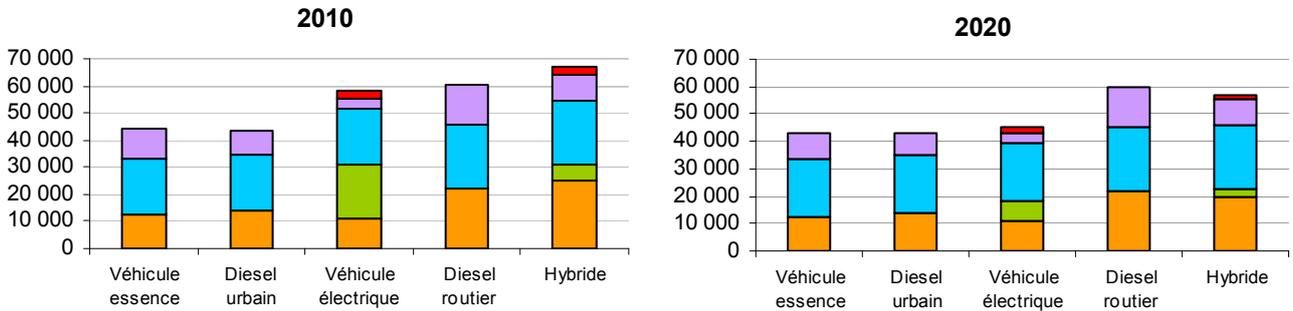
Coût des infrastructures de recharge pour un véhicule électrique (en €)



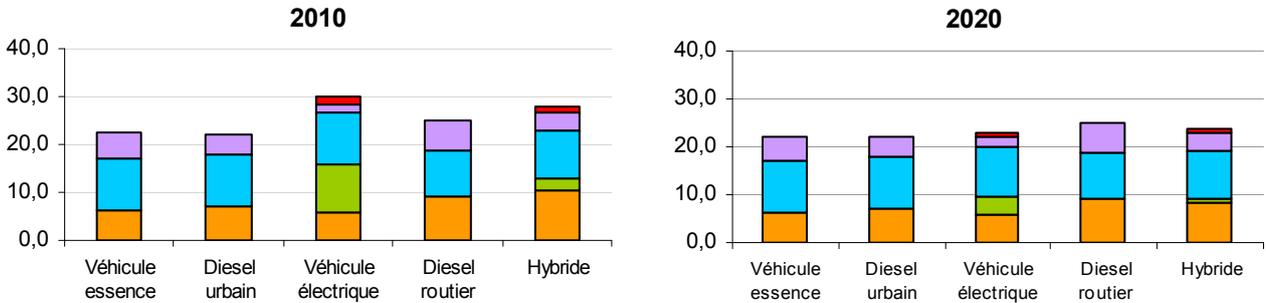
Le bilan financier est élevé : de l'ordre de 3 000 € par véhicule en 2010, puis, 2 000 € en 2020, soit près de 3 Mds € pour l'ensemble du parc de véhicules électriques sur la période 2010-2020 (cf. encadré). Ce sont les prises mutualisées qui pèsent le plus lourd dans ce bilan et notamment les prises en voirie qui représentent à elles seules plus de la moitié des coûts. Le surcoût s'explique par un coût d'investissement plus élevé et des besoins en maintenance et en renouvellement plus importants compte tenu de l'utilisation collective des bornes. En termes d'acteurs, les collectivités locales et les concessionnaires, gestionnaires du stationnement public, supportent ainsi l'essentiel des coûts (2 200 € en 2010 et 1 300 € en 2020). Côté ménages, le coût de la borne à domicile est plutôt faible (300 €/véhicule en 2010 et 180 € en 2020). Les coûts de raccordement à la charge d'ERDF sont, quant à eux, de l'ordre de 45 €/véhicule.

Intégré au coût de possession du véhicule pour un usager, le poste de coût lié aux infrastructures s'avère faible (environ 5% des coûts de possession totaux). Il est plus élevé pour le véhicule tout électrique compte tenu du surcoût lié aux bornes de charge rapide (43kVA) (cf. graphique ci-dessous), qui n'ont pas vraiment de sens pour la recharge des véhicules hybrides.

Coût de possession du véhicule intégrant le coût des infrastructures (€)



... au km (c€/km)



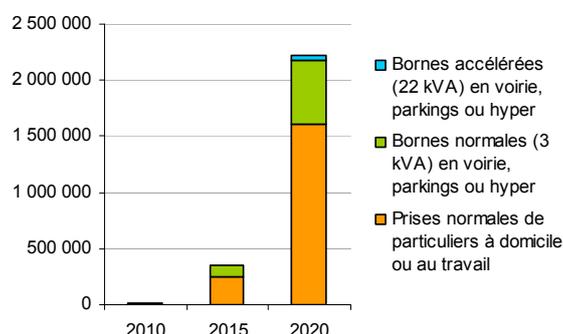
- Énergie (électricité ou carburant)
- Entretien (assurance, entretien, contrôle technique)
- Coût d'achat
- Coût de la batterie
- Infrastructures de recharge

Source : calculs CGDD

Encadré : Déploiement et coûts des infrastructures de recharge à l'échelle du parc de véhicules électriques

A l'échelle du parc, la mise en circulation en 2020 de 2 millions de véhicules électriques nécessite le déploiement de 2,2 millions bornes de recharge, dont les ¾ sont des prises particulières au domicile ou au travail (cf. diagramme ci-dessous).

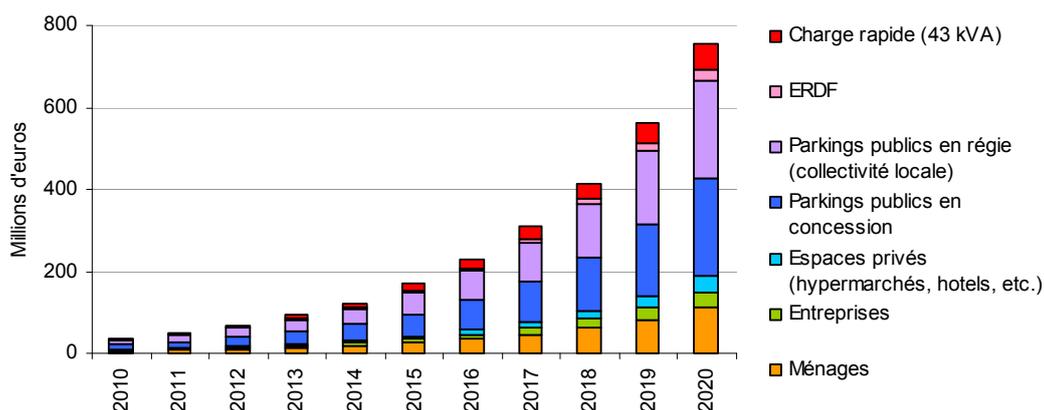
Nombre d'infrastructures disponibles



Source : calculs CGDD, groupe de travail « Livre Vert »

Le coût de déploiement de ces 2,2 millions de borne est proche de 3 Md € (hors renouvellement), dont 750 M€ pour la seule année 2020. Les coûts annuels par acteur sont décomposés dans le diagramme suivant :

Coût annuel des infrastructures de recharge par acteur



Source : calculs CGDD

Le scénario de croissance ne fait que refléter le schéma de développement du marché des véhicules électriques. Dans la réalité, le déploiement des infrastructures publiques devrait normalement anticiper le développement du marché des véhicules électriques ; par ailleurs, le déploiement sera facilité et les coûts fortement réduits (génie civil notamment) pour les constructions et aménagements neufs.

4. Bilan des coûts externes

La partie suivante propose le bilan des externalités environnementales négatives produites par les différents types de véhicules. Par externalité négative, on entend toute situation où un agent économique détériore le bien-être ressenti par un autre agent, sans que ce dernier ne soit compensé, et sans qu'aucun marché ne vienne pallier cette situation. Dans le cas du véhicule automobile, le conducteur impose un coût social aux autres agents dans la mesure où son véhicule est émetteur de CO₂, de pollution locale ou encore de bruit.

Les externalités peuvent être décomposées selon le cycle de vie du véhicule : amont (production du véhicule et de l'énergie), circulation et aval (fin de vie et recyclage du véhicule et des unités de production d'énergie). L'étude valorise l'ensemble de ces externalités sur la base d'un calcul actualisé sur la durée de vie des véhicules.

La monétarisation repose sur les valeurs de référence des derniers travaux disponibles :

- Manuel de la Commission européenne ou *Handbook on estimation of external cost in transport sector*. Publié en 2008 par la Commission européenne, ce « manuel » sur l'évaluation des coûts externes des transports présente un état des lieux précis sur les valorisations correspondantes dans les principaux pays de l'UE ;
- Rapport du Commissariat général du plan *Transports : choix des investissements et coût des nuisances* de juin 2001, dit rapport Boiteux 2, qui sert de base aux circulaires d'évaluation des projets d'infrastructures du Ministère en charge des Transports ;
- Rapport du Centre d'Analyse Stratégique *Valeur tutélaire du carbone* de juin 2008, groupe présidé par Alain Quinet ;
- Etude ADEME sur le contenu CO₂ du kWh électrique en France selon l'usage de janvier 2005.

Sont valorisées monétairement les externalités suivantes :

- les émissions de polluants globaux (CO₂) ;
- les émissions de polluants locaux ;
- le bruit.

Il s'agit des externalités que l'*Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures* propose de prendre en compte dans la réalisation de bilans coûts-avantages. Les autres externalités (le coût marginal d'usage de l'infrastructure routière, les coûts de l'insécurité routière) ne sont pas considérées parce que supposées identiques pour les cinq types de véhicules ; elles n'interviendront donc pas dans un bilan global comparatif véhicules thermiques vs. véhicules électriques.

Il est parfois avancé que le véhicule tout électrique, plus silencieux que les véhicules thermiques traditionnels, serait de ce fait plus dangereux et pourrait entraîner une hausse de l'insécurité routière. Le véhicule tout électrique est en effet très peu bruyant à petites vitesses, comme en ville, mais le risque d'accidents graves ou mortels y est alors négligeable. A plus grande vitesse en revanche, le frottement de l'air et du revêtement au niveau du véhicule produit un bruit *a priori* comparable à celui des véhicules thermiques. Globalement, on considère donc que les véhicules tout électrique ne présentent pas de surplus d'externalités en termes d'insécurité routière. Dans le cas d'un développement du parc de véhicules électriques, des études *ex-post* seront nécessaires pour confirmer (ou infirmer) cette hypothèse.

En ce qui concerne l'extraction et le recyclage de métaux rares constituant les batteries, la littérature propose des études aux conclusions divergentes. Les batteries de type lithium-ion semblent laisser disposer de métaux réutilisables après la fin de vie de la batterie. On émet donc l'hypothèse que le recyclage des batteries revêtira un intérêt économique pour les industriels producteurs de batteries et que les pollutions liées à ce recyclage seront limitées. Une étude menée par les pouvoirs publics, les constructeurs automobiles et les fabricants de batterie est en cours pour identifier et définir les possibilités de seconde vie des matériaux constituant les batteries. En ce qui concerne la rareté éventuelle des matières premières, on considère qu'elle n'aura pas d'impact sérieux à court terme dans le cadre des hypothèses de développement du parc de véhicules électriques.

L'externalité négative liée aux déchets nucléaires (au-delà de la filière de retraitement et du démantèlement déjà internalisés dans le coût de l'électricité) n'est pas valorisée faute d'évaluation fiable.

4.1. Coût des émissions de CO₂

Le transport routier est responsable de 33 % des émissions de CO₂ en France (CITEPA). Les voitures particulières sont responsables d'un peu plus de la moitié des rejets attribués au secteur des transports routiers, soit environ 18 % du volume global de CO₂ émis en France (CITEPA). Les émissions de CO₂ des véhicules automobiles représentent donc à la fois un enjeu majeur et un coût social important.

Il convient de tenir compte des émissions sur la totalité du cycle de vie du véhicule. Cependant, il n'existe pas encore d'analyse intégrale du cycle de vie des différents types de véhicules étudiés. Une étude plus complète menée par l'ADEME est attendue, elle devrait permettre une comparaison plus fine des émissions.

Concernant la phase de production de l'énergie (carburant ou électricité), on considère une baisse des émissions au niveau des raffineries et des centrales électriques entre 2010 et 2020 :

- Pour la production d'essence et de diesel, on considère une réduction des émissions rapportées au kilomètre de 1 % par an (par exemple pour le véhicule à essence, on passe ainsi de 30 gCO₂/km émis au niveau de la raffinerie en 2010 à 27 gCO₂/km en 2020) ;
- Pour la production d'électricité, le contenu CO₂ du kWh dépend du mode de production d'électricité. Si on se place dans le cas du mix énergétique français, les émissions seront plus faibles que dans le cas d'un mix énergétique plus émetteur de CO₂, comme le mix moyen européen. Par ailleurs, au sein même d'un pays, la période de la journée où l'on observe une demande supplémentaire d'électricité va influencer sur les émissions de CO₂ : au moment d'un pic de demande d'électricité (correspondant à un pic de consommation des ménages), le contenu CO₂ du kWh électrique produit sera marginalement plus élevé que dans la moyenne. La nuit en revanche, toute demande d'un kWh supplémentaire n'engendrera pas d'émissions de CO₂ supplémentaires (car la production d'électricité reposera alors principalement sur l'énergie nucléaire).

Au regard de cette variabilité potentielle des émissions lors de l'étape de production de l'électricité, on donne dans les calculs suivants une fourchette indicative, la valeur basse correspondant aux émissions optimisées pour un mix énergétique français (avec, par exemple, recharge des batteries de tout véhicule électrique ou hybride durant la nuit) et la valeur haute correspondant aux émissions pour le mix énergétique moyen européen. On pourra considérer les émissions du mix européen comme des valeurs marginales d'émissions du mix français au moment des pointes de demande de l'électricité.

On estime que le contenu CO₂ du kWh va décroître progressivement jusqu'à l'horizon 2020. Les contenus CO₂ du kWh électrique retenus dans les calculs sont les suivants :

Contenu CO₂ du kWh électrique produit selon le type de mix énergétique

Contenu CO ₂ du kWh électrique (en gCO ₂ /kWh)	2010	2020
Mix français	65	43
Mix européen	400	360

Source : RTE et calculs CGDD

L'impact sur les réseaux électriques est relativement faible tant que le nombre de véhicules électriques reste inférieur à 1 ou 2 millions d'unités. Le réseau de transport d'électricité (RTE) ne serait pas affecté. Le réseau de distribution quant à lui devrait être renforcé ; d'après le plan gouvernemental, les investissements de renforcement du réseau de distribution nécessaires seraient de l'ordre de 750 M€ en cumulés entre 2010 et 2020. A terme, si le nombre de véhicules électriques en circulation devient très important, les batteries pourraient interagir avec le réseau pour lui restituer de l'énergie en cas de forte demande (on parle de « réseau intelligent » ou « smart grid »).

Pour la phase de circulation, les niveaux d'émission sont déduits des performances des véhicules (cf. hypothèses générales, partie 1).

La valeur du carbone utilisée pour ces estimations est celle fournie par le « Rapport Quinet » du Centre d'Analyse Stratégique (CAS). Le coût social de la tonne de CO₂ est fixé à 32 € en 2010, avec un taux d'accroissement annuel du prix de la tonne constant de 5,8 % jusqu'en 2030. En 2030, la tonne est valorisée à 100 €, avec un taux d'accroissement annuel de 4 % les années suivantes. La valeur de 32 €/tonne de CO₂ en 2010 est cohérente avec les différentes mesures du « coût de l'effet de serre » disponibles dans la littérature :

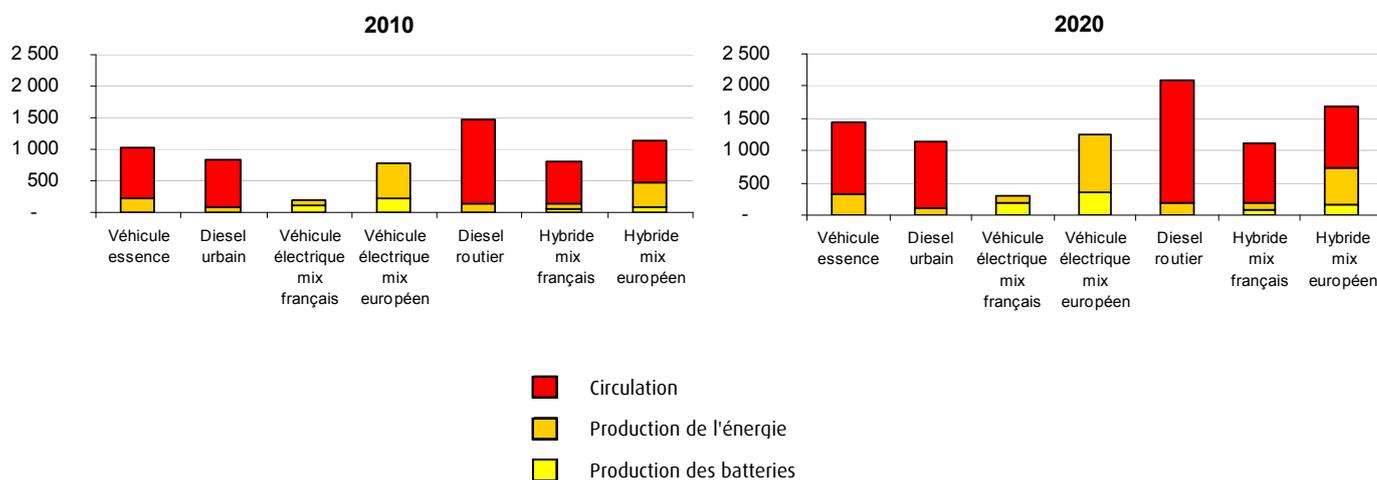
Valeurs tutélaires disponibles pour la tonne de CO₂

€/tonne de CO ₂	2007	2010	2020
Boiteux	27	32	42
CAS (rapport Quinet)		32	56 (100 en 2030)
Handbook		25	40

Sources : Rapport Boiteux, Rapport Quinet, Handbook

Les diagrammes suivants montrent que le véhicule tout électrique et le véhicule hybride rechargeable présentent un avantage certain en ce qui concerne les émissions de CO₂ dans un pays au mix énergétique semblable à celui de la France. Les estimations pour 2020 laissent entrevoir un avantage encore accru des véhicules électrique et hybride. Dans d'autres pays d'Europe, cet avantage est moins net ; dans le cas extrême d'un pays où l'essentiel de l'électricité disponible est fourni par le charbon, le véhicule tout électrique devient moins performant que le véhicule thermique classique. La fourchette indicative du coût total du CO₂ du véhicule électrique, variant du simple au quadruple, dénote l'importance du mix énergétique employé pour la production électrique et, par conséquent, en France, de la période de recharge.

Coût du CO₂ dans les différentes étapes de la vie d'un véhicule (€)



Source : calculs CGDD

Les tableaux détaillés sont disponibles en annexe.

4.2. Coût des polluants locaux

Les polluants locaux représentent une nuisance aux effets très variés : santé, bâti, environnement, etc. Les effets monétarisés par le rapport Boiteux et le Manuel de la Commission Européenne (*Handbook*) reposent ainsi sur les coûts d'impact sur la santé et la mortalité, l'impact sur les bâtiments, et les atteintes à la végétation (perte de rendement agricole, entre autres). Les autres effets sont considérés comme *a priori* moins importants et plus difficiles à évaluer (Boiteux).

Les polluants locaux sont émis principalement durant la phase de circulation du véhicule ; néanmoins, des estimations sont également établies pour les phases de production de l'énergie et des batteries. Une analyse en cycle de vie permettrait toutefois d'établir un bilan complet des émissions de polluants locaux sur toute la durée de vie du véhicule.

Les émissions de polluants locaux sont estimées : (1) pour la production de batterie en suivant le rapport Ollivier (EDF, 1996) et des informations fournies par le groupe Saft ; (2) pour la production d'électricité en suivant l'étude européenne MEET ; et (3) pour la circulation en suivant les normes Euro.

