

Commissariat général au développement durable

Analyse coûts bénéfices des véhicules électriques

Les voitures

JUILLET 2017

sommaire

Analyse coûts bénéfices des véhicules électriques

Les voitures

5 – Objectifs et cadre de l'étude

11 – Méthodologie et hypothèses générales

Le calcul des coûts globaux de possession et le coût socio-économique nécessite la construction d'un jeu d'hypothèses concernant les caractéristiques des véhicules et les externalités.

31 – Résultats

L'analyse montre que le véhicule électrique peut être rentable en milieu urbain très dense dès 2020 alors qu'il faut attendre 2030 pour les technologies hybrides et qu'en usage mixte avec une part de trajets interurbains thermique reste la meilleure technologie pour ces deux horizons.

69 – Compléments : éléments d'appréciation de la valeur «smart grid» des batteries de véhicule électrique

Les véhicules à batterie électrique peuvent apporter des bénéfices sous forme de services énergétiques avec une valeur «smart grid» capable de compléter leur modèle économique.

87 – Annexes : bilans détaillés et sources des émissions de polluants atmosphériques

Document édité par :

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

Remerciement : Nous remercions **Mathilde Poret**, stagiaire de Sciences Po en Master in Economics and Public Policy pour son aide dans la réalisation de l'analyse coûts-bénéfices.

contributeurs

ST

Stéphane Taszka

Adjoint au chef de bureau des
politiques de mobilité et
d'aménagement durable

[stephane.taszka@developpement-
durable.gouv.fr](mailto:stephane.taszka@developpement-durable.gouv.fr)

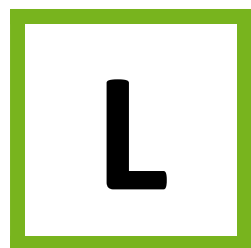
SD

Silvano Domergue

Chef du bureau des politiques
de mobilité et d'aménagement
durable

[silvano.domergue@developpement-
durable.gouv.fr](mailto:silvano.domergue@developpement-durable.gouv.fr)

avant-propos



Les enjeux climatiques de l'accord de Paris, la qualité de l'air dans les zones urbaines, le développement des nouvelles mobilités comme l'autopartage, l'affaire des constructeurs relative aux émissions de polluants des véhicules, notamment diesel, les expérimentations du véhicule autonome, sont autant d'éléments propices au développement des technologies alternatives au véhicule thermique, comme le véhicule électrique ou hybride.

Cette étude a pour objectif d'évaluer ces technologies alternatives pour les véhicules particuliers à la fois d'un point de vue socio-économique et du point de vue de l'utilisateur, aux horizons 2020 et 2030. À travers cette analyse nous tenterons de proposer une réponse à la question : quels sont les domaines de pertinence de ces nouvelles technologies ?

Laurence Monnoyer-Smith

COMMISSAIRE GÉNÉRALE AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Introduction

Objectifs et cadre de l'étude

Pour limiter les émissions de CO₂, la pollution atmosphérique ou les nuisances sonores, les progrès technologiques et les changements de comportement représentent des solutions pertinentes, notamment à travers le développement de l'électromobilité. L'étude permet de comparer les technologies électrique ou hybride au véhicule thermique à travers différents cas d'usage et dans différents milieux de circulation, aux horizons 2020 et 2030.



ÉLÉMENTS DE CONTEXTE

L'accord de Paris signé le 12 décembre 2015 par un très grand nombre de pays, a pour objectif de contenir la hausse des températures en deçà de 2°C, voire 1,5°C. Dans ce contexte, la France s'est engagée dans des objectifs de réduction des émissions de CO₂ au travers de la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (encadré page 9).

Dans le secteur des transports, le développement des technologies alternatives à la voiture thermique apparaît ainsi comme une des réponses à la fois aux enjeux du changement climatique, compte tenu notamment du mix de production électrique décarbonaté, mais aussi aux problèmes de qualité de l'air et de pollution sonore dans les zones urbaines denses, qui produisent des impacts sanitaires et économiques importants.

Cette étude a pour objectif de comparer les bilans environnementaux des différentes motorisations afin d'évaluer leur impact en matière de changement climatique (CO₂), de pollution atmosphérique (plus particulièrement NOx et particules) et de nuisances sonores.

Le changement climatique

Le secteur des transports est responsable en France de plus du quart des émissions de GES et le mode routier représente à lui seul 92 % de ces émissions (43 % pour les seuls véhicules particuliers). L'Europe s'est fixé un objectif de réduction des émissions de CO₂ de 40 % en 2030 (par rapport à 1990) repris au niveau national par la France dans la loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.

Le développement de technologies alternatives aux véhicules thermiques comme le véhicule électrique ou hybride (comme le report modal) apparaissent comme des solutions contribuant à atteindre cet objectif.

La pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique a des impacts importants en matière de santé publique (maladies respiratoires, cardiovasculaires et cancers), particulièrement en zones urbaines. En France, malgré la mise en œuvre du Plan particules et des nombreuses actions des deux Plans nationaux santé environnement (PNSE) entre 2004 et 2013, visant à la réduction des émissions de polluants, la qualité de l'air ne s'est pas améliorée significativement depuis les dix dernières années dans les villes. Neuf villes françaises dépassent de 10 µg/m³ les valeurs guide OMS pour les particules fines (PM_{2,5}). Une étude de Santé publique France¹ estime que 17 700 décès prématurés seraient évitables chaque année dans un scénario respectant ces valeurs guides, et que 48 300 le seraient « sans pollution induite par l'activité humaine ». Les pathologies respiratoires et cardiovasculaires occasionnent chaque année des coûts estimés *a minima* entre 20 et 30 milliards d'euros pour la France métropolitaine².

¹ Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique (Santé publique France), 2016.

² Rapport de la Commission des comptes et de l'économie de l'environnement - Santé et qualité de l'air extérieur (CGDD), juillet 2012

Le transport routier est le secteur le plus polluant en matière de NOx avec plus de 50 % des émissions³. En matière de particules, le transport est responsable de 15 à 20 % des émissions⁴ (en 2015, 15 % pour les PM₁₀ et 19 % pour les PM_{2,5}), derrière le logement, principal émetteur *via* le chauffage résidentiel.

Les nuisances sonores

Pour 54 % des Français, le bruit des transports est la principale source de nuisance, loin devant les bruits de comportements qui gêneraient 21 % de la population⁵. À haute dose, le bruit n'a pas qu'un impact sur le système auditif mais perturbe aussi les échanges et la communication, contrarie le sommeil, provoque un stress chez les individus. Il peut entraver le bon fonctionnement plus général de l'organisme (vue, système cardio-vasculaire, système gastro-intestinal), causer vertiges et nausées et être à l'origine de troubles psychologiques. Pour tenter de réduire ces nuisances, la directive 2002/49/CE sur l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement a pour objectif de définir une approche commune afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine dus à l'exposition au bruit ambiant dû aux transports terrestres et aériens.

Trois pistes d'action identifiées dans les transports pour limiter les externalités négatives :

- Les progrès technologiques au niveau des motorisations aussi bien en matière d'efficacité énergétique qu'en matière d'émissions de polluants atmosphériques

En 2009, l'Union Européenne a instauré des normes contraignantes pour les émissions des voitures neuves à hauteur de 130 g de CO₂ par km en 2015 (ce qui correspond environ à une consommation de 5,2 L/100km pour un moteur diesel et 5,8 L/100km pour l'essence) et 95 gCO₂/km (environ 3,8 L/100km pour le diesel et 4,2 L/100km pour l'essence) en 2020⁶. Même si on observe un écart entre les émissions théoriques affichées par les constructeurs (21 % de baisse sur les 8 dernières années) et les émissions réelles observées, les émissions de CO₂ des véhicules ont baissé significativement. Pour limiter ces écarts entre les émissions réelles et théoriques, dans le cadre de la norme Euro6c pour les véhicules mis en service en 2019, le cycle de conduite automobile NEDC sera remplacé à partir de 2017 par le cycle WLTC pour l'homologation des véhicules. Il sera ainsi plus proche des conditions réelles de conduite et devrait permettre de combler les écarts constatés entre les émissions affichées par les constructeurs et celles mesurées en phase de circulation. Un moteur thermique consommant 2 L/100km et les véhicules électriques ou hybrides peuvent renforcer significativement ces progrès.

³ Rapport national d'inventaire – Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Séries sectorielles et analyses étendues (Citepa), avril 2015

⁴ Citepa, format SECTEN, avril 2017.

⁵ Enquête TNS – Sofres, mai 2010, « Les Français et les nuisances sonores » (Ministère du développement durable).

⁶ Règlement européen n° 443/2009 établissant des normes de performance en matière d'émissions pour les voitures particulières neuves

- L'évolution des comportements de mobilité pour tendre vers plus d'intermodalité et un usage plus rationnel de la voiture à travers de nouvelles pratiques comme l'autopartage et le covoiturage

L'appel à projets « villes respirables en 5 ans » vise à faire émerger des « villes laboratoires » volontaires pour mettre en œuvre des mesures exemplaires pour la reconquête de la qualité de l'air afin de garantir, dans un délai de 5 ans, un air sain aux populations. Les dispositions de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte favorisent le développement de l'autopartage, du covoiturage et des modes doux qui sont des pratiques de mobilité plus adaptées aux problèmes de qualité de l'air.

- Le recours aux carburants alternatifs et plus particulièrement aux véhicules électriques ou hybrides

La directive européenne « Alternative Fuel Infrastructure » adoptée en septembre 2014 contraint les États-membres à fixer des objectifs pour 2020 en termes de bornes de recharge électrique accessibles au public. Une « stratégie » de déploiement (qui doit aussi intégrer le Gaz Naturel et l'Hydrogène) devrait être proposée à l'UE par les États-membres d'ici fin 2016. L'objectif européen serait d'arriver à 1 borne accessible au public pour 20 véhicules électriques. Ces objectifs sont intégrés dans la stratégie nationale bas carbone / mobilité propre (SNBC/MP) et la France s'est fixé de manière législative un objectif d'installation de 7 millions de points de charge (privés ou ouverts au public).

Les véhicules électriques et hybrides rechargeables présentent l'avantage de ne pas émettre de CO₂ et peu de polluants atmosphériques (essentiellement des particules émises lors du freinage ou de l'abrasion des pneus et des chaussées) et d'être peu bruyants. La production de l'énergie électrique ainsi que la fabrication de la batterie nécessaire à leur fonctionnement sont cependant sources d'émissions qui doivent être prises en compte sur la totalité du cycle de vie d'un véhicule.

La loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte : des actions pour limiter les externalités dues aux transports

L'article 36 prévoit le développement de véhicules à très faibles émissions avec un objectif national de consommation de carburant de 2 L/100 km et parallèlement de favoriser le report modal.

L'article 37 prévoit que l'État et les acteurs publics ainsi que les taxis et les loueurs procèdent à des achats responsables avec des obligations de renouvellement du parc en faveur de véhicules plus sobres sur le plan énergétique.

Les articles 39 et 40 prévoient des dispositions favorisant l'utilisation du vélo. L'article 40 prévoit aussi que l'État définit une stratégie pour le développement d'une mobilité propre qui se décline dans l'article 41 par l'objectif d'installation de 7 millions de points de charge pour les véhicules électriques et hybrides rechargeables.

L'article 41 incite les collectivités territoriales à développer l'utilisation des vélos et véhicules électriques. Le code de la construction et de l'habitation prévoit pour la construction de nouveaux bâtiments ou la rénovation d'espaces de stationnement des obligations d'installation d'infrastructures permettant le stationnement de vélos et l'obligation, dans certains cas, de doter une partie des places de stationnement d'infrastructures de charge pour le véhicule électrique ou hybride rechargeable.

Les articles 47 et 48 autorisent les collectivités à mettre en place notamment pour des raisons environnementales des limitations de vitesse inférieures à celles fixées par le code de la route et des zones de circulation restreinte (ZCR).

L'article 52 prévoit une définition officielle du covoiturage et des dispositions favorisant son développement.

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Le but de cette étude est de comparer différentes technologies de motorisation électrique alternatives au véhicule particulier thermique à travers deux types d'analyse :

- une analyse socio-économique comparant les coûts aux bénéfices en tenant compte des externalités environnementales ;
- une analyse du point de vue du consommateur ou de l'utilisateur de type coût complet de possession (*total cost of ownership* ou *TCO*) intégrant la fiscalité.

L'analyse est menée dans une logique micro-économique en comparant les coûts sur toute la durée de vie du véhicule de deux types de véhicules neufs : un véhicule thermique en référence et un véhicule à motorisation alternative.

Introduction - Objectifs et cadre de l'étude

Les quatre technologies étudiées sont :

- Les véhicules thermiques (VT), essence et diesel ;
- Les véhicules hybrides (VH) ;
- Les véhicules hybrides rechargeables (VEHR) ;
- Les véhicules tout électrique (VE).

Il s'agit de comparer les véhicules, quelle que soit la technologie utilisée, à usage équivalent. C'est pourquoi, pour des usages urbains, on compare une citadine essence à une citadine électrique de gamme B, hybride ou hybride rechargeable utilisant de l'essence. Dans le cas mixte, avec de multiples usages et une grande part de trajets interurbains, on compare une berline diesel à un véhicule électrique ou hybride rechargeable appartenant à la gamme M1. L'analyse se situe à deux horizons temporels d'achat des véhicules : 2020 et 2030.

Les technologies sont étudiées dans trois différents milieux de circulation en fonction de la densité de population : urbain très dense, urbain dense, et « mixte » à travers une moyenne pondérée de tous les milieux⁷. Concernant les milieux urbains, deux cas d'usage sont considérés : standard et intensif (type taxi ou Autolib').

Tableau 1 - Caractéristiques des cas d'usage étudiés en fonction des milieux traversés

	2020		2030	
Cas urbain	Très dense	Dense	Très dense	Dense
Cas urbain intensif	Très dense	Dense	Très dense	Dense
Cas mixte	Moyenne de tous les milieux		Moyenne de tous les milieux	

Source : CGDD

Les zones urbaines « très denses » correspondent aux zones avec une densité moyenne de 6 750 habitants/km². Les villes qui dépassent ce seuil et en font partie : Paris avec 21 300 habitants/km², de nombreuses communes d'Île-de-France comme Levallois-Perret, Courbevoie, Montrouge, Asnières-sur-Seine, Le Kremlin-Bicêtre et également Lyon, Grenoble, Nancy ou des communes autour de Lille comme Roubaix, Mons-en-Barœul. Lille et Marseille se situent juste en dessous du seuil mais avec de fortes disparités au sein de ces zones urbaines : certains arrondissements de Marseille dépassent ce seuil, d'autres sont en dessous. Les zones denses correspondent à une densité moyenne de 2 250 habitants/km². De nombreuses villes dépassent ce seuil et entrent dans la catégorie : Chambéry, Metz, Brest, Palavas-les-Flots, Pau, La Rochelle, Amiens, Tours, etc.

⁷ Qui regroupent outre les deux cités : urbain, urbain diffus et rase campagne (cf. le Rapport Quinet, Évaluation socio-économique des investissements publics, CGSP, 2013, pour la définition des milieux).

Partie 1

Méthodologie et hypothèses générales

Le calcul des coûts globaux de possession et le coût socio-économique pour chaque technologie nécessitent la construction d'un jeu d'hypothèses. Ces hypothèses concernent notamment le taux d'actualisation, les coûts des externalités, les caractéristiques des véhicules (consommation, kilométrage, durée de vie...), les milieux traversés, les prix des véhicules, des batteries et infrastructures ainsi que les coûts d'usage (entretien, énergie, fiscalité).



MÉTHODES

Coût socio-économique *versus* coûts globaux de possession (*total cost of ownership* -TCO)

Deux types d'analyse sont effectuées : l'analyse du coût socio-économique et l'analyse TCO.

Le bilan socio-économique porte sur les coûts *réels* supportés par la *collectivité* (y compris donc les coûts supportés par les personnes victimes des nuisances environnementales générées par l'utilisation d'un véhicule), qu'ils correspondent à des investissements, des achats ou aux valeurs monétaires des externalités, sans prise en compte des transferts entre agents, en particulier vers l'État à travers la fiscalité. La fiscalité relative aux carburants (TICPE), en dehors de sa composante carbone, est ainsi exclue de l'analyse. Toutefois, les pertes ou gains de recettes fiscales sont intégrés au second ordre à travers le coût d'opportunité des fonds publics (cf. COFP ci-après). La CSPE (contribution au service public de l'électricité) est intégrée dans le coût pour la collectivité de l'électricité.

L'analyse TCO prend en compte les coûts *financiers* supportés par *l'utilisateur* (hors externalités donc, sauf si une taxe en couvre les coûts, comme la composante carbone de la TICPE par exemple). Cette analyse permet d'évaluer les coûts globaux d'un véhicule pendant toute sa durée de détention. Les coûts entrant dans l'analyse sont les coûts d'achat (voiture, batterie, infrastructures de recharge), les coûts d'entretien du véhicule ainsi que l'assurance, les coûts liés à la fiscalité comme la carte grise, ou la TVS et les coûts TTC liés à la consommation d'énergie (carburant ou électricité).

Coûts actualisés

La méthode appliquée dans les deux types d'analyse est celle de l'analyse coût bénéfice sur la durée de vie du véhicule, avec un taux d'actualisation de 4,5 % correspondant au taux d'actualisation « public » préconisé par France Stratégie⁷. Ce taux est utilisé à la fois pour le bilan socio-économique et pour la vision « acteur » (TCO).

L'actualisation⁸ permet l'évaluation d'un même bien ou des services qu'il rend à différents moments dans le temps. En particulier les technologies étudiées impliquent un surcoût immédiat (à l'achat et/ou pour l'installation d'infrastructures) et un gain dans le futur (moindres consommation et impacts environnementaux).

Les coûts sont exprimés en € 2015 et actualisés pour les deux années étudiées, 2020 et 2030.

⁷ Évaluation socio-économique des investissements publics – Rapport de la mission menée par Émile Quinet (CGSP), septembre 2013

⁸ 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 : $A / (1+i)^n$.

La valeur résiduelle des infrastructures est prise en compte si leur durée de vie est supérieure à celle des véhicules étudiés. Elle est calculée comme le gain actualisé procuré par la détention d'une infrastructure partiellement amortie en comparaison à la situation où on doit la construire immédiatement. Ce gain est intégré comme une revente la dernière année de vie du véhicule.

Externalités

Les externalités qui sont prise en compte dans le bilan socio-économique sont le CO₂, le bruit et la pollution atmosphérique (NOx et particules). Ces externalités sont monétarisées conformément aux recommandations de France stratégie⁹. Elles évoluent dans le temps comme le PIB / tête (+1,3 % / an).

Le périmètre des externalités prises en compte inclut :

- la phase « en circulation » ;
- la phase « amont » de production de l'énergie (carburant, électricité) ;
- la phase « amont » de production de la batterie.

Coûts d'opportunité des fonds publics (COFP)

La substitution à un véhicule thermique dont le carburant est fortement taxé d'un véhicule électrique consommant moins et dont le vecteur énergétique est moins taxé entraîne une perte de recettes fiscales pour l'État. Cette perte n'est pas directement intégrée comme un coût dans le calcul socio-économique. Néanmoins, les effets indirects de cette perte sont pris en compte, à travers le « coût d'opportunité des fonds publics » (COFP). Les prélèvements publics sont à l'origine d'effets distorsifs dans l'économie, donc le coût est estimé ici conformément au rapport Quinet (2013) à 20 % du montant prélevé total. Le coût pour l'ensemble de l'économie de prélever 1 € est donc de 0,2 € : ce coût est intégré au bilan.

HYPOTHÈSES CONCERNANT LES VÉHICULES

Caractéristiques des véhicules

Les quatre technologies étudiées sont :

- **Un véhicule thermique essence ou diesel utilisé comme véhicule de référence.**
→ Il s'agit pour les deux types de carburant d'un véhicule de norme Euro 6 évoluant vers des émissions de 95 gCO₂/km en 2020 (74 gCO₂/km en 2030).
- **Un véhicule hybride.**
→ Il s'agit d'un véhicule à double motorisation thermique et électrique, utilisant une technologie de récupération de l'énergie au freinage et qui permet de limiter la consommation de carburant.

⁹ Évaluation socio-économique des investissements publics – Rapport « Quinet », CGSP, septembre 2013

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

- Un véhicule hybride rechargeable.

→ Ce véhicule peut être utilisé à la fois pour un usage urbain et mixte. Il possède une double motorisation, une batterie de 8 kWh et il réalise une partie des trajets en mode électrique (autonomie d'environ 40 km) et l'autre en mode thermique.

- Un véhicule tout électrique.

→ Il ne possède qu'un moteur électrique et réalise 100 % de ses trajets en mode électrique. Pour les besoins des cas nécessitant des usages différents, il est décliné en 2 types de véhicules avec des caractéristiques différenciées :

- Pour l'usage urbain : une citadine avec une batterie de 24 kWh permettant une autonomie de 130 km ;
- Pour l'usage mixte : une berline avec une batterie de 50 kWh permettant une autonomie de 200 km.

Hypothèses concernant le kilométrage annuel et la durée de vie

D'après le SOeS, le kilométrage annuel moyen d'un véhicule particulier (VP) est de 12 753 km (2014). Pour un VP à usage intensif, d'après un sondage mené auprès des taxis au Québec les taxis parcourent en moyenne 53 893 km/an (mais les chauffeurs minorent leurs kilométrages), d'après la Société d'assurance automobile du Québec, les taxis parcourent 67 730 km/an. On a donc pris pour hypothèse une distance moyenne de 60 000 km/an¹⁰.

On considère que les VP à usage « routier » réalisant plus de parcours interurbains sont utilisés de manière plus intensive en parcourant 16 000 km/an.

On considère que les kilométrages annuels moyens ne varient pas dans le temps.

Tableau 2 - Kilométrages annuels et durées de vie des véhicules retenus dans l'étude, en fonction des cas d'usage

Usage	Kilomètres / an	Durée de vie	Kilomètres totaux parcourus
Standard	13 000	16	208 000
Intensif (taxi)	60 000	4	240 000
"Routier"	16 000	16	256 000

Sources : CGDD/SOeS CCTN 2014, SAA Québec

¹⁰ Cela correspond à un usage par un seul chauffeur. Généralement les taxis/VTC sont plusieurs chauffeurs à utiliser un même véhicule qui effectue alors environ 100 000 km par an. Toutefois ces pratiques nécessitent des infrastructures de recharge rapide entraînant des coûts additionnels.

Hypothèses concernant les consommations unitaires des véhicules neufs

Pour les déplacements en zones urbaines, on fait l'hypothèse que le véhicule type est un véhicule de la gamme B. Un véhicule de la gamme M1 est retenu pour l'usage mixte.

Les données sont constituées à partir de l'année de référence 2011, pour laquelle la consommation moyenne de chaque gamme a été calculée à partir des fichiers d'immatriculation. Un facteur multiplicatif de 1,25 est appliqué à la consommation affichée par le constructeur, conformément à ce qui est pratiqué par le CITEPA pour cette année-là. On prend pour hypothèses que les consommations unitaires baissent jusqu'en 2020, respectivement pour l'essence de 2,7 %/an et pour le diesel de 2,2 %/an. Après 2020, on prend pour hypothèse que la baisse de consommation annuelle est de 2,2 %/an pour les deux carburants. Ces hypothèses sont cohérentes avec le passage en 2020 à un parc de véhicules neufs émettant en moyenne 95 gCO₂/km¹¹, et supposent un certain effet rattrapage de l'essence. Ces tendances sont ensuite prolongées après 2020.

Les consommations sont différenciées selon l'usage du véhicule dans les 5 zones définies dans le rapport Quinet. Cette différenciation est effectuée en attribuant à chaque zone une vitesse de circulation et en utilisant ensuite les courbes d'émission COPERT¹². Ces courbes sont utilisées simplement pour évaluer l'écart de consommation relatif entre zones : le niveau est recalé de sorte que la moyenne sur l'ensemble des zones retombe bien sur la consommation moyenne par gamme.

Pour calculer la moyenne sur l'ensemble des zones, on utilise une répartition calculée à partir de données relatives à la répartition du trafic routier selon les milieux par MODEV, le modèle utilisé par le CGDD.

Tableau 3 - Répartition du trafic routier selon le milieu

Milieu	Répartition du trafic / milieu
Urbain très dense	10%
Urbain dense	12%
Urbain	15%
Urbain diffus	51%
Interurbain	12%

Source : CGDD (MODEV 2015)

¹¹ Dans une approche prudente relative aux émissions des véhicules thermiques, on suppose que l'écart entre les consommations réelles et théoriques reste constant dans le temps. En réalité, plusieurs études ont estimé que cet écart avait augmenté depuis 2011.

¹² Le modèle COPERT (COmputer Program to calculate Emission from Road Transport) est fondé sur une base de données des facteurs d'émission routiers qui permettent de convertir des données quantitatives d'activité en émissions de polluants. On utilise la formule suivante pour les consommations en fonction de la vitesse : $C = 0,1381 - 2,34 \cdot 10^{-3} \cdot V + 1,6 \cdot 10^{-5} \cdot V^2$ (en l/km)

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Le tableau ci-après précise les hypothèses prises sur les vitesses pratiquées dans les différentes zones ainsi que les résultats obtenus concernant la consommation unitaire.

Tableau 4 - Consommations unitaires réelles de carburant (en L/100 km) en fonction des gammes, des milieux et des vitesses en 2015, 2020 et 2030, retenues dans l'étude

Gamme	Zone	Vitesse	2015		2020		2030	
			Diesel	Essence	Diesel	Essence	Diesel	Essence
B	Très dense	30	6,31	7,85	5,65	6,84	4,52	5,48
B	Dense	40	5,38	6,68	4,81	5,83	3,85	4,67
B	Urbain	50	4,69	5,83	4,19	5,08	3,36	4,07
M1	Urbain diffus	90	4,84	6,26	3,92	4,75	3,14	3,80
M1	Interurbain	110	6,30	8,15	5,10	6,18	4,08	4,95
B	Moyenne	---	4,89	6,09	4,38	5,31	3,51	4,25
M1	Moyenne	---	5,41	7,00	4,84	6,10	3,68	4,88

Source : calculs CGDD d'après le modèle COPERT

Pour rappel, les consommations unitaires exprimées sont des consommations réelles intégrant un facteur correctif par rapport aux valeurs affichées par les constructeurs, correspondant à l'écart constaté entre émissions réelles et banc d'essai.

Concernant les véhicules « tout électriques » de segment B (compact) en milieu urbain, on retiendra la valeur moyenne de 18 kWh/100 km estimée dans le cadre du rapport européen *Individual mobility: From conventional to electric cars JRC Science & Policy report, 2015*¹³ (page 34). Il faut noter que cette estimation apparaît largement supérieure à celle affichée par les constructeurs (de 38 %, cf. estimation du même rapport de la commission européenne).

Il s'agit de véhicules correspondant au segment A européen¹⁴ (mini citadines correspondant à la gamme B en France) et d'un usage urbain (dense ou très dense). On supposera qu'en utilisation interurbaine, et dans le cas d'un véhicule de segment M1 (plus lourd), la consommation atteint 25 kWh/100km. Concernant le véhicule électrique, le rendement du moteur étant moins dépendant du régime de vitesses, on considère que la consommation augmente quand la vitesse augmente du fait des forces de frottement accrues.

On suppose que la consommation des véhicules hybrides essence et diesel est 20 % inférieure à celle des véhicules thermiques. En milieu très dense, les gains en matière de consommation sont accrus et atteignent 30 %.

Pour les véhicules hybrides rechargeables (VHR) on suppose que les constructeurs ne font pas d'effort technologique sur les motorisations thermiques et les performances en matière de consommation restent celles de 2015.

¹³ http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC97690/eur_27468_en_online_v3.pdf

¹⁴ Qui correspond en France à la gamme B1 du Comité des constructeurs français automobiles (CCFA).

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Il faut noter que les consommations des véhicules électriques varient fortement en fonction des saisons (utilisation de la climatisation l'été et du chauffage l'hiver qui, en l'absence de moteur thermique, crée une surconsommation importante) et des changements d'altitude (cf. rapport européen sus-mentionné).

Il est supposé que la batterie des véhicules tout électrique a une capacité de 24 kWh, et celle des véhicules hybrides rechargeables de 8 kWh. Cette capacité de stockage pour les VHR permet une autonomie de l'ordre de l'ordre de 40 km en usage urbain, un peu moins en usage interurbain. Au vu de la distribution des longueurs de trajet fournie par l'enquête nationale transports et déplacements (ENTD) du CGDD/SOeS de 2008, on estime que cette capacité de stockage permet aux VHR de réaliser en mode électrique :

- en usage mixte, 55 % des kilomètres ;
- en usage urbain dense, 80 % des kilométrages ;
- en usage urbain très dense, 90 % des kilométrages.