1. Concernant la phase de production de la batterie :

- Pour le SO₂, la valeur d'émission unitaire est fournie par les industriels (Saft) pour 2009. Concernant les NO_x et les PM, ont été utilisées faute de données plus récentes les valeurs d'émissions de l'étude Ollivier (EDF, 1996). Les valeurs d'émission peuvent ainsi souffrir d'une certaine surestimation puisqu'on ne tient pas compte des progrès réalisés depuis 1996. Cependant l'essentiel du coût (75 %) est lié à l'émission de SO₂.

2. Concernant la phase de production de l'électricité :

- Comme pour le CO₂, une valeur basse est calculée en considérant une moyenne d'émissions en mix français et une valeur haute en considérant une moyenne d'émissions en mix européen⁷.

3. Concernant la phase de circulation :

- Les émissions en phase de circulation sont calculées sur la base des normes « Euro » (cf. encadré), Euro 5 pour les véhicules de 2010 et Euro 6 pour les véhicules de 2020.

Pour les autres étapes du cycle de vie du véhicule (fabrication du moteur et de la carrosserie, recyclage), les émissions ne sont pas prises en compte. Cela revient en première approximation à supposer que les émissions de ces étapes sont les mêmes pour les différents véhicules. On reste dans l'attente de données fiables issues d'une analyse de cycle de vie des différents types de véhicules étudiés.

Encadré : Les normes d'émission « Euro »

Les normes « Euro » fixent, depuis 1988, les seuils maximaux de rejets de polluants locaux dans la phase de circulation de tous les véhicules mis sur le marché. La norme Euro 5 doit être observée pour les véhicules neufs immatriculés à partir de janvier 2011 et la norme Euro 6 sera imposée aux véhicules neufs immatriculés après septembre 2015. Les valeurs limites requises sont les suivantes (mesurées durant un cycle de conduite normalisé NEDC) :

Véhicule diesel (en mg/km):

Normes d'émissions pour un véhicule diesel (en mg/km)

	Oxydes d'azote (NO _x)	Monoxyde de carbone (CO)	Hydrocarbures (HC)	HC+NO _x	Particules (PM)
Euro 5 (2011)	180	500	-	230	5
Euro 6 (2015)	80	500	-	170	5

Source : Règlement européen 715/2007

Véhicule essence (en mg/km) :

Normes d'émissions pour un véhicule essence (en mg/km)

	Oxydes d'azote (NO _x)	Monoxyde de carbone (CO)	Hydrocarbures (HC)	Hydrocarbures non méthaniques (HCNM)	Particules (PM)
Euro 5 (2011)	60	1000	100	68	5
Euro 6 (2015)	60	1000	100	68	5

Source : Règlement européen 715/2007

La valorisation repose sur le Manuel de la Commission Européenne sur les coûts externe des transports (Handbook). Les valeurs suivantes sont référencées :

Nox : 0,77 c€/g ; NMVOC : 0,14c€/g ; SO₂ : 0,8 c€/g
 PM₁₀ : [14 c€/g – 3 c€/g] suivant densité population
 PM_{2,5} : [39 c€/g – 7,8 c€/g] suivant densité population

Aucune valorisation homogène n'est disponible pour les polluants de type CO, HC et HCNM ; les estimations ne prennent donc en compte que trois polluants (le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x) et les particules (PM)), donnant ainsi un minorant du coût de l'externalité « polluants locaux ».

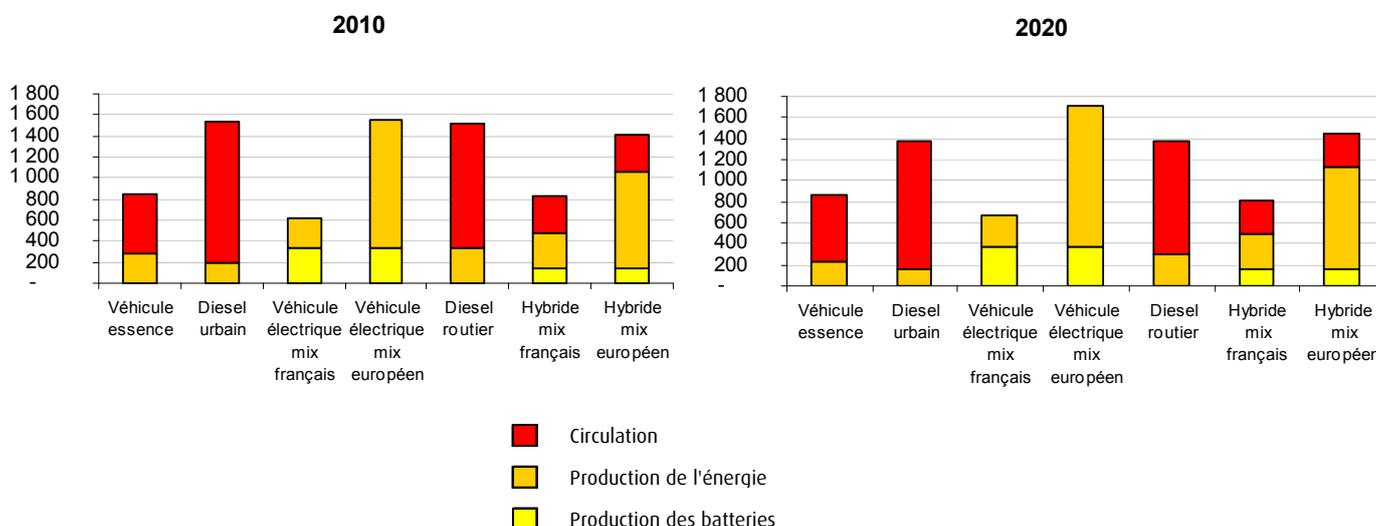
⁷ Cette valeur moyenne européenne peut être considérée comme une approximation des émissions marginales françaises.

Ces valeurs dépendent de la motorisation et de la densité de population de la zone de circulation. Dans notre cas, la valeur choisie correspond au milieu de déplacement principal pour chaque type de véhicule et à la norme « Euro » relative à la période d'acquisition du véhicule. Pour le véhicule hybride, on suppose un fonctionnement de type thermique pour les trajets interurbains (la valorisation choisie est ainsi la même que pour le véhicule diesel routier) et un fonctionnement sur la batterie pour les trajets urbains (la valorisation choisie est alors la même que pour le véhicule tout électrique).

Le taux de croissance du coût des polluants locaux entre 2010 et 2020 est approché par le taux de croissance du PIB par tête (fixé à 1 % par an).

Les graphiques suivants confirment que les polluants locaux sont émis principalement lors de la phase de circulation et notamment pour les véhicules diesel. La grande variabilité de coût des véhicules tout électrique et hybride est liée, comme pour le CO₂, au mix énergétique considéré. En mix moyen européen, les véhicules tout électrique se retrouvent au niveau ou au-dessus du diesel routier : près de 1 500 € par véhicule en 2010 et entre 1 500 € et 1 700 € en 2020.

Coût de la pollution locale dans les différentes étapes de la vie d'un véhicule (€)



Source : calculs CGDD

4.3. Valorisation du bruit

Les phénomènes de bruit en cause sont complexes et leurs impacts sont difficiles à évaluer. Le rapport Boiteux se fonde sur une méthode d'évaluation par préférences révélées, en observant la valeur des nuisances causées par le bruit dans les variations du prix de l'immobilier. Ces résultats sont corrigés pour tenir compte des effets du bruit sur la santé et de l'impact plus important de la gêne durant un bruit nocturne. Le rapport souligne la nécessité d'études complémentaires sur le différentiel de valorisation du bruit entre le jour et la nuit ainsi que sur l'impact du bruit sur la santé. Le *Handbook* fournit des valeurs de référence qui suivent deux approches : une approche marginale à partir de fonctions de coût de dommages et une approche à partir des consentements à payer pour plus de silence qui prend également en compte des effets sur la santé.

Dans le cadre de l'étude, seul l'impact du bruit de la phase de circulation est valorisé, sur la base des valeurs « jour » du *Handbook*, présentées dans le tableau suivant :

Urbain	Rural
0,76 c€/km [0,76-1,85] de jour	0,01 c€/km [0,01 - 0,014] de jour
1,39 c€/km [1,39 - 3,37] de nuit	0,03 c€/km [0,01 - 0,03] de nuit

Source : Handbook

Les bruits émis dépendent de la motorisation et la gêne occasionnée croît en fonction de la densité de population. On prend ainsi en compte les hypothèses suivantes :

- Une pondération du coût du bruit (x 1,2) est appliquée pour un fonctionnement de type diesel par rapport à l'essence en milieu urbain, conformément aux recommandations du *Handbook*. Pour le véhicule électrique et le fonctionnement électrique de l'hybride, on considère un bruit moyen de 60 dB contre 65 dB pour les véhicules thermiques (ADEME, constructeurs automobiles) ;
- Pour les véhicules diesel routier et hybride, l'utilisation est considérée pour moitié urbaine et pour moitié « rurale ». On suppose que l'hybride fonctionne intégralement à l'aide du moteur électrique en milieu urbain et intégralement à l'aide du moteur thermique en milieu rural ;
- Le taux de croissance du coût du bruit est approché par le taux de croissance du PIB par habitant (fixé à 1 % par an).

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

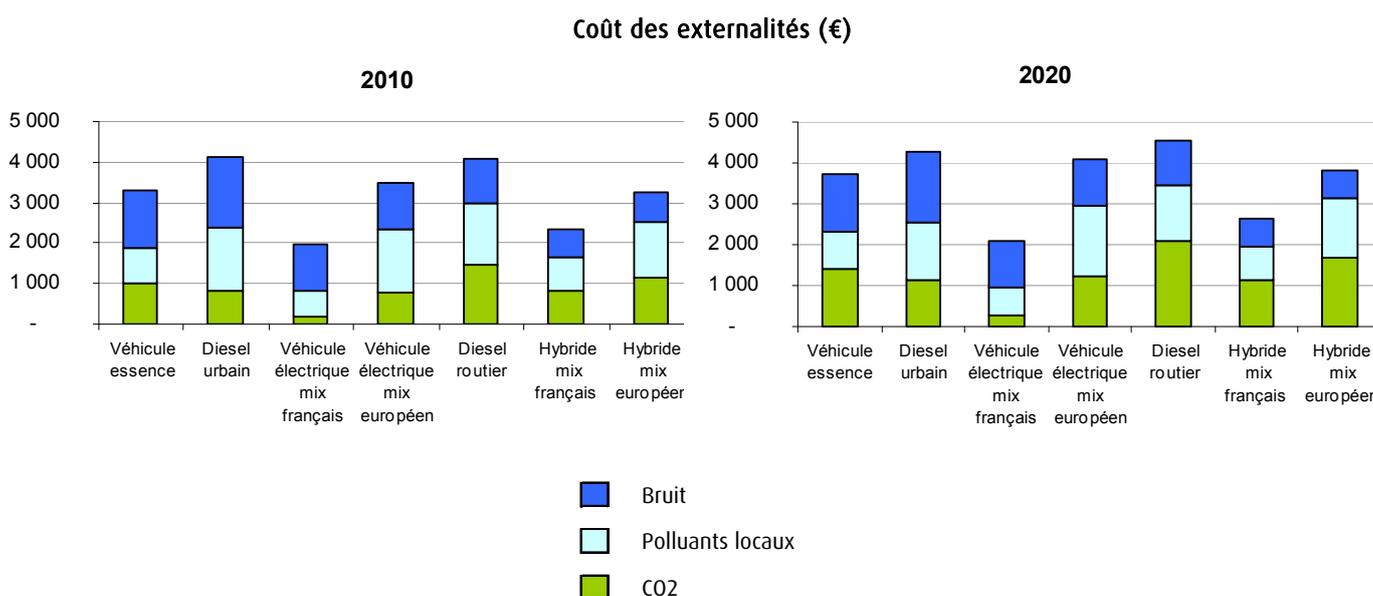
Comparaison des coûts du bruit pour les différents types de véhicule en 2010 et 2020

	Véhicule essence	Véhicule diesel urbain	Véhicule électrique	Véhicule diesel routier	Véhicule hybride rechargeable
2010 : Coût total actualisé sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule (€ ₂₀₁₀)	1 453	1 744	1 162	1 085	727
2020 : Coût total actualisé sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule (€ ₂₀₁₀)	1 449	1 739	1 128	1 082	707

Source : calculs CGDD, à partir des valeurs du *Handbook*.

4.4. Bilan des externalités

En agrégeant les trois externalités environnementales prises en compte pour chaque type de véhicule, on observe qu'elles ont chacune un impact important. Les véhicules diesel pâtissent du coût des externalités le plus élevé. Le véhicule tout électrique engendre un coût moindre que le véhicule essence dans le cas d'un mix énergétique français, mais un coût plus élevé dans le cas d'un mix européen. Le véhicule tout électrique apparaît toutefois toujours engendrer moins d'externalités négatives que le véhicule diesel urbain. Malgré l'amélioration technique des véhicules, les coûts en 2020 sont légèrement supérieurs à ceux de 2010. Cela s'explique par la croissance du coût unitaire des externalités (CO₂ en particulier).



Source : calculs CGDD

5. Analyse coûts-avantages comparative des véhicules électriques

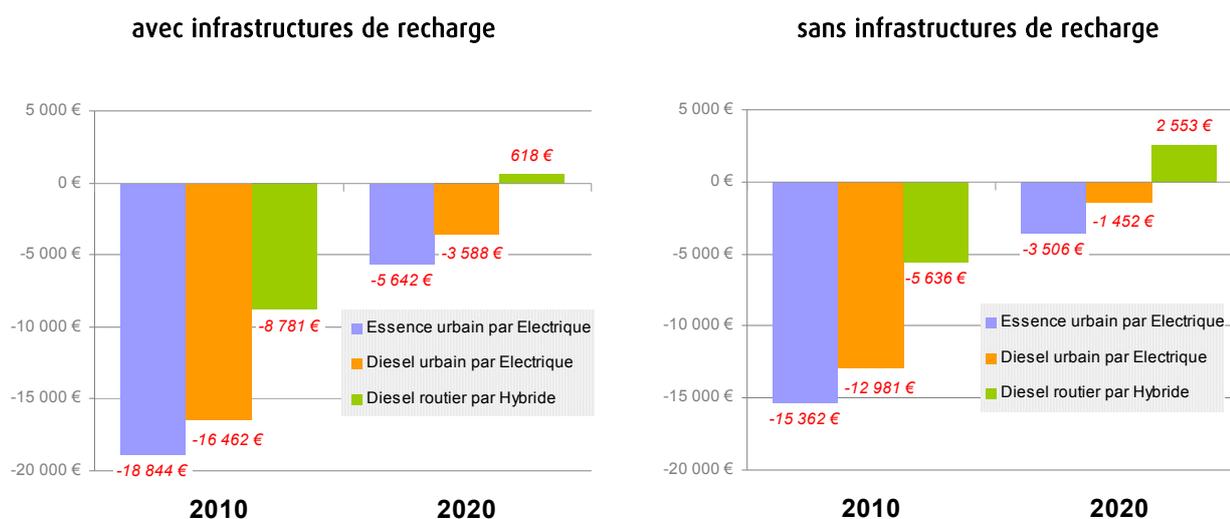
Sur la base des résultats présentés précédemment, la partie suivante propose un bilan coûts-avantages du passage d'un véhicule essence ou diesel « urbain » à un véhicule électrique d'une part et d'un véhicule diesel de type routier à un véhicule hybride rechargeable d'autre part.

Le bilan est réalisé en tenant compte de l'ensemble des postes : possession⁸, infrastructures de recharge, coût d'opportunité des fonds publics et externalités environnementales. Il porte sur l'ensemble des agents (socio-économique), on élimine donc les transferts entre agents, en particulier les taxes ou les subventions, qui n'ont un impact qu'à travers le coût d'opportunité des fonds publics.

Le coût d'opportunité des fonds publics (COFP) représente le coût pour la collectivité des besoins en financement public lié au déficit budgétaire résultant. Celui-ci provient d'une part des primes versées à l'achat de véhicules électriques et d'autre part du manque à gagner en recettes de TIPP, lié à une diminution de la consommation de carburants d'origine pétrolière. Ce déficit budgétaire a un coût pour la collectivité puisqu'il doit être financé par un accroissement des prélèvements sur l'économie, entraînant une perte de bien-être. Le COFP est estimé par les experts à 30 % du montant du déficit à financer, soit, dans notre cas, un taux de 30 % appliqué sur la fiscalité (TIPP, TLE, Taxe Carbone), le Bonus/Malus et le coût des bornes de recharge publique (en tenant compte du signe du transfert).

Le graphique suivant présente les différents bilans du remplacement d'un véhicule thermique par un véhicule électrique, selon la catégorie de véhicule, aujourd'hui et à l'horizon 2020. Les bilans détaillés sont exposés en encadré.

Bilans comparés du remplacement d'un véhicule thermique par un véhicule électrique (€)



Source : calculs CGDD

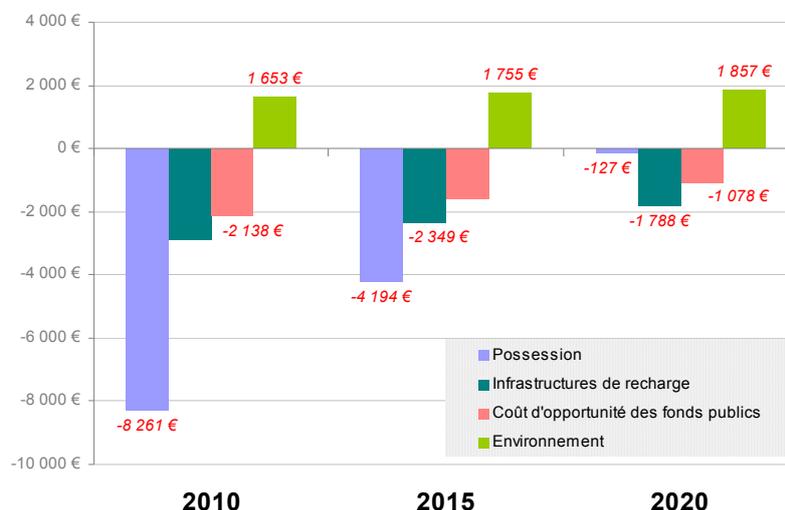
Pour le tout électrique, le bilan est négatif pour un usager en début et en fin de période, les avantages environnementaux ne couvrent pas le besoin de financement public, les coûts de possession très élevés et les dépenses liées aux infrastructures de recharge. Le désavantage du tout électrique est moins marqué vis-à-vis du diesel urbain davantage émetteur de pollution locale. Le désavantage très important en 2010, autour de 20 000 €, est près de 4 fois moindre en 2020.

Pour l'hybride, le bilan est négatif en 2010 mais il devient positif à l'horizon 2020, avec un gain pour l'utilisateur de l'ordre de 600 €.

⁸ La TVA n'est prise en compte dans aucun coût car il s'agit d'un transfert monétaire entre agents économiques et on raisonne dans ce genre d'étude à niveau de consommation global constant.

Il convient de souligner la grande sensibilité des résultats à l'ensemble des paramètres étudiés et plus particulièrement au coût de la batterie et à la consommation et au coût du carburant. En changeant légèrement la valeur de ces paramètres, les bilans peuvent varier, en faveur du véhicule électrique ou en défaveur du véhicule hybride (cf. analyse de sensibilité disponible en annexe). Les résultats des bilans illustrent ainsi le cadre d'hypothèses retenues et nombre de paramètres restent encore difficiles à prévoir. L'évolution sous-jacente des coûts de possession est cruciale, comme le montre le graphique suivant. Il s'agit ici des coûts calculés pour un véhicule moyen (30 % tout électrique et 70 % hybride).

Evolution moyenne des coûts entre 2010 et 2020 (€)



Les bilans présentés ici sont des bilans moyens. En réalité, il devrait exister des situations plus favorables où devraient émerger en premier les véhicules tout électrique : par exemple, les flottes d'entreprises de type La Poste qui peuvent optimiser leur usage (usage quotidien intensif, tournées programmées, recharge fréquente). Par ailleurs, le coût des infrastructures pourrait être également optimisé, notamment dans les constructions neuves⁹ et dans les opérations d'aménagement public et de requalification des quartiers (éco-quartiers, périmètres de rénovation urbaine, etc.). De surcroît, pour un usager, le coût perçu de l'infrastructure serait plutôt équivalent au coût de la prise particulière, soit 500 € en 2010 et 300 € en 2020.

Un soutien au développement du marché des véhicules électriques semble requis pour assurer une production de masse, nécessaire à la baisse des coûts, et asseoir ainsi la compétitivité de ces véhicules, dont les gains environnementaux sont réels (en mix énergétique français).

Néanmoins, du point de vue de l'efficacité économique à « décarboner » le secteur, le bilan implique un coût social de la tonne de CO₂ évitée¹⁰ supérieur aux valeurs recommandées par le Conseil d'Analyse Stratégique¹¹ sauf pour le véhicule hybride à la fin de la période (de l'ordre de 20 € pour le véhicule hybride et 350 € pour le véhicule tout électrique). Le tableau détaillant les coûts de la tonne de CO₂ évitée est disponible en annexe.

⁹ En 2008, la construction neuve s'élève à 25 millions de m² de locaux résidentiels, équivalents à 350 000 logements, et 31 millions de m² de locaux non résidentiels (SoeS, Sita@del2, date réelle).

¹⁰ Le coût social de la tonne de CO₂ évitée est calculé en rapportant le bilan socio-économique du passage d'un véhicule thermique à un véhicule électrique aux tonnes de CO₂ évitées.

¹¹ 32€ en 2010 avec un taux d'accroissement annuel du prix de la tonne de 5,8 % jusqu'en 2030.

Encadré : Coûts-avantages du passage d'un véhicule thermique à un véhicule électrique
A- Coûts-avantages du passage d'un véhicule essence à un véhicule tout électrique

Bilan coûts-avantages du passage d'un véhicule essence à un véhicule tout électrique

Bilan du passage essence urbain → électrique pour un particulier (€)		Coûts		Avantages		Bilan	
		2010	2020	2010	2020	2010	2020
Economie	Possession (HT)	13 923	3 950				
	→ dont : batterie (HT)	16 722	6 271				
	→ dont : carburant (HT)			1 545	1 067		
	Infrastructure de recharge	3 146	1 929				
Fiscalité	Coût d'opportunité des fonds publics	3 130	1 419				
<i>Sous-total</i>		<i>20 198</i>	<i>7 297</i>			<i>-20 198</i>	<i>-7 297</i>
Environnement (pour un mix énergétique français)	CO2			826	1 141		
	Pollution locale			238	194		
	Bruit			291	321		
	<i>Sous-total</i>			<i>1 355</i>	<i>1 655</i>	<i>1 355</i>	<i>1 655</i>
Total		20 198	7 297	1 355	1 655	-18 844	-5 642

Source : calculs CGDD

Le bilan est négatif en 2010 et en 2020, les avantages environnementaux ne couvrent pas les différents postes de coûts. Le surcoût très important en 2010 est divisé par 3,5 sur la période pour atteindre un peu plus de 5 500 € en 2020.

Dans la cas d'un mix énergétique européen, le bilan serait alourdi de 1 500 à 2 000 €.

B- Coûts-avantages du passage d'un véhicule diesel urbain à un véhicule tout électrique

Bilan coûts-avantages du passage d'un véhicule diesel urbain à un véhicule tout électrique

Bilan du passage diesel urbain → électrique pour un particulier (€)		Coûts		Avantages		Bilan	
		2010	2020	2010	2020	2010	2020
Economie	Possession (HT)	12 853	2 833				
	→ dont : batterie (HT)	16 722	6 271				
	→ dont : carburant (HT)			1 361	930		
	Infrastructure de recharge	3 146	1 929				
Fiscalité	Coût d'opportunité des fonds publics	2 617	1 006				
<i>Sous-total</i>		<i>18 616</i>	<i>5 768</i>			<i>-18 616</i>	<i>-5 768</i>
Environnement (pour un mix énergétique français)	CO2			649	859		
	Pollution locale			923	709		
	Bruit			581	611		
	<i>Sous-total</i>			<i>2 153</i>	<i>2 179</i>	<i>2 153</i>	<i>2 179</i>
Total		18 616	5 768	2 153	2 179	-16 462	-3 588

Source : calculs CGDD

Le bilan est cette fois encore négatif mais moins marqué du fait des avantages environnementaux plus élevés (bruit et pollution locale). Il est à noter également que le manque à gagner sur les recettes de TIPP est plus faible, expliquant ainsi le moindre coût d'opportunité des fonds publics par rapport au bilan essence/électrique. La réduction du coût de la batterie permet de faire baisser le surcoût du véhicule électrique de 16 000 € en 2010 à 3 500 € en fin de période.

Comme dans le cas précédent, le bilan serait alourdi de 1 500 à 2 000 € dans la cas d'un mix énergétique européen.

C- Coûts-avantages du passage d'un véhicule diesel routier à un véhicule hybride rechargeable

Bilan coûts-avantages du passage d'un véhicule diesel routier à un véhicule hybride rechargeable

Bilan du passage diesel routier → hybride pour un particulier (€)		Coûts		Avantages		Bilan	
		2010	2020	2010	2020	2010	2020
Economie	Possession (HT)	5 927			1 415		
	→ dont : batterie (HT)	5 217	1 957				
	→ dont : carburant (HT)			1 799	1 699		
	Infrastructure de recharge	2 810	1 728				
Fiscalité	Coût d'opportunité des fonds publics	1 757	967				
<i>Sous-total</i>		<i>10 494</i>	<i>2 695</i>		<i>1 415</i>	<i>-10 494</i>	<i>-1 280</i>
Environnement (<i>pour un mix énergétique français</i>)	CO2			673	955		
	Pollution locale			682	569		
	Bruit			358	375		
<i>Sous-total</i>				<i>1 713</i>	<i>1 898</i>	<i>1 713</i>	<i>1 898</i>
Total		10 494	2 695	1 713	1 898	-8 781	618

Source : calculs CGDD

Si le bilan est négatif en 2010, il est à la faveur du véhicule hybride rechargeable à terme, avec un gain de l'ordre de 600 €, du fait des coûts de possession plus avantageux.

Mise en perspective et éléments conclusifs

En 2020, le bilan coût-avantages du passage d'un véhicule thermique à un véhicule électrique est partagé : positif pour l'hybride mais négatif pour le tout électrique. Le bilan positif du véhicule hybride rechargeable à l'horizon 2020 ouvre des perspectives pour un développement du marché à plus court terme. Le véhicule tout électrique devrait plutôt se développer dans des marchés de niche, du côté des flottes d'entreprises notamment.

Le bilan présenté dans cette étude est particulièrement sensible aux hypothèses retenues (notamment concernant la batterie et la consommation des véhicules). Des variations apparemment minimales de certains paramètres pris isolément peuvent modifier sensiblement le bilan. Le bilan final est donc à prendre avec une précaution particulière, au regard des hypothèses retenues. Le mix de production électrique utilisé est le mix français. Dans le cas d'un mix moyen européen, le bilan serait négatif à terme, aussi bien pour le tout électrique que l'hybride. La prise en compte du facteur CO₂ de la production électrique est essentielle dans les perspectives de développement des véhicules électriques à l'échelle européenne.

Pour développer ces marchés à hauteur des ambitions du Plan national et favoriser la progression des technologies, des mesures de soutien public sont nécessaires, via des investissements en R&D et le subventionnement à l'achat. Sur ce point, des primes sont actuellement accordées à travers le dispositif de bonus malus, à hauteur de 5 000 € pour un véhicule électrique neuf et de 2 000 € pour un véhicule hybride. En l'état actuel des textes, l'octroi de ces subventions est prévu jusqu'en 2012. Un soutien plus durable pourrait s'avérer nécessaire.

Le développement des véhicules électriques nécessite le déploiement d'infrastructures de recharge dont le coût est relativement important, en début et en fin de période. Aussi, il convient de réfléchir dès à présent à l'optimisation de ces infrastructures, notamment en les incluant, dès la conception, dans les constructions et les aménagements neufs.

PARTIE II

Développement des véhicules électriques et mobilité des usagers : Analyse de la demande potentielle à partir de l'Enquête Nationale Transports Déplacements (ENTD 2008)

Résumé

L'objet de cette partie est d'apporter un éclairage sur la demande potentielle de véhicules électriques rechargeables. L'Enquête Nationale Transports Déplacements (ENTD), une enquête nationale qui s'intéresse aux déplacements des français, fournit des résultats récents (2008) sur la mobilité des ménages. Ces résultats peuvent fournir des éléments de réponse quant au développement potentiel d'un marché de véhicules électriques, notamment en termes d'acheteurs potentiels, d'autonomie souhaitable pour la batterie et de mise en place d'infrastructures de recharge. Cette seconde partie de l'étude examine en détail les données fournies par l'ENTD qui présentent un intérêt particulier pour le développement des véhicules électriques : le nombre de véhicules disponibles par ménage, la distance totale parcourue par véhicule et par jour, les déplacements locaux et les déplacements vers un lieu de travail fixe, la répartition horaire des déplacements au cours d'une journée, la disponibilité de places de stationnement et la mobilité à longue distance en véhicule particulier. Après une analyse des perspectives possibles pour les véhicules électriques, l'étude propose une synthèse économique pour déterminer un profil de faisabilité et fournit des éléments pour calibrer une taille de batterie optimale.

En guise de conclusion, s'appuyant sur ces premiers résultats, l'étude tente de dégager une taille de batterie optimale pour les véhicules électriques et hybrides rechargeables, correspondant à une autonomie optimale du véhicule. Cette optimisation repose à la fois sur la satisfaction de la demande des usagers potentiels, sur la minimisation des coûts d'achat et d'usage du véhicule, et sur la maximisation des bénéfices environnementaux entraînés en termes de réductions d'émissions de CO₂ notamment.

La deuxième partie de l'étude vise, à partir des résultats de l'Enquête Nationale Transports Déplacements (ENTD), à évaluer la demande potentielle pour les véhicules électriques, l'autonomie souhaitable de la batterie et les besoins en infrastructures de recharge.

1. Cadre de l'étude, présentation de l'Enquête Nationale Transports Déplacements

Les véhicules tout électrique et hybrides rechargeables sont actuellement en phase de développement et les modèles de ces nouvelles gammes ont été proposés en fin d'année 2010.

Les innovations réalisées au niveau de la batterie représentent un axe central pour le développement de ces véhicules. Une étude récente considère que l'une des difficultés principales est que les progrès sur les cinq postes cruciaux de la batterie ne peuvent être améliorés simultanément (Axsen, *et al.*, 2010) :

- la puissance de la batterie, c'est-à-dire la performance du véhicule ;
- son autonomie énergétique, c'est-à-dire la durée d'une décharge ;
- sa durée de vie, c'est-à-dire le nombre de cycles de charge/décharge réalisables ;
- son coût ;
- la sécurité des usagers, c'est-à-dire la prise en compte de la nocivité potentielle des produits chimiques qui la composent.

1.1. Caractéristiques des véhicules électriques étudiés

► les véhicules tout électrique

Le véhicule tout électrique considéré dans cette étude fonctionne à partir de l'énergie produite par la décharge d'une batterie de type lithium-ion. Une batterie d'une capacité de 25 kWh peut assurer une autonomie de 100 à 150 km, ce qui correspond à une consommation moyenne de 0,2 kWh/km (sur une année). Une recharge lente (3 kVA) de la batterie peut s'effectuer par un branchement sur le secteur, elle dure de sept à huit heures. La recharge est optimale en période de production d'électricité de base (pour limiter les émissions de dioxyde de carbone liées à la production d'électricité), en particulier pendant la nuit.

► Les véhicules hybrides rechargeables

Les véhicules hybrides rechargeables considérés disposent d'une batterie de type lithium-ion d'une part et d'un moteur thermique traditionnel de type diesel d'autre part. On peut ainsi envisager un mode de fonctionnement à partir de la batterie pour les premiers kilomètres d'autonomie jusqu'à l'épuisement complet de la batterie et un fonctionnement par moteur à combustion traditionnelle pour la distance parcourue au-delà de la décharge complète de la batterie.

Une étude d'Axsen *et al.* (2008) précise que la phase de décharge de la batterie peut avoir lieu selon deux cas de figure : en utilisant uniquement l'énergie de la batterie (véhicule de type *All Electric*) ou en utilisant à la fois l'énergie de la batterie et l'énergie du moteur thermique (véhicule de type *Blended*) jusqu'à décharge complète de la batterie. Cette dernière option permet une réduction des coûts de développement de la batterie, mais présente, à autonomie égale, des bénéfices environnementaux moindres qu'un fonctionnement de type *All Electric* (Axsen, *et al.*, 2010).

On peut ainsi tester différents types de véhicules hybrides rechargeables, sachant que les acheteurs potentiels sont généralement plus intéressés par les batteries les moins coûteuses. Une étude de marché interrogeant un panel d'acheteurs potentiels aux Etats-Unis indique que la majorité d'entre eux (un tiers des ménages interrogés, sur un échantillon de 2 373 ménages) choisirait préférentiellement le véhicule hybride rechargeable présentant les caractéristiques les moins ambitieuses parmi un choix de 12 véhicules, soit une autonomie d'une quinzaine de kilomètres (10 miles) et une décharge de type *Blended* (Axsen, *et al.*, 2010).

1.2. Présentation de l'ENTD

Le Ministère en charge des transports et l'INSEE conduisent tous les dix ans environ une enquête nationale sur les transports. Ces enquêtes sont les seules qui couvrent une telle envergure en France et décrivent tous les déplacements des français, quels qu'en soient le motif, la longueur, la durée du déplacement, le mode de transport ou la période de l'année. Afin de comprendre les comportements liés à la mobilité des ménages, ces enquêtes s'intéressent aussi aux possibilités d'accès aux transports en commun et aux modes de transport individuels dont disposent les ménages.

L'Enquête Nationale Transports Déplacements (ENTD 2008) la plus récente a été conduite au cours des années 2007 et 2008. Elle fournit des résultats récents sur la mobilité des français, intégrant des évolutions socio-économiques notables par rapport à l'enquête précédente de 1994, en particulier concernant l'apparition de la réduction du temps de travail et la plus grande

flexibilité de la durée du travail, ou encore l'augmentation du taux de diésélisation du parc automobile. La base de sondage correspond à 20 200 ménages enquêtés.

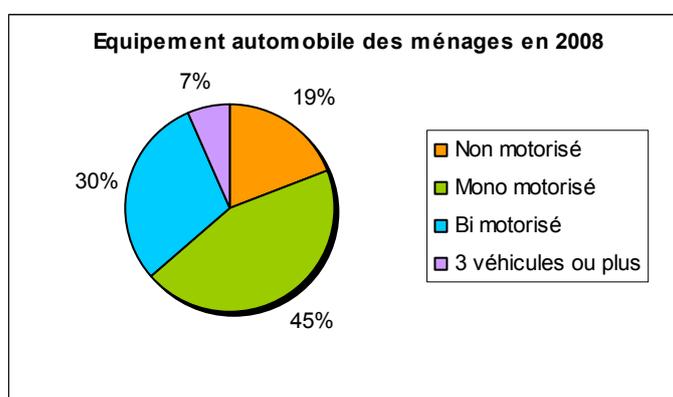
La présente étude repose sur une sélection des réponses de la base de données issue de l'ENTD pour s'intéresser uniquement aux déplacements en voiture particulière ou en véhicule utilitaire léger.

2. Les perspectives de développement des véhicules électriques au regard des résultats de l'ENTD

2.1. Les véhicules à disposition des ménages

L'ENTD comptabilise 26 753 000 ménages français en 2008, pour un parc français de 32 718 000 voitures particulières et véhicules utilitaires légers (parc ayant circulé au cours des 12 derniers mois avant l'enquête). Le parc à disposition des ménages est de 33,4 millions en 2008 (incluant les véhicules immobilisés depuis au moins un an).

Le nombre de véhicules dont dispose un ménage est utile pour déterminer la capacité d'achat d'un véhicule électrique ou hybride rechargeable. On suppose que les ménages mono-motorisés auront vraisemblablement plus de mal à se contenter d'un véhicule tout électrique compte-tenu de son autonomie, tandis qu'un ménage disposant de plusieurs véhicules pourrait *a priori* disposer d'un véhicule électrique et d'un véhicule thermique, ce dernier permettant la réalisation de déplacements occasionnels à longue distance.



Source : ENTD 2008, calculs SOeS

Perspectives pour le véhicule tout électrique :

On peut émettre l'hypothèse que le fait de disposer de deux véhicules ou plus augmente la probabilité que le ménage soit acheteur potentiel d'un véhicule tout électrique. Selon cette hypothèse, le nombre de véhicules à disposition des ménages est un premier facteur discriminant et, 64 % des ménages sont mono-motorisés ou ne disposent d'aucun véhicule. La mono-motorisation n'est cependant pas un critère nécessaire et suffisant pour discriminer un marché potentiel et des ménages mono-motorisés peuvent éventuellement être intéressés par l'acquisition d'un véhicule tout électrique – quitte à trouver un autre moyen de locomotion pour un déplacement à longue distance occasionnel. Les ménages disposant de deux véhicules ou plus représentent 37 % des ménages, ce qui correspond à une cible privilégiée pour un nouveau marché de véhicules électriques.

Perspectives pour le véhicule hybride rechargeable:

Le véhicule hybride rechargeable est *a priori* attractif pour tout ménage se déplaçant en voiture, du fait de sa capacité à réaliser de longues distances en utilisant son moteur thermique. En première approximation, on peut considérer que les ménages acheteurs potentiels seraient alors tous ceux disposant d'au moins un véhicule, soit 81 % de l'ensemble des ménages.

2.2. Les distances parcourues au cours d'une journée

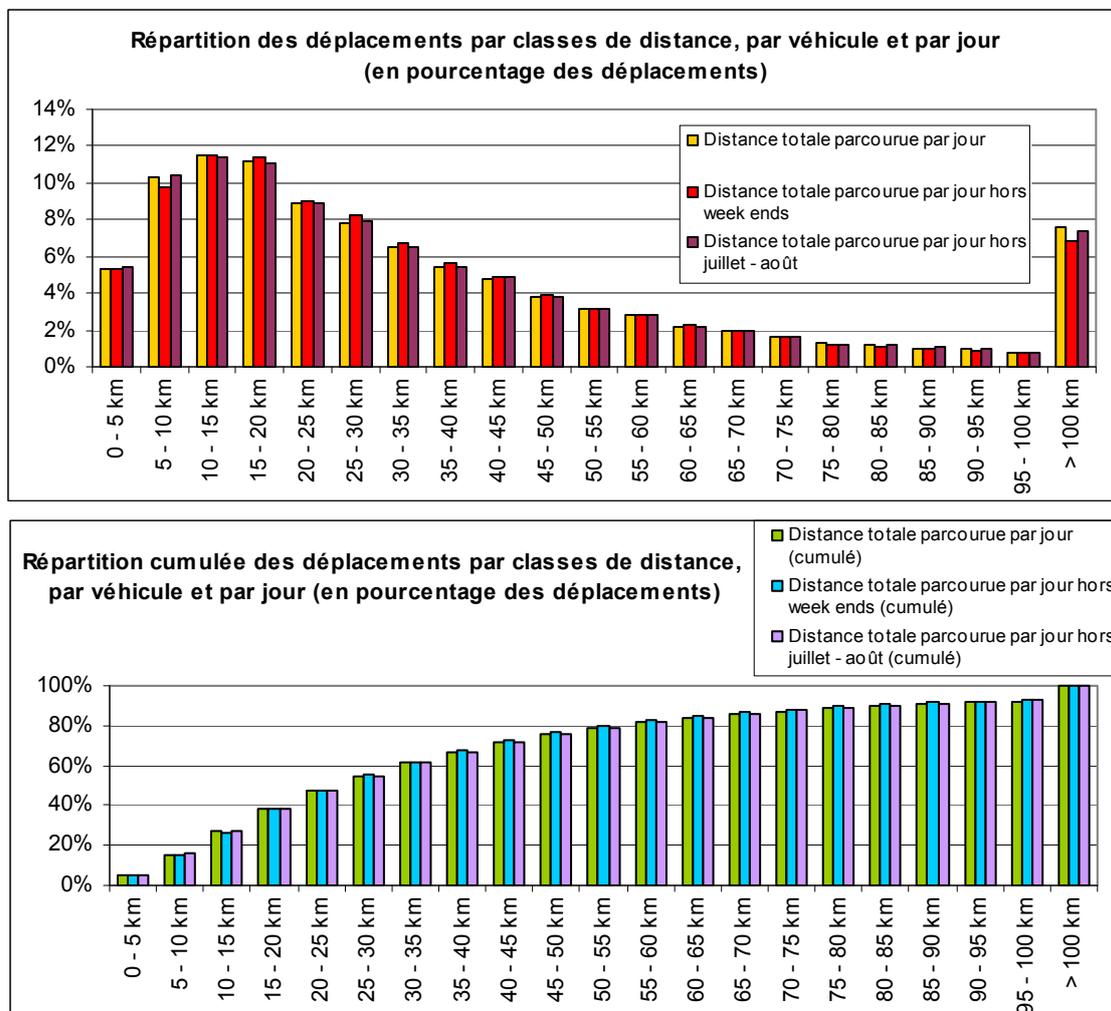
► Plus de 90 % des déplacements d'une journée ont une distance inférieure à 100 km

En analysant la répartition de la distance totale parcourue par un véhicule en une journée, on peut déterminer les besoins des usagers en termes d'autonomie de la batterie d'un véhicule électrique ou hybride. Les chiffres présentés dans ce paragraphe

proviennent des données du « carnet véhicule¹² ». On appelle déplacement le mouvement d'une personne d'un lieu de départ vers un lieu d'arrivée. Il se caractérise par un seul motif.