Tableau 5 - Hypothèses concernant les consommations unitaires des véhicules, selon le milieu et la gamme de véhicule pour 2020

Consommation unitaire	Milieu mixte / segment M1	Milieu dense / segment B1	Milieu très dense / segment B1
VP essence standard (L/100 km)	6,1	5,83	6,84
VP diesel standard (L/100 km)	4,84	4,81	5,65
VP tout électrique (kWh / 100 km)	25	18	18
VP hybride essence (en % de la consommation du véhicule thermique correspondant)	80 %	80 %	70 %
VP hybride diesel (en % de la consommation du véhicule thermique correspondant)	80 %	80 %	70 %
VP hybride rechargeable essence : part du trajet réalisé en mode électrique	55 %	80 %	90 %
VP hybride rechargeable diesel : part du trajet réalisé en mode électrique	55 %	80 %	90 %

Source : estimations CGDD

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Tableau 6 - Hypothèses concernant les consommations unitaires des véhicules, selon le milieu et la gamme de véhicule pour 2030

Consommation unitaire	Milieu mixte / segment M1	Milieu dense / segment B1	Milieu très dense / segment B1
VP essence standard (L/100 km)	4,88	4,67	5,48
VP diesel standard (L/100 km)	3,88	3,85	4,52
VP tout électrique (kWh / 100 km)	25	18	18
VP hybride essence (en % de la consommation du véhicule thermique correspondant)	80 %	80 %	70 %
VP hybride diesel (en % de la consommation du véhicule thermique correspondant)	80 %	80 %	70 %
VP hybride rechargeable essence: part du trajet réalisé en mode électrique	55 %	80 %	90 %
VP hybride rechargeable diesel : part du trajet réalisé en mode électrique	55 %	80 %	90 %

Source : estimations CGDD

HYPOTHÈSES CONCERNANT LE COÛT ASSOCIÉ AUX DIFFÉRENTS IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Hypothèses concernant les émissions de GES (CO₂)

Plusieurs sources d'émissions sont identifiées¹⁵ :

- lors de la combustion du carburant (en circulation), en phase de fonctionnement ;
- lors de la production du carburant (extraction, transport, raffinage) ou de l'électricité (centrales électriques), en phase amont ;
- lors de la production de la batterie pour le cas des véhicules équipés.

On suppose que le contenu CO₂ de l'électricité est de 53 gCO₂/kWh¹⁶ en 2020 et qu'il évolue linéairement vers 25 g CO₂/kWh¹⁷ en 2030 et qu'il est stable ensuite, au-delà de 2030.

¹⁵ Arrêté du 10 avril 2012 pris pour l'application des articles 5, 6 et 8 du décret n°2011-1336 du 24 octobre 2011 relatif à l'information sur la quantité de dioxyde de carbone émise à l'occasion d'une prestation de transport. Valeurs prises correspondant au carburant « à la pompe », tenant compte de l'intégration de 6 % de biocarburant.

¹⁶ Décret n°2011-1336 du 24 octobre 2011 relatif à l'information sur la quantité de dioxyde de carbone émise à l'occasion d'une prestation de transport

¹⁷ Contenu CO₂ de l'électricité en 2030 dans le cadre du scénario RTE « croissance forte », Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France (RTE), 2015

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Tableau 7 – Contenu CO₂ des énergies

Emissions de CO ₂	Valeur
Contenu CO ₂ production de la batterie (kgCO ₂ /kg de batterie)	12,6
Contenu CO ₂ de l'électricité (gCO ₂ /kWh)	53
Contenu CO ₂ du gazole - phase production (kgCO ₂ /L)	0,58
Contenu CO ₂ du gazole - phase combustion (kgCO ₂ /L)	2,49
Contenu CO ₂ de l'essence - phase production (kgCO ₂ /L)	0,47
Contenu CO ₂ de l'essence - phase combustion (kgCO ₂ /L)	2,24

Sources : arrêté du 10 avril 2012 ; base carbone Ademe

Les hypothèses relatives aux émissions dues à la production de batteries sont issues des données de l'Ademe¹⁸ :

Tableau 8 - Caractéristiques des batteries et émissions de CO₂

Production de CO ₂ production (en kg)	3 000
Poids batterie (en kg)	238
Energie batterie (en kWh)	24
Contenu énergétique (en Wh/kg)	125
Emissions de CO ₂ production (en g par kg de batterie)	12,6

Sources : Ademe ; CGDD

Concernant la production de la batterie qui est une phase très consommatrice d'électricité, le facteur d'émission est donné pour un mix électrique correspondant au mix français¹⁹. Selon l'Ademe, l'évolution des bouquets nationaux à l'horizon 2020 ne change pas les conclusions. On conserve cette hypothèse pour l'horizon 2030.

Pour le véhicule hybride rechargeable, la batterie étant d'une masse trois fois inférieure à celle du véhicule électrique, on supposera les émissions de polluants pour la production de batterie des VEHR égales à un tiers de celles du tout électrique.

Le prix du CO₂ est donné dans la partie « fiscalité » et correspond à la valeur tutélaire préconisée par le rapport Quinet et est par ailleurs celui prévu par la loi TECV.

¹⁸ Élaboration selon les principes ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020 (ADEME), novembre 2013.

¹⁹ En l'absence d'informations précises sur la provenance des batteries pour les différents constructeurs, on suppose les batteries produites en France, ce qui est le cas pour certains modèles français.

Hypothèses concernant la valeur de la pollution

Pollution liée à la circulation

Les valeurs sont déduites du rapport CGSP sur les externalités environnementales pour la norme euro 6 qui donne des valeurs différenciées en fonction du milieu. Elles sont exprimées ici en euros 2015 (€2015). Le rapport préconise de les faire évoluer comme le PIB/tête (croissance supposée ici de 1,3 %/an conformément aux hypothèses de la Commission Européenne fournies pour le cadrage macroéconomique des projections d'émission à long terme).

Les coûts affichés par le rapport Quinet ne concernent que les pollutions liées à la combustion. En particulier les émissions de particules liées à l'usure (abrasion et freinage) ne sont pas prises en compte. Toutefois, s'agissant ici d'effectuer une comparaison entre un véhicule à faibles émissions (électrique ou hybride) et un véhicule thermique classique, ce point n'est pas pénalisant si les émissions liées à l'usure sont supposées identiques pour les véhicules thermiques et pour les véhicules à faibles émissions. En conséquence, on ne tient pas compte des coûts liés à l'usure des véhicules pour calculer le bilan.

Pour le calcul du cas « usage mixte », une moyenne pondérée est effectuée, basée sur les parts de trafic mentionnées précédemment.

Concernant « l'affaire Volkswagen » qui a reconnu en septembre 2015 avoir installé sur des véhicules diesel un logiciel destiné à tromper les tests d'homologation, en réduisant temporairement les émissions polluantes, l'impact sur les résultats d'une hausse substantielle d'émissions pour le véhicule diesel est nul car le véhicule thermique de référence en milieu urbain est un véhicule essence. Dans le cas d'usage mixte, les populations sont moins exposées aux nuisances, ce qui génère un coût monétaire qui ne change pas les conclusions en raison d'une grande part de trajets interurbains. De plus, l'impact du moteur diesel sur le plan de pollution atmosphérique est moins important en raison d'un meilleur rendement du moteur en rase campagne et milieu urbain diffus.

On ne suppose pas d'évolution au-delà de la norme Euro 6.

Tableaux 9 et 10 - Coûts associés aux pollutions liées à la combustion (en circulation)

En 2020

Cas moyen	Usage mixte
Coût essence c€/km	0,26
Coût gazole c€/km	0,25
Coût VE c€/km	0
Cas dense	Urbain dense
Coût essence c€/km	0,33
Coût gazole c€/km	0,34
Coût VE c€/km	0
Cas très dense	Urbain très dense
Coût essence c€/km	1,04
Coût gazole c€/km	1,25
Coût VE c€/km	0

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

En 2030

Cas moyen	Usage mixte
Coût essence c€/km	0,31
Coût gazole c€/km	0,3
Coût VE c€/km	0
Cas dense	Urbain dense
Coût essence c€/km	0,39
Coût gazole c€/km	0,41
Coût VE c€/km	0
Cas très dense	Urbain très dense
Coût essence c€/km	1,23
Coût gazole c€/km	1,49
Coût VE c€/km	0

Source : Évaluation socio-économique des investissements publics, E. Quinet, CGSP, sept. 2013

Pollution amont

La pollution liée à la production des véhicules n'est pas prise en compte, car elle est quasi identique, quelle que soit la motorisation.

Concernant la production des carburants et de l'électricité, on multiplie les facteurs d'émission par la valeur tutélaire des polluants.

Tableau 11 - Facteurs d'émission pour la pollution atmosphérique amont, par source d'énergie (en g/km)

Polluants	Electricité	Essence	Diesel
Nox	0,02	0,05	0,04
SO2	0,02	0,08	0,06
PM	0	0	0

Source : Ademe, Élaboration selon les principes ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020, novembre 2013

Tableau 12 - Valeurs tutélaires (en €2015/tonne)

Nox	11 858
SO2	11 088
PM	220 990

Source : calcul CGDD à partir des valeurs « Quinet » CGSP 2013 actualisées en €2015.

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Pour les particules, la valeur choisie correspond au milieu urbain diffus, considérant que les sites industriels sont situés majoritairement en zones péri-urbaines. Concernant les autres polluants (non locaux), la valeur est identique dans toutes les zones.

La pollution liée à la phase amont des carburants et de l'électricité a été monétarisée en €2015 pour les différents types de motorisation. Cette valeur monétaire évolue dans le temps comme cela a été précisé supra.

Tableaux 13 - Coûts de la pollution amont associée à chaque carburant (en c€2015/km)

En 2020

VE

Polluants	Electricité
Nox	0,03
SO ₂	0,02
PM	0,00
Total	0,05

VP Essence

Polluants	Essence
Nox	0,06
SO ₂	0,09
PM	0,00
Total	0,16

VP Diesel

Polluants	Diesel
Nox	0,05
SO ₂	0,07
PM	0,00
Total	0,12

En 2030

VE

Polluants	Electricité
Nox	0,03
SO ₂	0,03
PM	0,00
Total	0,05

VP Essence

Polluants	Essence
Nox	0,07
SO ₂	0,11
PM	0,00
Total	0,18

VP Diesel

Polluants	Diesel
Nox	0,06
SO ₂	0,08
PM	0,00
Total	0,14

Source : calculs CGDD à partir des valeurs « Quinet » CGSP 2013

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Pollution associée à la production de la batterie

De même, à partir de l'analyse ACV de l'Ademe les émissions liées à la production de la batterie ont été monétarisées.

Tableau 14 - Coûts externes de la pollution associée à la production d'une batterie de 24 kWh produite par une usine supposée située en milieu urbain diffus (en €)

En 2020

Batterie VE	émissions (en g)	valeur tutélaire (€/t)	coût externe (en €)
Nox	7 500	12 629	95
SO2	16 500	11 809	195
PM	1 500	235 354	353
Total			643

En 2030

Batterie VE	émissions (en g)	valeur tutélaire (€/t)	coût externe (en €)
Nox	7 500	14 111	106
SO2	16 500	13 195	218
PM	1 500	262 978	394
Total			718

Source : calculs CGDD à partir des valeurs « Quinet » CGSP 2013.

NB : concernant les particules fines (PM), l'usine de production de la batterie étant supposée située en milieu urbain diffus, la valeur tutélaire correspondante est utilisée (en effet, pour rappel les valeurs tutélaires pour les PM varient en fonction des milieux).

Hypothèses concernant la valeur de la pollution sonore

Les valeurs sont tirées du Handbook (*Handbook of External Costs of Transport, update 2014*) produit par la Commission européenne sur les externalités environnementales. Elles sont différenciées en fonction de la zone géographique.

Tableau 15 - Coûts de la pollution sonore en fonction des milieux, du trafic et des périodes

Période	Trafic	Urbain	Suburbain	Rural
Jour	dense	8,8	0,5	0,1
	peu dense	21,4	1,4	0,2
Nuit	dense	16,1	0,9	0,1
	peu dense	38,9	2,5	0,4

Source : *Handbook of External Costs of Transport, update 2014* (en €2010/1000 VL)

Il convient de remarquer que les valeurs tirées du Handbook correspondent à des coûts marginaux, c'est-à-dire correspondant à des situations de changements de trafic mineurs. Pour des horizons lointains tels que 2030, on pourrait questionner ce choix, à tout le moins pour les zones urbaines denses et très denses. En effet on peut s'attendre à ce que les différents leviers instaurés par la loi (obligation d'achat de véhicules très faiblement émetteurs pour les bus, taxis, VTC ; possibilité pour les maires de créer des zones à circulation restreinte ; et toutes les mesures favorisant l'installation de bornes électriques) vont permettre de réduire drastiquement la circulation des véhicules bruyants dans les centres-villes. En conséquence, il pourrait être pertinent d'utiliser non pas des valeurs marginales, mais des valeurs moyennes, sensiblement plus élevées. Toutefois, le Handbook ne dispose pas, dans sa version actuelle, de valeurs moyennes²⁰.

Ces valeurs exprimées en €/1000 km par type de véhicule sont ventilées en fonction de 3 zones de densité urbaine (dense, urbain diffus, rural), en fonction de l'intensité du trafic (dense, fluide) et de la période (jour, nuit).

Il sera considéré ici que la valeur donnée par le Handbook en milieu urbain correspond à la zone « urbaine très dense ». Cette valeur est divisée par 3 pour passer à celle de la zone dense (car la densité de population est elle-même divisée par 3) ; puis encore par 3 pour passer à la zone urbaine (même raison).

En s'appuyant sur les données de MODEV relatives à la répartition du trafic par milieu et en utilisant les données de répartition du trafic routier jour / nuit par type de réseau²¹ nous avons affecté les circulations de la manière suivante :

Tableau 16 – Répartition du trafic routier en fonction de la période, de la circulation en milieu urbain très dense

Période	Circulation / Milieux	Urbain très dense
Nuit	Dense	2 %
	Fluide	13 %
Jour	Dense	11 %
	Fluide	74 %

Sources : CGDD, CCTN 2011 tome 2 et données MODEV 2015

Concernant les véhicules électriques, il est considéré que pour une vitesse de 30 km/h (cas urbain très dense), la nuisance sonore est nulle²². Pour des vitesses allant de 40 à 50 km/h, on considère que la nuisance sonore correspond à la moitié de celle d'un véhicule thermique classique.

²⁰ Cette suggestion pourrait s'appliquer à la pollution de l'air en zones urbaines, mais de façon plus nuancée, car la pollution locale n'est pas due uniquement à la voiture, elle émane également du chauffage notamment (cf. introduction).

²¹ Cf. Les comptes des transports en 2011 (CCTN 2011) – tome 2 – Dossier « Les externalités des différents modes de transports : identification et évaluation » - Tableau 23 p. 32 – CGDD mars 2013

²² Ce très faible niveau sonore peut être facteur d'accident en réduisant le niveau de signalisation des véhicules électriques.

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Tableaux 17 - Coût de la pollution sonore (c€/km)

En 2020

Pollution du véhicule en circulation (en c€ / km)	VP (Euro 6)
Cas moyen	Interurbain
Coût essence	0,3
Coût gazole	0,3
Coût VE	0,07
Cas dense	Urbain dense
Coût essence	0,54
Coût gazole	0,54
Coût VE	0,27
Cas très dense	Urbain très dense
Coût essence	1,61
Coût gazole	1,61
Coût VE	0

En 2030

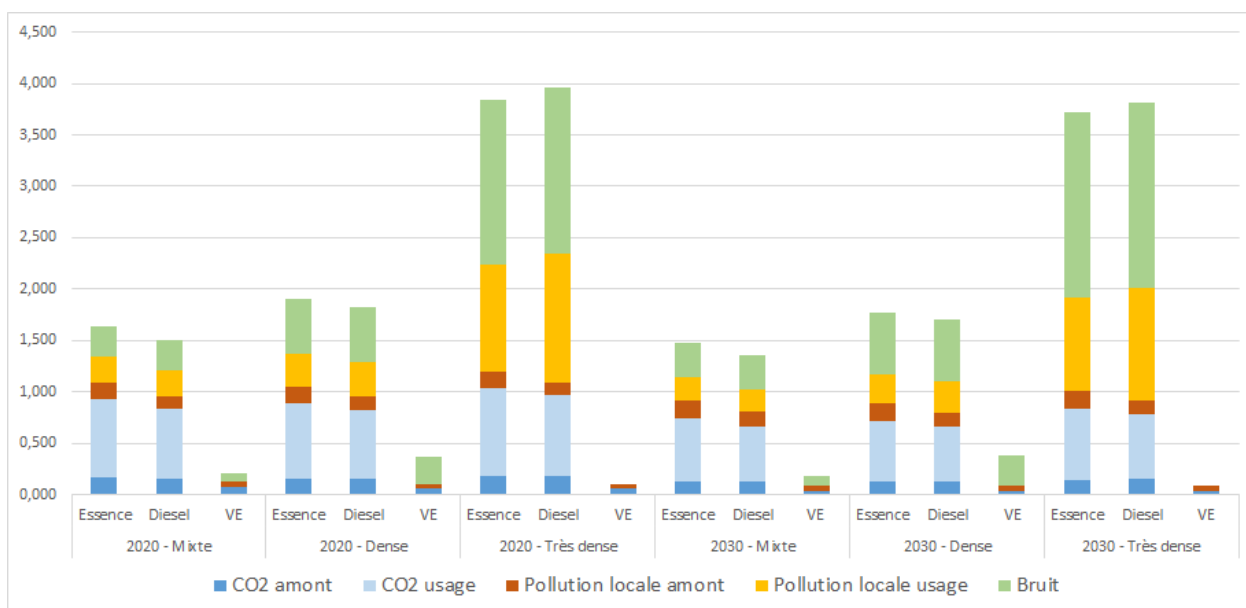
Pollution du véhicule en circulation (en c€ / km)	VP (Euro 6)
Cas moyen	Interurbain
Coût essence	0,33
Coût gazole	0,33
Coût VE	0,07
Cas dense	Urbain dense
Coût essence	0,6
Coût gazole	0,6
Coût VE	0,3
Cas très dense	Urbain très dense
Coût essence	1,79
Coût gazole	1,79
Coût VE	0

Source : Calcul CGDD à partir des valeurs du Handbook 2014

Le graphique suivant illustre de manière synthétique le poids des différentes externalités émises lors de la circulation des véhicules (dont les externalités émises lors de la production de l'énergie utilisée).

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Graphique 1 – Externalités des VT / VE selon les milieux et l'énergie utilisée : synthèse (c€2015/km)



Source : Calcul CGDD

HYPOTHÈSES SUR LES PRIX ET COÛTS D'ACHAT ET D'USAGE

Prix d'achat des véhicules

Le premier principe qui a guidé la fixation des prix (pour un segment considéré) est le suivant :

$$\text{Prix}_{\text{VEHR}} \geq \text{prix}_{\text{VH}} \geq \text{prix}_{\text{VE}} \geq \text{prix}_{\text{VT}}$$

Les prix des véhicules sont estimés TTC²³ et incluent la carrosserie et la motorisation. Ils n'intègrent pas le coût d'achat de la batterie.

Le VE est de conception simple alors que le véhicule thermique est un peu plus complexe. Le véhicule hybride, quant à lui, cumule les complexités des deux véhicules précédents. En s'inspirant des hypothèses de la thèse d'Elisabeth Windisch²⁴ on suppose ici, pour 2015 :

- un surcoût pour le véhicule électrique par rapport au véhicule essence équivalent de l'ordre de 25 % ;
- un surcoût de 40 % pour le véhicule hybride par rapport au véhicule thermique correspondant ;
- un surcoût de + 10 000 € pour le véhicule hybride rechargeable par rapport au véhicule thermique correspondant.

²³ Les prix HT sont utilisés pour réaliser le bilan socio-économique.

²⁴ *Driving electric? A financial assessment of electric vehicle policies in France (Elisabeth Windisch), 2013.*

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

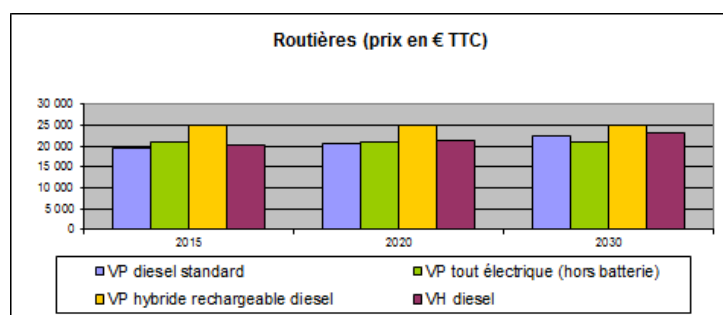
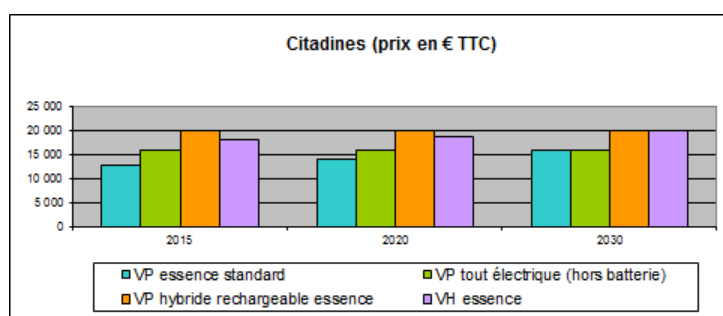
En raison d'objectifs d'émission plus ambitieux, on fait l'hypothèse que les coûts de production augmenteront pour les véhicules thermiques de :

- + 1 000 € entre 2015 et 2020²⁵ ;
- + 2 000 € entre 2020 et 2030²⁶.

Les véhicules hybrides en revanche voient leur coût augmenter comme les véhicules thermiques sauf pour les VH essence dont les prix augmentent dans des proportions moindres (+ 500 € entre 2015 et 2020 et +1 300 € entre 2020 et 2030). On suppose que les véhicules hybrides seront essentiellement à essence ce qui permet de générer des économies d'échelle pour les produire. Enfin pour l'hybride rechargeable, on suppose un coût constant.

Tableau 18 et graphiques 2 & 3 - Coûts des véhicules en fonction de la motorisation (hors batterie), en €2015

Citadines				Routières			
Technologies	2015	2020	2030	Technologies	2015	2020	2030
VP essence standard	13 000	14 000	16 000	VP diesel standard	19 500	20 500	22 500
VP tout électrique (hors batterie)	16 000	16 000	16 000	VP tout électrique (hors batterie)	21 000	21 000	21 000
VH essence	18 200	18 700	20 000	VH diesel	20 300	21 300	23 300
VP hybride rechargeable essence	20 000	20 000	20 000	VP hybride rechargeable essence	25 000	25 000	25 000



Source : CGDD

Hypothèses concernant les prix de batterie

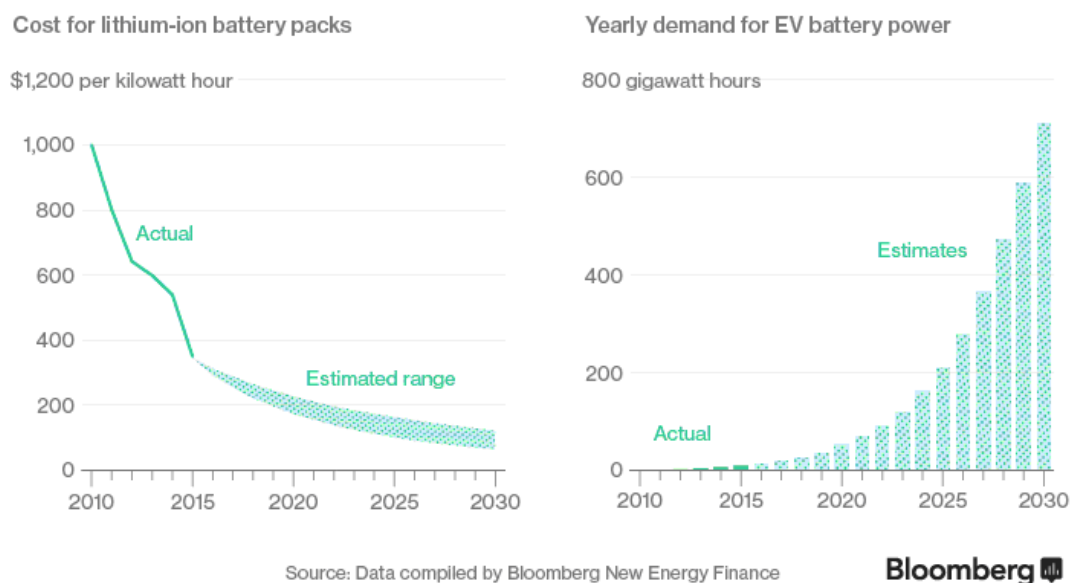
²⁵ Voir <http://www.fticonsulting.com/~media/Files/us-files/intelligence/intelligence-research/regulation-and-competitiveness.pdf>. Le coût de la réglementation est estimé entre 1 000 et 2 000 € entre 2010 et 2020.

²⁶ Interview de Carlos Ghosn qui affirme que le surcoût pour passer d'une émission de 95 gCO₂/km à 68 gCO₂/km est estimé à 4 000 €. On estime que 50 % de ce surcoût sera absorbé par les constructeurs.

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Si la thèse d'E. Windisch prend pour hypothèse des coûts de stockage de 450 €/kWh pour 2015, il semblerait que les coûts de stockage aient diminué et seraient en 2015 de 320 €/kWh. Tesla et Panasonic tableraient sur 200 \$/kWh en 2020. Par ailleurs une étude Bloomberg New Energy Finance (BNEF) publiée en 2016 estime le prix de la batterie en 2030 à moins de 120 \$/kWh. Enfin, Tesla a annoncé récemment des coûts de 100 €/kWh en 2020. On estime ici qu'ils seront de 200 €/kWh en 2020 puis de 100 €/kWh en 2030 (HTVA).

Graphique 4 – Evolution des coûts de la batterie et de la demande d'énergie associée



Source : *It's all about the batteries* (Bloomberg New Energy Finance), 2016

Étant donné les kilométrages effectués par les véhicules sur leur durée de vie, on supposera que la batterie est renouvelée une fois à mi-vie (7 à 8 ans pour un usage standard du véhicule et 2 ans pour un usage intensif, de type taxi ou VTC).

Hypothèses concernant les infrastructures de recharge

À partir des données collectées sur le site www.breezcar.com, on émet l'hypothèse que la durée de vie d'une borne est de 20 ans.

En 2015, le prix d'une borne simple est de 600 € et celui d'une place de parking équipée de 2 000 €. On prend l'hypothèse que pour chaque véhicule, ces deux installations sont requises (typiquement : la première sur le lieu de travail, la seconde au domicile). Le coût de 2 600 € peut aussi s'interpréter comme un coût moyen d'installation des différents types de bornes (y compris

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

à charge rapide). Ces hypothèses sont cohérentes avec celles prises dans une étude précédente du CGDD (*Études et documents, Les véhicules électriques en perspective, mai 2011*).

Hypothèses concernant les coûts d'entretien et d'assurance

Les différents coûts d'usage sont définis à partir de la thèse d'E. Windisch. On suppose que les coûts d'entretien (ou de maintenance) et d'assurance varient en fonction des motorisations.

Tableau 19 - Coûts d'entretien (en c€2015/km) et d'assurance (en €2015/an)

Technologie	Coût d'assurance (TTC)	Coût d'entretien (TTC)
VP essence standard	500	5,25
VP diesel standard	500	5,25
VP tout électrique (hors batterie)	400	4,73
VP hybride essence	600	6,3
VP hybride diesel	600	6,3
VP hybride rechargeable essence	600	6,3
VP hybride rechargeable diesel	600	6,3

Source : CGDD et thèse d'Elisabeth Windisch (2013)

Il est supposé que les véhicules tout électriques coûtent un peu moins cher en entretien et assurance. Au contraire, les véhicules hybrides, plus complexes, sont plus onéreux.

Dans le cas d'usage urbain intensif qui concerne les taxis et les véhicules de tourisme avec chauffeur (VTC), le professionnel doit disposer soit d'une « assurance responsabilité civile professionnelle » pour le taxi ou d'une « assurance véhicule » pour le VTC. Elle prévoit donc une indemnisation illimitée à la victime en cas d'accident de la circulation. Une assurance pour les professionnels est en moyenne 3 fois plus chère qu'une assurance classique, hypothèse qui est retenue dans cette étude.

Prix de l'énergie de traction

Le prix de l'électricité est celui payé par les sites < 36 kVA, correspondant aux particuliers et à certains commerces. Il est supposé augmenter de 20 % d'ici 2030 en euros constants. On suppose que la TICFE (qui a remplacé la CSPE) demeure plafonnée à son niveau actuel de 22,5 €/MWh.

À noter que pour l'approche socio-économique, le « vrai coût » de l'électricité doit être utilisé. En particulier le financement des énergies renouvelables par des subventions doit être pris en compte. Avant la mise en place de la TICFE, la CSPE était l'outil de financement des EnR. On suppose pour l'analyse socio-économique seulement (pas pour la vision acteur) que la CSPE « virtuelle » augmente à 50 €/MWh en 2025 puis se stabilise (toujours en euros 2015).

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Tableau 20 - Évolution de la Contribution au service public de l'électricité (CSPE) entre 2020 et 2030 (en €2015/MWh)

2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
35	38	41	44	47	50	50	50	50	50	50

Tableau 21 - Prix des carburants HTT en €2015/L

Prix carburants	2020	2030	2050
Essence	0,63	1,10	1,42
Gazole	0,62	1,07	1,38

Source : Calcul CGDD à partir du scénario *current policy* de l'AIE pour le pétrole. *World Energy Outlook*, 2015.

Les trajectoires de prix des carburants sont construites en partant des prix moyens observés de 2015, puis en appliquant un taux de croissance annuel correspondant à celui du scénario *current policies* du *World Energy Outlook* de l'AIE pour le pétrole (baril à 50 \$ en 2015, 130 \$ en 2030 et 150 \$ en 2050).

Hypothèses concernant la fiscalité

Les taxes sur les carburants liquides (TICPE en l'occurrence) sont impactées par l'évolution du prix du carbone à travers la contribution climat énergie (« composante carbone »). On distinguera donc pour la TICPE la composante carbone d'une base hors composante carbone. Cette base est supposée converger entre essence et gazole à l'horizon 2020.

Tableau 22 - Évolution des taxes sur l'énergie en fonction du prix du CO₂ (en €2015)

	2020	2030	après 2030
Prix du CO₂ pour la composante carbone de la TICPE			
€ 2015/tCO ₂	56	100	Croit comme le taux d'actualisation (4,5 %/an)
Taxes sur l'électricité hors TVA (c€/kWh)			
TCFE	1	Constant	Constant
TICFE	2,25	2,25	Constant
CTA	0,25	Constant	Constant
Taxes sur l'essence hors TVA (c€/L)			
Composante carbone calée sur émissions phase combustion	14	23	Constant
TICPE essence hors composante carbone	53	Constant	Constant
Taxes sur le gazole hors TVA (c€/L)			
Composante carbone calée sur émissions phase combustion	12,5	27	Constant
TICPE gazole hors composante carbone	53	Constant	Constant

Source : CGDD

Partie 2

Résultats de l'analyse coûts bénéfices

L'analyse coûts bénéfices montre que le véhicule électrique est rentable sur le plan socio-économique dès 2020 en milieu très dense. En 2030, toutes les technologies deviennent rentables en zone très dense avec un usage intensif. En usage mixte, comprenant des trajets interurbains, le véhicule thermique reste la meilleure technologie.

Pour l'utilisateur, le véhicule électrique est une option financièrement intéressante dès 2020 en milieux urbains, et seulement en 2030 pour un usage mixte. Les autres technologies ne sont rentables financièrement qu'en usage urbain intensif en 2030.



Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

SYNTHÈSE DES BILANS MOTORISATIONS ALTERNATIVES VS VÉHICULES THERMIQUES

Bilans socio-économiques

	2020		2030	
Cas urbain	Très dense	Dense	Très dense	Dense
Cas urbain intensif	Très dense	Dense	Très dense	Dense
Cas mixte				

Source : calcul CGDD

Bilans pour l'utilisateur

	2020		2030	
Cas urbain	Très dense	Dense	Très dense	Dense
Cas urbain intensif	Très dense	Dense	Très dense	Dense
Cas mixte				

Source : calcul CGDD

Légende :

Tous les bilans positifs pour les technologies alternatives	
Bilans positifs pour le seul VE	
Tous les bilans négatifs pour les technologies alternatives	

Un gain environnemental très inégal en fonction des milieux et la nécessité de « rentabiliser » le coût environnemental de la production de la batterie

Les véhicules thermiques entraînent à l'usage un coût environnemental de l'ordre de 1,5 c€/km pour un véhicule diesel en usage « mixte », 2 c€/km pour un véhicule essence en usage urbain dense et 4 c€/km pour un usage urbain très dense. La motorisation tout électrique permet de réduire sensiblement ces coûts : suppression des émissions de polluants locaux en circulation liés à la combustion, moindre bruit (nul en milieu urbain très dense), et très faibles émissions de CO₂ (liées uniquement à la phase production d'électricité qui sont faibles compte tenu du mix électrique français). Le coût environnemental est ainsi ramené pour le VE à 0,2 c€/km en usage « mixte », 0,4 c€/km en usage urbain dense et à 0,1 c€/km en usage urbain très dense.

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfiques

Le gain à l'usage de la motorisation électrique est un peu réduit par le coût environnemental de production de la batterie. Lors de la production de la batterie, environ 3 tonnes de CO₂ sont émises. Sachant que deux batteries sont utilisées sur la durée de vie des véhicules, cela représente 6 tonnes de CO₂, à comparer aux 38 tonnes de CO₂ émis par un véhicule essence pour un usage urbain très dense. Dans le cas d'une berline avec une plus grande autonomie, le bilan environnemental se dégrade en raison de la taille de la batterie qui augmente.

Au final, en analyse ACV, il apparaît que le gain de CO₂ est positif, avec un mix énergétique favorable lié à la part importante d'électricité non carbonée du mix français.

De même, la pollution locale engendrée lors de la production de la batterie représente un coût d'environ 1 400 € (700 €/batterie). Ce coût est à mettre en regard du gain environnemental à l'usage réalisé sur la durée de vie du véhicule. Le bilan est nul en usage mixte. Il demeure positif pour les usages urbains en milieu dense, très positif pour l'urbain très dense.

Seuil d'indifférence du contenu CO₂ de l'électricité en termes de choix entre le véhicule électrique et le véhicule thermique.

Dans le cas de la zone dense en 2020, il s'agit de comparer une citadine électrique équipée d'une batterie consommant 18 kWh/100 km à un véhicule essence dont la consommation en milieu urbain dense est en moyenne de 6,84 L/100 km (cf. hypothèses de consommation). On fait l'hypothèse qu'en usage standard le véhicule parcourt 13 000 km/an, soit 208 000 km pendant sa durée de vie qui est de 16 ans. Au total, le véhicule thermique émet pendant sa durée d'utilisation 38,5 t de CO₂ (émissions amont et à la combustion). La production de la batterie émet 6 t CO₂. Pour qu'un véhicule électrique obtienne un bilan équivalent, le contenu CO₂ de l'électricité doit être de 864 gCO₂/kWh. Toute valeur en dessous de ce seuil permet donc au VE d'obtenir un bilan meilleur que le véhicule thermique. Ce seuil évolue à la baisse du fait de l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules thermiques. Pour rappel il est supposé que les émissions de CO₂ liées à la production de la batterie n'évoluent pas dans le temps, ainsi que la consommation des VE.

Tableau 23 - Seuil d'indifférence écologique entre les technologies électriques et thermiques en fonction du contenu CO₂ de l'électricité (en g CO₂/kWh),

Cas	Véhicule	Kilométrage	2020	2030
Très dense	Citadine	208 000	864	659
Dense	Citadine	208 000	712	538
Mixte	Berline	256 000	249	190

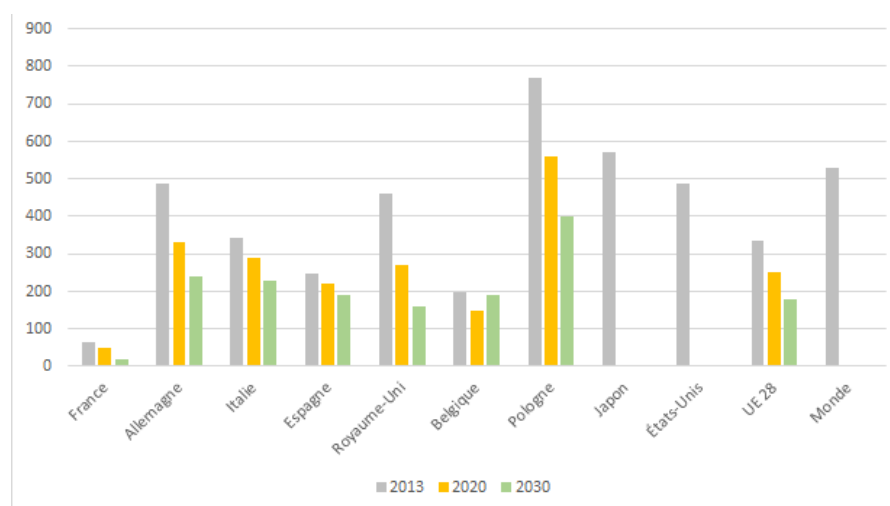
.../...

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

.../...

À titre d'exemple, d'après l'Agence internationale pour l'énergie²⁷ (AIE), le contenu CO₂ moyen en France de l'électricité en 2013 est de 64 g de CO₂ /kWh alors qu'il est de 486 g en Allemagne.

Contenu CO₂ de l'électricité (en gCO₂ / kWh)



Source : Données AIE 2015 et « EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050 – référence scenario 2013 »

En 2020, le seuil avec batterie serait de 249 gCO₂/kWh en zone mixte là où le véhicule diesel est le plus performant. En usage mixte, le VE serait moins performant que le véhicule thermique en matière de CO₂, en Allemagne (330 g), au Royaume-Uni (270 g), en Italie (290 g) ou en Pologne (560 g). L'émission moyenne de 250 g en 2020 de l'UE28 correspond au seuil d'indifférence pour le milieu mixte. En 2020, le VE serait cependant plus performant que le véhicule thermique dans toutes les zones urbaines quel que soit le pays de l'UE.

Entre 2020 et 2030 les seuils diminuent de près de 25 % compte tenu des progrès supposés sur la consommation des véhicules thermiques. En 2030, en usage mixte, le VE ne serait toujours pas performant dans des pays comme l'Allemagne (240 g), l'Italie (230 g) ou la Pologne (400 g). En revanche, en milieu urbain le VE devient plus performant que le véhicule thermique sur le plan du CO₂ dans tous les pays européens.

²⁷ CO₂ emissions from fuel combustion (IEA), 2015

L'usage en zone urbaine constitue le domaine de pertinence économique des véhicules électriques

En zones urbaines, les consommations des véhicules thermiques sont élevées (mauvais rendement moteur²⁸) et les nuisances environnementales associées sont maximales. Le véhicule électrique, dont le rendement du moteur ne dépend que très peu des conditions d'utilisation et dont les externalités sont quasi nulles, y trouve son domaine de pertinence.

Si le VE est pénalisé par le coût d'achat du véhicule, de la batterie et de l'infrastructure de recharge associée, ses faibles coûts d'usage (consommation et entretien) font qu'il est déjà rentable financièrement pour l'utilisateur en zone urbaine dès 2020. Sur le plan socio-économique sa pertinence est restreinte à cet horizon aux zones urbaines très denses, dans lesquelles la valeur des nuisances évitées est maximale. Comme les prix d'achat des véhicules thermiques et électriques (hors batterie) convergent à l'horizon 2030, les bilans socio-économiques et TCO s'améliorent au fil du temps pour devenir positifs à la fois en zone dense et très dense en 2030. Ainsi, en ce qui concerne le bilan socio-économique en zone dense, le VE passe, entre 2020 et 2030, d'un surcoût supérieur à 4 000 € à une situation d'équilibre (gain d'environ 300 €) sur la durée de vie du véhicule. En zone très dense, le gain en 2020 est d'environ 700 € et croît pour dépasser 5 000 € en 2030.

Les autres technologies (VEHR, VH) présentent à la fois des gains (sur le plan de la consommation d'énergie et des externalités environnementales) et des surcoûts d'achats moindre que le VE. Elles présentent en revanche des surcoûts d'entretien dus à la complexité de la bi-motorisation. Il apparaît qu'elles ne sont rentables socio-économiquement et pour l'utilisateur qu'en zone très dense en 2030 et uniquement en usage intensif. En effet, en termes de coût socio-économique, comparé à un véhicule essence, un VH en zone dense en 2020 est loin du point d'équilibre puisqu'il coûte plus de 4 000 € de plus et un VEHR plus de 8 000 €. En zone très dense un VH présente un surcoût de moins de 2 000 € et le VEHR de plus de 3 000 €. En 2030, en revanche, la situation tend à s'équilibrer : en zone dense, le surcoût est d'environ 5 000 € pour le VEHR et de près de 3 500 € pour le VH ; en zone très dense, en 2030, le VEHR présente un bilan positif (gain de plus de 300 €) alors que celui du VH présente un surcoût inférieur à 1 000 €. On constate au fil du temps une amélioration des performances du VEHR par rapport au VH.

Les résultats sont très sensibles au kilométrage annuel du véhicule, supposé de 13 000 km en usage urbain et 16 000 km en usage mixte. Une hypothèse alternative de 8 500 km conduit à un surcoût pour le VE de plusieurs milliers d'euros.

L'intensification de l'usage des véhicules permet d'améliorer les bilans

Ces cas correspondent pleinement aux modèles de type Autolib' avec une activité d'autopartage en trace directe utilisant des véhicules 100 % électriques.

²⁸ 6,8 L / 100km pour l'essence et 5,7 L / 100km pour le diesel en zone très dense soit 11,5 % de plus qu'en usage mixte pour l'essence, et près de 19 % pour le diesel.

L'usage intensif des véhicules, permet aux technologies VE et VEHR d'améliorer leur bilan socio-économique et TCO. Ceci est dû au fait qu'il est supposé que ces véhicules parcourent plus de distance sur leur durée de vie 240 000 au lieu de 208 000 km (soit + 15 %), ce qui accroît mécaniquement les bénéfices sur l'usage : gains de consommation et environnemental. Des économies d'échelles apparaissent en outre sur l'utilisation des infrastructures de recharge qui sont davantage utilisées (le véhicule n'est détenu que 4 ans : l'infrastructure de recharge possède alors une valeur résiduelle plus importante).

Le cas d'usage intensif présente les mêmes conclusions que l'usage standard mais avec des bilans améliorés pour toutes les technologies alternatives. Toutefois, il faut remarquer que le VH et le VEHR en milieu urbain très dense deviennent rentables à la fois pour l'usager et sur le plan socio-économique alors qu'il ne l'était pas en usage standard.

Pour un usage mixte, le véhicule thermique demeure plus avantageux

Dans le cas d'un usage mixte, moyenne pondérée des trafics observés dans tous les milieux traversés, **aucune technologie alternative n'est plus rentable que les véhicules thermiques notamment ceux consommant du diesel**. Ainsi par exemple le surcoût socio-économique pour un VE en 2030 est de 7 000 € (et supérieur pour les autres technologies et/ou pour 2020).

Ce résultat s'explique par le fait que la technologie électrique voit ses avantages compétitifs s'éroder du fait de vitesses plus élevées (hausse des consommations par rapport au milieu urbain) alors qu'au contraire le rendement du moteur des véhicules thermiques est optimal autour de 80 km/h²⁹, et du moindre coût environnemental dans les zones moins peuplées. Ce phénomène est renforcé par une hypothèse de baisse annuelle de plus de 2 % des consommations des véhicules thermiques.

Par ailleurs, pour rendre un service équivalent, le véhicule électrique considéré doit posséder une grosse batterie d'une capacité de 50 kWh correspondant à une autonomie plus importante (200 km). Cela implique davantage d'émissions de polluants et de GES lors de la phase de fabrication.

Pour les émissions de CO₂, l'avantage du VE reste important, mais il est minoré en raison d'une meilleure consommation des véhicules thermiques et de la phase amont de production de la batterie. Concernant la pollution atmosphérique, les impacts sont valorisés en fonction de la densité de la population exposée et la grande part de trajets interurbains limite aussi l'avantage du VE. Le bilan relatif à la pollution atmosphérique du VE en milieu mixte est même négatif face à un véhicule thermique diesel en raison de la phase amont de production des deux batteries utilisées pendant la durée d'utilisation du VE.

Un cas spécifique d'utilisation du VE en usage mixte peut s'envisager. Il s'agit de celui du « deuxième véhicule », plus petit (type citadine) et destiné à des trajets quotidiens plus courts

²⁹ Il en résulte pour le milieu mixte, qu'une berline diesel consomme moins qu'une citadine essence en milieu urbain. Par exemple, en 2020 une berline diesel dans le cas mixte consomme 4,84 L / 100km alors qu'une citadine essence consomme 5,83 L / 100km en milieu dense et 6,84 L / 100km en milieu très dense.

nécessitant une batterie de taille standard. Dans ces conditions, le bilan socio-économique s'améliore mais demeure défavorable.

En revanche du point de vue de l'utilisateur le VE en usage mixte peut s'avérer intéressant financièrement en 2030, comme premier véhicule et de façon plus marquée comme deuxième véhicule. Par rapport au bilan socio-économique, le bilan TCO intègre la fiscalité, ce qui joue ici en faveur du VE.

Les technologies hybrides comme solutions transitoires

Les VEHR et VH ne présentent un bilan positif qu'en zone urbaine très dense en 2030, et seulement en usage intensif.

Par rapport au VE, le VEHR coûte légèrement plus cher à l'achat (du fait de la bi-motorisation) et en dépit d'une batterie de capacité plus faible, coûte également plus cher à entretenir (+ 2 500 €). Une batterie de capacité réduite permet cependant d'optimiser le taux d'utilisation de l'énergie stockée. Elle permet en outre de limiter les impacts environnementaux négatifs liés à la phase de production. En conséquence, les gains environnementaux du VEHR sont globalement comparables à ceux du VE.

Le VH, quant à lui, est comparable au VE à l'achat (la bi-motorisation représente un surcoût du même ordre de grandeur que celui de la batterie). De même, le surcoût pour l'entretien peut être comparé au coût de l'infrastructure de recharge pour le VE. En revanche, les gains à l'usage sont évidemment très limités par rapport à ceux du VE.

Ces technologies peuvent apparaître comme des technologies de transition entre le véhicule thermique et le VE. Elles permettent en effet une souplesse dans leur utilisation équivalente à celle des véhicules thermiques, qui s'assimile à une valeur d'option. Ces motorisations permettent en effet à un particulier de répondre à ses différents besoins de mobilité, qu'ils soient de courte ou longue distance. Un véhicule tout électrique, tant que son autonomie reste limitée, est cantonné au marché des seconds véhicules et à celui des flottes de véhicules partagés tel qu'Autolib. Cette valeur d'option des technologies hybride décroît parallèlement au déploiement des infrastructures de recharges et aux progrès sur la batterie (réduction des coûts et du poids). Concernant les taxis, comme la portée moyenne d'une course d'un taxi parisien n'excède pas 5 km, les technologies hybrides semblent parfaitement adaptées à leurs besoins les plus courants en offrant un bilan positif en zone urbaine très dense en 2030 et le surcoût socio-économique consenti par rapport à un VE est en quelque sorte le prix de la sécurité en matière d'autonomie pour répondre à des demandes de trajets avec des distances supérieures. De plus, les délais de recharge, en l'absence de bornes de recharge rapide, nécessitent une immobilisation du véhicule qui rendrait son utilisation moins intensive, ferait perdre des clients et aurait un impact significatif sur le chiffre d'affaires, notamment pour des taxis roulant en 3 X 8.

ZOOM SUR L'USAGE STANDARD DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE EN ZONE URBAINE

En 2020

Bilan socio-économique en zone dense en 2020

La zone urbaine dense, en raison d'une forte exposition aux externalités des populations concernées, constitue *a priori* une zone privilégiée pour le développement du véhicule électrique. Dans le cadre d'un usage standard en zone urbaine dense avec une citadine, l'analyse socio-économique détaillée, comparant les coûts d'achat, d'usage et les externalités négatives du véhicule thermique à celui du VE, révèle que le VE n'est pas encore compétitif en 2020. Cependant, en 2020, le bilan TCO est positif ce qui le rend rentable pour l'acheteur ou l'utilisateur.

- **Coûts d'achat : + 9 500 € HT**

Si le véhicule thermique est pénalisé par des surcoûts d'achats relatifs à l'atteinte des objectifs liés aux nouvelles normes de pollution de 1 000 € sur la période 2015-2020 et de 2 000 € sur la période 2020-2030, on fait l'hypothèse que le VE a un surcoût d'achat de 25 % en 2015 mais que son prix reste ensuite constant ce qui le rend plus compétitif au fil du temps.

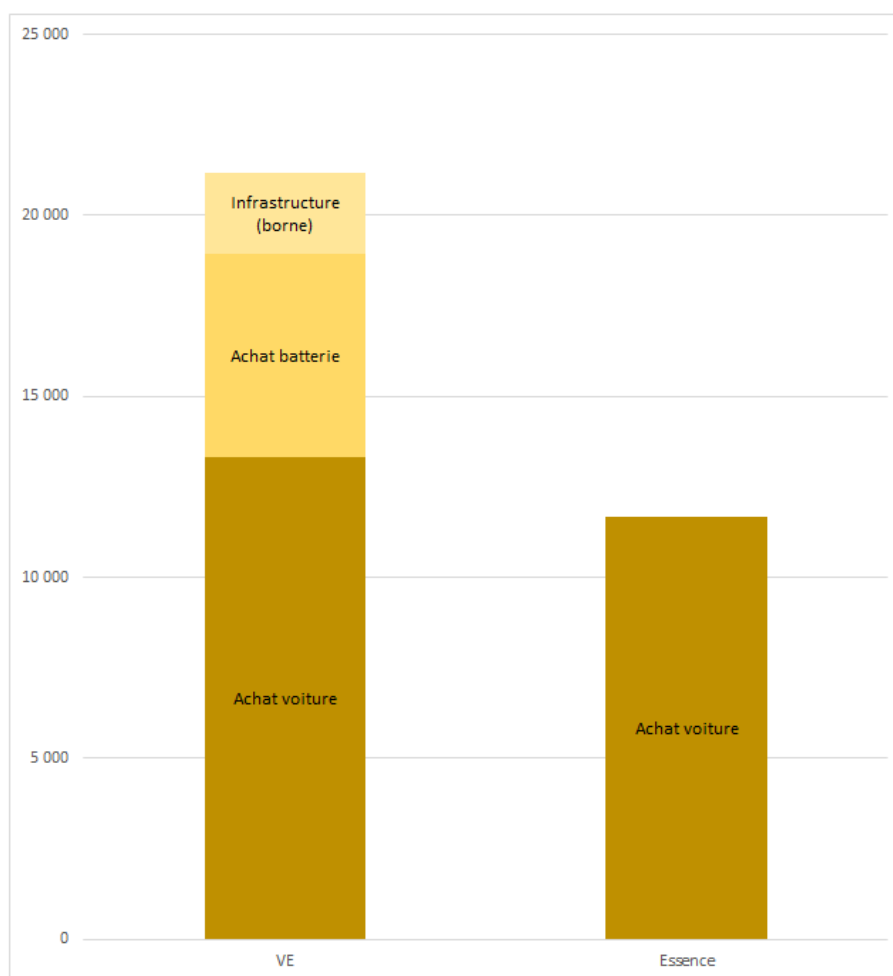
L'écart sur le poste achat entre les deux technologies est essentiellement dû à l'achat de la batterie dont le coût de stockage est de 320 €/kWh en 2015, puis 200 € en 2020 et 100 € après 2030. Si le prix de la batterie diminue au fil du temps, ce poste de coût reste important car on fait l'hypothèse que durée de vie de la batterie est de 7 ans et qu'elle est donc renouvelée une fois pendant la durée de vie du véhicule.

À l'achat, le VE est également pénalisé par un investissement relatif à l'installation de bornes de recharge. On fait l'hypothèse qu'il est nécessaire d'installer une prise à domicile pour un coût de 600 € et d'aménager une place de parking avec borne à destination (travail, études, commerces...) pour un coût de 2 000 €.

Au total à l'achat, la solution VE pâtit d'un surcoût de l'ordre de 9 500 €, qui se décompose en (graphique 5) :

- surcoût du véhicule : + 1 700 €,
- surcoût lié à la batterie : + 5 600 €,
- surcoût lié à la borne : + 2 200 €.

Graphique 5 – Coûts d'achat (en €2015)



Source : calcul CGDD

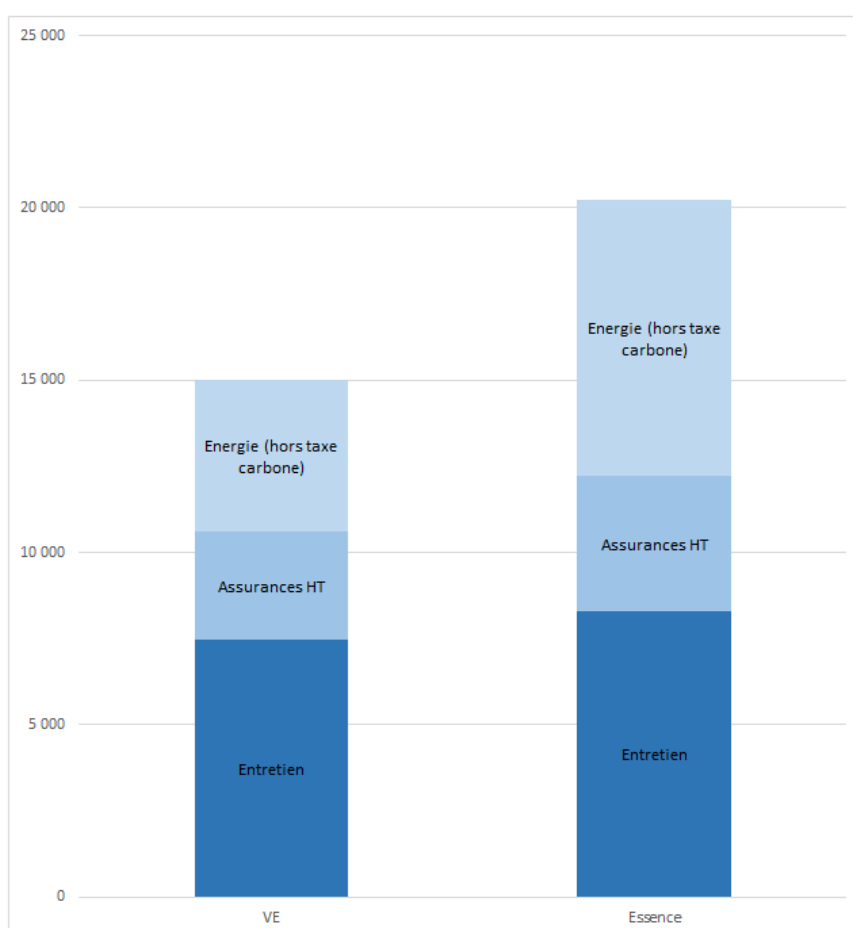
Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

- **Coûts d'usage : - 5 200 € HT**

Dès 2020 les coûts d'usage du VE s'avèrent plus bas que ceux d'un véhicule thermique. Les coûts sont plus bas à la fois en matière d'entretien et d'assurance en raison de la simplicité de la motorisation mais également sur le plan énergétique.

S'agissant d'une analyse socio-économique, les coûts considérés ici sont pris HTT (la TICPE est exclue). Dans ces conditions, il apparaît que le coût de l'énergie est environ deux fois moins élevé pour la solution électrique.

Graphique 6 – Coûts d'usage (en €2015)



Source : calcul CGDD

Le gain est de 5 200 €. Ce gain se décompose en :

- gain lié à l'entretien : - 800 €,
- gain lié à l'assurance : - 800 €,
- gain lié à l'énergie : - 3 600 €.

- **Externalités : -1 500 €**

Pour rappel, sont exclues de la comparaison les externalités associées à la production du véhicule (car supposées identiques dans les deux cas) et celles associées aux particules du fait des frottements et de l'usure des pneus et de la route (idem). À titre indicatif, les émissions de CO₂ associées à la production des composants et l'assemblage d'une voiture sont de l'ordre de 3,5 t de CO₂³⁰. Concernant la pollution atmosphérique, les particules émises du fait de l'abrasion³¹, donc de l'usure des freins, de l'usure des pneus et de la route représentent la grande majorité des émissions (environ 90 %) par rapport à celles émises du fait de la combustion pour un véhicule thermique.

Pour le véhicule thermique, les externalités proviennent pour moitié des émissions de CO₂ liées à la consommation de carburant, pour un quart des polluants atmosphériques et pour un autre quart du bruit. Pour le VE, plus de deux tiers des externalités proviennent de la production des batteries (54 % pour la pollution atmosphérique et 18 % pour les émissions de CO₂). Comme seule la phase de combustion est prise en compte, la pollution liée à l'usage du véhicule apparaît comme nulle.

Le bruit représente environ 20 % des externalités pour le VE car dans ce cas, en zone urbaine dense, on considère qu'une vitesse comprise entre 30 et 50 km est responsable de nuisances sonores 50 % inférieures à celles d'un véhicule thermique.