Le diagramme suivant présente la répartition des déplacements quotidiens moyens d'un véhicule par tranche de kilomètres parcourus. Il tient compte de tous les déplacements en véhicule particulier, quelle que soit la distance parcourue par déplacement (sont inclus les déplacements de plus de 80 km) pendant sept jours consécutifs. Seuls les voitures particulières et les véhicules utilitaires légers sont pris en compte. La distance prise en considération est la distance routière réalisée, elle est calculée par le logiciel Odomatrix. On dispose de 40 518 observations.

Répartition en pourcentage de déplacements



Source : ENT D 2008, calculs CGDD

92 % des déplacements totaux d'une journée ont une distance inférieure à 100km, avec un pic entre 10 et 20 km. Ces résultats sont cohérents avec les données déclaratives issues d'entretiens personnels selon lesquelles la distance moyenne d'un déplacement local¹³ en voiture un jour de semaine (du lundi au vendredi) est de 10,3 km, pour un total de déplacements quotidiens locaux de 2,04 par personne.

A l'échelle de l'échantillon étudié (10 179 véhicules ayant enregistré au moins un déplacement), 99,2 % des voitures particulières ou des véhicules utilitaires légers ne parcourent jamais plus de 100 km par jour (sur une semaine de l'année prise aléatoirement).

En excluant les week-ends ou les mois de juillet et août, on n'observe pas de comportement significativement différent.

Perspectives pour le véhicule tout électrique :

A l'aide d'une unique charge quotidienne durant la nuit, un véhicule tout électrique peut couvrir 92 % des déplacements réalisés quotidiennement avec une batterie de 100 km d'autonomie. Sur la base de la distance moyenne par déplacement

¹² Il s'agit d'un carnet installé aléatoirement dans un véhicule de chaque ménage sondé et qui recense tous les déplacements de ce véhicule pendant une semaine.

¹³ Déplacement effectué dans un rayon de 80 km autour du domicile.

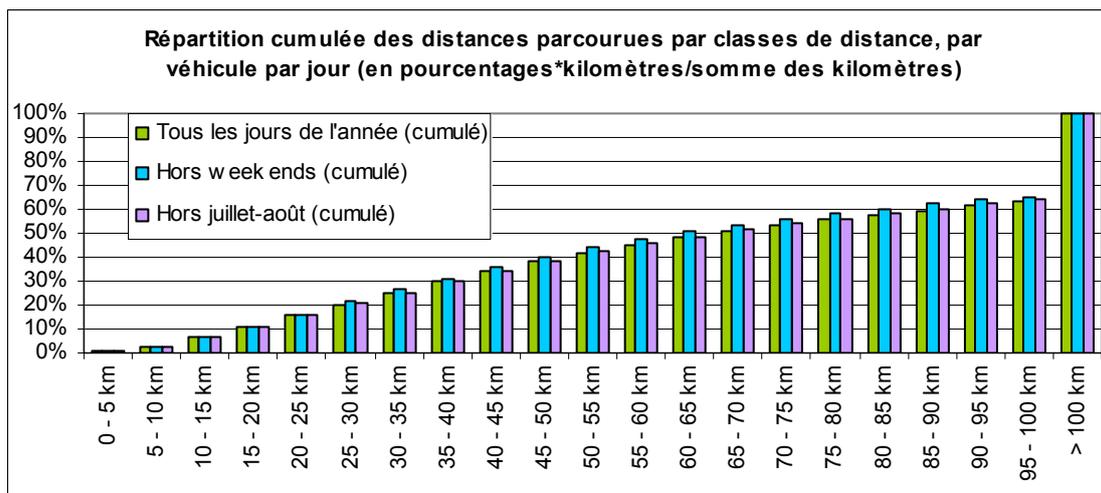
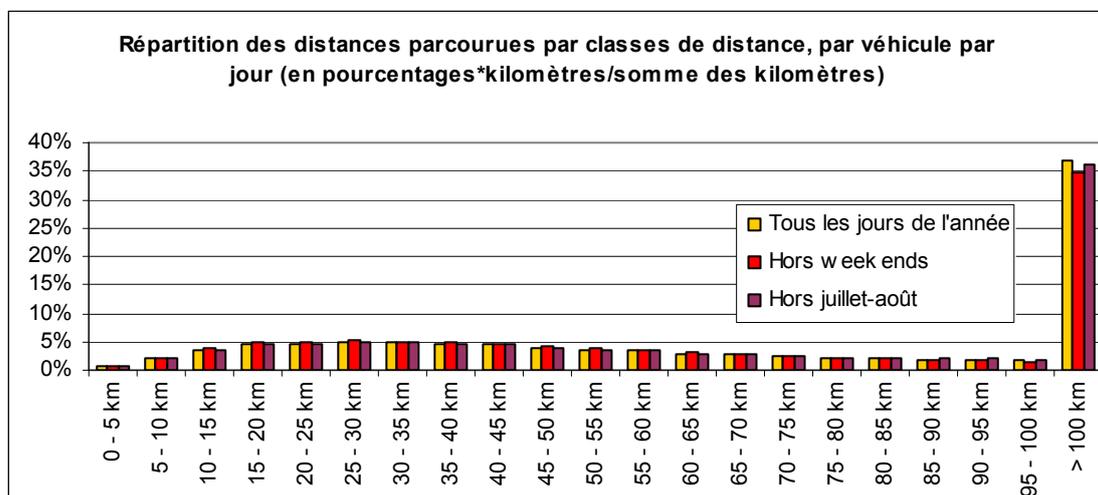
(10,3 km) et du nombre moyen de déplacements par personne et par jour (2,04), la distance moyenne parcourue par jour est de 21 km. Un véhicule tout électrique disposant d'une autonomie d'une centaine de kilomètres pourrait ainsi couvrir la grande majorité de ces déplacements et disposer, de surcroît, d'une flexibilité importante pour réaliser des trajets marginaux supplémentaires.

Perspectives pour le véhicule hybride rechargeable :

Ces résultats donnent des éléments de réponse pour déterminer une taille de batterie optimale du véhicule hybride rechargeable. Une batterie de 40 km d'autonomie suffirait à couvrir 67 % des déplacements quotidiens à l'aide de la seule décharge de la batterie. Les distances dépassant cette autonomie pourraient être réalisées à l'aide du fonctionnement du moteur thermique ou après une charge en cours de journée (recharge lente sur le lieu de travail ou semi-rapide sur un stationnement public ou d'une grande surface, par exemple).

Répartition en tenant compte du kilométrage quotidien

Les diagrammes précédents donnent une répartition des déplacements en fonction de la tranche de distance quotidienne parcourue par un véhicule. Pour mieux prendre en compte les effets environnementaux de la substitution de la motorisation thermique par la motorisation électrique, on peut également tenir compte des distances effectivement parcourues¹⁴ : le poids donné aux véhicules qui effectuent une distance quotidienne plus élevée est de fait plus important. La nouvelle courbe est très étalée et se voit décalée vers la droite, centrée sur des valeurs plus élevées (autour de 35 km). Les déplacements supérieurs à 100 km représentent 37 % des kilomètres parcourus.



Source : ENT D 2008, calculs CGDD

¹⁴ La part des déplacements par classe de distance est multipliée par le nombre de kilomètres effectués et ce chiffre est rapporté à l'ensemble des kilomètres parcourus. En ce qui concerne le kilométrage des valeurs supérieures à 100 km, on a approché la valeur du kilométrage à la distance moyenne d'un déplacement à longue distance, qui est de 235 km (cf. encadré). Un tel calibrage donne de fait un poids considérable à toutes les valeurs de déplacements enregistrés supérieures à 100 km, qui se trouvent condensées en un unique bâtonnet.

Encadré : Les déplacements longue distance

Du fait de l'autonomie limitée de la batterie, les déplacements à longue distance représentent une barrière cruciale au développement des véhicules tout électrique. Par déplacement à longue distance on entend tout déplacement dont la destination se situe à plus de 80 km à vol d'oiseau du lieu d'origine. La notion de voyage fait référence à l'ensemble des déplacements effectués par une personne au départ du domicile jusqu'à ce qu'elle y revienne. Si des déplacements inférieurs à 80 km donnent lieu à une nuitée, ils sont considérés comme relevant d'un voyage.

Les déplacements à longue distance représentent 1,3 % de l'ensemble des déplacements. La voiture est le mode de transport principal pour 73,4 % des voyages à longue distance. La distance pour un aller simple parcourue en moyenne lors d'un voyage en voiture est de 235 km, pour une distance totale moyenne parcourue de 658 km par voyage. Pour 46 % des voyages en voiture, la distance parcourue est de moins de 400 km (SETRA).

La répartition des voyages en voiture par classes de distance est la suivante :

Répartition des voyages par classes de distance :

Classe de distance (km)	Proportion
D < 400	46,1 %
400 ≤ D < 800	27,0 %
800 ≤ D < 1 600	19,0 %
1 600 ≤ D < 3 000	6,8 %
D ≥ 3 000	1,1 %

Source : SETRA

Perspectives pour le véhicule tout électrique :

Les déplacements à longue distance sont *a priori* discriminants pour le véhicule tout électrique dont l'autonomie est de 100 à 150 km. Un voyage de distance moyenne de 658 km ne peut pas être réalisé par un véhicule tout électrique (même en considérant des charges régulières au cours du trajet, le temps de charge serait réhibitoyre). Toutefois les déplacements à longue distance représentent seulement 1,3 % des cas de déplacements. On peut envisager que les ménages potentiellement intéressés par l'acquisition d'un véhicule tout électrique pourraient davantage se trouver parmi les ménages : (1) qui utilisent des modes de déplacement alternatifs pour réaliser ces déplacements à longue distance, (2) qui seraient susceptibles d'utiliser des véhicules tout électrique en auto-partage pour leurs déplacements locaux, et/ou (3) qui possèdent un second véhicule, à propulsion thermique – voire un véhicule hybride rechargeable – capable de réaliser les déplacements plus longs.

Perspectives pour le véhicule hybride rechargeable :

Du fait qu'il combine les deux types de propulsion, le véhicule hybride rechargeable réunit dans un seul véhicule à la fois l'opportunité de réaliser la majorité des déplacements locaux à l'aide d'une batterie et la possibilité de réaliser des déplacements à longue distance en utilisant son moteur thermique. On peut supposer que cette double caractéristique peut rassurer un acheteur potentiel, ayant ainsi l'assurance de pouvoir réaliser l'ensemble de ses déplacements à l'aide d'un même véhicule. Les déplacements à longue distance ne sont donc pas un facteur discriminant pour le véhicule hybride rechargeable, et correspondent à un avantage relatif de ce véhicule face au véhicule tout électrique.

► Les déplacements quotidiens ont une durée moyenne de 50 minutes

Le « carnet véhicule » enregistre la durée de chaque déplacement effectué par un véhicule identifié au cours d'une semaine de sept jours. On peut ainsi déterminer le temps quotidien moyen passé dans une voiture particulière ou un véhicule utilitaire léger. Sur un total de 10 179 VP ou VUL interrogés qui ont réalisé au moins un déplacement, la moyenne du temps passé à bord du véhicule est de 6 heures environ par semaine (342 minutes), soit près de 50 minutes par jour (sans discrimination des week-ends ou de périodes de congés). Pour les déplacements locaux, il ressort que 90 % des temps de trajets sont inférieurs à 30 minutes, d'après les données déclaratives issues d'entretiens personnels.

D'après les constructeurs automobiles, l'autonomie de la batterie est avant tout liée à la distance parcourue par le véhicule tandis que le temps de trajet a un impact *a priori* négligeable sur le temps de décharge de la batterie. Cependant, le fonctionnement du moteur durant les phases d'arrêt du véhicule pourrait avoir un impact en déchargeant progressivement la batterie, en particulier si certaines fonctionnalités sont activées (climatisation, etc.). L'incertitude sur les modèles de batteries futures ne permet pas d'évaluer cet impact ; des études pourraient être menées sur les batteries pour observer dans quelles mesures le temps de fonctionnement de la batterie peut réduire son autonomie et sa durée de vie.

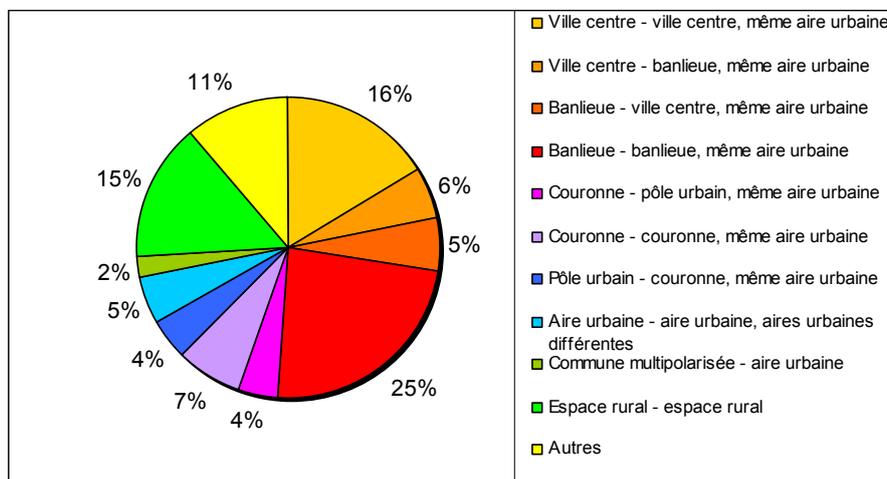
On peut toutefois noter qu'un développement à court terme de la technologie du « stop and start », qui coupe le moteur durant les nombreuses phases d'arrêt du véhicule en cours de circulation, pourrait minimiser l'impact – déjà faible en comparaison de la distance parcourue – du temps de parcours sur la décharge de la batterie.

2.3. Les origines-destinations et motifs des déplacements locaux

► 2/3 des déplacements locaux s'effectuent au sein d'une même aire urbaine

Le diagramme suivant montre que 67 % des déplacements locaux s'effectuent au sein d'une même aire urbaine. 16 % des déplacements se font au sein d'un même centre-ville, 11 % entre une ville et sa banlieue et 25 % entre deux communes d'une même banlieue. La typologie et la définition des zones urbaines sont détaillées en annexe.

Répartition des déplacements selon les zones urbaines de départ et d'arrivée pour un déplacement local



Source : ENT D 2008, calculs DGITM

Ces chiffres sont à prendre en compte dans le développement d'infrastructures de recharge sur la voie publique, puisqu'on constate que la majorité des infrastructures peut être mise en place en zone dense, tandis que l'installation d'infrastructures sur route en zone peu dense entre deux aires urbaines n'est pas aussi pertinente. Les coûts d'installation y sont en effet élevés pour une utilisation *a priori* faible.

► Le déplacement vers le travail constitue le premier motif de déplacement quotidien

Les activités qui motivent les déplacements quotidiens sont, *tous modes de déplacements confondus* (ENT D 2008, CETE Nord Picardie) :

- le travail vers un lieu fixe (21 %) ;
- faire des achats (19 %) ;
- accompagner quelqu'un (13 %) ;
- faire une visite (10 %) ;
- les études (10 %) ;
- autres (27 %).

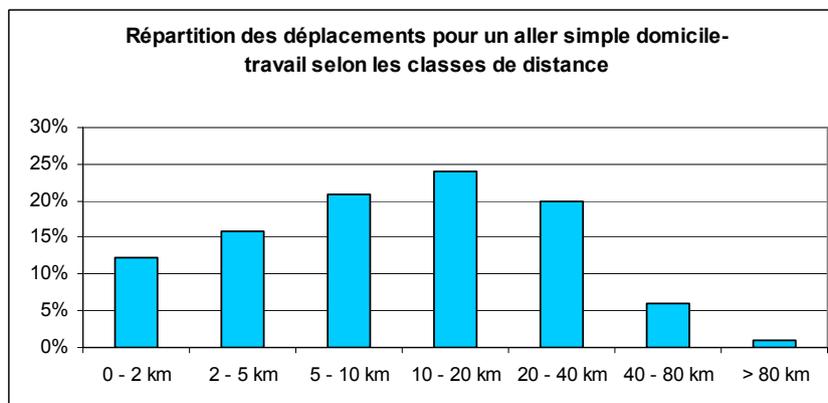
Le déplacement vers le lieu de travail apparaît comme le premier motif de déplacement quotidien ; il est donc nécessaire d'en tenir compte dans le développement des infrastructures de recharge. Les déplacements pour se rendre dans un commerce de proximité ou une grande surface constituent le second motif de déplacement. La mise en place d'un réseau d'infrastructures de recharge sur les lieux de grande surface ou les gares (parkings publics ou privés) est de ce fait un point central pour le développement de véhicules électriques.

L'analyse suivante propose de décrire plus particulièrement les résultats relatifs aux déplacements domicile-travail en voiture particulière¹⁵. Ces résultats sont issus du traitement de données déclaratives issues d'entretiens personnels.

¹⁵ La voiture est utilisée comme mode de transport principal dans 72,3 % des déplacements domicile-travail (68,7 % en tant que conducteur et 3,6 % en tant que passager).

- Les distances parcourues

Les déplacements domicile-travail représentent 41 % des distances journalières parcourues par la population et 48 % des distances parcourues en voiture (en tant que conducteur) le sont pour le travail (CETE Nord Picardie). Aux heures de pointe du matin (7h - 9h), 45 % des déplacements en voiture (en tant que conducteur) et 68 % des distances parcourues en voiture sont liés au travail (CETE Nord Picardie).



Source : ENTD 2008, calculs DGITM

La distance moyenne de l'aller est de 14,7 km (soit un aller-retour moyen de 29,4 km par jour travaillé). On constate que plus de 90 % des déplacements en véhicule particulier pour aller du domicile au travail correspondent à un trajet inférieur à 40 km, soit un aller-retour domicile-travail inférieur à 80 km.

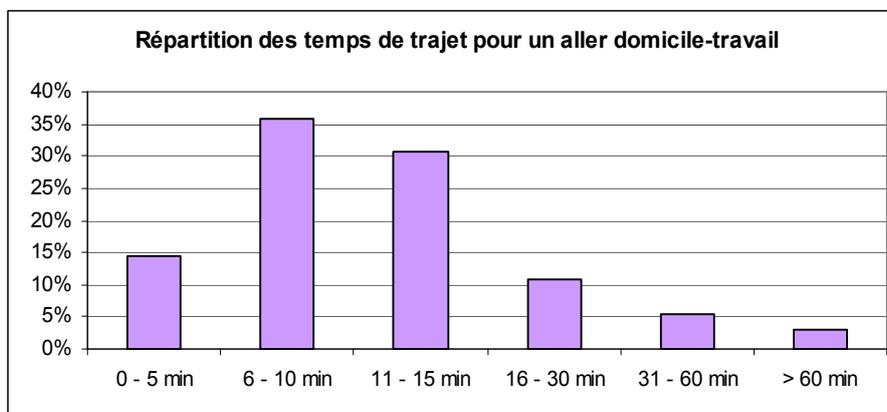
Perspectives pour le véhicule tout électrique :

Sans même considérer de recharge de la batterie en cours de journée sur le lieu de travail, une autonomie de batterie d'une centaine de kilomètres pourrait couvrir 93 % des déplacements allers-retours domicile-travail quotidiens – en ne considérant qu'un aller-retour effectué par jour. Si on considère une recharge au niveau du lieu de travail, une batterie d'une autonomie de 80 km seulement couvrirait 99 % des trajets automobiles domicile-travail.