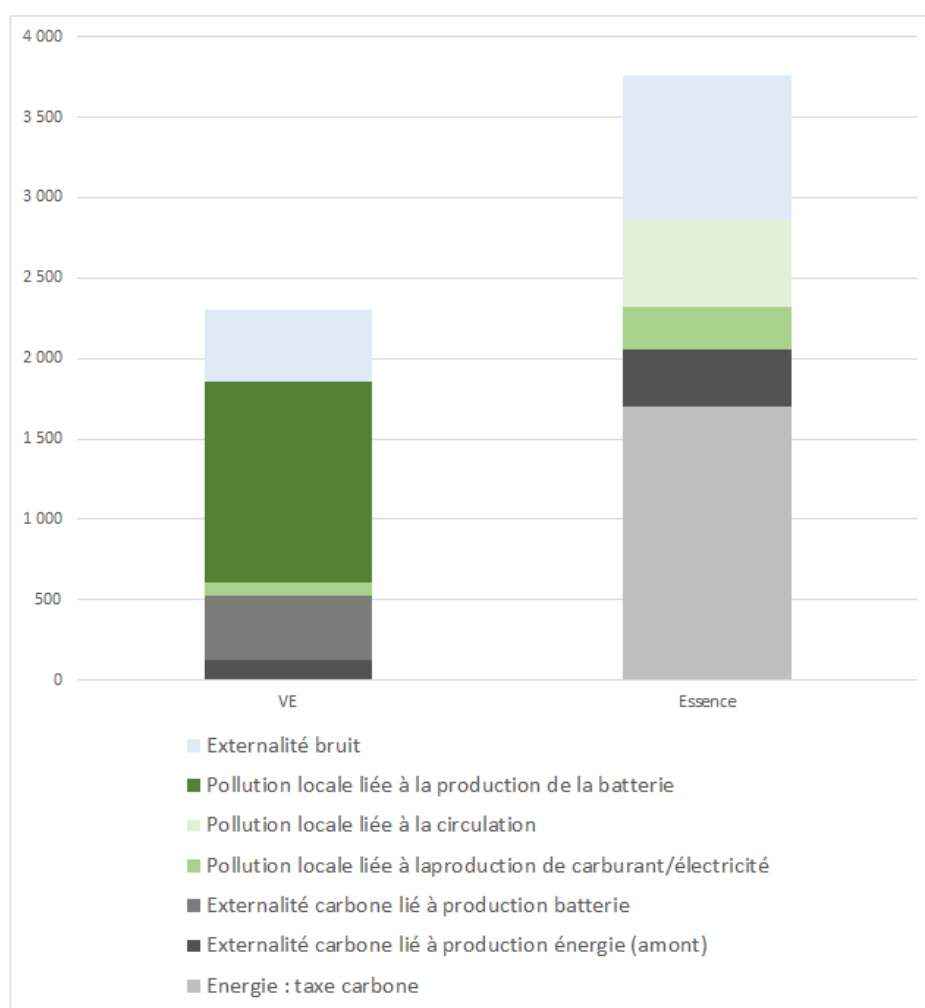
Au final sur la durée de vie d'un véhicule, en comptant l'utilisation de 2 batteries, un VE émet 6 tCO₂ alors qu'un véhicule essence de même gamme sera responsable de l'émission de 38,6 tCO₂.

³⁰ Élaboration selon les principes ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020 (Ademe), novembre 2013

³¹ Calcul à partir des facteurs d'émission

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

Graphique 7 – Coûts des externalités (en €2015)



Source : calcul CGDD

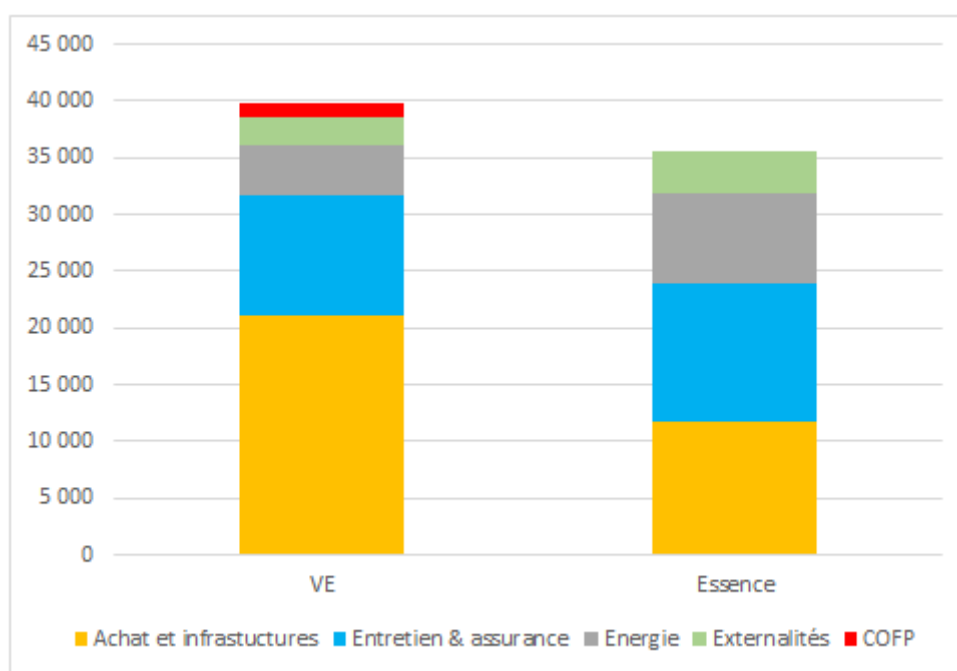
- **Surcoût socio-économique 2020 : + 4 200 €**

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

Outre les éléments décrits précédemment, il faut tenir compte également d'un coût d'opportunité des fonds publics (COFP) de 1 500 € qui correspond à la TICPE non collectée pour un véhicule thermique essence une fois déduit le gain correspondant aux taxes sur l'électricité.

Le bilan socio-économique en 2020 fait apparaître un coût de 39 900 € pour le VE et de 35 700 € pour le véhicule essence de même gamme.

Graphique 8 – Coûts socio-économiques VE vs VT essence (en €2015)



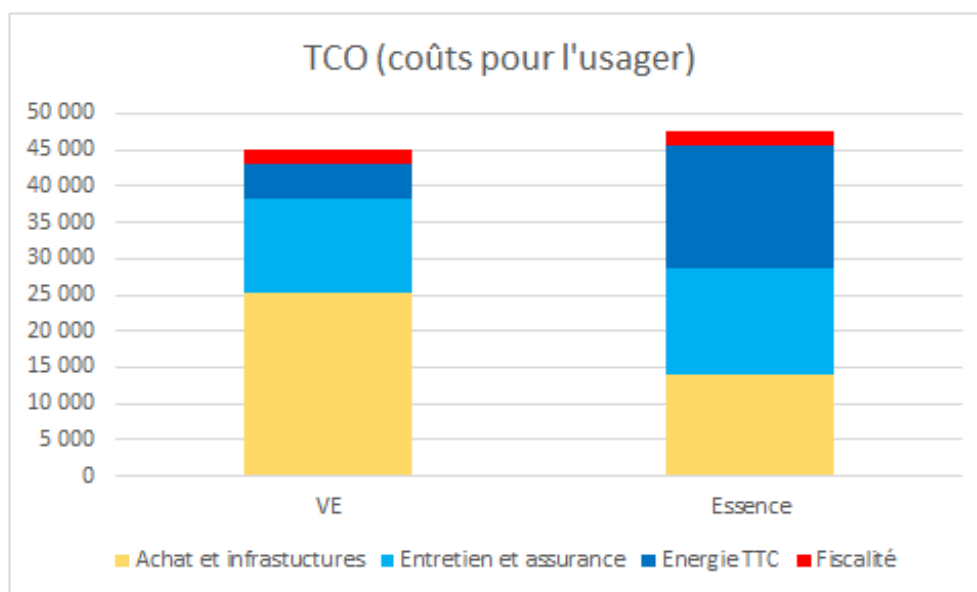
Source : calcul CGDD

Coût pour l'utilisateur (TCO) en 2020

Le bilan TCO du point de vue de l'acheteur ou de l'utilisateur s'avère positif en faveur du VE dès 2020. En effet, il est évalué à 45 000 € pour le VE et à 47 500 € pour le véhicule thermique. Le bilan TCO présente une structure assez différente du bilan socio-économique. Pour le véhicule thermique, la part de l'achat d'énergie dans le coût global est plus importante que dans le bilan socio-économique du fait du poids de la fiscalité sur l'essence (relativement à l'électricité). Le gain pour l'utilisateur du VE sur le poste énergie est important avec une facture énergétique trois fois moins élevée que celle d'un véhicule thermique.

Graphique 9 – Coûts pour l'utilisateur VE vs VT essence (en €2015)

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices



Source : calcul CGDD

Le gain pour le VE se décompose de la manière suivante :

- achat, batterie et infrastructures : + 11 400 €,
- usage (entretien et assurance) : - 1 900 €,
- énergie : - 12 000 €.

Et en 2030 ?

Entre 2020 et 2030, les prix d'achat des VE et des véhicules thermiques convergent pour être au même niveau en raison de la hausse des prix des véhicules thermiques qui intègre les surcoûts technologiques liés à l'atteinte des objectifs en matière de normes d'émission du CO₂ conjuguée à un prix constant pour le VE. Le prix des batteries en baisse permet d'améliorer le bilan sur le poste achat qui devient nettement moins défavorable au VE.

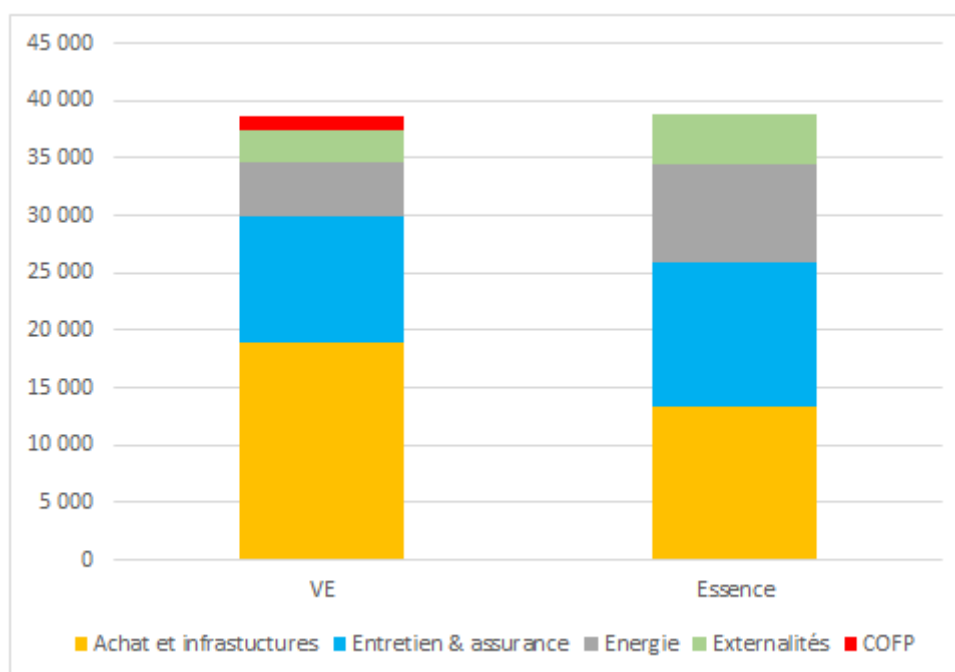
De plus, l'augmentation du prix des énergies fossiles plus importante que celle de l'électricité permet d'accentuer le gain du VE sur le plan de la consommation, alors même que la consommation unitaire des véhicules thermiques baisse de plus de 2 % par an.

En 2030, les bilans socio-économiques et TCO deviennent positifs pour le VE.

Coût socio-économique 2030

Le bilan socio-économique en 2030 fait apparaître un coût de 38 600 € pour le VE et de 38 800 € pour le véhicule essence de même gamme.

Graphique 10 – Coûts socio-économiques VE vs VT essence (en €2015)



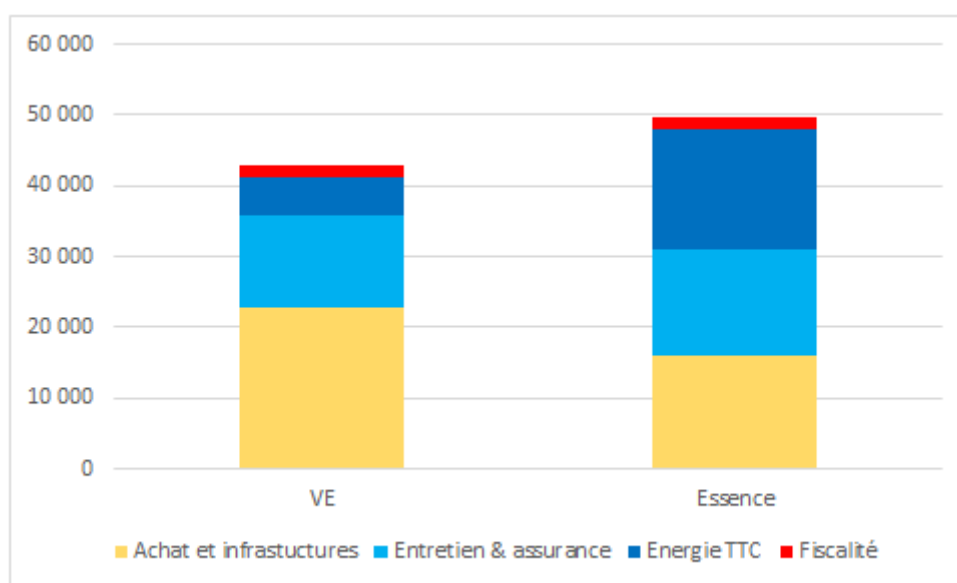
Source : calcul CGDD

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

Coût pour l'utilisateur (TCO) 2030

Le bilan TCO montre un coût de 43 000 € pour le VE et de 49 800 € pour le véhicule essence.

Graphique 11 – Coûts pour l'utilisateur VE vs VT essence (en €2015)



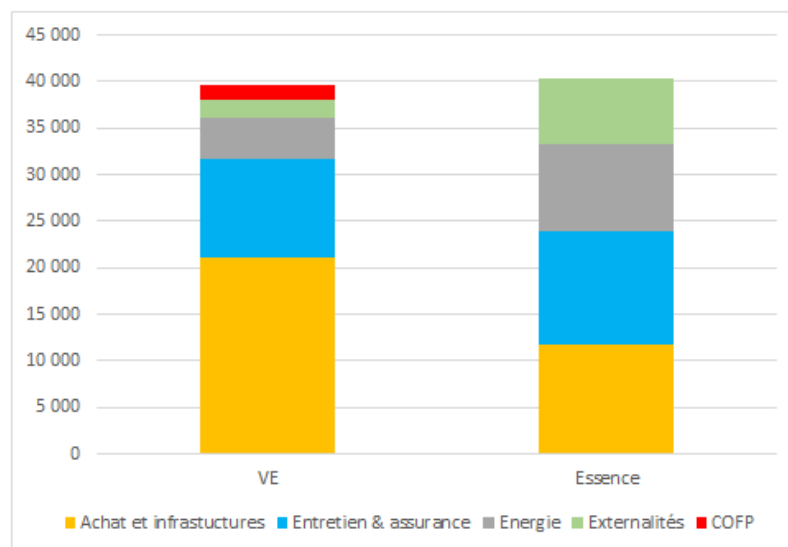
Source : calcul CGDD

Et en zone très dense ?

Si en 2020, en zone dense, le bilan socio-économique du VE est négatif en raison de coûts d'achats élevés et insuffisamment compensés par les gains liés à l'usage, le bilan est à l'équilibre en zone très dense. Le véhicule essence consomme plus d'énergie en zone urbaine très dense avec une vitesse plus basse et un régime moteur plus dégradé et émet donc plus de CO₂. La valeur monétaire des émissions de polluants atmosphériques fait plus que doubler par rapport à la zone dense, car la population exposée est plus importante. Il en va de même pour le bruit avec des externalités triplées en changeant de zone de densité, alors que l'impact en la matière est nul pour le VE.

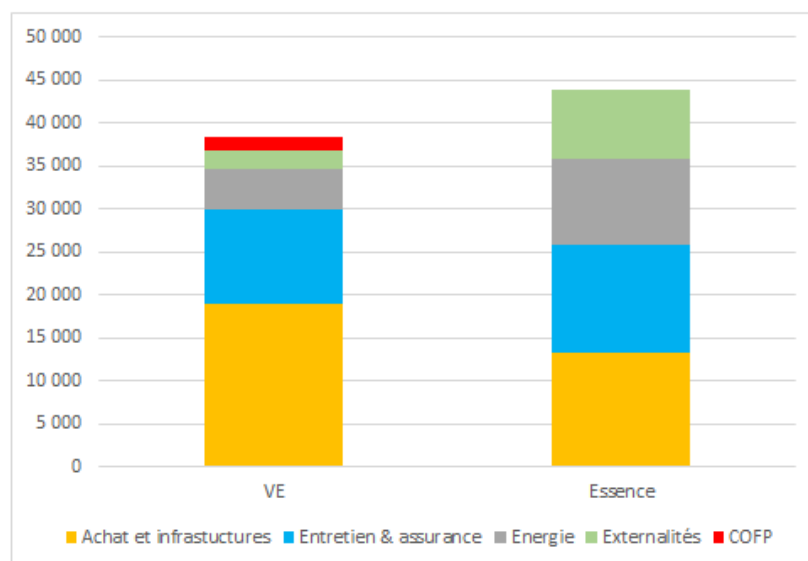
Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

Graphique 12 - Coût socio-économique 2020 VE vs VT essence (en €2015)



Source : calcul CGDD

Graphique 13 - Coût socio-économique 2030 VE vs VT essence (en €2015)



Source : calcul CGDD

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

Entre 2020 et 2030, le bilan environnemental du VE se dégrade moins que celui du véhicule thermique ce qui lui permet d'améliorer son bilan socio-économique. En effet, l'augmentation du coût du CO₂ pénalise les véhicules thermiques. De plus, les coûts liés aux nuisances sonores continuent d'augmenter pour les véhicules thermiques alors qu'ils sont nuls pour le VE. Le coût de l'essence augmente davantage que celui de l'électricité. Enfin concernant les coûts d'entretien, la différence de coûts entre les deux technologies évolue de manière quasi marginale.

En conclusion, le VE améliore son bilan entre 2020 et 2030 (de 39 600 € à 38 400 €) alors que celui du véhicule thermique se dégrade (de 40 400 € à 43 800 €).

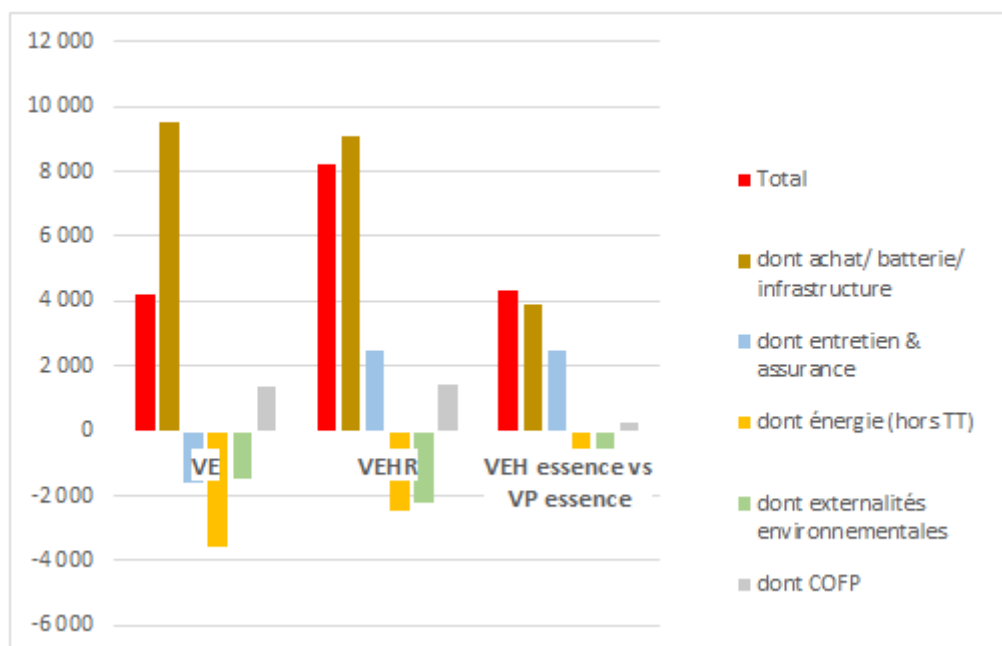
ET POUR LES AUTRES TECHNOLOGIES ?

Cas urbain standard en 2020

Bilan socio-économique en milieu urbain dense en 2020

En 2020, en zone urbaine dense, aucune technologie alternative au véhicule thermique ne présente un bilan positif.

Graphique 14 - Surcoûts socio-économiques cas standard – Zone dense en 2020



Source : calcul CGDD

Malgré des coûts d'achats élevés et un coût environnemental important pour la production de batterie, le VE présente le bilan socio-économique le moins négatif face au véhicule thermique (+ 4 200 €).

Globalement, le bilan du véhicule hybride est assez comparable à celui du VE (+ 4 400 €) mais s'il bénéficie d'un coût d'achat inférieur au VE de plus de 3000 € en raison du coût important de la batterie (5 600 €), il est à la fois pénalisé par des coûts d'entretien supérieurs en raison de la complexité de sa bi-motorisation et aussi par des gains environnementaux limités en raison de son carburant fossile.

Le VEHR possède le bilan le plus défavorable (surcoût de 8 200 €) car il cumule, d'une part les handicaps du VE liés au prix d'achat élevé (même si la batterie est de plus faible capacité) et aux investissements nécessaires en matière d'infrastructure de recharge et d'autre part les surcoûts liés à l'entretien du véhicule bi-motorisé.

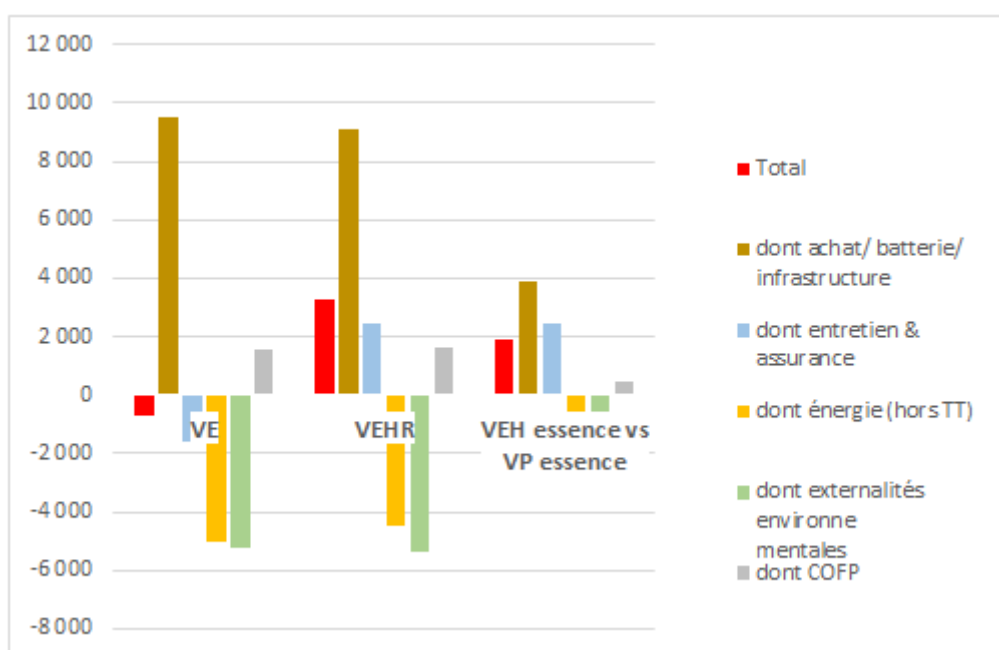
On constate que les gains environnementaux du VE sont moins élevés que ceux du VEHR en raison de l'impact environnemental de la production de batterie en matière de polluants atmosphériques et de CO₂ qui s'élève à plus de 1 600 € et seulement 550 € pour le VEHR.

Bilan socio-économique en milieu urbain très dense en 2020

Comme nous l'avons observé précédemment, en zone urbaine très dense, le VE affiche un bilan positif (- 700 €) en raison de gains importants sur les externalités et les consommations d'énergie.

Le bilan des autres technologies reste négatif, car les gains à l'usage ne suffisent pas à combler le surcoût initial lié à l'achat.

Graphique 15 - Surcoûts socio-économiques cas standard – Zone très dense en 2020



Source : calcul CGDD

Cas urbain standard en 2030

Bilan socio-économique en milieu urbain dense en 2030

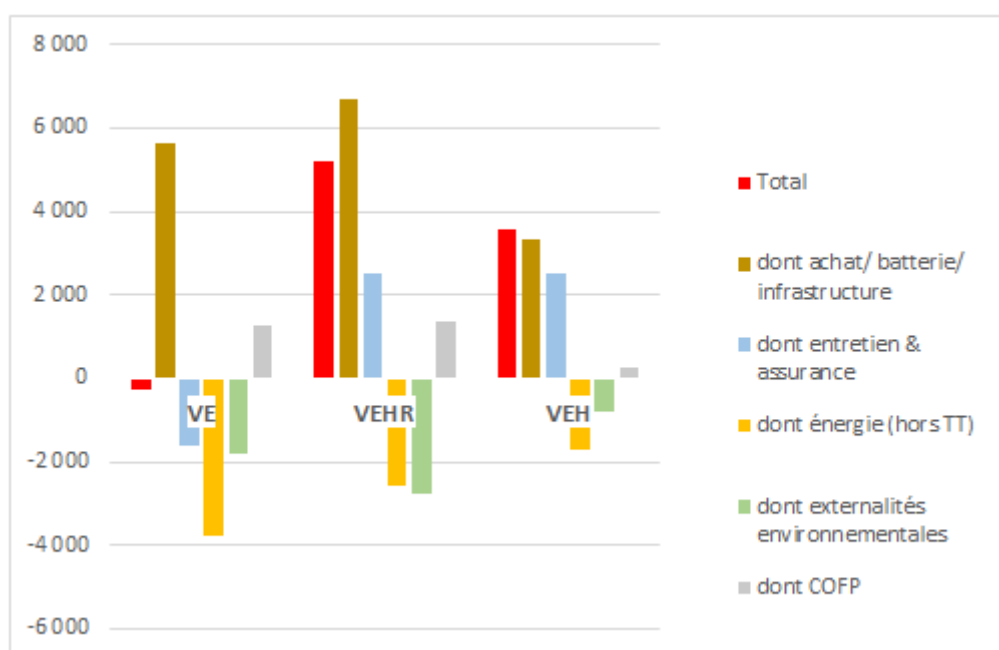
Entre 2020 et 2030, l'écart de prix à l'achat entre les véhicules thermiques et VE incluant la batterie se réduit de moitié ce qui permet au VE d'être la seule technologie présentant des coûts inférieurs au véhicule thermique en zone dense (- 300 €).

L'écart constaté en 2020 entre technologies hybrides et véhicule thermique se réduit en 2030.

Même si le bilan du VH est moins défavorable (de 4 400 € à 3 500 €), le bilan reste négatif et s'améliore peu en raison de l'augmentation de l'écart des coûts d'entretien.

Pour le VEHR, le bilan s'améliore (de 8 200 € à 5 200 €) mais reste négatif. Les coûts d'entretien se dégradent et les gains environnementaux restent faibles. La principale amélioration du bilan provient de la baisse de la hausse du prix d'achat du véhicule thermique conjuguée à la baisse du coût de la batterie.

Graphique 16 – Surcoûts socio-économiques cas standard – Zone dense, en 2030

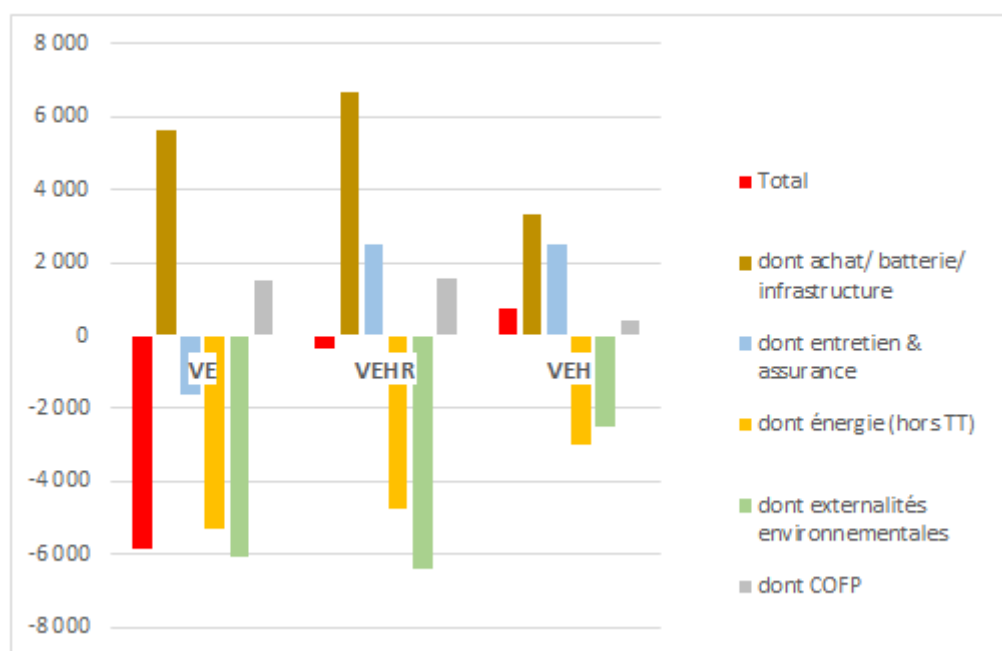


Source : calcul CGDD

Bilan socio-économique en milieu urbain très dense en 2030

Entre 2020 et 2030, le VE améliore substantiellement son bilan (de - 700 € à -5 800 €). Le bilan du VH s'améliore entre 2020 (+ 1 900 €) et 2030 (+ 800 €) sans devenir positif. Pénalisé par l'augmentation de l'écart des coûts d'entretien, les gains du VH s'accroissent sur le plan énergétique et sur le plan environnemental. Pour le VEHR, le bilan s'améliore (de 3 300 € à - 400 €) pour devenir positif. Si les coûts d'entretien augmentent, les gains énergétiques permettent d'améliorer le bilan. Concernant les externalités, si tous les coûts pour le VEHR augmentent faiblement grâce aux trajets réalisés en mode électrique, limitant les émissions de CO₂ et de bruit, ceux qui concernent le véhicule thermique augmentent plus substantiellement, plus particulièrement les coûts liés aux émissions de CO₂. Comme en zone dense, la principale amélioration du bilan provient de la baisse des coûts de batterie et de la hausse du prix des véhicules thermiques.

Graphique 17 - Surcoûts socio-économiques cas standard – Zone très dense en 2030



Source : calcul CGDD

Cas urbain intensif 2020

Le cas d'usage intensif est caractérisé par un usage accru du véhicule (60 000 km / an) sur une durée plus courte (4 ans au lieu de 16 ans). Sur la durée de vie du véhicule, un usage intensif implique une augmentation du kilométrage des véhicules de 15 % (240 000 km) alors qu'en usage standard un véhicule parcourt 208 000 km. L'intensification de l'usage permet différents gains s'apparentant à des économies d'échelle : pour un même surcoût à l'achat, les gains engrangés à l'usage sont *a priori* accrus ; les coûts d'assurance sont des forfaits annuels, certes trois fois supérieurs au cas standard mais dont la somme sur la durée de vie est inférieure ; les infrastructures de recharge sont amorties plus rapidement.

Si la comparaison avec les résultats du cas standard montre globalement une amélioration des bilans des technologies alternatives en usage intensif, elle est toutefois biaisée. En effet, la période de quatre ans regroupe des années pour lesquelles les prix des énergies fossiles et CO₂ sont inférieurs à ceux utilisés sur 16 ans. De même le coût de la batterie lors du renouvellement plus précoce ne bénéficie pas autant de l'effet d'apprentissage que dans le cas standard. Si la comparaison entre les deux cas est possible et permet d'identifier de grandes tendances, elle

doit néanmoins être appréhendée avec réserve car biaisée en faveur du cas standard. L'objet de l'analyse de ce cas d'usage est principalement de déterminer s'il est pertinent d'acquérir ou d'utiliser des véhicules à technologies alternatives en 2020 et en 2030.

Bilan socio-économique en milieu urbain dense 2020

En 2020, comme pour le cas standard, aucune technologie alternative au véhicule thermique ne présente un bilan positif dans le cas d'usage intensif.

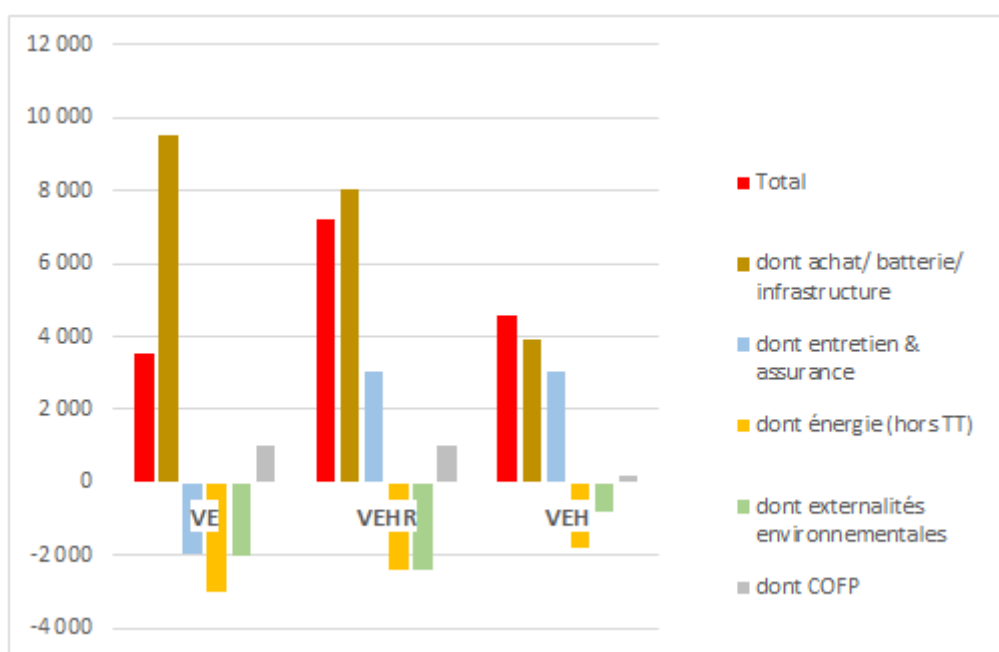
Le VE présente un bilan socio-économique amélioré par rapport à celui du cas standard (+ 3 500 €). Pourtant, il est pénalisé par les coûts d'achat de la batterie qui est renouvelée au bout de deux ans, pour un coût supérieur (plus de 1 500 €) car le prix des batteries n'a pas autant diminué. Cette perte est toutefois plus que compensée par une valeur résiduelle des infrastructures plus élevée après seulement 4 ans d'amortissement.

En usage intensif, les gains en matière d'externalités sont plus importants, car le différentiel de coûts favorable aux véhicules électriques s'accroît avec l'augmentation du nombre de kilomètres parcourus. Cependant les gains énergétiques sont moins importants que dans le cas standard, car ils bénéficient moins de la hausse du prix des carburants sur une plus longue tendance (le prix moyen de l'essence est plus faible sur la période entre 2020 et 2024 qu'entre 2020 et 2036)

Le bilan du VEHR reste très négatif (+ 7 200 €) mais s'améliore par rapport à l'usage standard (+ 8 200 €) en raison de gains en matière d'externalités. On constate la même distorsion que pour le VE avec des bornes de recharge qui ont une valeur résiduelle plus importante et un surcoût lié au renouvellement de la batterie précoce cependant plus faible pour un VEHR, car la batterie de capacité plus faible est moins chère.

Le bilan du VH se dégrade légèrement en usage intensif (+ 4 500 €) comparé à l'usage standard (+ 4 300 €) malgré les gains en matière de consommation de carburant qui s'accroissent, le véhicule réalisant plus de kilomètres. Les gains en matière d'externalités sont faibles en raison de l'importance de la pollution atmosphérique et du bruit qui représentent réunis un coût aussi important que le coût des émissions amont et aval de CO₂. Les coûts d'entretien sont en hausse en raison de la bi-motorisation qui génère un surcoût de 83 c€/km.

Graphique 18 – Surcoûts socio-économiques : cas intensif – Zone dense en 2020

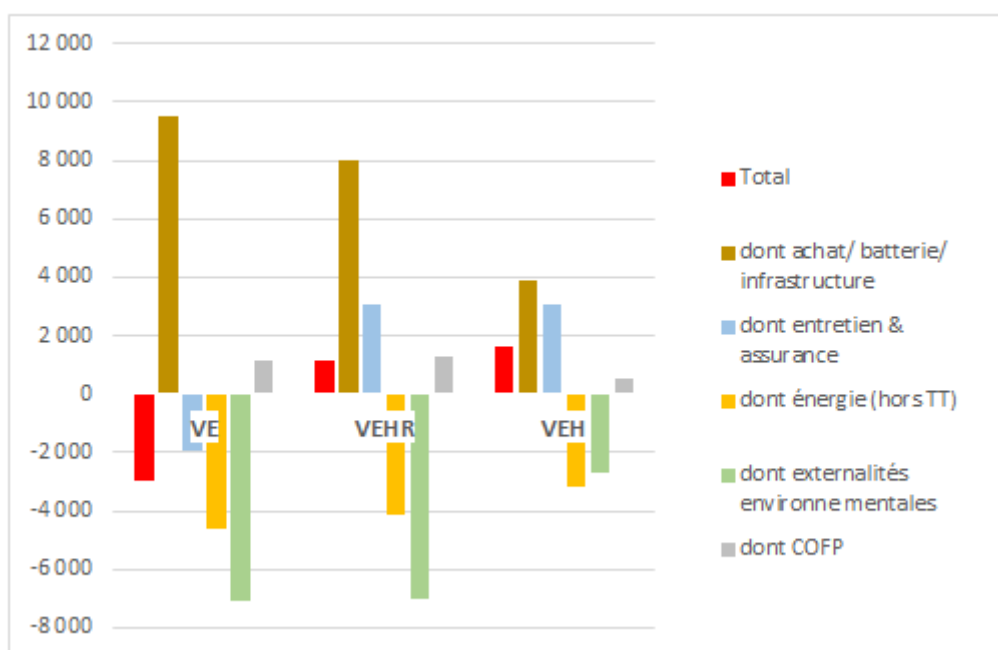


Source : calcul CGDD

Bilan socio-économique en milieu urbain très dense 2020

En zone très dense, comme pour le cas standard (- 700 €), seul le VE présente un bilan positif en usage intensif (- 3 000 €). Même s'il reste défavorable, le bilan du VEHR s'améliore nettement (+ 1 100 €). En milieu très dense, contrairement au milieu dense, par rapport à l'usage standard (+ 1 900 €), le bilan du VH comparé au véhicule thermique s'améliore également en usage intensif (+ 1 600 €), mais reste négatif.

Graphique 19 - Surcoûts socio-économiques : cas intensif - Zone très dense, en 2020



Source : calcul CGDD

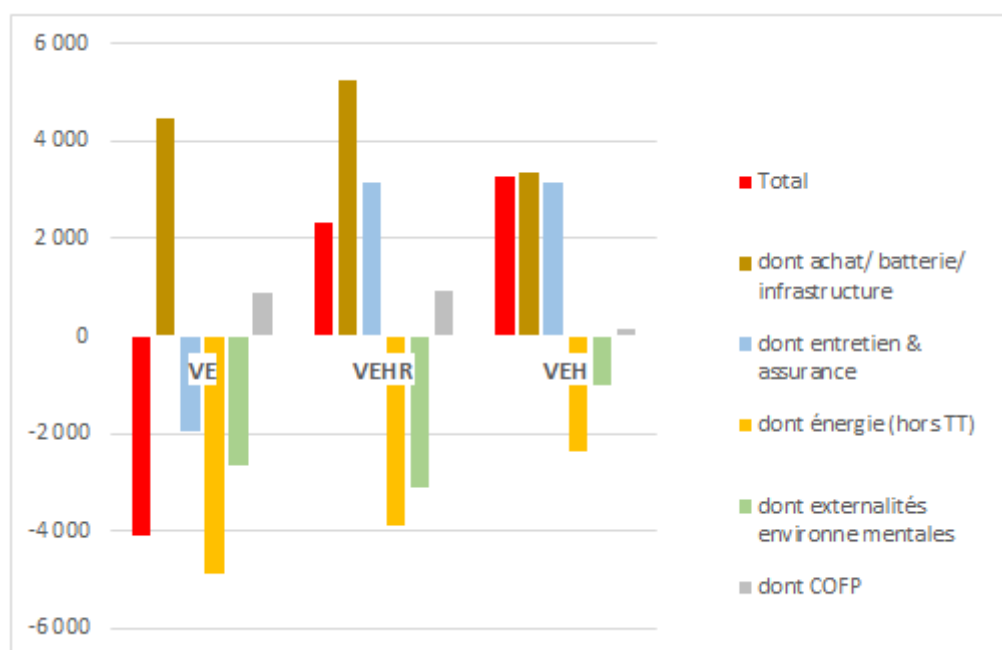
Cas urbain intensif 2030

Bilan socio-économique en milieu urbain dense 2030

En 2030, en zone dense, comme pour le cas standard (- 270 €), seul le VE présente un bilan positif en usage intensif (- 4 100 €).

Entre 2020 et 2030, le bilan du VEHR par rapport au VT s'améliore (baisse du surcoût de 7 200 € à 2 300 €) mais reste négatif. De même pour le VH (+ 3 300 €) même s'il s'améliore par rapport au cas standard (+ 3 600 €).

Graphique 20 - Surcoûts socio-économiques : cas intensif – Zone dense, en 2030



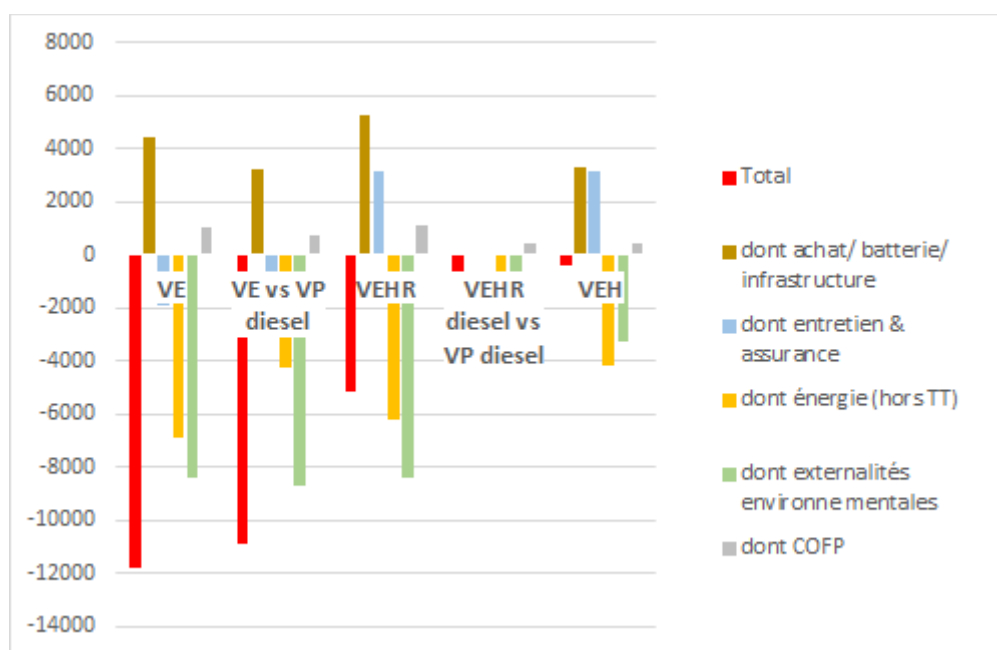
Source : calcul CGDD

Bilan socio-économique en milieu urbain très dense 2030

En 2030, en zone très dense, toutes les motorisations présentent un bilan positif, amélioré par rapport au cas urbain standard.

Le VE présente un bilan positif en usage intensif nettement amélioré (- 11 800 €) par rapport à l'usage standard (- 5 800 €). Le bilan du VEHR varie de -400 € en usage standard à - 5 100 €. Pour le VH, l'usage intensif permet d'améliorer le bilan par rapport à l'usage standard (de + 700 € à - 400 €).

Graphique 21 - Surcoûts socio-économiques : cas intensif - Zone très dense en 2030



Source : calcul CGDD

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

Zoom sur... Le bilan TCO du taxi en 2020

Dans le cas d'usage intensif en milieu urbain, le bilan est neutre pour le VE en zone dense et il est positif en zone très dense. Ce n'est pas le cas du véhicule hybride classique qui bénéficie également de cette fiscalité avantageuse sur les carburants. L'attribution d'un bonus est susceptible de rendre les solutions VEHR et VEH rentables.

Bilan TCO avec remboursement d'une partie de la TICPE

Surcoût TTC	Urbain dense					Urbain très dense				
	Total	dont achat véhicule + batterie	dont infra-structure	dont entretien assurance	dont énergie	Total	dont achat véhicule + batterie	dont infra-structure	dont entretien assurance	dont énergie
VE vs VP essence	45	10 627	759	-2 320	-9 021	-2 754	10 627	759	-2 320	-11 820
VEHR essence vs VP essence	8 252	8 847	759	3 649	-4 002	5 402	8 847	759	3 649	-6 853
VEH essence vs VP essence	5 132	4 700	0	3 649	-3 216	1 749	4 700	0	3 649	-5 664

NB : Les exploitants de taxis bénéficient d'un remboursement de la TICPE pour les supercarburants et le gazole correspondant à la différence entre la TICPE effectivement acquittée et 35,9 €/hl pour les supercarburants et 30,20 €/hl pour le gazole.

En l'absence de remboursement d'une partie de la TICPE pour les taxis à moteur thermique, les VE et VEHR pourraient présenter un bilan amélioré de l'ordre de 5 000 € en zone dense et de 6 000 € en zone très dense par comparaison avec le véhicule diesel.

Bilan TCO sans remboursement d'une partie de la TICPE

Surcoût TTC	Urbain dense					Urbain très dense				
	Total	dont achat véhicule+batterie	dont infra-structure	dont entretien assurance	dont énergie	Total	dont achat véhicule + batterie	dont infra-structure	dont entretien assurance	dont énergie
VE vs VP essence	-4943	10627	759	-2320	-14010	-8611	10627	759	-2320	-17677
VEHR essence vs VP essence	7322	8847	759	3649	-4933	3724	8847	759	3649	-8530
VEH essence vs VP essence	4135	4700	0	3649	-4214	-8	4700	0	3649	-7421

ET POUR LE CAS MIXTE ?

Cas mixte 2020

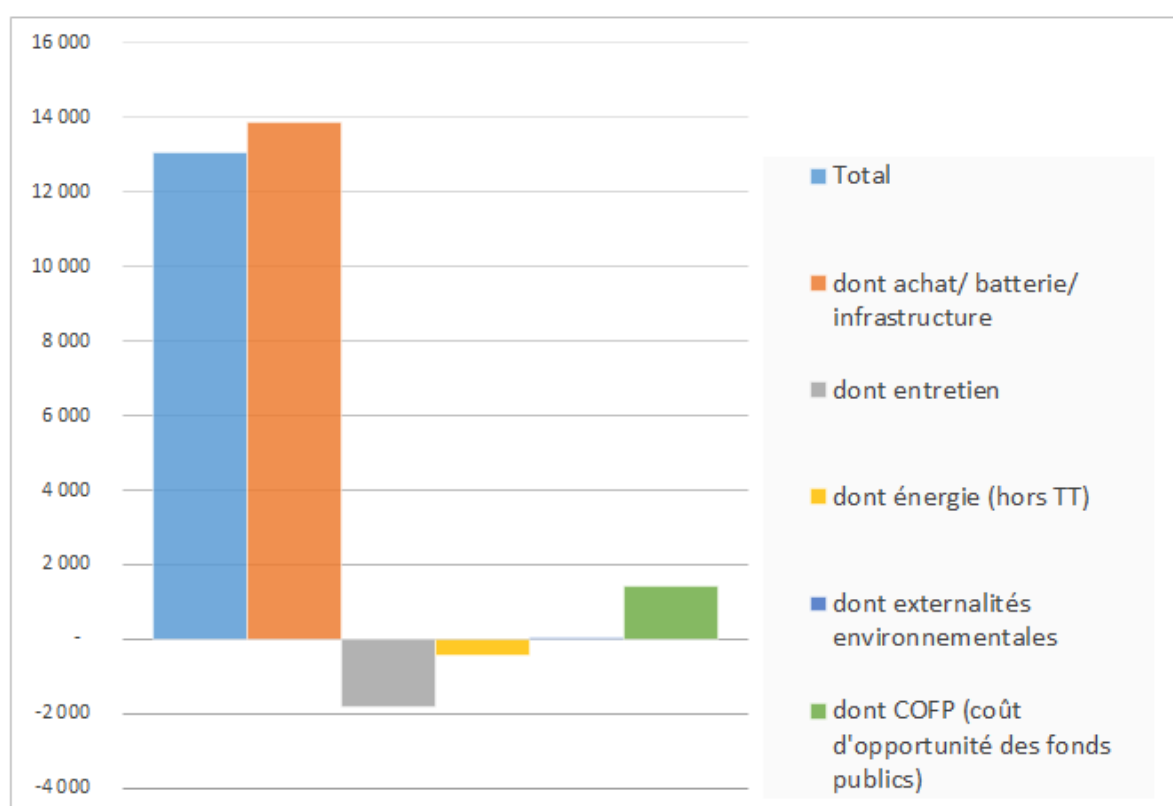
En usage moyen, avec une part importante de trajets interurbains et en milieu urbain diffus (63 %) et un véhicule équipé d'une batterie plus grosse (deux fois la capacité de celle embarquée par la citadine électrique), le bilan des technologies VE et VEHR par rapport à la berline diesel est systématiquement négatif.

Le VE présente un surcoût de + 13 100 €. Il affiche en matière d'externalités un bilan défavorable en raison de gains limités en matière de pollution atmosphérique et de bruit dans les zones à faible densité et il est pénalisé par l'impact environnemental important de la production de la batterie (+ 2 500 €). Il est notable que les gains énergétiques apportés par le VE sont

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

extrêmement réduits par rapport à ceux d'un usage urbain, sous le double effet de la moindre consommation du véhicule thermique et de la hausse de celle du VE.

Graphique 22 - Bilan socio-économique VE vs diesel : usage mixte (toutes zones)

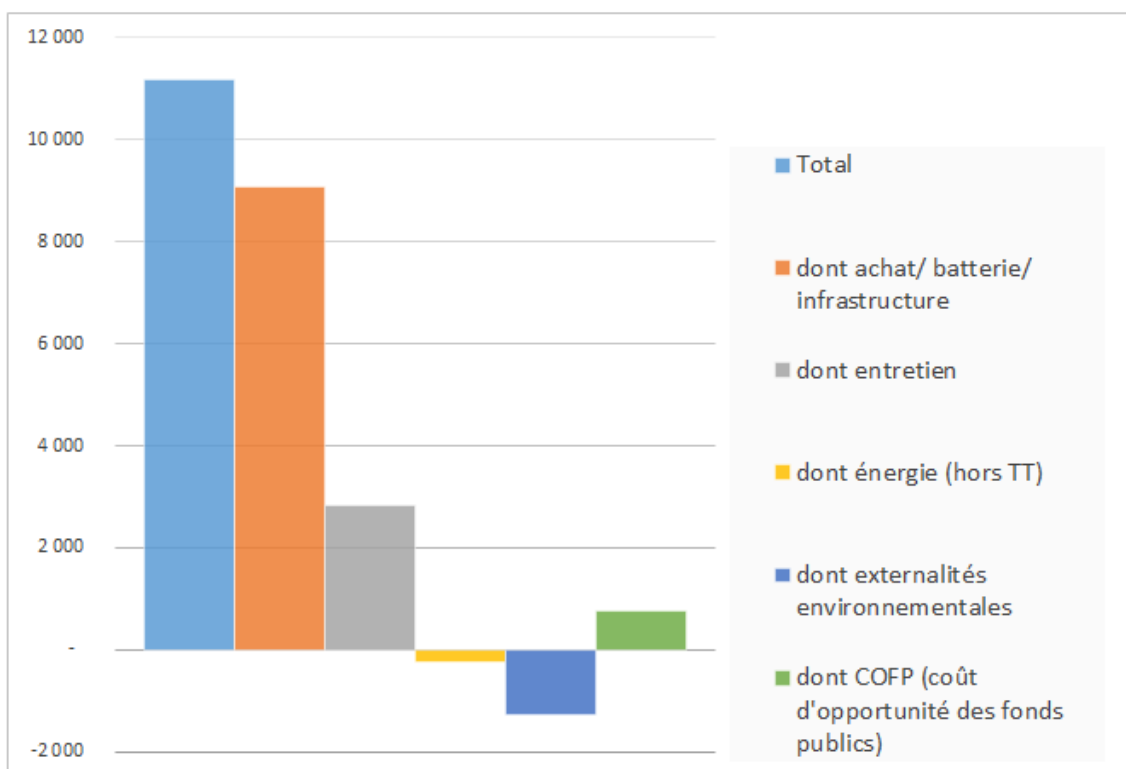


Source : calcul CGDD

Le bilan du VEHR en usage mixte en 2020 est très négatif (+ 11 200 €). En matière de consommation de carburant, la part importante de trajets interurbains et en milieu urbain diffus (63 %) où les vitesses permettent un rendement presque optimal pour un véhicule thermique, ne permet pas au VEHR de générer des gains importants sur le poste énergie. Le VEHR se montre plus performant que le véhicule thermique, dans le domaine des externalités environnementales, pour les trajets urbains (40 %) qui permettent de rendre le bilan environnemental positif, principalement en matière d'émissions de CO₂ et de bruit. Il se révèle toutefois moins efficient sur le plan de la pollution atmosphérique en raison des émissions générées par la production de batterie.

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

Graphique 23 - Bilan socio-économique VEHR vs Diesel : usage mixte (toutes zones)



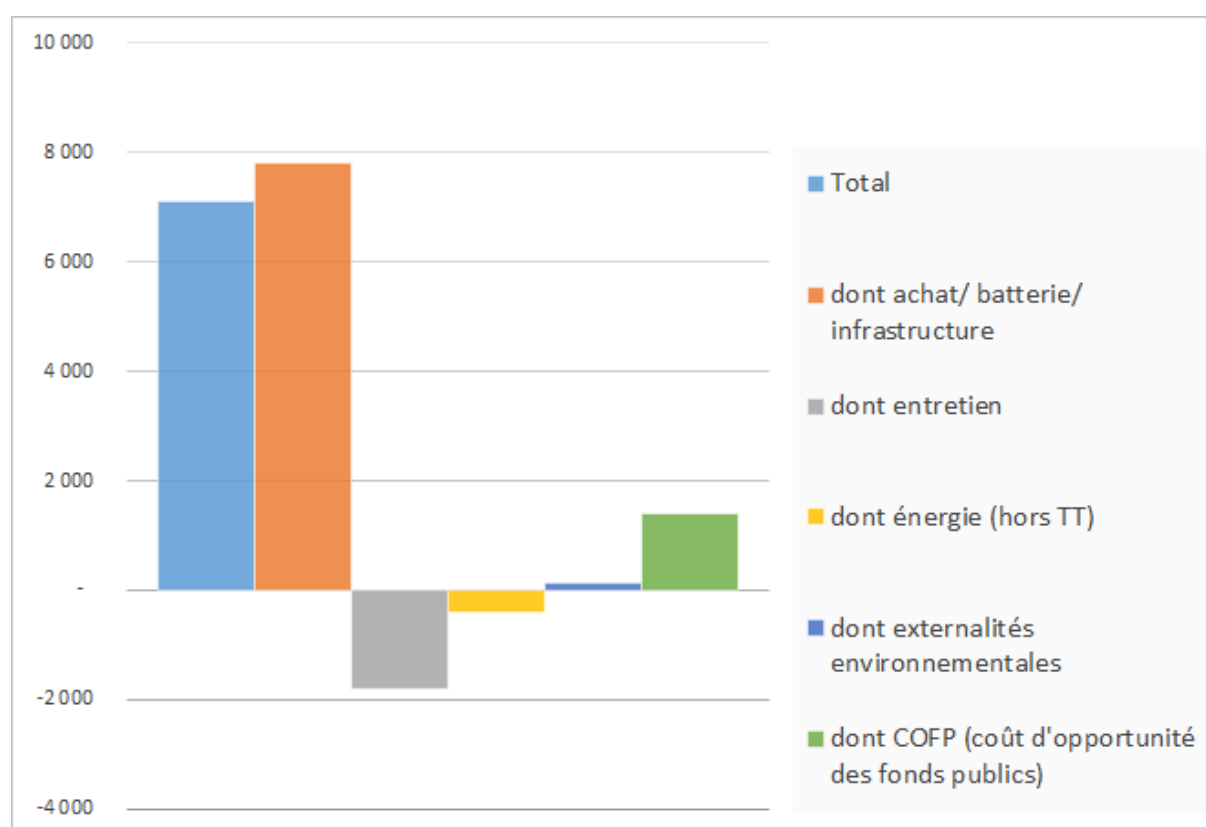
Source : calcul CGDD

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

Cas mixte 2030

Entre 2020 et 2030, le bilan du VE s'améliore (baisse du surcoût de + 13 100 € à + 7 000 €) mais reste très défavorable.