Perspectives pour le véhicule hybride rechargeable :

En considérant un aller-retour domicile-travail sans recharge sur le lieu de travail, le véhicule hybride pourrait couvrir 73 % des trajets sur une batterie ayant 40 km d'autonomie. En prenant en compte une recharge en journée sur le lieu de travail, 93 % des déplacements allers-retours domicile-travail pourraient être couverts.

- Les temps de trajet

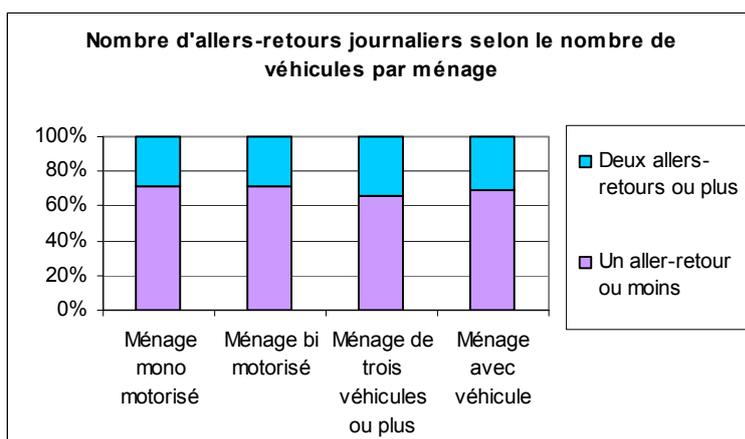


Source : ENTD 2008, calculs DGITM

97 % des déplacements en voiture vers un lieu de travail fixe sont réalisés en moins d'une heure et 92 % en moins de 30 minutes. Ces résultats sont cohérents avec les données du « carnet véhicule » ; la moyenne du temps passé à bord du véhicule pour se rendre vers son lieu de travail fixe est de 118 minutes par semaine, soit 17 minutes par jour (aller simple, sans discrimination des week-ends ou de périodes de congés). Ces temps de parcours ne sont pas pénalisants par les véhicules électriques.

- Le nombre d'allers-retours effectués par jour

Pour avoir une idée précise des distances parcourues quotidiennement par les ménages pour se rendre sur un lieu de travail fixe, il ne suffit pas de s'intéresser à la distance domicile-travail, il faut également observer le nombre d'allers-retours domicile-travail réalisés quotidiennement.



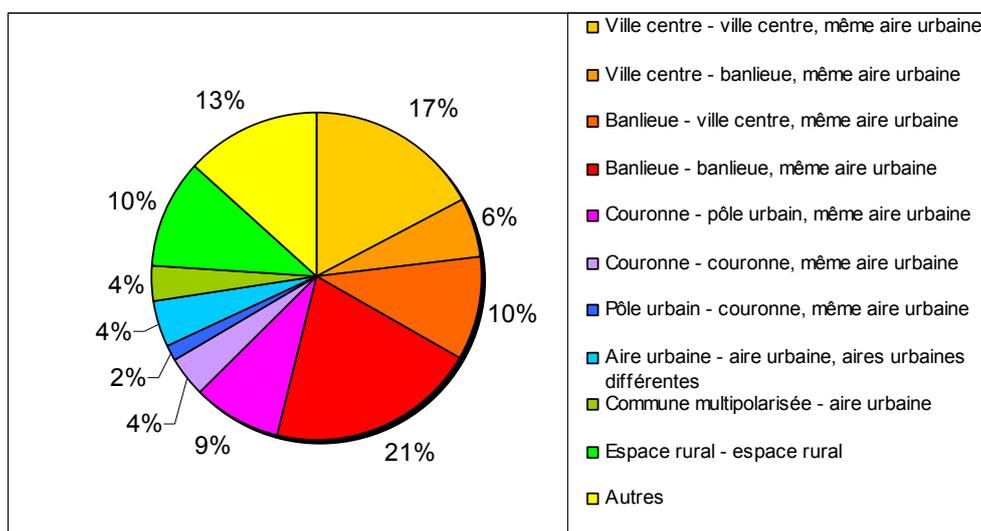
Source : ENTD 2008, calculs DGITM

Le graphique précédent montre que plus le ménage dispose de véhicules, plus il a tendance à multiplier les allers-retours journaliers vers le lieu de travail. Ainsi, les ménages mono-motorisés et bi-motorisés sont respectivement 28,5 % et 28,6 % à réaliser deux allers-retours ou plus, tandis que 34 % des ménages disposant de trois véhicules ou plus réalisent quotidiennement deux allers-retours ou plus.

En règle générale, on observe tout de même que 30,4 % des ménages effectuent deux allers-retours ou plus pour se rendre quotidiennement sur leur lieu de travail. Au regard des temps de parcours journaliers moyens, on peut émettre l'hypothèse que plus la distance domicile-travail est faible, plus le ménage a tendance à multiplier les allers-retours. Selon cette hypothèse, même dans le cas d'un usager effectuant plusieurs allers-retours quotidiens domicile-travail, la distance cumulée parcourue par jour reste en moyenne faible et les véhicules tout électrique ou hybrides peuvent couvrir la majorité de ces parcours.

- La typologie des zones de départ et d'arrivée

Répartition des déplacements selon les zones urbaines de départ et d'arrivée pour un déplacement domicile-travail



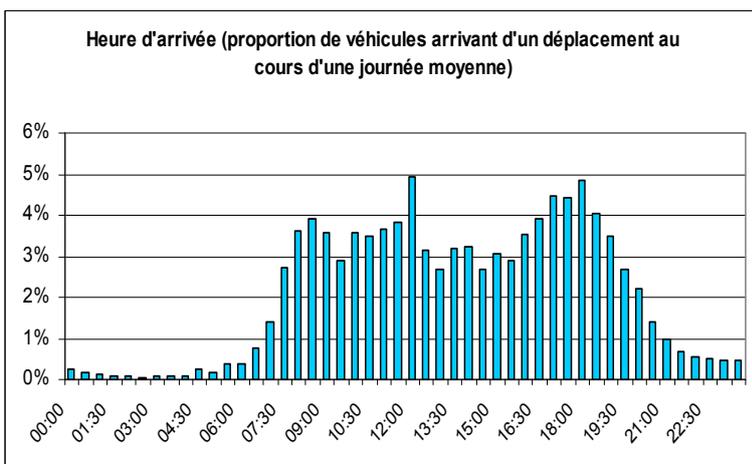
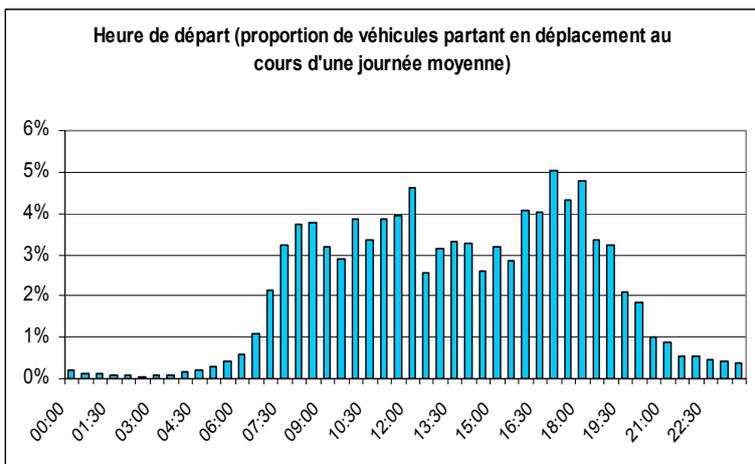
Source : ENTD 2008, calculs DGITM

Ce diagramme montre que 76 % des déplacements domicile-travail s'effectuent au sein d'une même aire urbaine, ce qui signifie que ces trajets quotidiens ne nécessitent pas d'infrastructure de recharge sur route entre deux aires urbaines différentes. 17 % des déplacements se font au sein d'un même centre-ville, 10 % entre une ville et sa banlieue et 21 % entre deux communes d'une même banlieue. Le développement d'un réseau d'infrastructures de recharge sur la voie publique devrait tenir compte des zones urbaines des déplacements domicile-travail.

2.4. Répartition horaire des déplacements au cours d'une journée

► Répartition horaire de la circulation au cours d'une journée type

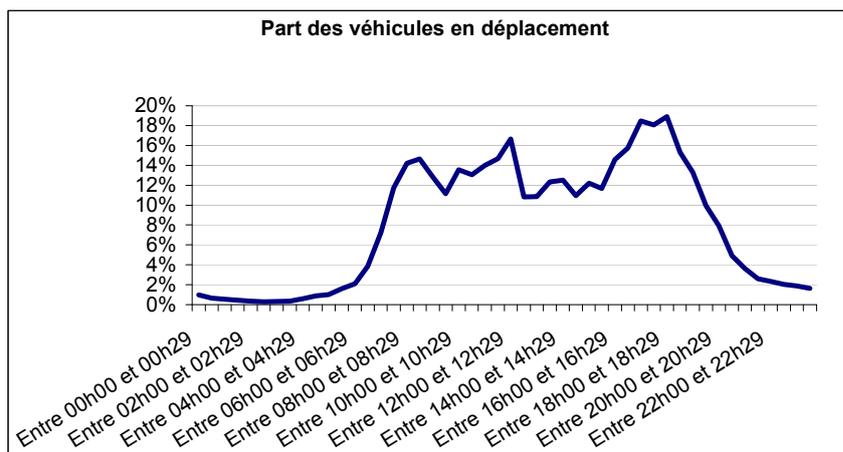
On cherche ici à déterminer la proportion de véhicules circulant au cours d'une journée type, pour mettre en évidence d'éventuels pics horaires de circulation et des creux, propices à la recharge des batteries. On identifie ainsi la part des véhicules en circulation par créneau horaire d'une demi-heure¹⁶.



Source : ENTD 2008, calculs CGDD

Les graphiques donnent ainsi les répartitions des départs et arrivées des véhicules. A titre illustratif, on lit sur le graphique de gauche que 5 % de véhicules partent en déplacement entre 17 h 00 et 17 h 30.

A partir de ces résultats, on déduit la part de véhicules en circulation pour chaque tranche horaire (cf. graphique ci-dessous). C'est entre 18 h 00 et 18 h 30 que le nombre de véhicules en déplacement est le plus élevé (19 % de l'ensemble des véhicules). Dans une journée moyenne type, les véhicules en circulation ne représentent jamais plus de 20 % du total des véhicules recensés.



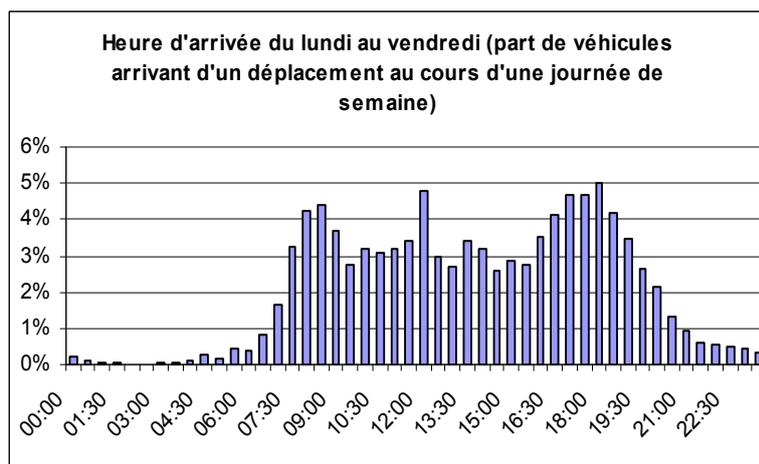
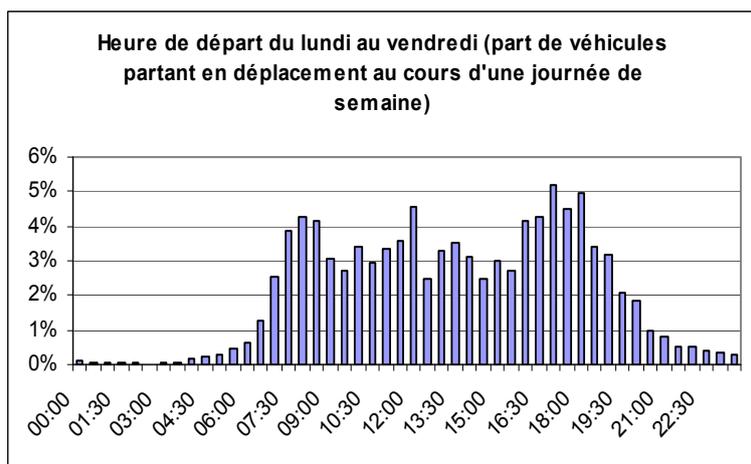
Source : ENTD 2008, calculs CGDD

¹⁶ C'est le rapport du nombre de véhicules en déplacements sur le nombre total de véhicules recensés (c'est-à-dire les voitures particulières et les véhicules utilitaires légers qui disposent d'un carnet véhicule et ont effectué au moins un déplacement au cours de la semaine de recensement).

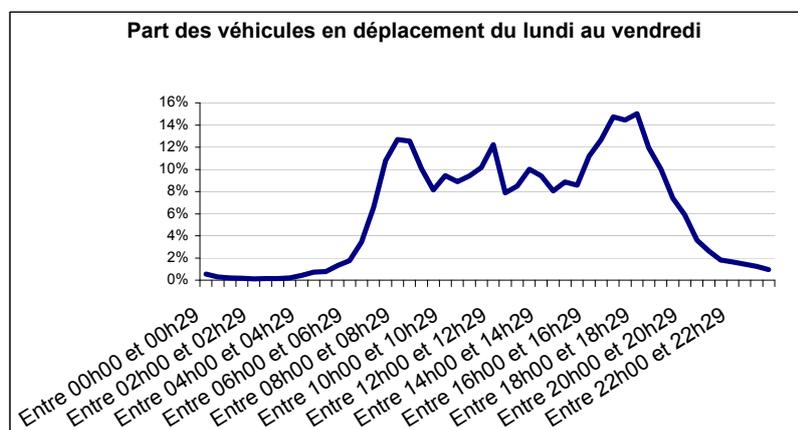
Si on distingue nettement une phase de circulation pendant la journée et une phase nocturne avec très peu de véhicules circulant, on ne peut pas clairement mettre en évidence deux pics de circulation en matinée et en soirée, mais plutôt un plateau de 7 h 30 à 19 h 30. La circulation est relativement diffuse tout au long de la journée. Un pic se détache toutefois en soirée autour de 18 h 00.

► Répartition horaire de la circulation un jour de semaine (du lundi au vendredi)

Au cours des week-ends, les déplacements sont plus aléatoires (loisirs, visites, etc.) et il peut être judicieux d'analyser les déplacements du lundi au vendredi séparément de ceux du samedi au dimanche. La réalisation du même travail à partir des déplacements réalisés uniquement un jour ouvré (du lundi au vendredi) ou le week-end (samedi au dimanche) fournit les résultats suivants :

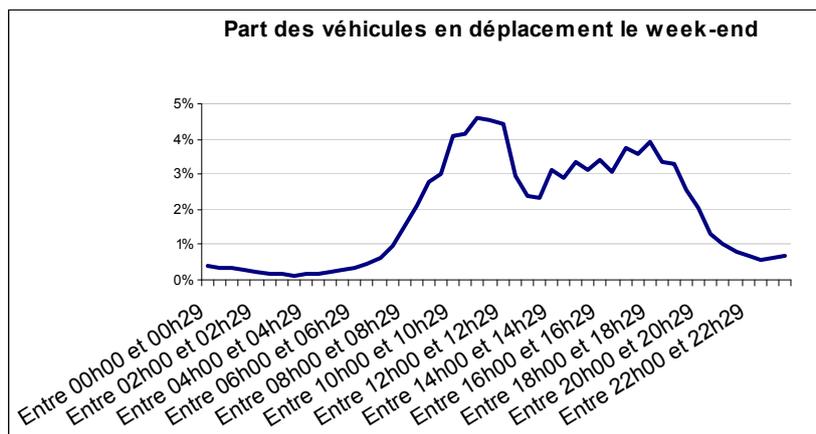


Source : ENTD 2008, calculs CGDD



Source : ENTD 2008, calculs CGDD

En ne retenant que les jours de semaine, on distingue un peu plus clairement que précédemment deux périodes de pointe, en matinée autour de 8 h 00 du matin et en soirée entre 17 h 00 et 18 h 30. Dans cette configuration, il est vraisemblable que l'on donne plus de poids aux trajets quotidiens vers et depuis le lieu de travail. La période de pointe plus importante en soirée s'explique vraisemblablement par des déplacements liés à d'autres motifs que le travail, en particulier faire des achats (second motif principal de déplacement en véhicule particulier).

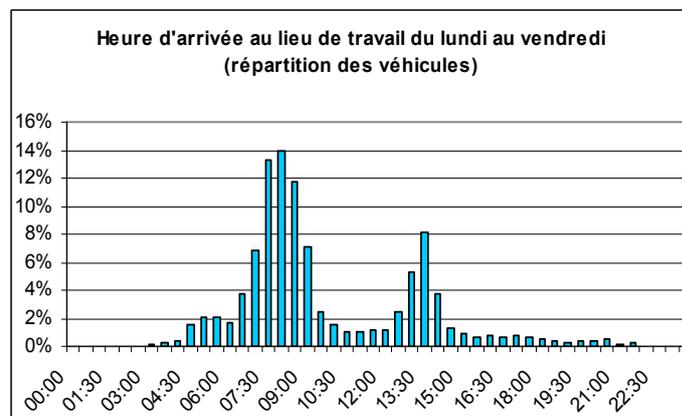
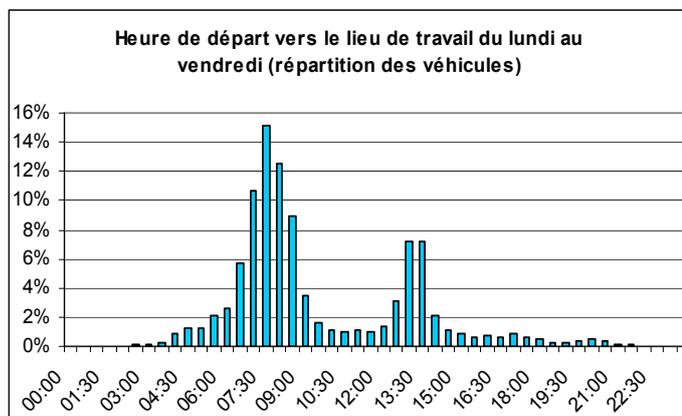


Source : ENTD 2008, calculs CGDD

La part des véhicules en déplacement le week-end enregistre une toute autre tendance. Il y a, de façon générale, moins de véhicules circulant au même moment. Jamais plus de 5 % de l'ensemble des véhicules recensés ne circulent en même temps. Les déplacements commencent plus tard dans une journée de week-end ; ils sont les plus importants entre 10 h 00 et 12 h 00. La circulation est ensuite relativement diffuse entre 14 h et 18 h 30.

► Répartition de la circulation à destination du lieu de travail du lundi au vendredi

Pour mettre en évidence l'influence des déplacements vers le lieu de travail dans la répartition horaire des déplacements, on se propose d'affiner encore l'échantillon étudié en réalisant la même étude à partir d'un sous-échantillon dont le motif de déplacement est « travailler dans son lieu fixe et habituel ». On n'étudie ici que les déplacements effectués du lundi au vendredi.



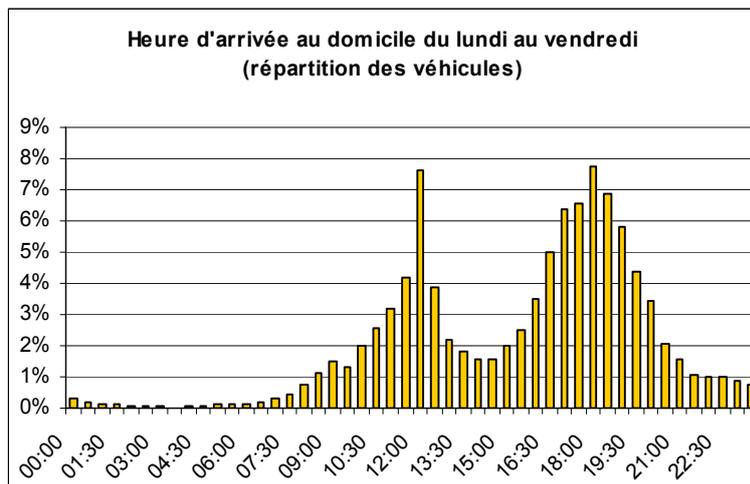
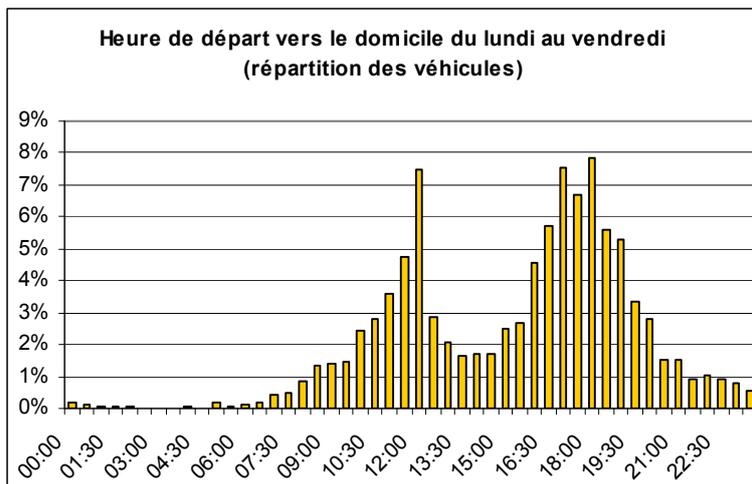
Source : ENTD 2008, calculs CGDD

Il est important de souligner que la formulation de l'enquête ne permet pas de savoir d'où s'effectue le départ ; seul est connu le lieu vers lequel se fait le déplacement. Ainsi, seuls les déplacements à destination du lieu de travail sont comptabilisés, quel que soit le lieu de départ : domicile ou autre.

On met en évidence deux périodes de pointe bien distinctes, la plus importante, en matinée, est particulièrement aiguë sur une plage de 6 h 30 à 9 h 30. Une seconde phase de départ vers le lieu de travail se dégage en début d'après-midi entre 13 h 00 et 14 h 00, elle est plus resserrée que la première. La mise en place d'un filtre (le motif de déplacement) permet donc une meilleure appréhension de la structure des courbes précédentes.

► Répartition de la circulation à destination du domicile du lundi au vendredi

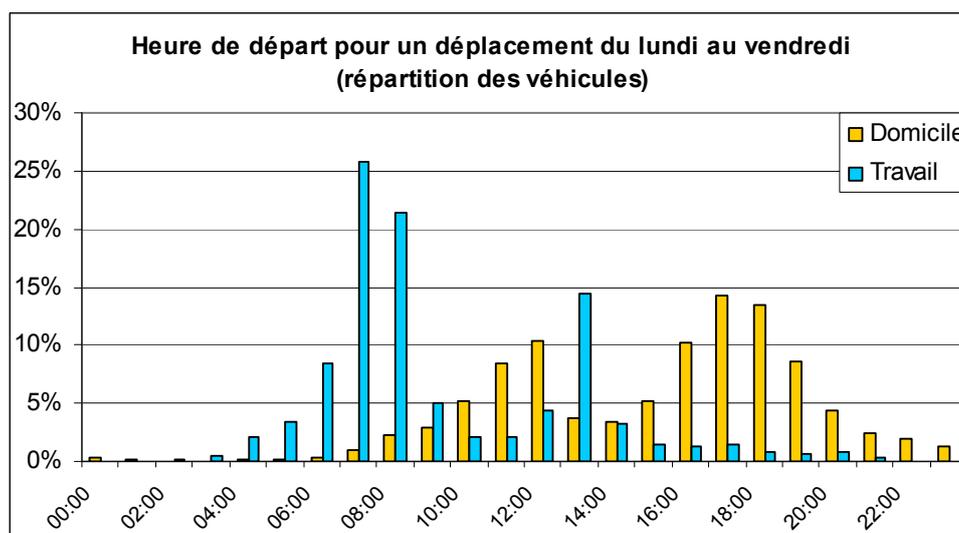
Il est probable que le retour vers le domicile explique une grande partie des déplacements quotidiens en début de soirée et donc la présence d'une pointe de circulation autour de 17 h 30-18 h 00. On a ainsi réalisé la même démarche que précédemment en sélectionnant les déplacements dont le motif est « aller au domicile ». Il faut signaler une nouvelle fois que la formulation de l'enquête ne permet pas de connaître le lieu de départ, mais uniquement le lieu d'arrivée. Cette contrainte empêche donc de capturer spécifiquement les trajets du travail vers le domicile. On peut seulement déterminer indistinctement le retour au domicile, qui inclut donc tous les déplacements à destination du domicile quelle qu'en soit l'origine. Une nouvelle fois on n'étudie que les déplacements effectués du lundi au vendredi.



Source : ENTD 2008, calculs CGDD

La distinction des déplacements dont le motif est d'aller au domicile permet de mettre en évidence deux pointes au cours d'une journée de semaine habituelle. La première pointe, particulièrement étroite, est centrée autour d'une plage horaire à 12 h 00 – 12 h 30. Il est donc intéressant de constater qu'une proportion importante de véhicules se rend au domicile au moment du déjeuner. Le second pic, plus étalé, est centré autour de 18 h 00 – 18 h 30. Le retour au domicile explique donc pour une grande part la période de pointe de circulation observée dans la soirée.

La superposition des courbes de répartition selon le déplacement vers le lieu de travail ou vers le domicile donne la courbe suivante (courbe réalisée pour l'heure de départ uniquement (l'heure d'arrivée donnant un résultat très similaire) et avec des tranches horaires d'une heure au lieu de 30 minutes précédemment) :



Source : ENTD 2008, calculs CGDD

Perspectives pour les infrastructures de recharge :

La répartition horaire des véhicules en circulation décrite précédemment permet de tirer les conclusions suivantes concernant les infrastructures de recharge :

- la recharge la plus optimale se fera durant la nuit, où non seulement la demande électrique globale est la plus faible mais également où la majorité des véhicules particuliers ne circule pas ;
- en milieu de journée, où l'on observe un léger affaiblissement de la circulation entre 12 h 30 et 16 h 00, la recharge sera également plus importante que pendant les phases de circulation les plus intenses (autour de 8 h 00 et de 18 h 00).

Perspectives pour l'auto-partage :

On constate que le taux d'utilisation simultanée de l'ensemble des véhicules du parc est très faible, avec au maximum des pics de 20 % de véhicules utilisés lors de la point du soir. Ce résultat laisse entrevoir des perspectives positives pour l'auto-partage (c'est-à-dire le déploiement de véhicules en libre service en agglomérations) puisque l'utilisation de la route est relativement uniformément répartie au cours de la journée.

2.5. Disponibilité de places de stationnement

► Stationnement au niveau du domicile

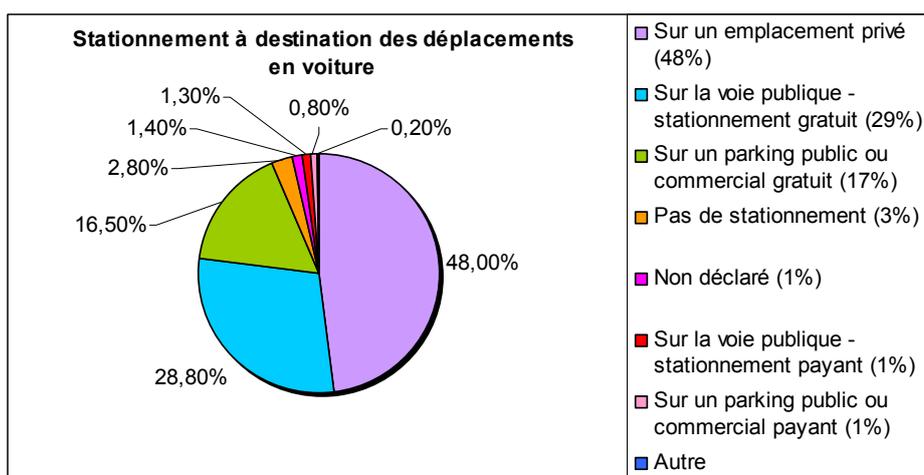
L'ENTD fournit des informations quant à la disponibilité de places de stationnement des ménages. On sait que 69 % des ménages disposent de places de stationnement privées, utilisées ou non (ENTD 2008, calculs CGDD). En particulier, 38 % des ménages disposent d'un parking d'immeuble (avec places non attribuées), dont 27,6 % qui disposent d'un parking de 11 places ou plus.

Une part importante des ménages dispose d'une place dans le garage du logement (43,5 %) ; les ménages disposant de 2 places sont deux fois moins nombreux (23 %). On note que 5,8 % des ménages disposent de 3 places ou plus.

Par ailleurs, 14,2 % des ménages disposent d'au moins une place dans un parking couvert en immeuble ou d'un box ; ils sont 9,9 % à disposer d'une seule place et 4,3 % à disposer de 2 places ou plus dans un parking couvert (ENTD 2008, calculs CGDD).

Enfin, une information fondamentale dans le cadre du développement des véhicules tout électrique et hybrides rechargeables est la disponibilité d'une prise électrique à proximité du stationnement. Il suffirait d'adapter cette prise aux standards de recharge pour permettre la recharge des véhicules électriques ou hybrides. L'ENTD 2008 indique que 69 % des ménages disposent d'une prise de courant à proximité d'au moins une des places de stationnement.

► Stationnement sur le lieu de destination des déplacements



Source : ENTD 2008, calculs SOeS

Le graphique ci-dessus montre que le stationnement des usagers de la route à destination se fait en premier lieu sur un emplacement privé (48 % des cas), ce qui tend à justifier la mise en place de bornes de recharge sur le lieu de travail fixe, où le temps de stationnement est généralement long et permet une recharge lente.

Le second type de stationnement est le stationnement gratuit sur la voie publique (28,8 % des déplacements). L'ENTD ne fournit pas de données quant au temps moyen de stationnement. Si ce temps de stationnement est relativement faible, comme les tendances le suggèrent, il n'est pas forcément nécessaire d'y installer un nombre très important de bornes de recharge compte tenu des coûts élevés qu'un tel déploiement entraînerait.

Le troisième type de stationnement lors d'un déplacement se fait au niveau d'un parking public ou commercial gratuit (16,5 % des cas). Ce type de lieu pourrait ainsi accueillir préférentiellement des infrastructures de recharge, lentes ou semi-rapides, compte tenu du temps de stationnement relativement long (de l'ordre de 50 minutes en moyenne sur un parking de centre commercial).

3. Couverture potentielle des déplacements par les véhicules électriques

3.1. Couverture potentielle des déplacements et des kilomètres parcourus

L'objet de cette partie est de résumer les perspectives de développement pour le véhicule tout électrique et le véhicule hybride rechargeable, selon l'autonomie disponible pour la batterie. On propose de comparer différentes autonomies possibles pour le véhicule tout électrique et le véhicule hybride rechargeable. Les autonomies choisies pour le véhicule tout électrique correspondent à la fourchette d'autonomie indiquée par les constructeurs automobiles (100 à 150 km). Les autonomies de batterie retenues pour le véhicule hybride rechargeable correspondent aux ordres de grandeurs fournis par les constructeurs automobiles et s'inspirent des autonomies étudiées dans la publication d'Axsen *et al.* (2010) réalisant une étude de marché sur la base d'autonomies de 10 miles (16,1 km), 20 miles (32,2 km) et 40 miles (64,4 km). On a donc choisi 5 types de véhicules avec les autonomies suivantes :

- Un véhicule hybride rechargeable de 20 km d'autonomie (en fonctionnement électrique, sur la base de la décharge de la batterie uniquement), noté **VHR 20**. Au-delà de 20 km, ce véhicule bascule sur le moteur thermique ;
- Un véhicule hybride rechargeable de 40 km d'autonomie (en fonctionnement électrique, sur la base de la décharge de la batterie uniquement), noté **VHR 40**. Au-delà de 40 km, ce véhicule bascule sur le moteur thermique ;
- Un véhicule hybride rechargeable de 60 km d'autonomie (en fonctionnement électrique, sur la base de la décharge de la batterie uniquement), noté **VHR 60**. Au-delà de 60 km, ce véhicule bascule sur le moteur thermique ;
- Un véhicule tout électrique de 100 km d'autonomie, noté **VE 100** ;
- Un véhicule tout électrique de 150 km d'autonomie, noté **VE 150**.

Les taux de couverture des déplacements et des kilométrages journaliers par type de véhicule sont présentés dans les tableaux suivants (cf. courbes de distribution du paragraphe 2.2.) :

Couverture des déplacements journaliers par type de véhicule rechargeable

		VHR 20	VHR 40	VHR 60	VE 100	VE 150
Couverture des déplacements journaliers	(1) Sans recharge supplémentaire	38 %	67 %	81 %	92 %	96 %
	(2) Avec une recharge supplémentaire	67 %	88 %	94 %	98 %	99 %
	(3) Compte tenu des usagers qui ont la possibilité d'une charge supplémentaire au travail (48 % des usagers)	52 %	77 %	89 %	95 %	97 %

Source : ENTD 2008, calculs CGDD

Couverture des kilométrages journaliers par type de véhicule rechargeable

		VHR 20	VHR 40	VHR 60	VE 100	VE 150
Couverture des kilomètres journaliers parcourus	(1) Sans recharge supplémentaire	11 %	30 %	45 %	63 %	73 %
	(2) Avec une recharge supplémentaire	30 %	56 %	65 %	78 %	84 %
	(3) Compte tenu des usagers qui ont la possibilité d'une charge supplémentaire au travail (48 % des usagers)	20 %	42 %	55 %	70 %	78 %

Source : ENTD 2008, calculs CGDD

Hypothèses :

- (1) Cas de figure sans recharge supplémentaire :
Dans le scénario de référence on considère une unique charge quotidienne durant la nuit sur le lieu de domicile (charge dite principale).
- (2) Cas de figure avec une recharge supplémentaire :
- Dans ce cas, on considère une recharge additionnelle en cours de journée (charge dite secondaire). Dans un souci de simplification, la charge secondaire est supposée recharger la batterie en intégralité. Ce peut être une recharge lente, sur le lieu de travail par exemple ou une recharge accélérée sur la voie publique ou dans un parking privé.
 - La couverture des déplacements indiquée correspond alors au cas extrême d'une utilisation parfaitement optimisée : on considère une décharge complète, une charge secondaire complète en cours de journée et une nouvelle décharge complète.
 - En ce qui concerne le véhicule hybride rechargeable, le pourcentage indiqué exprime la couverture des déplacements réalisables sur l'unique base de l'autonomie de la batterie. Ces chiffres ne sont pas discriminants puisque les trajets supplémentaires peuvent être couverts par le moteur thermique.
 - On ne considère pas de marge supplémentaire d'autonomie pour assurer des trajets au-delà de la couverture décrite.
- (3) Cas de figure qui tient compte de la part d'usagers qui disposent d'un stationnement sur leur lieu de travail pour effectuer une charge quotidienne supplémentaire :
- En première approximation, on considère que cela correspond à la part d'usagers qui, pour un déplacement local, stationnent sur un emplacement privé à destination du déplacement. Cela représente 48 % d'usagers qui peuvent effectuer une seconde charge. Une étude complémentaire serait nécessaire pour déterminer avec précision le sous-ensemble des usagers qui disposent réellement d'une place de stationnement sur leur lieu de travail et où une charge serait possible.
 - Le pourcentage de couverture des déplacements inscrit représente donc la somme pondérée de la couverture de ceux qui peuvent effectuer une seconde charge et de ceux qui ne le peuvent pas. Comme précédemment, on considère que la charge est complète et la recharge optimisée.

Dans le premier tableau, il s'agit de la couverture des déplacements journaliers estimée pour un trajet moyen au niveau de l'ensemble du parc, on ne prend pas en compte de trajet occasionnellement plus long. Le fait de ne pas tenir compte d'une marge pour les véhicules tout électrique conduit à des résultats relativement optimistes ; on s'attache cependant à suivre les indications d'autonomie de batteries données par les constructeurs.

Le second tableau tient compte du kilométrage parcouru, ce qui reflète de façon plus pertinente les distances réellement parcourues et permet ainsi d'évaluer l'impact environnemental des véhicules.

3.2. Parc potentiel de véhicules électriques

Pour déterminer le parc potentiel de véhicules électriques, on s'intéresse au sous-ensemble de la population qui réunit les conditions suivantes :

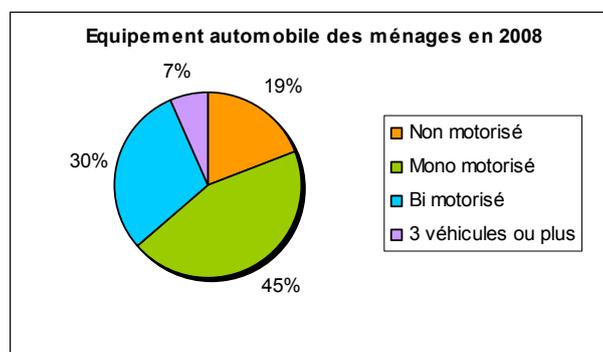
- disponibilité d'au moins deux voitures particulières ;
- disponibilité d'un stationnement privé ;
- disponibilité d'un stationnement sur le lieu de travail (cette dernière valeur étant approchée par la part d'usagers qui stationnent sur un emplacement privé au lieu de destination d'un déplacement local).

Le raisonnement global est le suivant :

- on considère que le véhicule tout électrique peut être adopté comme deuxième véhicule d'un ménage, on fait ainsi l'hypothèse d'une limitation du parc potentiel de véhicules tout électrique ;
- on considère que le véhicule hybride rechargeable peut être adopté quel que soit l'équipement automobile des ménages, aucune limitation de parc potentiel ne s'appliquerait donc à ces véhicules.

1. Parc des véhicules « secondaires »

Dans une première approche, le parc potentiel de véhicules tout électrique est restreint au parc de véhicules des ménages qui correspond à une deuxième (ou troisième, ou plus) voiture d'un ménage. En reprenant le diagramme présenté au paragraphe 2.1. on peut approcher le parc potentiel de véhicules « secondaires ».



Source : ENT D 2008, calculs SOeS

Le nombre total de véhicules est :

$$19 \% \times 0 + 45 \% \times 1 + 30 \% \times 2 + 7 \% \times 3 \quad (*) \quad (1)$$

(*) En réalité, 7 % des ménages disposent de 3 véhicules ou plus. Par souci de simplification, on réduit cet ensemble à ceux qui disposent uniquement de 3 véhicules considérant que les ménages disposant de 4 véhicules ou plus représentent une part très faible des ménages.

La part de seconds véhicules (ou plus) est approché par :

$$30 \% \times 1 + 7 \% \times 1 \quad (*) \quad (2)$$

(*) Dans un souci de simplification, on considère que les ménages qui disposent de trois véhicules ou plus ne sont susceptibles d'acheter qu'un seul véhicule tout électrique.

Le taux de véhicules « secondaires » est ainsi représenté par le rapport (2)/(1) = 29,4 %.

Appliqué au parc français en 2009 de 32 331 000 véhicules (31 109 000 voitures particulières de moins de 15 ans d'âge et 1 222 000 véhicules utilitaires légers de moins de 1,5 tonne), ce taux donne un parc potentiel d'environ 9 505 000 véhicules.

2. Affectation de places de stationnement à un véhicule

On fait l'hypothèse simplificatrice qu'un ménage n'adoptera un véhicule électrique (tout électrique, mais aussi hybride rechargeable) qu'à la condition qu'il dispose d'une place de stationnement privée. Sachant que 69 % de ménages disposent d'un stationnement privé (cf. paragraphe 2.5) et que 48 % des stationnements à destination d'un déplacement se font sur un emplacement privé, on suppose que :

- 33 % (= 69 % x 48 %) de véhicules disposent de deux places de stationnement (une à domicile et une mise à disposition sur le lieu de travail par exemple) ;
- 36 % (= 69 % - 33 %) disposent d'une seule place de stationnement (à domicile par exemple). Ce chiffre est vraisemblablement sous-estimé car on ne prend pas en compte les cas où le véhicule dispose d'une seule place de stationnement en entreprise.

En réalité, le déploiement de recharges sur les parkings publics ou en voirie devrait desserrer cette contrainte.

3. Parc potentiel de véhicules électriques et couverture des déplacements et des kilométrages effectués

Sur la base des hypothèses précédentes, le parc potentiel de véhicules hybrides rechargeables et tout électrique pourrait s'établir de la manière suivante :

- les véhicules hybrides rechargeables représentent 69 % du parc, équivalent à la part des ménages disposant d'au moins un stationnement ;
- les véhicules tout électrique sont restreints au parc de seconds véhicules disposant d'au moins un stationnement, soit 20 % de l'ensemble (29 % x 69 %) ;
- 31 % (= 100 % - 69 %) des véhicules du parc ne peuvent donc pas être remplacés par des véhicules électriques et demeureront des véhicules thermiques¹⁷.

Parts potentielles des véhicules hybrides rechargeables et électriques dans le parc de véhicules (VP et VUL<1,5t)

	VHR20	VHR40	VHR60	VE100	VE150
Part des véhicules dans le parc (%)	69%	69%	69%	20%	20%

Source : ENTD 2008, calculs CGDD

En tenant compte de ces résultats, on peut déterminer la couverture possible des déplacements et des kilométrages journaliers du parc français, par les propulsions thermique et électrique pour le véhicule hybride rechargeable et, par la propulsion électrique pour le véhicule tout électrique.

Couverture des déplacements et kilométrages journaliers du parc français (en tenant compte des stationnements possibles et du parc potentiel de véhicules électriques)

	VHR20	VHR40	VHR60	VE100	VE150
Couverture potentielle des déplacements journaliers, via la propulsion électrique	36%	53%	61%	19%	20%
Couverture potentielle des déplacements journaliers, via la propulsion thermique	44%	32%	27%	-	-
Couverture potentielle des kilométrages journaliers, via la propulsion électrique	14%	29%	39%	14%	16%
Couverture potentielle des kilométrages journaliers, via la propulsion thermique	60%	49%	42%	-	-

Source : ENTD 2008, calculs CGDD

Hypothèses :

¹⁷ On pourrait imaginer un autre scénario où les « seconds véhicules » (29 % du parc) sont remplacés par des véhicules tout électriques, et le reste du parc (71%) par des véhicules hybrides rechargeables. La couverture potentielle en mode électrique des déplacements de ce parc serait alors comprise dans une fourchette de 45% à 63% des déplacements, soit 24 % à 43 % des kilomètres parcourus, en fonction des autonomies étudiées.

- On considère la couverture dans le cas d'une utilisation optimale de la batterie ; le pourcentage fourni suppose des cycles de charge/décharge complets et optimisés, et qui ne tiennent pas compte d'effets de seuil.
- A l'inverse, la couverture pourrait augmenter sensiblement si on considérait également les véhicules qui disposent d'un lieu de charge principale en entreprise, sur voirie ou parking public.

En tenant compte des critères de faisabilité retenus, on constate que des véhicules hybrides rechargeables d'une autonomie de 20 km pourraient potentiellement couvrir 36 % des déplacements effectifs de la population avec la seule propulsion électrique. Un VHR d'une autonomie de 60 km pourrait quant à lui couvrir 61 % des déplacements en fonctionnant sur la seule batterie. De la même façon, un véhicule tout électrique de 100 ou 150 km d'autonomie pourrait couvrir respectivement 19 % et 20 % des déplacements quotidiens des usagers.

En termes de kilomètres parcourus, un VHR de 20 km d'autonomie de batterie pourrait potentiellement couvrir 14 % des kilomètres parcourus par les usagers en fonctionnant sur sa batterie, contre 39 % pour un VHR de 60 km d'autonomie. Pour le véhicule tout électrique, 150 km d'autonomie permettraient de couvrir 16 % des kilomètres journaliers parcourus par la population.

Ainsi, ce sont 15 à 40 % des kilomètres parcourus quotidiennement qui pourraient être effectués par le mode de propulsion électrique.

3.3. Bilan économique de la conversion d'une partie du parc en véhicules électriques

Les déplacements identifiés précédemment comme pouvant être effectués par des véhicules électriques fournissent différents scénarios de basculement de véhicules thermiques en véhicules électriques. On propose dans le paragraphe suivant de dresser un bilan économique de ces basculements potentiels, en mettant en regard les différents coûts et avantages, sur la base des hypothèses retenues dans la première partie de l'étude.

Concernant la batterie, il est difficile de connaître avec précision le lien entre autonomie recherchée et dimension avant l'apparition sur le marché des véhicules électriques de nouvelle génération, d'autant que cela pourrait varier fortement en fonction des caractéristiques des véhicules (masse, aérodynamisme, etc.). Sur la base de la correspondance « 25 kWh = 150 km d'autonomie », hypothèse retenue dans la première partie de l'étude (1.2.1.), en accord avec les données des constructeurs, on applique une proportionnalité directe pour les autres véhicules. On propose donc les ordres de grandeur suivants.

Dimensions (en kWh) retenues pour les batteries des cinq véhicules électriques étudiés, à l'horizon 2020

	VHR 20	VHR 40	VHR 60	VE 100	VE 150
Dimension de la batterie (en kWh)	3	7	10	17	25

Source : calculs CGDD

Le tableau suivant récapitule les valeurs en 2020, rapportées au kilomètre, des différents postes de coûts pour chaque type de véhicules, sur leur durée de vie. Pour le véhicule hybride rechargeable, le ratio de fonctionnement thermique/électrique est directement déduit des résultats précédents sur la couverture potentielle des distances journalières.

Bilan des coûts, par postes, rapportés au kilomètre, des véhicules thermiques et électriques en 2020, sur leur durée de vie (en c€/veh.km)

	Véhicules à motorisation thermique			Véhicules décarbonés				
	Diesel "routier"	Essence "urbain"	Diesel "urbain"	VHR20	VHR40	VHR60	VE100	VE150
Possession (HT)	18,6	16,2	16,8	18,0	18,2	18,5	17,2	18,2
<i>dont achat</i>	7,7	5,4	6,0	7,0	7,0	7,0	4,7	4,7
<i>dont batterie</i>	0,0	0,0	0,0	0,4	1,0	1,4	2,2	3,2
<i>dont entretien</i>	8,1	8,9	8,9	8,1	8,1	8,1	8,9	8,9
<i>dont énergie</i>	2,8	1,9	1,9	2,5	2,2	2,0	1,4	1,4
Taxes (hors TVA) (*)	2,3	2,3	1,6	1,9	1,4	1,1	0,2	0,2
Externalités ("du puits à la roue")	2,5	1,9	2,2	1,7	1,5	1,4	1,1	1,1
<i>dont CO2</i>	0,9	0,7	0,6	0,7	0,6	0,5	0,1	0,1
<i>dont polluants locaux</i>	0,6	0,4	0,7	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
<i>dont bruit</i>	0,7	0,7	0,9	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

(*) Il s'agit de la TIPP, de la TLE et de la taxe carbone.

Source : calculs CGDD

Pour dresser le bilan différentiel des différents basculements à l'échelle du parc, et identifier une taille de batterie optimale, on se place en 2020 dans un scénario où les véhicules tout électrique et hybride auraient remplacé les véhicules thermiques dans les parts et les distances parcourues identifiées précédemment. Ainsi, pour chaque poste de coût, on compare le passage d'un véhicule « classique » à un véhicule électrique équivalent¹⁸. Le parc français est quant à lui composé de l'ensemble des voitures particulières et des véhicules utilitaires légers de moins de 1,5 tonne. Le scénario d'évolution du parc à horizon 2020 reprend la tendance observée entre 2000 et 2009 (+0,68 % par an, source : CCTN). A partir d'un parc de 31,1 millions de voitures particulières et 1,2 véhicules utilitaires légers de moins de 1,5 tonne (source : CCTN), la projection du parc global en 2020 est de 34,8 millions de VP et de VUL de moins de 1,5 t.

La conversion d'une partie du parc automobile français en véhicules électriques aurait un effet positif marqué au niveau environnemental, en particulier en termes de réduction des émissions de CO₂ (cf. tableau suivant).

Emissions de CO₂ évitées par le parc identifié pour l'année 2020 (en millions de tonnes de CO₂)

	VHR20	VHR40	VHR60	VE100	VE150
Emissions de CO ₂ évitées en 2020 (MtCO ₂)	7,9	16,8	22,3	6,4	7,1

Source : calculs CGDD

La substitution des véhicules thermiques par des véhicules hybrides rechargeables de 60 kilomètres d'autonomie (VHR60) affiche les gains les plus conséquents au niveau environnemental, avec près de 22 millions de tonnes de CO₂ évitées sur la seule année 2020, valorisés à 19 milliards d'euros (Md €) sur la durée de vie des véhicules. En revanche, c'est le VHR20 qui présente le bilan global le plus favorable, de l'ordre de 43 Md€. Le bilan est négatif pour les deux véhicules tout électrique, à hauteur de 5 Md€ pour le VE100 et 17 Md€ pour le VE150. Le tableau suivant récapitule l'ensemble des résultats :

Bilan socio-économique différentiel, à l'échelle du parc de 2020, du passage à des véhicules électriques de sorte qu'ils couvrent les kilomètres précédemment identifiés, cumulé sur la durée de vie des véhicules (en milliards d'euros)

	VHR20	VHR40	VHR60	VE100	VE150
Possession (HT)	26,0	14,8	4,7	-8,5	-20,4
<i>dont achat</i>	32,4	32,4	32,4	7,4	8,3
<i>dont batterie</i>	-18,9	-44,2	-63,2	-21,0	-34,4
<i>dont entretien</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>dont énergie</i>	12,6	26,6	35,4	5,1	5,7
Coût d'opportunité des fonds publics	-5,9	-12,4	-16,5	-5,6	-6,2
Externalités ("du puits à la roue")	22,5	30,7	35,8	8,7	9,7
<i>dont CO₂</i>	6,7	14,1	18,7	5,3	6,0
<i>dont polluants locaux</i>	8,9	9,4	9,7	1,5	1,6
<i>dont bruit</i>	7,0	7,2	7,3	1,9	2,1
Total	42,7	33,0	23,9	-5,4	-17,0

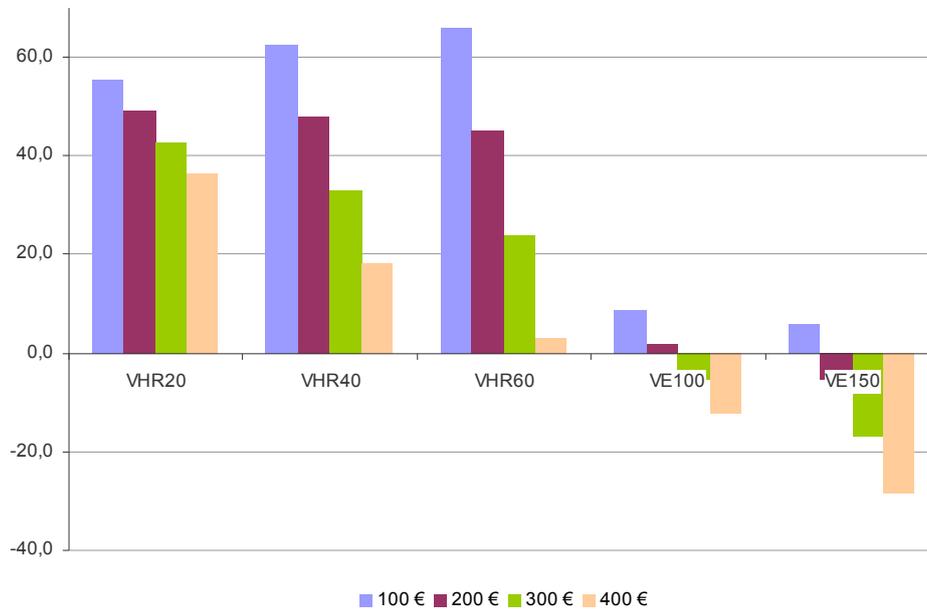
Source : calculs CGDD

Note de lecture : En 2020, le remplacement de 69 % du parc de véhicules thermiques par des véhicules hybrides rechargeables de 40 km d'autonomie aurait un impact positif sur l'environnement, valorisé à 30 Md€. Cette substitution dégagerait également d'importants bénéfices en termes de possession (achat et consommation de carburant), de l'ordre de 15 Md €. En revanche, le coût d'opportunité des fonds publics est négatif, à hauteur de 16,5 Md €, du fait des pertes de recettes de TIPP.

¹⁸ Le véhicule hybride rechargeable est comparé à un véhicule diesel routier, et le véhicule tout électrique est comparé à un véhicule « type » urbain, réunissant les caractéristiques du véhicule essence urbain et du véhicule diesel urbain, avec un taux de diésélisation des véhicules urbains de 20%.

Dans le cadre des hypothèses retenues (coût de la batterie et prix des carburants notamment), c'est le véhicule hybride rechargeable de 20 km d'autonomie qui présente la batterie optimale. Néanmoins, cet « optimum » varie si l'on modifie certains paramètres. Par exemple, le graphique suivant montre que plus la batterie est coûteuse, plus le bilan est faible, mais d'autant moins que la batterie est de petite taille.

Variation du bilan en 2020 selon le coût de la batterie (en Mds €)



Source : calculs CGDD

Cette analyse n'a pas vocation à projeter le parc de véhicules électriques, ses usages et ses caractéristiques. Il s'agit d'une illustration qui présente quelques limites. En effet, les hypothèses quant au parc potentiel de véhicules électriques sont très fortes (par exemple, limitation des véhicules électriques aux seconds véhicules des ménages) et le comportement des ménages et les usages spécifiques ne sont pas pris en compte. Il confirme toutefois qu'il existe vraisemblablement une taille de batterie « optimale » en fonction des usages et des différentiels de coûts entre véhicules thermiques et tout électrique.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Coûts totaux de possession pour un véhicule particulier

Coûts totaux de possession pour un véhicule particulier acheté en 2010 et en 2020
(sur toute la durée de vie du véhicule, en €2010)

2010	Véhicule essence	Diesel urbain	Véhicule électrique	Diesel routier	Véhicule hybride rechargeable
Coût d'achat	12 500	14 000	11 000	22 000	25 000
Coût de la batterie	0	0	20 000	0	6 240
Entretien (assurance, entretien, garage, péage)	20 802	20 802	20 802	23 346	23 346
Energie (électricité ou carburant)	10 882	8 617	3 278	14 945	9 517
2010 : Coût total de possession	44 185	43 419	55 080	60 291	64 103
2020	Véhicule essence	Diesel urbain	Véhicule électrique	Diesel routier	Véhicule hybride rechargeable
Coût d'achat	12 500	14 000	11 000	22 000	20 000
Coût de la batterie	0	0	7 500	0	2 340
Entretien (assurance, entretien, garage, péage)	20 802	20 802	20 802	23 346	23 346
Energie (électricité ou carburant)	9 879	8 069	3 772	14 604	9 542
2020 : Coût total de possession	43 181	42 871	43 074	59 950	55 228

Source : calculs CGDD

Comme le kilométrage moyen est supposé différent pour les 5 véhicules étudiés, une comparaison des coûts ramenés au kilomètre parcouru est présentée dans le tableau suivant.

Coûts totaux de possession rapportés au kilomètre en 2010 et 2020 (c€/km)

2010	Véhicule essence	Diesel urbain	Véhicule électrique	Diesel routier	Véhicule hybride rechargeable
Coût d'achat	6,4	7,2	5,6	9,2	10,4
Coût de la batterie	0	0	10,3	0	2,6
Entretien (assurance, entretien, garage, péage)	10,7	10,7	10,7	9,7	9,7
Energie (électricité ou carburant)	5,6	4,4	1,7	6,2	4,0
2010 : Coût total de possession (c€/km)	22,7	22,3	28,2	25	26,7
2020	Véhicule essence	Diesel urbain	Véhicule électrique	Diesel routier	Véhicule hybride rechargeable
Coût d'achat	6,4	7,2	5,6	9,2	8,3
Coût de la batterie	0	0	3,8	0	1,0
Entretien (assurance, entretien, garage, péage)	10,7	10,7	10,7	9,7	9,7
Energie (électricité ou carburant)	5,1	4,1	1,9	6,1	4,0
2020 : Coût total de possession (c€/km)	22,1	22,0	22,1	25,0	23,0

Source : calculs CGDD

ANNEXE 2 : Les infrastructures de recharge nécessaires aux véhicules d'entreprise

Pour un véhicule de société, on fait l'hypothèse que le lieu de charge principal se situe toujours au niveau de l'entreprise. Cette approximation tient compte du fait que les véhicules de société qui ne sont pas garés sur le site de l'entreprise pendant la nuit sont *a priori* des véhicules qui effectuent des déplacements à plus longue distance et n'entrent donc pas, à l'heure actuelle, dans le cadre des véhicules rechargeables.

Pour déterminer avec précision le nombre de points de charge à considérer au niveau des entreprises, on se propose d'analyser la part de véhicules d'entreprises du parc français.

En termes de parc circulant :

Part des véhicules d'entreprise dans le parc français :

Parc circulant	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Parc de voitures particulières	30 582 717	30 537 244	30 497 013	31 002 304	31 442 880	31 109 081	31 393 734
Dont VP d'entreprises	2 036 226	2 074 900	2 134 311	2 230 357	2 375 868	2 321 536	2 300 968
Parc de véhicules utilitaires légers	4 189 245	4 337 358	4 475 954	4 563 936	4 738 416	4 568 069	4 244 212
Part de véhicules d'entreprises	18 %	18 %	19 %	19 %	20 %	19 %	21 %

Source : FCA

En termes de nouvelles immatriculations :

Part des véhicules d'entreprise dans les immatriculations neuves

Nombre d'immatriculations annuelles	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Immatriculations de voitures particulières	2 013 709	2 067 789	2 000 549	2 064 543	2 050 283	2 269 011
Dont VP d'entreprises	821 221	846 799	838 028	886 928	823 775	725 483
Immatriculations de véhicules utilitaires légers (moins de 3,5 t)	383 360	392 272	409 336	429 911	430 402	348 097
Dont VUL à usage professionnel	339 466	350 267	374 280	396 831	400 593	316 795
Part de véhicules d'entreprises (VP et VUL)	48 %	49 %	50 %	51 %	49 %	40 %

Source : FCA

D'après les chiffres du parc automobile, 20 % des voitures particulières et des véhicules utilitaires légers sont des véhicules d'entreprise (sans distinguer ici les véhicules utilitaires légers détenus par des particuliers). Ce pourcentage est stable entre 2004 et 2010. Cependant l'observation des immatriculations annuelles montre que les véhicules d'entreprises représentent la moitié des nouvelles immatriculations de 2004 à 2008 et 40 % en 2009.

Sur la base de ces pourcentages, on décide d'adopter un rapport de 20 % de véhicules disposant d'un lieu de charge principal en entreprise pour refléter le parc automobile circulant. Une même analyse avec un taux plus élevé de véhicules d'entreprise au cours d'une période transitoire pourrait faire l'objet d'études ultérieures, compte tenu que :

- les entreprises sont responsables d'achats significatifs de véhicules neufs (près de 50 %) ;
- les entreprises sont *a priori* capables d'optimiser l'usage de véhicules tout électrique et d'offrir une bonne gestion des places de stationnement.

ANNEXE 3 : Coûts du CO₂ et coûts des polluants par phase du cycle de vie du véhicule

 Coût du CO₂ en 2010 par phase du cycle de vie

2010		Véhicule essence	Véhicule diesel urbain	Véhicule électrique	Véhicule diesel routier	Véhicule hybride rechargeable
Production de batterie	Emissions unitaires de CO ₂ (g/km)	0	0	15 - 30	0	5 - 10
	Coût unitaire actualisé (€ ₂₀₁₀)	0	0	106 - 212	0	43 - 87
Production d'énergie (carburant ou électricité)	Emissions unitaires de CO ₂ (g/km)	30	10	13 - 80	15	14 - 47
	Coût unitaire actualisé (€ ₂₀₁₀)	212	71	92 - 564	130	87 - 378
Circulation	Emissions unitaires de CO ₂ (g/km)	115	110	0	155	78
	Coût unitaire actualisé (€ ₂₀₁₀)	811	776	0	1 346	673
Bilan	Emissions totales de CO ₂ (g/km)	145	120	28 - 110	170	93 - 131
	Coût total actualisé (€ ₂₀₁₀)	1 023	847	198 - 776	1 476	803 - 1 138

 Coût du CO₂ en 2020 par phase du cycle de vie

2020		Véhicule essence	Véhicule diesel urbain	Véhicule électrique	Véhicule diesel routier	Véhicule hybride rechargeable
Production de batterie	Emissions unitaires de CO ₂ (g/km)	0	0	15 - 30	0	5 - 10
	Coût unitaire actualisé (€ ₂₀₁₀)	0	0	183 - 366	0	75 - 150
Production d'énergie (carburant ou électricité)	Emissions unitaires de CO ₂ (g/km)	27	9	9-72	14	7 - 39
	Coût unitaire actualisé (€ ₂₀₁₀)	331	110	105 - 878	204	112 - 588
Circulation	Emissions unitaires de CO ₂ (g/km)	90	85	0	125	63
	Coût unitaire actualisé (€ ₂₀₁₀)	1 098	1 037	0	1 876	938
Bilan	Emissions totales de CO ₂ (g/km)	117	94	24 - 102	139	75 - 112
	Coût total actualisé (€ ₂₀₁₀)	1 428	1 147	288 - 1244	2 080	1 125 - 1 676

Comparaison des coûts des polluants locaux pour les différents types de véhicules en 2010 et 2020

	Véhicule essence	Véhicule diesel urbain	Véhicule électrique	Véhicule diesel routier	Véhicule hybride rechargeable
2010 : Coût total actualisé sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule (€ ₂₀₁₀)	849	1 534	611-1 555	1 509	827-1 408
2020 : Coût total actualisé sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule (€ ₂₀₁₀)	868	1 384	575-1 717	1 383	814-1 455

Source : calculs CGDD

ANNEXE 4 : Coûts de la tonne de CO₂ évitéeCoûts de la tonne de CO₂ évitée dans chaque cas (en €₂₀₁₀)

Passage essence → électrique	tCO ₂ évitées	Coût social de la tonne de CO ₂ évitée	Coût public de la tonne de CO ₂ évitée
2010 mix français	-22,8	862	408
2010 mix européen	-6,8	3 020	1 365
2020 mix français	-18,2	372	221
2020 mix européen	-3,0	2 652	1 369
Passage diesel urbain → électrique	tCO ₂ évitées	Coût social de la tonne de CO ₂ évitée	Coût public de la tonne de CO ₂ évitée
2010 mix français	-17,9	954	424
2010 mix européen	-1,9	9 259	3 899
2020 mix français	-13,7	324	194
2020 mix européen	-	-	-
Passage diesel routier → hybride	tCO ₂ évitées	Coût social de la tonne de CO ₂ évitée	Coût public de la tonne de CO ₂ évitée
2010 mix français	-18,6	506	255
2010 mix européen	-9,4	1 072	506
2020 mix français	-15,3	22	166
2020 mix européen	-6,5	151	392

Source : calculs CGDD

Le coût social de la tonne de CO₂ évitée est calculé en rapportant le bilan socio-économique du passage d'un véhicule thermique à un véhicule électrique aux tonnes de CO₂ évitées ; le coût public de la tonne de CO₂ évitée est calculé, quant à lui, en rapportant le différentiel de fiscalité, lié au remplacement d'un véhicule thermique à un véhicule électrique, aux émissions de CO₂ évitées.

ANNEXE 5 : Analyse de sensibilité

Pour évaluer la robustesse des résultats du bilan coût-avantages du passage d'un véhicule thermique à un véhicule électrique, une étude de la sensibilité du résultat du bilan à la variation des valeurs en 2020 de différents paramètres clés de l'étude permet une mise en perspectives de l'analyse proposée. Le tableau suivant propose le résultat du bilan pour chacun des paramètres testés selon deux valeurs encadrant celles retenues dans le scénario central. La variation de la valeur d'un paramètre est effectuée à valeurs des autres paramètres constantes.

Analyse de sensibilité (avec infrastructures de recharge)

Paramètres	Référence	Valeur 1	Bilan			Valeur 2	Bilan				
			véh. Ess. →	véh. Diesel →	véh. Diesel →		véh. Ess. →	véh. Diesel →	véh. Diesel →		
			véh. Elec	véh. Elec	véh. Hyb.		véh. Elec	véh. Elec	véh. Hyb.		
			-5 642	-3 588	618		-5 642	-3 588	618		
Batterie	Coût de la batterie (€)	300	200	-3 552	-1 498	1 271	500	-7 732	-5 679	-34	
	Puissance de la batterie (kWh)	VE	25	20	-4 388	-2 334	—	30	-6 896	-4 843	—
		VHR	6	3	—	—	1 597	10	—	—	-686
Carburant	Prix du baril de pétrole en 2030 (€)	100	75	-6 168	-4 175	87	150	-4 725	-2 532	1 574	
	Consommation des véhicules (L/100km)	"urbains"	3,2 – 3,7	2,5	-8 285	-5 481	—	4,2 - 4,8	-3 439	-1 696	—
		"routiers"	4,7	4	—	—	-220	5,8	—	—	2 016
Km annuels	Kilométrage annuel des véhicules (km/an)	"urbains"	13 000	8 000	-6 223	-4 477	—	16 000	-5 293	-3 055	—
		"routiers"	16 000	10 000	—	—	-446	20 000	—	—	1 328
	VHR : Part des km parcourus avec la batterie	50%	30%	—	—	-578	70%	—	—	—	1 814
Contenu CO2 du kWh	Contenu en CO2 du kWh (gCO2/kWh)	Mix français	43	20	-5 421	-3 368	754	65	-5 853	-3 800	488
		Mix européen	360	300	-8 108	-6 055	-899	400	-9 068	-7 014	-1 490

Analyse de sensibilité (sans infrastructures de recharge)

Paramètres	Référence	Valeur 1	Bilan			Valeur 2	Bilan				
			véh. Ess. →	véh. Diesel →	véh. Diesel →		véh. Ess. →	véh. Diesel →	véh. Diesel →		
			véh. Elec	véh. Elec	véh. Hyb.		véh. Elec	véh. Elec	véh. Hyb.		
			-3 506	-1 452	2 844		-3 506	-1 452	2 844		
Batterie	Coût de la batterie (€)	300	200	-1 416	638	3 406	500	-5 596	-3 543	2 102	
	Puissance de la batterie (kWh)	VE	25	20	-2 252	-198	—	30	-4 760	-2 707	—
		VHR	6	3	—	—	3 733	10	—	—	1 450
Carburant	Prix du baril de pétrole en 2030 (€)	100	75	-4 032	-2 039	2 223	150	-2 589	-396	3 710	
	Consommation des véhicules (L/100km)	"urbains"	3,2 – 3,7	2,5	-6 150	-3 345	—	4,2 - 4,8	-1 303	440	—
		"routiers"	4,7	4	—	—	1 916	5,8	—	—	4 152
Km annuels	Kilométrage annuel des véhicules (km/an)	"urbains"	13 000	8 000	-4 087	-2 341	—	15 000	-3 157	-919	—
		"routiers"	16 000	13 000	—	—	1 690	20 000	—	—	3 464
	VHR : Part des km parcourus avec la batterie	50%	30%	—	—	1 558	70%	—	—	—	3 950
Contenu CO2 du kWh	Contenu en CO2 du kWh (gCO2/kWh)	Mix français	43	20	-3 285	-1 232	2 890	65	-3 717	-1 664	2 624
		Mix européen	360	300	-5 972	-3 919	1 237	400	-6 932	-4 878	646

Source : calcul CGDD

On observe que le résultat du bilan est assez sensible aux paramètres étudiés, voire très sensible pour certains. Il s'agit notamment des postes « batterie » et « carburant ».

ANNEXE 6 : Typologie des zones urbaines

On utilise la notion d'unité urbaine pour spécifier la continuité de l'habitat : est considéré comme unité urbaine un ensemble d'une ou plusieurs communes présentant une continuité du tissu bâti (pas de coupure de plus de 200 mètres entre deux constructions) et comptant au moins 2 000 habitants.

Si la zone bâtie se situe sur une seule commune, on parle de ville isolée. Dans le cas contraire, on parle d'une agglomération multicommunale. Pour chacune des agglomérations multicommunales, un « centre » est défini comme un ensemble composé d'une ou plusieurs communes entières. Si une commune représente plus de 50% de la population de l'unité urbaine, elle est seule ville centre. Dans le cas contraire, toutes les communes qui ont une population supérieure à la moitié de celle de la commune la plus importante, ainsi que cette dernière, sont villes centres. Les communes urbaines qui ne sont pas villes centres constituent la banlieue de l'unité urbaine. Enfin, les communes rurales sont celles qui n'appartiennent pas à une unité urbaine.

En parallèle à ce zonage en unité urbaine est construit un zonage en aires urbaines à partir des unités urbaines et des déplacements domicile-travail pour mesurer l'influence des villes et distinguer l'espace à dominante urbaine de l'espace à dominante rurale. Il permet notamment de prendre en compte le phénomène de périurbanisation en s'appuyant sur l'attractivité en termes d'emploi.

Une aire urbaine est un ensemble de communes d'un seul tenant et sans enclave, constituée par un pôle urbain et une couronne périurbaine. La couronne périurbaine est formée de communes rurales ou d'unités urbaines dont au moins 40 % de la population résidente ayant un emploi travaille dans le pôle ou dans des communes attirées par celui-ci.

On définit ainsi un espace à dominante urbaine constitué :

- (1) d'un pôle urbain ;
- (2) de communes monopolarisées ;
- (3) de communes multipolarisées.

(1) Un pôle urbain est une unité urbaine offrant au moins 5 000 emplois et n'appartenant pas à la couronne périurbaine d'un autre pôle urbain. Un pôle urbain est donc constitué d'un centre (ou ville-centre) et d'une banlieue, tout comme l'unité urbaine.

(2) Les communes monopolarisées (ou couronne périurbaine ou communes polarisées) font partie des communes de l'aire urbaine à l'exclusion de son pôle urbain.

(3) Les communes multipolarisées sont des communes rurales et unités urbaines situées hors des aires urbaines, dont au moins 40% de la population résidente ayant un emploi travaille dans plusieurs aires urbaines, sans atteindre ce seuil avec une seule d'entre elles, et qui forment un ensemble d'un seul tenant.

Enfin, un espace à dominante rurale est un ensemble de communes n'appartenant pas à l'espace à dominante urbaine.

Références bibliographiques

- ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), *Etude sur le contenu CO₂ du kWh électrique en France selon l'usage*, janvier 2005.
- ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), *Etude sur les coûts externes des véhicules électriques et hybrides*.
- ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), *Les transports électriques en France : un développement nécessaire sous contraintes*, Stratégie et études n°21, 21 juillet 2009.
- AXSEN, J., BURKE, A., KURANI, K., 2008. *Batteries for plug-in hybrid electric Vehicles (PHEVs): goals and the state of technology circa 2008*. Research Report UCD-ITS-RR-08-14, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis.
- AXSEN, J., KURANI, K., BURKE, A., 2010. *Are batteries ready for plug-in hybrid buyers?* Transport Policy 17 (2010) 173-182, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis.
- BILOT, H., *Diésélisation du parc automobile – Seuil de rentabilité de la motorisation diesel et sensibilité aux conditions économiques*, MEEDDAT, SESP, Bureau de la Prospective Economique des Transports, décembre 2007.
- BUREAU, D. & GOLLIER, C., *Evaluation des projets publics et développement durable*, Références économiques pour le développement durable n°8, Conseil Economique pour le Développement Durable (CEDD), 2009.
- Cahier des Constructeurs Automobiles.
- Centre d'Analyse Stratégique (CAS), *Valeur tutélaire du carbone*, Rapport du groupe d'experts présidé par Alain Quinet, juin 2008.
- Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement (CETE) Nord Picardie, *Pourquoi et comment se déplace-t-on au quotidien ?* « La mobilité des résidents français : résultats de l'Enquête Nationale Transports Déplacements de 2008 ». Présentation du 6 mai 2010.
- Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique (CITEPA), *Coralie – format SECTEN*, mise à jour février 2008.
- Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), *Une évaluation du bonus malus automobile écologique*, Le Point sur n°53, Mai 2010.
- Commissariat Général du Plan, *Transports : choix des investissements et coût des nuisances*, Rapport du groupe d'experts présidé par Marcel Boiteux, juin 2001.
- Commissariat Général du Plan, *Révision du Taux d'actualisation des investissements publics*, Rapport du groupe d'experts présidé par Daniel Lebègue, 21 janvier 2005.
- Commission des Comptes et Transports de la Nation (CCTN).
- Commission Européenne, *Règlement n° 715/2007 du Parlement européen et du Conseil, relatif à la réception des véhicules à moteur au regard des émissions des véhicules particuliers et utilitaires légers (Euro 5 et Euro 6) et aux informations sur la réparation et l'entretien des véhicules*, 20 juin 2007.
- Commission Européenne, *Handbook on estimation of external cost in transport sector*, Delft, février 2008.
- Commission Européenne, *Directive 2005/0283 du Parlement européen et du Conseil, relative à la promotion de véhicules de transport routier propres et économes en énergie*, 16 mars 2009.
- Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (MEEDDM/DGITM), *Les déplacements domicile-travail*. Résultats de l'enquête nationale transports et déplacements 2007-2008. Présentation du 6 mai 2010.
- Enquête Nationale Transports Déplacements (ENTD), 2008. Base de données du Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du MEEDDM.
- ERDF (Electricité Réseau Distribution France), *Etude des coûts de raccordement aux réseaux publics de distribution d'électricité de l'infrastructure de recharge des véhicules électriques*, 13 mai 2009.
- European Topic Centre on Air and Climate Change (ETCACC), *Environmental impacts and impact on the electricity market of a large scale introduction of electric cars in Europe – Critical revue of literature*, Technical Paper 2009/4, November 27, 2009.

Fichier Central des Automobiles.

Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat (GIEC), Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), PACHAURI, R.K., REISINGER, A., *Changements climatiques 2007 – Rapport de Synthèse*, 2008.

Groupe La Poste, *Les Perspectives de développement industriel des véhicules électriques*, 18 septembre 2008.

Groupe de travail sur la mise en place d'infrastructures pour les véhicules électriques ou hybrides électriques rechargeables, sous-groupe « Modèles économiques », Projet de note technique pour le thème de travail n°1 « Caractériser le développement du marché (technologies et usages) », EDF, 9 mai 2007.

Groupe de travail sur la mise en place d'infrastructures pour les véhicules électriques ou hybrides électriques rechargeables, sous-groupe « Modèles économiques », Note technique n°2 « Définir les typologies d'infrastructures nécessaires », EDF, 14 mai 2009.

International Energy Agency (IEA), *Technology Roadmap – Electric and plug-in hybrid electric vehicles*, 2009.

KARPLUS, V., PALTSEV, S. & REILLY, J.M., 2009. *Prospects for Plug-in Hybrid Electric Vehicles in the United States and Japan: A General Equilibrium Analysis*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Report No. 172. April 2009.

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM), Service de l'Observation et des Statistiques (MEEDDM/CGDD/SOeS/OST), *Présentation de l'Enquête Nationale Transports Déplacements (ENTD 2007-2008)*. Etat au 25 septembre 2008.

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM), *Lancement du plan national pour le développement des véhicules électriques et hybrides rechargeables*, dossier de presse présenté par Jean-Louis Borloo, 1^{er} octobre 2009.

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM), *Avancées du plan de développement des véhicules électriques et hybrides*, dossier de presse présenté par Jean-Louis Borloo et Christian Estrosi, 13 avril 2010.

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM), Service de l'Observation et des Statistiques (MEEDDM/CGDD/SOeS/OST), *Caractéristiques du parc des véhicules motorisés et de leurs usages*. « La mobilité des résidents français », Journée d'échanges du Réseau des Economistes Transports et Aménagement, 6 mai 2010.

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM), Groupe de travail sur le « livre vert » pour le développement des infrastructures de charge électrique, présidé par Louis Nègre, coordonné par Jean-Louis Legrand, 2010.

Observatoire du véhicule d'entreprise, Mémento fiscal et social du véhicule d'entreprise, juin 2008.

Observatoire du véhicule d'entreprise, *Le véhicule électrique pour l'entreprise – Points de vue et recommandations des entreprises pour le déploiement du véhicule électrique*, 24 mars 2010.

OLLIVIER, Analyse de Cycle de Vie de véhicules thermiques et électrique, EDF, 1996.

PERTHUIS, C. De, CRIQUI, P., DELBOSC, A., ILASCA, C., *Après Copenhague – Des engagements de réduction d'émission « à géométrie variable »*, Références économiques pour le développement durable n°13, Conseil Economique pour le Développement Durable (CEDD), 2010.

PERTHUIS, C. De, *Et pour quelques degrés de plus... Nos choix économiques face au risque climatique*, Pearson Education France, 2009.

Projet Européen MEET.

Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements (SETRA), *Présentation de l'Enquête Nationale Transports Déplacements (ENTD)*, Mobilités à Longue Distance, Fiche n°1. Avril 2010.

Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements (SETRA), *Évolution des volumes et caractéristiques des voyages à longue distance*, Mobilités à Longue Distance, Fiche n°2. Avril 2010.

SYROTA, J. (sous la dir. de), *Perspectives concernant le véhicule « grand public » d'ici 2030*, Centre d'Analyse Stratégique, Conseil Général des Mines, 28 septembre 2008.

TEISSIER, O. & MEUNIER, L., *Scénarios de forte réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les transports et les bâtiments à l'horizon 2050*, In *Lutte contre le changement climatique – Quelles contributions sectorielles ?*, Notes de synthèse - Analyses

Prospectives n°170, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT), juillet-août-septembre 2008.

THEYS, J., *Quelles technologies futures pour les transports en Europe ?*, Centre de Prospective et de Veille Scientifiques et technologiques, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT), novembre 2007.

Commissariat général au développement durable

Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable

Tour Voltaire

92055 La Défense cedex

Tél : 01.40.81.21.22

Retrouver cette publication sur le site :

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/> « Salle de lecture »

Résumé

Le secteur des transports, responsable du tiers des émissions de CO₂ d'origine énergétique en France, représente un secteur clé dans le cadre d'une stratégie de réduction des émissions. La pénétration de véhicules tout électrique ou hybrides rechargeables, qui puisent leur énergie de propulsion d'une électricité peu émettrice de carbone, est l'une des solutions avancées pour « décarboner » les déplacements assurés par les véhicules particuliers. Un plan national pour le développement de ces véhicules a été lancé en octobre 2009, avec un objectif de 2 millions mis en circulation à l'horizon 2020.

La présente évaluation met en regard, en 2010 et à l'horizon 2020, l'ensemble des coûts et des avantages estimés du remplacement des véhicules « classiques » à motorisation thermique par des véhicules électriques. A l'horizon 2020, le bilan est proche de l'équilibre. Le coût de la batterie reste un enjeu majeur à court moyen terme pour la compétitivité du véhicule électrique. Le développement d'une dynamique de marché à moyen terme devrait permettre une réduction significative de ce coût. Un soutien public à l'achat de véhicules électriques paraît donc justifié jusqu'au décollage de la filière.

L'étude fournit également des éléments d'évaluation de la demande potentielle de véhicules électriques, par une analyse des résultats récents de l'Enquête Nationale Transports Déplacements (ENTD 2008), relative aux déplacements des français. L'analyse montre que la grande majorité des déplacements quotidiens en véhicules particuliers pourraient être couverts par des véhicules tout électrique d'une centaine de kilomètres d'autonomie.



Dépôt légal : Mai 2011
ISSN : 2102 - 4723