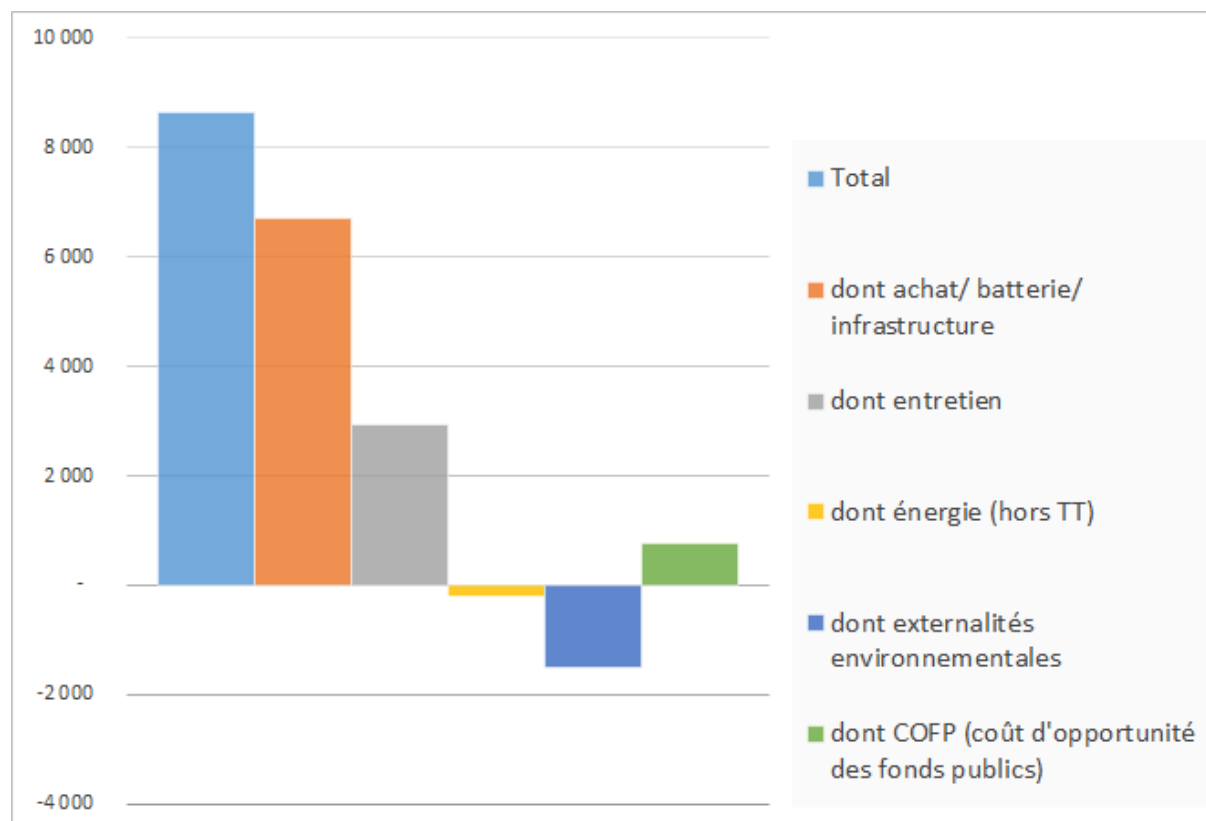
Graphique 24 - Bilan socio-économique VE vs diesel : usage mixte (toutes zones)



Source : calcul CGDD

Entre 2020 et 2030, le bilan du VEHR s'améliore peu (baisse du surcoût de + 11 200 € à + 8 600 €).

Graphique 25 - Bilan socio-économique VEHR vs VT diesel : usage mixte (toutes zones)



Source : calcul CGDD

Le véhicule thermique resterait donc la technologie la plus efficace en usage mixte, notamment dans les zones péri-urbaines et sur les trajets interurbains, même à l'horizon 2030.

Il convient de noter que le bilan pour l'utilisateur (approche TCO, cf. résultats en annexe) est sensiblement amélioré : il s'approche de l'équilibre pour le VE (+ 1 250 €) mais reste négatif.

Cas mixte : le cas particulier du 2^e véhicule

Plus de 9 millions de ménages possèdent un deuxième véhicule en France dont 40 % résident dans des communes rurales ou de moins de 20 000 habitants³². Il existe donc un marché du deuxième véhicule important et le cas mixte, examiné précédemment (i.e. une berline qui parcourt plus de kilomètres qu'en zone urbaine) ne s'appliquerait pas à un deuxième véhicule qui serait électrique.

³² Enquête budget des familles (INSEE), 2011

Dans ce cas spécifique, il convient de modifier un certain nombre de paramètres :

- On fait l'hypothèse que le deuxième véhicule est utilisé pour des trajets quotidiens et que son kilométrage annuel est moins important. Cet usage est assez proche du cas urbain et on suppose qu'il parcourt 13 000 km / an ;
- On compare une citadine électrique à une citadine essence de gamme B ;
- Le VE a une batterie plus petite, identique à celle du cas urbain (avec une énergie disponible de 24 kWh) ;
- On fait l'hypothèse que la consommation du VE augmente (22 kWh / 100 km) car en milieu mixte les trajets en milieu urbain diffus et en rase campagne représentent les deux tiers des déplacements ;
- Pour le véhicule thermique, on prend en compte les consommations moyennes des véhicules essence de la gamme B1 et non plus celles des véhicules diesel de la gamme M1. Les consommations sont de **5,31 L/100 km pour 2020** et de **4,25 L/100 km pour 2030**.

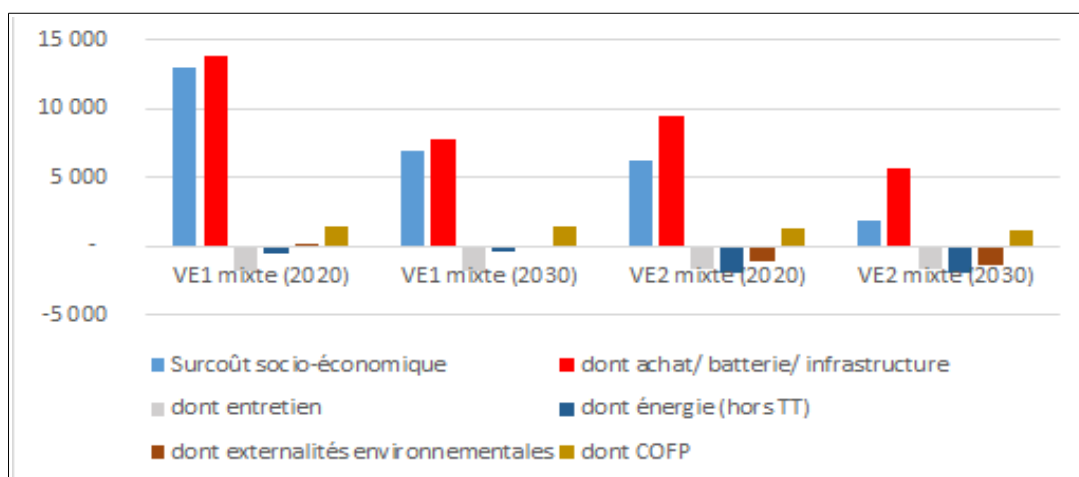
Pour le cas mixte appliqué à un deuxième véhicule, on constate une nette amélioration du bilan en 2020 pour le VE qui présente un surcoût de 7 000 € alors que dans le cas mixte appliqué à un premier véhicule le surcoût dépasse 13 000 €. L'amélioration du bilan est due à la baisse de la taille de la batterie, qui a principalement un impact positif en matière de coût d'achat mais aussi en matière de polluants émis lors de sa production.

Sur le plan de la consommation d'énergie, la dégradation des performances du VE en zone urbaine est plus que compensée par l'augmentation de la consommation de la citadine essence par rapport à la berline diesel (4,84 L/100 km en 2020 et 3,88 L/100 km en 2030), le deuxième VE présente donc un gain supérieur sur ce poste.

En 2030, les performances sont également améliorées pour le deuxième véhicule même si le surcoût atteint encore 2 000 € alors qu'il dépasse 6 000 € pour un premier véhicule.

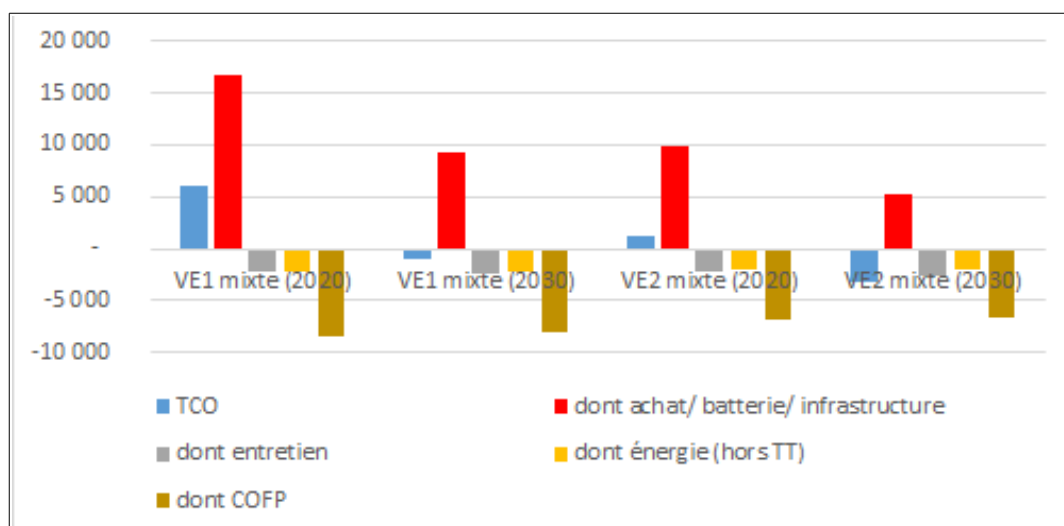
Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

Graphique 26 - Milieu mixte : bilans socio-économiques comparés pour un 1^{er} et un 2^e véhicule



Source : calcul CGDD

Graphique 27 - Milieu mixte : bilans TCO comparés pour un 1^{er} et un 2^e véhicule



Source : calcul CGDD

Cas mixte : le cas particulier du véhicule d'entreprise

Hypothèses de coûts

On considère un véhicule diesel haut de gamme de 25 000 €, un VE de 30 000 € et un VEHR de 35 000 €. Cela correspond à des surcoûts par rapport au diesel supérieurs à ceux pris précédemment : + 5 000 € (+ 500 € précédemment) pour le VE et + 10 000 € (+ 6 000 € précédemment) pour le VEHR. Les caractéristiques concernant la batterie sont les mêmes que celles du cas mixte.

Taxe sur les véhicules de société (TVS)

- Pour un véhicule diesel : 700 € / an pour la première composante, fonction des émissions de CO₂ et 40 €/an pour la deuxième composante fonction des émissions de polluants atmosphériques.
- Pour le VEHR : 120 €/an pour les véhicules émettant au titre de la première composante avec une émission moyenne de 60 gCO₂/km. Le VEHR est exonéré de la deuxième composante.
- Le VE émettant moins de 50 gCO₂/km, il est totalement exonéré de TVS.

Taxe sur la valeur ajoutée (TVA)

Les véhicules de société diesel bénéficient d'une exonération de 80 % sur la TVA appliquée au diesel.

Amortissement de l'achat du véhicule

- La loi de finances pour 2017 relève le plafond d'amortissement de 18 300 à 30 000 € pour le VE ce qui permet une réduction de l'impôt sur les sociétés par rapport aux véhicules thermiques de l'ordre de 600 € par an (hypothèses d'amortissement sur 5 ans et de taux d'impôt moyen sur les sociétés de 25 %),
- Concernant le VEHR, la même mesure prévoit de relever le plafond à 20 300 € permet une réduction de l'impôt sur les sociétés par rapport aux véhicules thermiques de 100 € par an (pendant 5 ans).

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfiques

Tableau 24 – Bilans socio-économiques³³ du VE et du VEHR³⁴ d'entreprise vs Diesel d'entreprise, 2020

Bilan socio- économique (surcoût, HTT)	Total	dont achat/ batterie/ infrastructure	dont entretien	dont énergie (hors TT)	dont externalités environnementales	dont COFP (coût d'opportunité des fonds publics)
VEHR diesel vs VP diesel	15 202	11753	2739	302	-1291	1699
VE vs VP diesel	20 026	18511	-1614	550	0	2578

Les bilans TCO du VE et du VEHR sont cependant meilleurs que leurs bilans socio-économiques, notamment en raison d'une fiscalité avantageuse en matière d'amortissement. Les gains en matière de consommation d'énergie respectivement de 4 000 € pour le VEHR et de 5 500 € pour le VE sont en partie gommés par l'exonération fiscale de 80 % dont bénéficient les véhicules diesel détenus par les entreprises. Cet avantage fiscal s'élève à environ 2 000 € TTC en coût actualisé. Les plafonds d'amortissement pour les véhicules de société relevés à 18 300 € pour le VEHR et à 30 000 € pour le VE leur octroient des gains respectifs de 500 € et 3 000 € sur la durée de détention du véhicule. L'octroi d'un bonus à l'achat (auquel ont droit les entreprises) est susceptible de rapprocher le bilan de l'équilibre.

Le but ici est plus de comparer les TCO. En pratique, il semblerait que les reventes sont plus rapides (au bout de 2 à 4 ans) et ne suivent pas un cycle de 8 ans. En prenant en compte une durée de détention plus courte avec une vente au prix de l'argus, le bilan serait plus fidèle à la réalité. Cependant, les incertitudes sont importantes sur le pourcentage de décote d'un VE ou VEHR et l'hypothèse relative au prix de l'argus impacterait fortement le bilan. Si le calcul sur la durée de vie de 8 ans ne correspond pas à la pratique de gestion du parc des véhicules d'entreprise, il permet toutefois de déterminer une hiérarchie entre les technologies, sans distorsion liée aux politiques de revente dépendant des croyances du marché.

Tableau 25 – Bilans pour l'utilisateur du VE et du VEHR d'entreprise vs Diesel d'entreprise (hors bonus à l'achat), 2020

Surcoût TTC	Total	dont achat véhicule+batterie	dont infrastructure	dont entretien assurance	dont TVS	dont énergie
VEHR diesel vs VP diesel	8 485	12 132	1 513	3 286	- 4 273	- 4 173
VE vs VP diesel	6 610	18 017	1 513	- 1 936	- 5 101	- 5 883

³³ Le bilan pour l'utilisateur est également négatif pour le VE et le VEHR notamment en raison du surcoût engendré par le renouvellement de la batterie.

³⁴ En raison d'écarts de coûts supérieurs, et d'un renouvellement plus rapide de la batterie ne permettant pas de bénéficier pleinement du progrès technologique, le bilan socio-économique du VE et du VEHR se dégrade par rapport au cas « mixte », avec des surcoûts respectifs de 15 000 € pour le VEHR et de 20 000 € pour le VE.

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfiques

TESTS DE SENSIBILITÉ POUR CERTAINES HYPOTHÈSES ET SCÉNARIOS

Tests de sensibilité relatifs au kilométrage annuel des véhicules

Le kilométrage a une influence très importante sur les bilans socio-économiques et TCO dans le cas d'un usage urbain. En faisant une analyse du cas urbain pour le VE comparé à un VP essence, on constate que si le nombre de km annuels diminue de 13 000 à 8 500 km, le bilan se détériore fortement et devient négatif même en urbain très dense en 2020. En 2030, le VE ne serait plus rentable qu'en milieu urbain très dense. À l'inverse, en parcourant plus de kilomètres, le bilan s'améliore fortement, situation déjà constatée dans le cas urbain intensif.

Dans le cas mixte, l'augmentation du kilométrage annuel de 16 000 à 20 000 km impacterait marginalement le bilan, car les gains énergétiques du VE sont faibles en raison du bon rendement du véhicule thermique. Dans le cas du bilan pour l'utilisateur, on observe que cette augmentation de 4 000 km permettrait au bilan TCO d'être favorable au VE comparé au VP diesel en 2030.

Tableau 26 - Test de sensibilité pour le bilan socio-économique (en €)

Cas d'usage	km	Année	MILIEU DENSE						MILIEU TRÈS DENSE					
			Surcoût socio-économique	dont achat/batterie/infrastructure	dont entretien	dont énergie (hors TT)	dont externalités environnementales	dont COFP	Surcoût socio-économique	dont achat/batterie/infrastructure	dont entretien	dont énergie (hors TT)	dont externalités environnementales	dont COFP
VE standard ref	13000	2020	4 201	9 512	-1 614	-3 602	-1 455	1 360	-734	9 512	-1 614	-4 995	-5 221	1 584
VE urbain	8500	2020	6 340	9 512	-1 327	-2 355	-379	889	3 113	9 512	-1 327	-3 266	-2 842	1 035
VE urbain	14500	2020	3 488	9 512	-1 710	-4 017	-1 813	1 517	-2 017	9 512	-1 710	-5 572	-6 014	1 766
VE standard ref	13000	2030	-268	5 636	-1 604	-3 791	-1 793	1 283	-5 819	5 636	-1 604	-5 275	-6 067	1 490
VE urbain	8500	2030	2 246	5 636	-1 291	-2 479	-459	839	-1 384	5 636	-1 291	-3 449	-3 254	974
VE urbain	14500	2030	-1 106	5 636	-1 708	-4 229	-2 237	1 431	-7 298	5 636	-1 708	-5 883	-7 005	1 662
VE mixte ref	16000	2020	13 061	13 877	-1 806	-454	26	1 418						
VE mixte	20000	2020	12 227	13 877	-2 061	-567	-794	1 772						
VE mixte ref	16000	2030	6 986	7 793	-1 812	-393	-5	1 404						
VE mixte	20000	2030	5 930	7 793	-2 090	-491	-1 037	1 755						

Source : calcul CGDD

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfiques

Tableau 27 - Test de sensibilité pour le bilan TCO (en €)

Cas d'usage	km	Année	MILIEU DENSE					MILIEU TRES DENSE				
			Surcoût TCO	dont achat véhicule + batterie	dont infrastructure	dont entretien assurance	dont énergie	Surcoût TCO	dont achat véhicule + batterie	dont infrastructure	dont entretien assurance	dont énergie
VE standard ref	13000	2020	-2 499	8 739	2 675	-1 937	-11 977	-5 456	8 739	2 675	-1 937	-14 933
VE urbain	8500	2020	1 991	8 739	2 675	-1 592	-7 831	58	8 739	2 675	-1 592	-9 764
VE urbain	14500	2020	-3 996	8 739	2 675	-2 052	-13 359	-7 294	8 739	2 675	-2 052	-16 656
VE standard ref	13000	2030	-6 798	4 088	2 675	-1 925	-11 637	-9 745	4 088	2 675	-1 925	-14 584
VE urbain	8500	2030	-2 395	4 088	2 675	-1 550	-7 609	-4 322	4 088	2 675	-1 550	-9 536
VE urbain	14500	2030	-8 266	4 088	2 675	-2 050	-12 980	-11 553	4 088	2 675	-2 050	-16 267
VE mixte ref	16000	2020	6 101	13 978	2 675	-2 167	-8 385					
VE mixte	20000	2020	3 698	13 978	2 675	-2 474	-10 481					
VE mixte ref	16000	2030	-923	6 676	2 675	-2 175	-8 099					
VE mixte	20000	2030	-3 281	6 676	2 675	-2 508	-10 124					

Source : calcul CGDD

Tests de sensibilité relatifs au taux d'actualisation

Le taux d'actualisation choisi dans l'étude est de 4,5 %. Si on prend pour hypothèse un taux d'actualisation en diminution, à 2 % par exemple, les bilans socio-économiques et TCO s'améliorent pour toutes les motorisations alternatives qui permettent des gains d'énergie et environnementaux. On constate que le VE, qui génère le plus de gains futurs, est la technologie la plus sensible à une variation du taux d'actualisation devant le VEHR. Le VH est la technologie générant les gains énergétiques et environnementaux les plus faibles. La consommation d'énergie et les externalités de manière plus relative, sont les postes de coûts les plus sensibles aux variations du taux d'actualisation.

Une hausse substantielle du taux d'actualisation, à 10 % par exemple, entraîne une détérioration des bilans, l'actualisation écrasant les bénéfices futurs générés par ces technologies alternatives.

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

Tableau 28 - Tests de sensibilité relatifs au taux d'actualisation pour le bilan socio-économique en fonction des milieux et des technologies en 2020 et 2030

Surcoûts socio-économiques en €

Cas d'usage	Taux	Technologie	2020		2030	
			dense	très dense	dense	très dense
Urbain ref	4,5%	VE	4 201	- 734	- 268	- 5 819
Urbain	2%	VE	3 095	- 2 800	- 1 478	- 8 078
Urbain	10%	VE	5 768	2 242	1 478	- 2 527
Urbain ref	4,5%	VEHR	8 243	3 260	5 186	- 375
Urbain	2%	VEHR	7 854	1 886	4 731	- 1 885
Urbain	10%	VEHR	8 786	5 247	5 848	1 841
Urbain ref	4,5%	VH	4 355	1 871	3 565	762
Urbain	2%	VH	4 388	1 408	3 592	256
Urbain	10%	VH	4 295	2 537	3 521	1 503
Urbain intensif ref	4,5%	VE	4 065	- 2 417	- 3 617	- 11 314
Urbain intensif	2%	VE	3 918	- 2 802	- 3 931	- 11 908
Urbain intensif	10%	VE	4 388	- 1 631	- 2 967	- 10 119
Urbain intensif ref	4,5%	VEHR	6 677	591	1 815	- 5 631
Urbain intensif	2%	VEHR	6 588	277	1 630	- 6 088
Urbain intensif	10%	VEHR	8 786	1 242	2 215	- 4 703
Urbain intensif ref	4,5%	VH	4 006	1 047	2 795	- 911
Urbain intensif	2%	VH	4 006	931	2 774	- 1 073
Urbain intensif	10%	VH	4 005	1 274	2 833	- 595

Cas d'usage	Taux	Technologie	2020	2030
Cas mixte ref	4,5%	VE	13 061	6 986
Cas mixte	2%	VE	12 950	6 750
Cas mixte	10%	VE	13 114	7 247
Cas mixte ref	4,5%	VEHR	11 170	8 577
Cas mixte	2%	VEHR	11 418	8 804
Cas mixte	10%	VEHR	10 786	8 235

Source : calcul CGDD

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfiques

Tableau 29 - Tests de sensibilité relatifs au taux d'actualisation pour le bilan TCO en fonction des milieux et des technologies en 2020 et 2030

Surcoûts pour l'utilisateur en €

Cas d'usage	Taux	Technologie	2020		2030	
			dense	très dense	dense	très dense
Urbain ref	4,5%	VE	- 2 499	- 5 456	- 6 798	- 9 745
Urbain	2%	VE	- 4 962	- 8 502	- 9 104	- 12 605
Urbain	10%	VE	1 083	- 1 017	- 3 414	- 5 545
Urbain ref	4,5%	VEHR	7 839	6 131	4 910	3 123
Urbain	2%	VEHR	7 396	5 371	4 575	2 487
Urbain	10%	VEHR	8 470	7 222	5 411	4 070
Urbain ref	4,5%	VH	4 236	1 651	3 622	1 044
Urbain	2%	VH	4 104	1 007	3 541	480
Urbain	10%	VH	4 422	2 585	3 738	1 875
Urbain intensif ref	4,5%	VE	705	- 2 094	- 6 818	- 9 969
Urbain intensif	2%	VE	415	- 2 488	- 7 231	- 10 497
Urbain intensif	10%	VE	1 315	- 1 282	- 5 967	- 8 896
Urbain intensif ref	4,5%	VEHR	7 592	4 742	2 573	- 863
Urbain intensif	2%	VEHR	7 572	4 623	2 467	- 1 088
Urbain intensif	10%	VEHR	7 680	5 022	2 830	- 376
Urbain intensif ref	4,5%	VH	4 472	1 089	3 564	- 192
Urbain intensif	2%	VH	4 462	988	3 548	- 307
Urbain intensif	10%	VH	4 492	1 285	3 593	31

Cas d'usage	Taux	Technologie	2020	2030
Cas mixte ref	4,5%	VE	6 101	- 923
Cas mixte	2%	VE	4 664	- 2 282
Cas mixte	10%	VE	8 126	1 021
Cas mixte ref	4,5%	VEHR	9 755	7 077
Cas mixte	2%	VEHR	9 460	6 878
Cas mixte	10%	VEHR	9 711	7 374

Source : calcul CGDD

Partie 3

Éléments d'appréciation de la valeur « smart grid » des batteries de véhicule électrique

Les véhicules à batterie électrique sont susceptibles d'apporter des bénéfices additionnels à la collectivité sous la forme de services énergétiques. La valeur « *smart grid* » potentiellement dégagée pourrait compléter le modèle économique du véhicule électrique. L'exploitation de ce gisement dépendra largement des comportements des utilisateurs et des coûts de mise en œuvre mais nécessitera une gouvernance et un cadre de régulation adaptés.



Partie 3 - Compléments : éléments d'appréciation de la valeur « *smart grid* » des batteries de véhicule électrique

Le concept de « *smart grid* » fait référence aux changements induits par l'intégration des nouvelles technologies de l'information et de la communication dans le secteur électrique. Grâce à ces nouvelles technologies, la prise en compte des actions des acteurs qu'ils soient consommateurs, producteurs, fournisseurs, etc. est facilitée et leur implication dans la gestion du système électrique devient possible.

Le système électrique sera progressivement piloté de manière plus flexible, davantage décentralisée, pour faire face à des contraintes telles que l'intermittence des productions à partir de sources renouvelables telles que le solaire ou le vent dont la part dans le mix électrique est amenée à croître. Le développement des véhicules électriques représente à cet égard à la fois une contrainte et une opportunité. Il peut représenter une contrainte si la recharge des véhicules électriques est effectuée de façon non coordonnée et non pilotée, car cela peut créer des appels de puissance importants et déstabiliser l'équilibre local du réseau électrique (en particulier avec les bornes de recharge de forte puissance dites « rapides »). Il constitue une opportunité si les batteries de véhicules électriques, gérées de manière active grâce aux nouvelles technologies de communication, mettent leur capacité de stockage à contribution pour apporter de la flexibilité au système électrique. Dès lors, la gestion dynamique de la recharge des véhicules électriques peut être créatrice de valeur économique.

Le but de cette analyse est de proposer un ordre de grandeur de cette valeur « *smart grid* » potentielle des véhicules électriques. La quantification est effectuée à partir d'hypothèses simplificatrices concernant l'usage de la batterie et en s'appuyant sur la rémunération observée aujourd'hui sur les différents segments de marché. Elle ne découle pas d'une modélisation du système électrique et ne permet pas d'appréhender la valeur *smart grid* à des horizons plus lointains. En outre, il s'agit de valeurs brutes : les coûts associés au déploiement des solutions *smart grid* pour les véhicules électriques ne sont pas évalués mais simplement identifiés à la fin de cette partie.

NATURE DES SERVICES RENDUS AU SYSTÈME ÉLECTRIQUE

Préalablement à l'évaluation de la valeur des services énergétiques que peuvent rendre les batteries de véhicule électrique, il est nécessaire de rappeler les principes fondamentaux du fonctionnement du système électrique. La gestion du système électrique doit répondre à plusieurs impératifs décrits ci-dessous.

L'équilibrage de l'offre et de la demande en temps réel

La puissance injectée sur le réseau doit à chaque instant être égale à la puissance consommée (plus les pertes par effet Joule), garantissant ainsi la sécurité d'approvisionnement. Une des difficultés pour assurer cet équilibre provient de la forte variabilité de la demande, que ce soit durant la journée (pics autour de 12 h et 19 h, creux au milieu de la nuit), au cours de la semaine ou entre les saisons. La part importante de chauffage électrique en France contribue à de fortes variations de consommation et crée un aléa température du fait des risques de pics de consommation lors de vagues de froid hivernales.

Côté offre également des aléas peuvent survenir, par exemple lorsqu'un groupe de production (centrale au gaz, nucléaire, etc.) tombe subitement en panne. Il s'agit alors de compenser très rapidement la perte de production associée. Par ailleurs, la production d'électricité à partir d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques est intermittente et ne coïncide pas nécessairement avec les besoins de consommation.

Des capacités électriques sont mises en réserve (« *back up* ») pour pallier ces risques de déséquilibre entre offre et demande, que ce soit pour la gestion à court terme (en cas de perte d'un groupe de production notamment) ou à plus long terme (nécessité de « passer l'hiver »).

L'optimisation des coûts de production

Pour répondre à un niveau de demande donné à moindre coût, il convient de mobiliser les centrales en fonctionnement dont le coût marginal est le plus faible (conformément au « *merit order* »). En premier lieu la production à partir d'énergie renouvelable est mobilisée, car elle a un coût marginal quasi nul, puis le nucléaire, le charbon ou le gaz, et enfin le fioul.

La gestion des congestions sur le réseau électrique

En fonction de la localisation des sites de production et de consommation et de l'instant considéré, des flux importants d'énergie peuvent apparaître sur le réseau électrique, conduisant dans certains cas à des saturations. Des mesures palliatives doivent alors être prises : à court terme par exemple en modifiant le plan de production ; à long terme en localisant les moyens de production et de consommation de façon à soulager la contrainte, ou en renforçant le réseau électrique.

Afin de répondre à ces différents enjeux, et de coordonner l'action de chaque acteur (producteurs, consommateurs, fournisseurs, etc), la gestion du système électrique est décomposée en plusieurs séquences temporelles relativement indépendantes articulées autour de marchés ou de dispositifs régulés. La valeur économique créée par un service énergétique trouve ainsi sa rémunération, à travers un prix de marché ou un contrat régulé.

Marché de gros de l'électricité : valeur « énergie »

Le marché de gros de l'électricité est organisé autour du marché spot, qui révèle la veille pour le lendemain le prix de l'électricité pour chaque heure de la journée, par confrontation de l'offre et de la demande. Ce prix est censé refléter le coût marginal du dernier moyen de production mobilisé. Il permet de coordonner les décisions de production des différents opérateurs, et assure ainsi l'optimisation du plan de production. Le marché spot permet aux fournisseurs d'ajuster en J -1 l'équilibre entre leurs besoins prévisionnels pour satisfaire leurs clients et leurs sources d'approvisionnement (moyens de production détenus en propre, contrats d'achats de long terme, importations, etc.).

La batterie peut capter la valeur « énergie » correspondant au stockage de l'énergie, en achetant l'électricité lorsqu'elle est bon marché et en la restituant lorsqu'elle est chère.

Partie 3 - Compléments : éléments d'appréciation de la valeur « *smart grid* » des batteries de véhicule électrique

Mécanisme de capacité : valeur « capacité »

Il s'agit ici de s'assurer que le système électrique dispose de suffisamment de capacité pour « passer l'hiver », période où la sécurité d'approvisionnement est menacée. Le mécanisme de capacité en vigueur en France³³ oblige ainsi chaque fournisseur à détenir suffisamment de capacités pour satisfaire la demande de ses clients durant la période hivernale. Soit les fournisseurs détiennent en propre des capacités, soit ils s'en procurent sur le marché de capacité. Ce marché permet à un opérateur de capacité de production, de stockage ou d'effacement de consommation, après s'être fait certifier auprès du GRT, de vendre son certificat. Le montant de certificats obtenu dépend de la contribution effective des capacités à la sécurité d'approvisionnement.

La valeur « capacité » correspond à une valeur assurantielle apportée par une capacité apportant une garantie d'être disponible au bon moment. Il n'y a pas d'obligation de produire, mais d'offrir sa capacité au cas où le système en aurait besoin³⁴. La grandeur physique en jeu est la puissance, par opposition à l'énergie.

La batterie, après certification, pourrait être valorisée sur le marché de capacité.

Participation aux réserves : valeur « équilibrage court terme »

A très court terme (moins de 15 minutes avant le temps réel), de petits déséquilibres peuvent subsister entre offre et demande, du fait par exemple d'erreurs de prévision sur la consommation, ou d'aléas sur la production. Une partie des capacités de production est mise en réserve et dédiée à leur résorption. Ces capacités doivent être très réactives, que ce soit « à la hausse » pour faire face à la perte d'un groupe de production, ou « à la baisse » pour compenser un surplus de production. Elles sont pilotées de façon centralisée par le GRT et font l'objet d'un contrat rémunéré dans le cadre des « services systèmes ».

Historiquement les réserves sont essentiellement constituées de centrales nucléaires compte tenu de leur place dans le mix électrique. Depuis mi 2014, des consommateurs participent aux réserves en faisant valoir leur capacité à moduler la consommation de gros sites industriels. Il n'existe pas pour l'heure de participation de batteries mais cela pourrait s'envisager.

Valeur « réseau »

Une capacité localisée judicieusement, dans une zone de consommation mal connectée aux zones de production, peut permettre de réduire le dimensionnement du réseau électrique nécessaire pour acheminer l'électricité. Le gain résulte alors d'une économie d'investissement dans le réseau.

Ces différentes composantes de valeur sont étudiées par la suite, à l'exception de la valeur « réseau » qui est supposée négligeable³⁵.

³³ Le mécanisme de capacité est mis en place par la loi de nouvelle organisation du marché de l'électricité du 7 décembre 2010. Il est entré en vigueur fin 2015, avec pour première année de livraison 2017.

³⁴ En pratique, les situations de défaillance effectives, qui ont toujours eu lieu l'hiver durant les périodes de pointe, sont très rares. La gestion du système électrique en France vise une réalisation de ce risque tous les 10 ans.

³⁵ Le rapport *Valorisation socio-économique des réseaux électriques intelligents* de RTE (http://www.rte-france.com/sites/default/files/rei_bd_1.pdf) estime à moins de 1 k€/MW la « valeur «réseau » pour les batteries.

HYPOTHÈSES CONCERNANT LES CONDITIONS D'EXPLOITATION DE LA BATTERIE

On considère une batterie de véhicule électrique de capacité de stockage de 24 kWh. Son alimentation est assurée par une borne de 7 kW, permettant des charges (et décharges) complètes dites « accélérées » en environ 3 h 30. Les bornes de recharge standards de 2,4 kW ne permettent une charge complète qu'en 10 h seulement. Ces bornes sont supposées être équipées de systèmes de gestion dynamique centralisés, permettant de commander à distance le mode de fonctionnement (arrêt, charge, décharge).

Deux cas d'usages sont envisagés dans cette étude.

- Cas 1 : batterie totalement « dédiée » au système électrique, sans contrainte liée à d'autres usages

Il s'agit ici d'étudier la valeur *smart grid* de la batterie seule, utilisée de façon exclusive au service du système électrique. Cette analyse présente l'intérêt de fournir un majorant pour la valeur du service rendu par la batterie de véhicule électrique. La comparaison des deux cas permet en outre d'identifier la valeur associée à la contrainte d'usage pour la batterie de véhicule électrique. Par ailleurs, un usage dédié peut constituer une « seconde vie » pour les batteries de véhicule électrique.

Il est supposé que la batterie est disponible 100 % du temps, et peut fonctionner à la charge comme à la décharge, comme un outil de stockage classique. Le rendement supposé de la batterie est de 90 %. Toutefois, le rendement énergétique du dispositif batterie-borne de recharge est inférieur. Il faut en effet tenir compte de plusieurs composantes physiques pour lesquelles il y a des pertes. Ainsi pour la charge il faut considérer le chargeur (90 à 95 %), les auxiliaires (90 à 100 %) et pour la décharge les convertisseurs (90 à 95 %). Au final on obtient un rendement compris entre 65 et 80 % : on retiendra 75 %³⁶.

- Cas 2 : batterie de véhicule électrique

Dans le cas d'une batterie de véhicule, un certain nombre de contraintes doit être pris en compte. Tout d'abord le véhicule n'est connecté au réseau électrique qu'une partie du temps. Ensuite il semble peu réaliste d'utiliser la batterie comme un moyen de stockage classique : l'énergie emmagasinée dans la batterie sert en effet en priorité à propulser le véhicule.

Des éléments concernant l'usage des véhicules électriques ont été délivrés par un rapport récent de la commission européenne intitulé *Individual mobility: From conventional to electric cars*³⁷. Les données de cette étude sont issues du projet *Green eMotion project* qui a réalisé le suivi, sur plus de deux années (mars 2011 à décembre 2013), d'environ 400 véhicules (dont 350 véhicules tout électrique et 50 hybrides rechargeables) utilisés dans des villes de 6 régions européennes (dont Copenhague, Barcelone, Guipúzcoa, Madrid, Dublin, Malmö, Florence, Modène). On peut en tirer les éléments suivants :

- en moyenne la distance journalière parcourue avec un véhicule électrique est 32,5 km ;

³⁶ Une hypothèse sur le rendement sera nécessaire pour calculer la valeur associée au stockage.

³⁷ http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC97690/eur_27468_en_online_v3.pdf

Partie 3 - Compléments : éléments d'appréciation de la valeur « *smart grid* » des batteries de véhicule électrique

- en moyenne le temps de déplacement avec un véhicule électrique est d'une heure par jour, pour 4,6 voyages de 12 minutes ;
- 1,4 recharge par jour est effectuée en moyenne et, dans 70 % des cas, une recharge par jour ;
- le nombre de véhicules connectés est à peu près homogène tout au long de la journée, avec un nombre plus important en fin de journée à 21 h et un point bas le matin à 7 h (rapport de 1 à quasiment 2 entre ces deux points) ;
- la puissance soutirée sur le réseau électrique par l'ensemble des véhicules électriques est à peu près constante de 9 h à minuit ; un point bas apparaît à 7 h ;
- le taux de charge de la batterie en début de période de recharge est de 62 % en moyenne, et de 80 % en fin de recharge ;
- en début de charge, seulement 4 % des batteries environ sont chargées à moins de 20 % ;
- les durées de charge varient fortement.

Ces informations relatent une certaine hétérogénéité dans l'usage des véhicules. Il semble toutefois que le schéma dominant corresponde à une charge par jour sur le lieu de destination (travail, course, etc) étant donné le nombre important de véhicules connectés en journée. Le rapport ne permet pas de déterminer quelle est la durée moyenne de connexion au réseau électrique par véhicule, qui est probablement relativement faible (peut-être la moitié du temps, voire moins, étant donné la faible durée moyenne de stationnement de 3,3 heures). On retiendra un effet de lissage des comportements important sur la journée, reflété par la forme assez plate de la distribution de la part des véhicules connectés au réseau.

En s'inspirant de ces informations, il est proposé de construire des hypothèses de travail qui correspondraient à un comportement moyen. À la différence de la situation que semble décrire le projet *Green eMotion*, il est supposé que dans les scénarios de déploiement massif des véhicules électriques, des bornes de recharges sont disponibles à la fois au domicile et sur les lieux de destination en journée. On suppose alors que :

- la batterie est systématiquement rechargée la nuit au domicile (21 h-7 h) ;
- en journée (7 h-21 h), la moitié seulement des véhicules sont connectés à une borne de recharge (en dehors de la période de 1 h cumulée où ils sont en circulation).

Le but ici est d'appréhender, même de façon simplifiée, le pourcentage de véhicules connectés au réseau qui se déduit comme suit :

- 100 % de 21 h à 7 h,
- 46 % de 7 h à 21 h.

Ces hypothèses constituent probablement un majorant du taux de connexion au réseau électrique.

Partie 3 - Compléments : éléments d'appréciation de la valeur « *smart grid* » des batteries de véhicule électrique

VALEURS DES SERVICES RENDUS AU SYSTÈME ÉLECTRIQUE

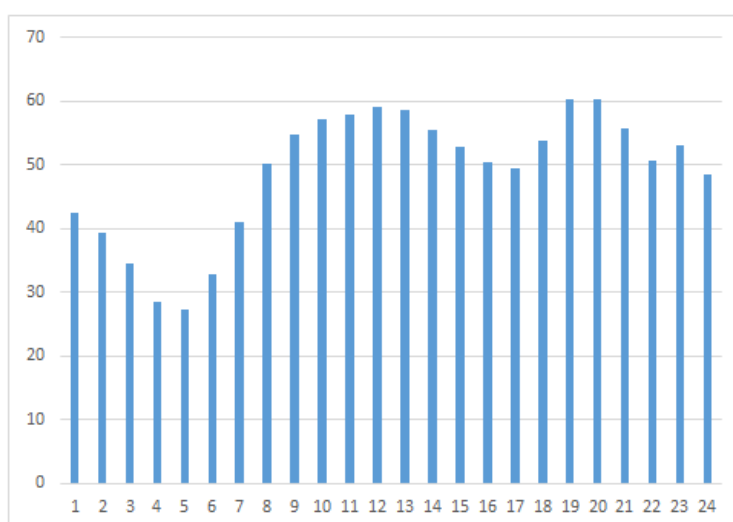
Pour chacun des trois blocs de valeurs « énergie », « capacité » et « équilibrage court terme », une estimation chiffrée est effectuée dans les deux cas d'études mentionnés : batterie dédiée et batterie de véhicule électrique.

Valeur « énergie »

Cas 1 : batterie « dédiée »

Il s'agit ici d'évaluer la valeur « stockage » apportée par la batterie. Cette valeur dépend directement des variations du prix horaire de l'électricité. Ce prix présente de fortes fluctuations journalières, reflétant les cycles de consommation. Il existe également des variations saisonnières (les prix sont en moyenne plus haut l'hiver que l'été) mais moins marquées. En outre la batterie n'a pas vocation à faire de l'arbitrage inter saisonnier, car elle pâtit de taux de pertes accrus pour des stockages de longue durée, et sa faible capacité de stockage ne permet pas d'espérer un gain significatif. En conséquence, on estime la valeur économique créée par une batterie qui ferait un stockage/déstockage quotidien. Afin de simplifier les calculs (les prix spots étant établis au pas horaire), il est supposé que la batterie peut se charger ou se décharger en 3 h (au lieu de 3 h 30). Cette hypothèse conduit à surestimer la valeur « énergie ».

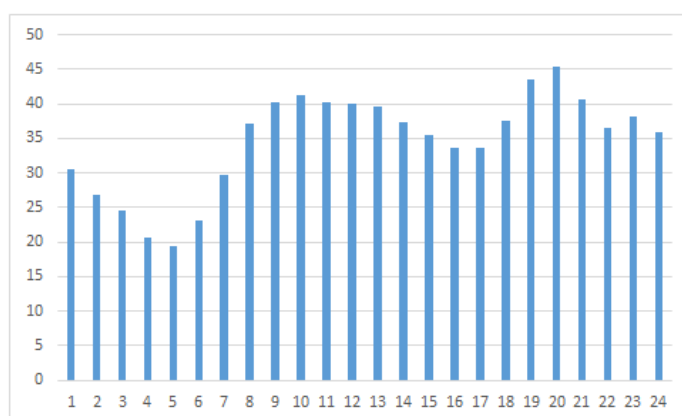
Graphique 28 - Prix spot horaire moyen journalier pour l'année 2011 (€/MWh)



Source : calcul EPEX SPOT 2011

Partie 3 - Compléments : éléments d'appréciation de la valeur « *smart grid* » des batteries de véhicule électrique

Graphique 29 - Prix spot horaire moyen journalier pour l'année 2014 (€/MWh)



Source : EPEX SPOT 2014

À titre illustratif, les prix spot horaires moyens sont donnés pour les années 2011 et 2014. Le tableau suivant résume les variables clefs.

Tableau 30 - Prix spot moyen en 2011 et 2014 (en €/MWh)

Prix	2011	2014
Prix moyen sur l'année	48	34
Prix moyen durant les 3h de prix le + bas	29	21
Prix moyen durant les 3h de prix le + élevé	60	43

Source : calcul CGDD

Sur la base d'une charge chaque nuit durant les trois heures de prix moyen le plus bas, et d'une décharge durant les trois heures de prix moyen le plus élevé la journée, pour une batterie de 24 kWh, si l'on reprend les hypothèses de prix observés en 2011 et 2014, avec un rendement énergétique de 75 %, la valeur créée est de respectivement 140 € et 100 €³⁸. On retiendra comme ordre de grandeur la valeur pour 2011 de 140 € **par an**.

Le rendement de la batterie influence sensiblement les résultats. Par exemple pour l'année 2011 :

- avec un rendement énergétique de 80 %, le gain augmente à 165 €/an ;
- avec un rendement énergétique de 65 %, le gain baisse à 90 €/an.

³⁸ Dans le premier cas : $24 \text{ kWh} * 75 \% * 60 \text{ €/MWh} - 24 \text{ kWh} * 29 \text{ €/MWh} = 0,38 \text{ € par jour}$.

Partie 3 - Compléments : éléments d'appréciation de la valeur « *smart grid* » des batteries de véhicule électrique

Cas 2 : batterie de véhicule électrique

L'utilisation de la batterie en mode stockage/déstockage sur le réseau n'est pas envisageable : l'énergie est utilisée pour le véhicule. En revanche il existe une latitude pour placer la recharge de la batterie au moment où les prix de l'électricité sont les plus bas³⁹. On suppose ici que seule la recharge effectuée pendant la nuit est propice à une telle optimisation car suffisamment longue.

On compare une situation de recharge passive lissée sur toute la nuit, comme c'est nécessairement le cas avec une borne de recharge lente (10 h de temps de charge), à une situation de recharge active durant les trois heures⁴⁰ pendant lesquelles le prix est le plus bas.

Tableau 31 - Prix spot moyen en 2011 et 2014 (en €/MWh)

Prix	2011	2014
Prix moyen durant les 3h de prix le + bas sur la plage 21h-7h	29	21
Prix moyen sur la plage 21h-7h	41	28

Source : calcul CGDD

Si l'on suppose un écart de prix moyen de 7 €/MWh (ce qui correspond à l'écart de prix observé en 2014), on obtient un gain de l'ordre de 65 €/an⁴¹. Pour l'année 2011, on obtient un gain de **110 €**, valeur que l'on retiendra.

Valeur « capacité »

Il est proposé de calculer la valeur capacitaire (en kW) de la batterie conformément aux règles du mécanisme de capacité⁴². Les modalités de calcul tiennent compte en premier lieu de la puissance disponible pendant la « période de pointe »⁴³ pour l'année de livraison considérée. Les jours concernés sont compris entre le 1^{er} novembre et le 31 mars, et sont signalés par le GRT sur critère de tension sur l'équilibre offre demande. Ils sont au nombre de 10 à 25. Les plages horaires prises en compte d'un jour signalé sont les heures de la plage [7 h 00 ; 15 h 00] et [18 h 00 ; 20 h 00].

S'agissant des capacités de stockage, le nombre d'heures d'activation à pleine puissance entre également en ligne de compte à travers un coefficient d'abattement. L'idée sous-jacente étant que si une capacité de stockage ne peut produire à pleine puissance qu'un court laps de temps, elle contribuera moins à réduire le risque de défaillance qu'une capacité pouvant produire pendant plusieurs heures voire plusieurs jours. Cela résulte de la nature du risque de défaillance en France qui est lié à l'occurrence de vagues de froid qui durent en général plusieurs jours.

³⁹ Ce type d'optimisation inspire le modèle de l'asservissement des ballons d'eau chaude aux « heures creuses » tarifaires.

⁴⁰ Comme précédemment, les prix étant fixés au pas horaire on considère une durée de 3 h et non pas de 3 h 30.

⁴¹ 24 kWh * 7 €/MWh = 0,17 € par jour.

⁴² http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/regles_Mecanisme_de_Capacite_def2.pdf

⁴³ Appelée PP2 dans les règles du mécanisme.

Partie 3 - Compléments : éléments d'appréciation de la valeur « *smart grid* » des batteries de véhicule électrique

Le coefficient d'abattement dépend du nombre d'heures de production à pleine puissance, selon l'abaque suivant⁴⁴.

Tableau 32 - Coefficient d'abattement du niveau de capacité certifié prévu par les règles du mécanisme de capacité

Heures d'activation pleine puissance	½ heure	1h	2h	3h	4h	8h	10h et +
Coefficient d'abattement	13%	25%	46%	59%	70%	95%	100%

Source : RTE

Enfin il est nécessaire de formuler une hypothèse concernant le prix de la capacité. Il est proposé de retenir la valeur plafond prévu par le mécanisme de capacité à savoir 40 €/kW.

Cas 1 : batterie « dédiée »

Conformément aux règles du mécanisme de capacité, le niveau de capacité certifié est déterminé par le produit de deux facteurs :

- la puissance disponible pendant la période de pointe :
Dans le cas de la batterie dédiée, la puissance disponible correspond à la puissance de la borne de recharge, 7 kW, étant donné que la batterie est connectée et opérationnelle en permanence.
- le coefficient d'abattement :
La batterie de 24 kWh est supposée pleinement chargée (durant la nuit). La durée d'activation à pleine puissance est de 3 h 30. Le coefficient d'abattement vaut environ 65 %.

On obtient donc une puissance certifiée de 4,6 kW.

Dans ces conditions, la valeur capacitaire de la batterie est de 180 €/an.

Cas 2 : batterie de véhicule électrique

Un calcul similaire au précédent est effectué en tenant compte des contraintes spécifiques associées à l'usage de la batterie de véhicule électrique :

- puissance disponible pendant les périodes de pointe :
La disponibilité de la batterie n'est que de 46 % sur la plage 7 h - 21 h qui englobe les plages de la période de pointe définie par le mécanisme de capacité.

⁴⁴ Cf. page 95 des règles du mécanisme de capacité : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/regles_Mecanisme_de_Capacite_def2.pdf

Partie 3 - Compléments : éléments d'appréciation de la valeur « *smart grid* » des batteries de véhicule électrique

- coefficient d'abattement :

Contrairement au cas 1, la batterie n'est pas nécessairement chargée à 100 % lors périodes de pointe. Il est supposé ici que le taux de charge est de 60 % correspondant au taux de charge minimal mentionné dans l'étude européenne citée précédemment. Cela représente environ 2 h de production à pleine puissance. On prendra un coefficient d'abattement de 46 % au lieu de 65 % appliqué précédemment.

Au final, on retiendra donc simplement une valeur capacitaire de 18 % (soit 46 %*46 %) de la puissance de la borne de recharge de 7 kW, soit 1,5 kW. Multiplié par un prix de la capacité de 40 €/kW, on obtient une valeur 3 fois inférieure à la valeur précédente, à savoir **60 € par an**.

Valeur « équilibrage court terme »

Il existe deux types de réserves pour les « services systèmes » :

- les réserves primaires⁴⁵

Il s'agit de moyens destinés au « réglage fréquence » appelés à réagir instantanément ou en quelques secondes, dont les réponses sont automatiques. Les durées de sollicitations, pour un sens donné (à la hausse ou à la baisse), sont très brèves : quelques minutes en moyenne et au maximum 3 ou 4 heures. Il est très rare que les puissances soient sollicitées à 100 %. Sur la durée, le bilan en énergie est nul : l'énergie appelée à la hausse compense celle appelée à la baisse.

- les réserves secondaires⁴⁶

Il s'agit des moyens mobilisés pour reconstituer les réserves primaires (et neutraliser les échanges aux frontières), qui interviennent à un horizon de quelque 30 secondes. Les durées de sollicitations, pour un sens donné (à la hausse ou à la baisse) sont plus longues : autour d'une demi-heure en moyenne et au maximum 6 ou 7 heures. La sollicitation en énergie et en puissance est plus importante que la réserve primaire, même si, là encore, sur la durée, le bilan est quasi nul.

Il semble envisageable techniquement de fournir les deux types de réserve avec une batterie Li-ion connectée à une borne de recharge. Toutefois la réserve primaire est appelée très fréquemment mais peu intensément, alors que la réserve secondaire est appelée pour des durées et des puissances plus importantes, ce qui est plus contraignant pour une batterie de véhicule électrique. Il est supposé ici qu'une batterie Li-ion est en mesure de participer pleinement aux réserves primaires, à la hausse et à la baisse, si elle dispose d'un stock d'énergie correspondant à une heure de production pleine puissance.

Il convient toutefois de noter que la substitution complète du nucléaire (ou des centrales à gaz ou au charbon) par des moyens de production « électronique de puissance » de type batterie pour la réserve de puissance n'est pas envisageable. En effet, les moyens dits « inertiels » sont nécessaires à la stabilité du réseau.

⁴⁵ 600 MW environ pour la France

⁴⁶ Le besoin varie d'une heure à l'autre, mais le volume minimal de réserve secondaire en France est de 500 MW.

Partie 3 - Compléments : éléments d'appréciation de la valeur « *smart grid* » des batteries de véhicule électrique

La rémunération pour la participation aux services systèmes est fixée dans un cadre régulé. Les règles des « services systèmes »⁴⁷ prévoient un prix forfaitaire de 9,06 €/MW et par demi-heure, pour une réserve symétrique (réserve à la hausse et à la baisse), qu'elle soit primaire ou secondaire. Cela représente environ 160 k€/MW sur l'année. Les énergies activées (à la hausse ou à la baisse) sont calculées et rémunérées, par 1/2 h, au prix forfaitaire de l'énergie de 10,43 € par MWh. Le système étant « centré » (à peu près autant de hausses que de baisses nécessaires), la rémunération à la hausse est compensée peu ou prou par le paiement à la baisse (d'autant plus vrai pour la réserve primaire). Aussi cette composante de rémunération peut être négligée en première approximation.

Cas 1 : batterie « dédiée »

La capacité de stockage de la batterie permet de délivrer la pleine puissance (7 kW) pendant 3 h 30. La batterie est donc supposée apte pour participer à la réserve primaire à hauteur de 7 kW. Compte tenu de la rémunération forfaitaire citée plus haut, cela se traduit par une valeur de **1 120 € par an**.

Cas 2 : batterie de véhicule électrique

Si l'on suppose, conformément à ce que suggèrent les résultats de l'étude de la commission européenne⁴⁸, que la batterie est chargée en moyenne à 60 % en début de recharge, soit l'équivalent de 2 h de production équivalent pleine puissance, alors elle est capable de participer pleinement à la réserve primaire. Néanmoins, le bilan en énergie de la participation à la réserve étant nul dans la durée, la recharge de la batterie ne pourrait pas s'effectuer. On suppose donc que seulement 50 % de la puissance du chargeur participe à la réserve. L'autre moitié de la puissance est utilisée pour recharger la batterie.

Par ailleurs, le taux de connexion du véhicule au réseau électrique réduit la puissance disponible. Les hypothèses (100 % de 21 h à 7 h ; 46 % de 7 h à 21 h) se traduisent par un taux moyen de connexion sur une journée de 55 %.

On obtient *in fine* une fraction moyenne de capacité participant à la réserve de 22,5 %, soit une puissance de 1,6 kW. Compte tenu de la rémunération forfaitaire citée plus haut, cela se traduit par une valeur de **250 € par an**, soit plus de quatre fois moins que dans le cas 1.

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Les analyses précédentes ont permis de donner des éléments de quantification de la valeur du service qu'apporte une batterie au système électrique. Cette valeur peut être calculée pour une batterie dédiée au système électrique, ou pour une batterie de véhicule électrique dont l'usage implique un temps de connexion au réseau plus limité et des contraintes liées à la nécessaire recharge de la batterie.

⁴⁷ http://clients.rte-france.com/htm/fr/offre/telecharge/20140101_Regles_SSY_approuvees.pdf

⁴⁸ *Individual mobility: From conventional to electric cars*

Partie 3 - Compléments : éléments d'appréciation de la valeur « *smart grid* » des batteries de véhicule électrique

Tableau 33 - Valeurs *smart grid* potentielles d'une batterie de 24 kWh connectée à une borne de recharge de 7 kW selon dans deux cas

Cas	Valeur « énergie »	Valeur « capacité »	Valeur « équilibrage court terme »	Coût annualisé de la batterie (**)
Cas 1 : Batterie 100% dédiée au réseau électrique	140 €/an	180 €/an	1120 €/an	700 €/an pour une batterie achetée en 2020
Cas 2 : Batterie de véhicule électrique	110 €/an (*)	60 €/an	250 €/an	350 €/an pour une batterie achetée en 2030

La valeur équilibrage court terme est exclusive des deux autres.

(*) Il s'agit ici de l'économie réalisée par le placement de la recharge de nuit aux heures où le prix est le plus bas, par rapport à une situation où la charge est effectuée uniformément sur toute la nuit.

(**) Il s'agit de l'annuité dont le versement sur la durée de vie de la batterie permet de rembourser et de rémunérer (au taux de 4,5 %) le coût d'achat initial.

La valeur « équilibrage court terme » apparaît comme prépondérante. Dans le cas de la batterie dédiée, la valeur dégagée est supérieure au coût annualisé de la batterie, assurant ainsi la rentabilité de cette solution comme moyen pour contribuer aux « services systèmes ». Si ce résultat doit être pris avec précaution, il est intéressant de noter que des cas d'utilisation de batterie pour des services d'équilibrage court terme du réseau électrique existent déjà dans certains pays. L'installation à partir de batteries de McHenry aux États-Unis permet de fournir près de 20 MW de puissance (40 MW de capacité dynamique) et de piloter une réserve d'énergie pour stabiliser la fréquence du réseau électrique au niveau local⁴⁹. À l'été 2016, lors d'un appel d'offres pour des réserves d'équilibrage court terme, le gestionnaire de réseau britannique a retenu pour la totalité⁵⁰ du besoin exprimé des solutions de stockage par batterie.

Concernant la batterie utilisée dans un véhicule électrique, le potentiel de valeur dégagé par la participation aux « services systèmes » est au moins divisé par quatre par rapport à un usage dédié, mais demeure significatif. Un revenu de 250 €/an sur les 16 ans de durée de vie du véhicule représente un montant actualisé de 3 000 €, soit plus de la moitié du coût de revient de la batterie en analyse TCO. Surtout, une seconde vie peut être offerte aux batteries lors de leur renouvellement, laissant une valeur résiduelle importante⁵¹.

Pour rappel, ces valeurs ont été établies à partir d'hypothèses optimistes, notamment concernant le taux de connexion des véhicules électriques, mais également en regard des prix considérés pour évaluer la valeur énergie ou capacité. Les prix et rémunérations pris en compte sont fondés sur des données récentes, qui pourraient évoluer sensiblement à moyen ou long terme. En

⁴⁹ L'installation à partir de batteries de McHenry aux États-Unis permet de fournir près de 20 MW de puissance (40 MW de capacité dynamique) et de piloter une réserve d'énergie pour stabiliser la fréquence du réseau électrique au niveau local.

⁵⁰ Capacité totale de 201 MW pour un montant de 66 millions de livres (77 millions d'euros), pour un contrat d'une durée de quatre ans.

⁵¹ Des progrès significatifs semblent avoir été effectués depuis quelques années concernant le nombre de cycles réalisables par une batterie. On aurait aujourd'hui entre 3 000 et 5 000 cycles de charges décharges (alors qu'on en avait 1 500 à 2 000 il y a quelques années).

Partie 3 - Compléments : éléments d'appréciation de la valeur « *smart grid* » des batteries de véhicule électrique

particulier, la possibilité pour les batteries de participer aux réserves primaires trouvera une limite. En supposant que chaque batterie de véhicule offre en moyenne sur l'année 1 kW (valeur inférieure à celle de 1,6 kW estimée ici) pour la participation à la réserve, un million de véhicules totalise 1 000 MW, alors que le besoin n'est que de 600 MW et qu'il n'est pas envisageable de constituer la réserve uniquement à partir de moyens de production « électronique de puissance » telles que les batteries.

Par ailleurs, il a été supposé qu'aucun obstacle technique ne venait gêner la réalisation effective des services énergétiques considérés. En particulier, l'utilisation d'une batterie comme moyen de stockage journalier, avec de fortes amplitudes de charge / décharge, ou la participation aux « services systèmes », impliquant des sollicitations très fréquentes, pourrait accélérer l'usure de la batterie et éventuellement en détériorer la performance ou la durée de vie. Il convient enfin de rappeler que la valeur estimée ici est une valeur brute : la réalisation des services associés entraînera des coûts qui sont identifiés dans la partie suivante.

CONDITIONS ET COÛTS DE RÉALISATION DU POTENTIEL DE VALEUR *SMART GRID*

Plusieurs facteurs conditionnent la réalisation effective des services énergétiques potentiellement rendus par la batterie de véhicule électrique.

Contrainte opérationnelle

Le véhicule ne pourra offrir la flexibilité de sa batterie au système électrique que s'il est connecté au réseau, qui plus est à travers des bornes de recharges performantes et communicantes. Pour atteindre le taux de connexion supposé dans cette analyse, il sera probablement nécessaire de disposer d'un maillage très dense de bornes de recharge sur le territoire.

Concernant la connectivité des bornes, il semble que la normalisation en vigueur⁵² rende possible sans surcoût prohibitif l'installation de dispositifs de pilotage à distance qui pourraient passer par deux canaux : le réseau électrique à travers la borne de recharge ou le véhicule directement (qui commanderait la borne).

Acceptabilité / comportement

Dans la phase de déploiement du véhicule électrique, la recharge du véhicule constituera probablement pour l'utilisateur novice une préoccupation importante du fait de l'autonomie limitée du véhicule comparativement au véhicule thermique. Il n'est toutefois pas certain que l'attitude consistant à rechercher systématiquement une borne de recharge lors des déplacements perdure. En effet, il est possible que l'utilisateur, de plus en plus confiant dans la technologie et dans le fait que l'autonomie du véhicule est suffisante pour son besoin quotidien, se contente d'une recharge par jour, à domicile ou au travail.

⁵² La normalisation (fixée niveau international) joue un rôle important et vise une généralisation de la connectivité des bornes de recharge. Concernant l'électricité il s'agit des normes « CEI » (IEC 61851 pour le véhicule électrique, en particulier 90-8) ; concernant le véhicule il s'agit des normes ISO. Les bornes de recharges communiquent dès aujourd'hui dans les deux sens avec le véhicule électrique à travers le signal « PWM ».

Coût de transaction / accès aux marchés de l'électricité

L'ensemble des services énergétiques identifiés relève de pratiques de professionnels du secteur électrique. Il n'est pas envisageable qu'un particulier intervienne sur les marchés de l'énergie, de la capacité ou contractualise avec le GRT : les coûts de transaction sont trop importants et les quantités d'énergie en jeu ne vérifient pas les seuils minima pour les échanges. La valorisation du potentiel *smart grid* des véhicules électrique suppose le recours à un intermédiaire « agrégateur », qui opérerait une massification. Ce type de schéma existe déjà par exemple pour l'effacement de consommation électrique, à travers l'activation à distance de boîtiers installés chez les clients permettant de contrôler leur consommation. Au-delà des économies d'échelle, la massification permet également de mutualiser les moyens et d'accroître la fiabilité du service rendu.

Concernant les batteries de véhicules électriques, *a priori* plusieurs schémas de massification peuvent être considérés. On peut imaginer par exemple la gestion d'une flotte de véhicules (sans nécessité d'en être propriétaire), à travers un système de pilotage à distance de la recharge du véhicule. Ce schéma pourrait convenir à un vendeur de véhicules électriques qui offrirait conjointement un service énergétique, ou à un énergéticien. Une autre solution pourrait passer par le contrôle d'un réseau de bornes de recharge : chaque véhicule utilisant une des bornes du réseau se soumettrait aux exigences de participation à des services énergétiques, éventuellement moyennant rémunération.

Cadre réglementaire

La valorisation de la flexibilité apportée par une batterie mettra en jeu plusieurs acteurs : l'utilisateur du véhicule, le fournisseur d'énergie qui alimente la borne de recharge, l'agrégateur. Elle nécessitera la définition d'un cadre contractuel spécifique notamment si l'agrégateur n'est pas le fournisseur d'énergie (ce qui est probable pour la recharge à domicile). En effet la gestion active de la recharge du véhicule, en modifiant le profil de consommation d'électricité, aura un impact sur le montant de la facture réglée au fournisseur. Elle réduira en outre la capacité du fournisseur à prévoir la consommation de son client, mettant à mal sa responsabilité en termes d'équilibrage en énergie de son portefeuille de clients. Par ailleurs, pour que l'agrégateur puisse effectivement valoriser des services énergétiques sur les marchés, il sera nécessaire d'identifier précisément quelles sont les quantités d'énergie en jeu. Ces blocs d'énergies seront alors transférés du fournisseur d'énergie vers l'agrégateur. Cette identification se heurtera à la définition d'un scénario contrefactuel : quelle aurait été la consommation du client sans l'intervention de l'agrégateur ? Par ailleurs se posera la question de la compensation financière du fournisseur.

Les schémas de régulation envisageables et leur coût de mise en œuvre dépendront des possibilités techniques relatives à la mesure de l'électricité consommée par la borne de recharge.

Partie 3 - Compléments : éléments d'appréciation de la valeur « *smart grid* » des batteries de véhicule électrique

En conclusion, il apparaît que si la valeur potentielle associée aux services énergétiques que peuvent rendre les batteries de véhicule électrique est élevée, sa mobilisation se heurtera à des freins et entraînera des coûts. Par ailleurs le gisement de valeur est probablement limité, du fait que le besoin en réserve pour l'équilibrage court terme est inférieur au potentiel que pourrait offrir le parc de véhicules électriques aux horizons 2025 ou 2030. Il n'en reste pas moins qu'il semble exister une fenêtre d'opportunité, et que ces nouveaux services pourraient apporter une valeur additionnelle venant renforcer le modèle économique du véhicule électrique au moment où il en a le plus besoin c'est-à-dire lors du décollage de la filière.

Annexes

Bilans détaillés

Sources des émissions de polluants atmosphériques



Annexes

Annexe 1 - Bilans détaillés

Cas urbains 2020

Bilan en matière d'externalités

Gain environnemental	Urbain dense				Urbain très dense			
	Total	dont CO2	dont pollution locale	dont bruit	Total	dont CO2	dont pollution locale	dont bruit
VE vs VP essence	1 455	1 525	-517	446	5 221	1 883	659	2 679
VEHR essence vs VP essence	2 231	1 592	240	398	5 404	1 925	1 068	2 411
VEH essence vs VP essence	663	411	162	89	2 123	723	596	804

Surcoût pour le consommateur ou l'utilisateur (TCO)

Surcoût TTC	Urbain dense					Urbain très dense				
	Total	dont achat véhicule + batterie	dont infra structure	dont entretien assurance	dont énergie	Total	dont achat véhicule + batterie	dont infra structure	dont entretien assurance	dont énergie
VE vs VP essence	-2 499	8 739	2 675	-1 937	-11 977	-5 456	8 739	2 675	-1 937	-14 933
VEHR essence vs VP essence	7 839	8 224	2 675	2 934	-4 994	6 131	8 224	2 675	2 934	-6 702
VEH essence vs VP essence	4 236	4 700	0	2 934	-3 397	1 651	4 700	0	2 934	-5 983

Bilan fiscal pour l'État

Impact recettes fiscales (hors TVA)	Urbain dense				Urbain très dense			
	Total	dont composante carbone de la TICPE	dont TICPE hors composante carbone	dont taxe électricité (TCFE)	Total	dont composante carbone de la TICPE	dont TICPE hors composante carbone	dont taxe électricité (TCFE)
VE vs VP essence	-6 799	-1 698	-4 733	-368	-7 918	-1 993	-5 557	-368
VEHR essence vs VP essence	-7 067	-1 518	-4 219	-330	-8 126	-1 794	-5 002	-331
VEH essence vs VP essence	-1 286	-340	-947	0	-2 265	-598	-1 667	0

Surcoût en termes socio-économiques

Bilan socio-économique (surcoût, HTT)	Urbain dense						Urbain très dense					
	Total	dont achat/ batterie/ infrastructure	dont entretien & assurance	dont énergie (hors TT)	dont externalités environnementales	dont COFP	Total	dont achat/ batterie/ infrastructure	dont entretien & assurance	dont énergie (hors TT)	dont externalités environnementales	dont COFP
VE	4 201	9 512	-1 614	-3 602	-1 455	1 360	-734	9 512	-1 614	-4 995	-5 221	1 584
VEHR	8 243	9 083	2 445	-2 474	-2 231	1 421	3 260	9 083	2 445	-4 496	-5 404	1 632
VEH essence vs VP essence	4 355	3 917	2 445	-1 601	-663	257	1 871	3 917	2 445	-2 820	-2 123	453

Annexes

Cas urbain 2030

Bilan en matière d'externalités

Gain environnemental	Urbain dense				Urbain très dense			
	Total	dont CO2	dont pollution locale	dont bruit	Total	dont CO2	dont pollution locale	dont bruit
VE vs VP essence	1 793	1 866	-571	498	6 067	2 324	757	2 987
VEHR essence vs VP essence	2 761	2 043	274	444	6 371	2 471	1 212	2 688
VEH essence vs VP essence	908	526	183	100	2 495	927	673	896

Bilan pour le consommateur ou l'utilisateur (TCO)

Surcoût TTC	Urbain dense					Urbain très dense				
	Total	dont achat véhicule + batterie	dont infrastructure	dont entretien assurance	dont énergie	Total	dont achat véhicule + batterie	dont infrastructure	dont entretien assurance	dont énergie
VE vs VP essence	-6 798	4 088	2 675	-1 925	-11 637	-9 745	4 088	2 675	-1 925	-14 584
VEHR essence vs VP essence	4 910	5 349	2 675	3 008	-5 122	3 123	5 349	2 675	3 008	-6 909
VEH essence vs VP essence	3 622	4 000	0	3 008	-3 386	1 044	4 000	0	3 008	-5 964

Bilan fiscal pour l'État

Impact recettes fiscales (hors TVA)	Urbain dense				Urbain très dense			
	Total	dont composante carbone de la TICPE	dont TICPE hors composante carbone	dont taxe électricité (TCFE)	Total	dont TC	dont TICPE hors composante carbone	dont taxe électricité (TCFE)
VE vs VP essence	-6 416	-2 174	-3 775	-467	-7 452	-2 553	-4 432	-467
VEHR essence vs VP essence	-6 725	-1 943	-3 365	-416	-7 707	-2 298	-3 989	-420
VEH essence vs VP essence	-1 190	-435	-755	0	-2 095	-766	-1 330	0

Bilan socio-économique

Bilan socio-économique (surcoût, HTT)	Urbain dense						Urbain très dense					
	Total	dont achat/ batterie/ infrastructure	dont entretien & assurance	dont énergie (hors TT)	dont externalités environnementales	dont COFP	Total	dont achat/ batterie/ infrastructure	dont entretien & assurance	dont énergie (hors TT)	dont externalités environnementales	dont COFP
VE	-268	5 636	-1 604	-3 791	-1 793	1 283	-5 819	5 636	-1 604	-5 275	-6 067	1 490
VEHR	5 186	6 687	2 507	-2 599	-2 761	1 354	-375	6 687	2 507	-4 747	-6 371	1 550
VEH	3 565	3 333	2 507	-1 705	-809	238	762	3 333	2 507	-3 002	-2 495	419

Annexes

Cas urbain intensif 2020

Bilan en matière d'externalités

Gain environnemental	Urbain dense				Urbain très dense			
	Total	dont CO2	dont pollution locale	dont bruit	Total	dont CO2	dont pollution locale	dont bruit
VE vs VP essence	2 012	1 750	-353	615	7 087	2 136	1 262	3 689
VEHR essence vs VP essence	2 405	1 556	357	492	7 022	2 112	1 590	3 320
VEH essence vs VP essence	790	443	224	123	2 709	781	821	1 107

Bilan pour le consommateur ou l'utilisateur (TCO)

Surcoût TTC	Urbain dense					Urbain très dense				
	Total	dont achat véhicule + batterie	dont infra-structure	dont entretien assurance	dont énergie	Total	dont achat véhicule + batterie	dont infra-structure	dont entretien assurance	dont énergie
VE vs VP essence	45	10 627	759	-2 320	-9 021	-2 754	10 627	759	-2 320	-11 820
VEHR essence vs VP essence	8 252	8 847	759	3 649	-4 002	5 402	8 847	759	3 649	-6 853
VEH essence vs VP essence	5 132	4 700	0	3 649	-3 216	1 749	4 700	0	3 649	-5 664

Bilan fiscal pour L'État

Impact recettes fiscales (hors TVA)	Urbain dense				Urbain très dense			
	Total	dont composante carbone de la TICPE	dont TICPE hors composante carbone	dont taxe électricité (TCFE)	Total	dont composante carbone de la TICPE	dont TICPE hors composante carbone	dont taxe électricité (TCFE)
VE vs VP essence	-4 964	-1 832	-2 876	-256	-5 784	-2 151	-3 377	-256
VEHR essence vs VP essence	-4 971	-1 465	-2 301	-205	-6 205	-1 935	-3 039	-231
VEH essence vs VP essence	-942	-366	-575	0	-2 593	-645	-1 013	0

Bilan socio-économique

Bilan socio-économique (surcoût, HTT)	Urbain dense						Urbain très dense					
	Total	dont achat/ batterie/ infrastructure	dont entretien & assurance	dont énergie (hors TT)	dont externalités environnementales	dont COFP	Total	dont achat/ batterie/ infrastructure	dont entretien & assurance	dont énergie (hors TT)	dont externalités environnementales	dont COFP
VE	3 515	9 488	-1 933	-3 021	-2 012	993	-2 967	9 488	-1 933	-4 587	-7 091	1 157
VEHR	7 227	8 005	3 041	-2 417	-2 405	1 004	1 141	8 005	3 041	-4 129	-7 022	1 246
VEH	4 556	3 917	3 041	-1 800	-790	188	1 598	3 917	3 041	-3 170	-2 709	519

Annexes

Cas urbain intensif 2030

Bilan en matière d'externalités

Gain environnemental	Urbain dense				Urbain très dense			
	Total	dont CO2	dont pollution locale	dont bruit	Total	dont CO2	dont pollution locale	dont bruit
VE vs VP essence	2 646	2 346	-386	686	8 716	3 165	1 438	4 114
VEHR essence vs VP essence	3 101	2 147	406	549	8 418	2 915	1 801	3 702
VEH essence vs VP essence	996	607	252	137	3 229	1 069	926	1 234

Bilan pour le consommateur ou l'utilisateur (TCO)

Surcoût TTC	Urbain dense					Urbain très dense				
	Total	dont achat véhicule + batterie	dont infrastructure	dont entretien assurance	dont énergie	Total	dont achat véhicule + batterie	dont infrastructure	dont entretien assurance	dont énergie
VE vs VP essence	-7 409	4 598	759	-2 331	-10 435	-10 560	4 598	759	-2 331	-13 586
VEHR essence vs VP essence	3 164	5 517	759	3 776	-5 887	-272	5 517	759	3 776	-9 324
VEH essence vs VP essence	4 154	4 000	0	3 776	-3 621	399	4 000	0	3 776	-6 377

Bilan fiscal pour l'État

Impact recettes fiscales (hors TVA)	Urbain dense				Urbain très dense			
	Total	dont composante carbone de la TICPE	dont TICPE hors composante carbone	dont taxe électricité (TCFE)	Total	dont TC	dont TICPE hors composante carbone	dont taxe électricité (TCFE)
VE vs VP essence	-4 457	-2 509	-1 260	-688	-5 113	-2 946	-1 479	-688
VEHR essence vs VP essence	-4 566	-2 007	-1 008	-551	-5 602	-2 651	-1 331	-619
VEH essence vs VP essence	-754	-502	-252	0	-2 327	-884	-444	0

Bilan socio-économique

Bilan socio-économique (surcoût, HTT)	Urbain dense						Urbain très dense					
	Total	dont achat/ batterie/ infrastructure	dont entretien & assurance	dont énergie (hors TT)	dont externalités environne mentales	dont COFP	Total	dont achat/ batterie/ infrastructure	dont entretien & assurance	dont énergie (hors TT)	dont externalités environne mentales	dont COFP
VE	-4 110	4 464	-1 942	-4 877	-2 646	891	-11 806	4 464	-1 942	-6 920	-8 431	1 023
VEHR	2 307	5 230	3 146	-3 901	-3 101	933	-5 139	5 230	3 146	-6 228	-8 418	1 130
VEH	3 287	3 333	3 146	-2 347	-996	151	-418	3 333	3 146	-4 134	-3 229	465

Annexes

Cas mixte 2020

Bilan en matière d'externalités

Gain environnemental	Total	dont CO2	dont pollution locale	dont bruit
VEHR diesel vs VP diesel	1 258	1 058	-47	246
VE vs VP diesel	-26	1 358	-1 831	448

Bilan pour le consommateur ou l'utilisateur (TCO)

Surcoût TTC	Total	dont achat véhicule+batterie	dont infrastructure	dont entretien assurance	dont énergie
VEHR diesel vs VP diesel	9 755	8 224	2 675	3 394	-4 538
VE vs VP diesel	8 268	13 978	2 675	0	-8 385

Bilan fiscal pour l'État

Impact recettes fiscales (hors TVA)	Total	dont composante carbone de la TICPE	dont TICPE hors composante carbone	dont taxe électricité (TCFE)
VEHR diesel vs VP diesel	-3 838	-1 061	-2 431	-346
VE vs VP diesel	-7 089	-1 930	-4 531	-628

Bilan socio-économique

Bilan socio-économique (surcoût, HTT)	Total	dont achat/batterie/infrastructure	dont entretien & assurance	dont énergie (hors TT)	dont externalités environnementales	dont COFP
VEHR diesel vs VP diesel	11 170	9 083	2 828	-250	-1 258	768
VE vs VP diesel	13 061	13 877	-1 806	-454	26	1 418

Annexes

Cas mixte 2030

Bilan en matière d'externalités

Gain environnemental	Total	dont CO2	dont pollution locale	dont bruit
VEHR diesel vs VP diesel	1 589	1 363	-49	275
VE vs VP diesel	5	1 546	-2 040	499

Bilan pour le consommateur ou l'utilisateur (TCO)

Surcoût TTC	Total	dont achat véhicule + batterie	dont infrastructure	dont entretien assurance	dont énergie
VEHR diesel vs VP diesel	7 077	5 349	2 675	3 508	-4 455
VE vs VP diesel	1 252	6 676	2 675	0	-8 099

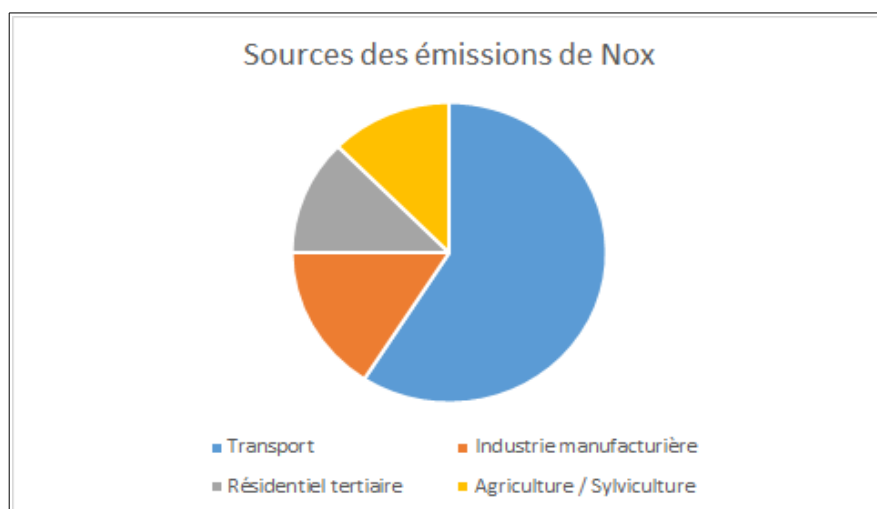
Bilan fiscal pour l'État

Impact recettes fiscales (hors TVA)	Total	dont composante carbone de la TICPE	dont TICPE hors composante carbone	dont taxe électricité (TCFE)
VEHR diesel vs VP diesel	-3 862	-1 359	-2 063	-439
VE vs VP diesel	-7 021	-2 472	-3 751	-798

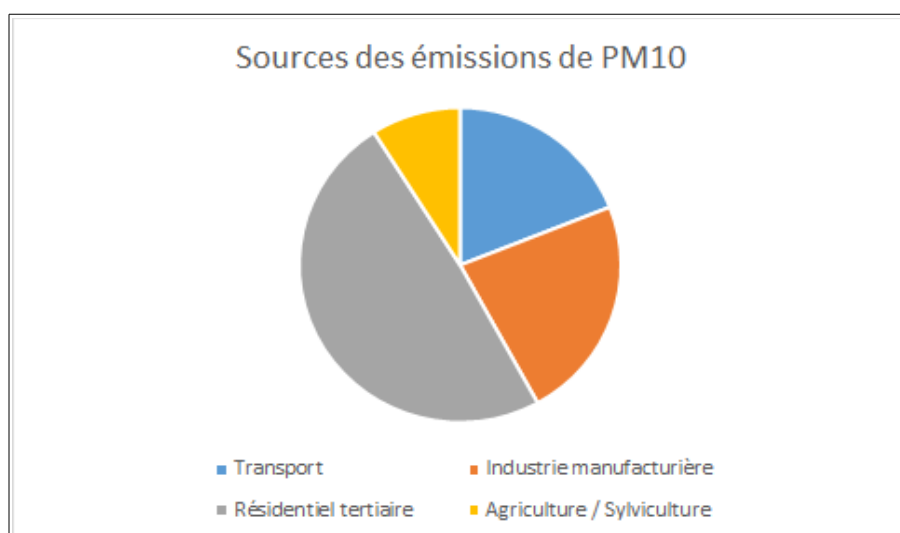
Bilan socio-économique

Bilan socio- économique (surcoût, HTT)	Total	dont achat/ batterie/ infrastructure	dont entretien & assurance	dont énergie (hors TT)	dont externalités environnementales	dont COFP
VEHR diesel vs VP diesel	8 577	6 687	2 923	-216	-1 589	772
VE vs VP diesel	6 986	7 793	-1 812	-393	-5	1 404

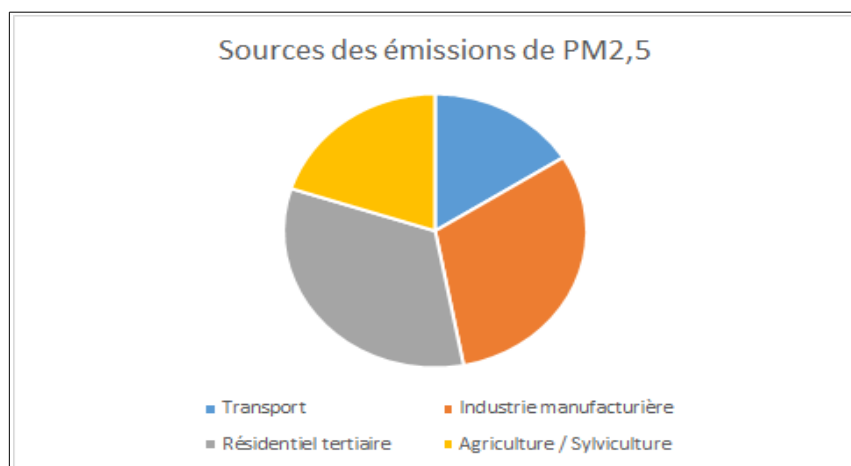
Annexe 2 - Sources des émissions de polluants atmosphériques en France (2013)



Source : émissions nationales en 2013 (MEDDE)



Source : Inventaire des émissions de polluants et de GES dans l'atmosphère en France en 2013 (CITEPA)



Source : Inventaire des émissions de polluants et de GES dans l'atmosphère en France en 2013 (MEDDE & CITEPA)

TABLE DES MATIÈRES

Introduction – Objectifs et cadre de l'étude.....	5
Éléments de contexte.....	6
Objectifs de l'étude.....	9
 Partie 1 – Méthodologie et hypothèses générales.....	 11
Méthodes.....	12
Hypothèses concernant les véhicules.....	13
Hypothèses concernant le coût associé aux différents impacts environnementaux	18
Hypothèses sur les prix et coûts d'achat et d'usage	26
 Partie 2 – Résultats de l'analyse coûts bénéfiques.....	 31
Bilans des motorisations alternatives vs le véhicule thermique	32
Zoom sur l'usage standard en zone urbaine.....	38
Et pour les autres technologies ?.....	48
Et pour le cas mixte ?.....	58
Tests de sensibilité pour certaines hypothèses et certains scénarios.....	67
 Partie 3 – Éléments d'appréciation de la valeur « <i>smart grid</i> » des batteries de véhicule électrique.....	 71
Nature des services rendus au système électrique.....	72
Hypothèses concernant les conditions d'exploitation de la batterie.....	75
Valeurs des services rendus au système électrique.....	77
Conditions et coûts de réalisation du potentiel de valeur <i>smart grid</i>	84
 Annexes.....	 87
Annexe 1 – Bilans détaillés.....	88
Annexe 2 – Sources des émissions de polluants atmosphériques en France.....	94



Conditions générales d'utilisation

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille — 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'oeuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 1er juillet 1992 — art. L.122-4 et L.122-5 et Code pénal art. 425).

Dépôt légal : Juillet 2017

ISSN : 2552-2272



Alors que l'utilisation des véhicules thermiques produit des externalités environnementales (CO₂, pollution atmosphérique, bruit), les véhicules électriques constituent-ils une alternative pertinente, pour l'utilisateur et pour la collectivité pour réduire ces nuisances ? Dans quelles conditions et à quels horizons ?

Le véhicule électrique est déjà rentable en zone urbaine très dense en 2020 et dans l'ensemble des zones denses en 2030. La technologie hybride rechargeable le devient vers 2030 pour les usages professionnels ou d'autopartage. Elle pourrait néanmoins constituer une solution de transition vers le "tout électrique" et son intérêt devrait décroître avec le déploiement des infrastructures de recharge et les progrès des batteries.

Les véhicules électriques et leur batterie sont également susceptibles d'apporter des bénéfices additionnels à la collectivité lorsqu'ils sont connectés aux réseaux électriques, sous la forme de services énergétiques. L'exploitation de ce gisement dépendra largement des comportements des utilisateurs et des coûts de mise en œuvre.

**Analyse coûts
bénéfices des
véhicules
électriques**
Les voitures



commissariat général au développement durable

Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du
développement durable
Sous-direction de la mobilité et de l'aménagement (MA)

Tour Séquoia
92055 La Défense cedex
Courriel : Ma.Seei.Cgdd@developpement-durable.gouv.fr

www.ecologique-solidaire.fr



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE