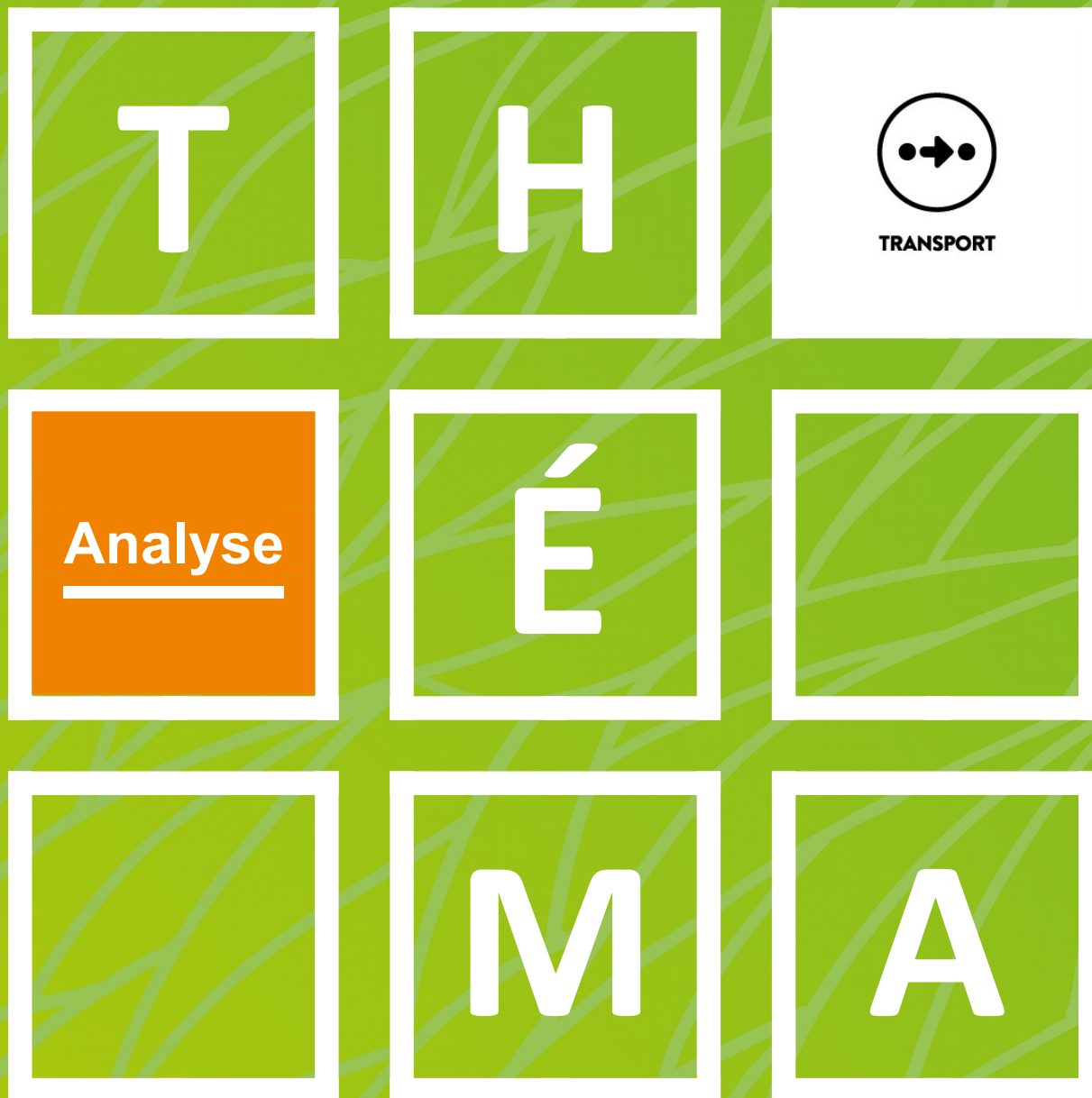




Commissariat général au développement durable

Analyse coûts bénéfices des véhicules électriques

Les autobus et autocars

OCTOBRE 2018

sommaire

Analyse coûts bénéfiques des véhicules électriques

Les autobus et autocars

4 – Avant propos

5 – Messages clés

9 – Objectifs et cadre de l'étude

Les progrès technologiques permettant de limiter les externalités des transports : l'étude compare les technologies électrique, hybride et GNV à l'autobus ou à l'autocar thermique.

15 – Méthodologie et hypothèses générales de l'analyse coûts bénéfiques (ACB)

Deux types d'approches sont menées : le coût socioéconomique pour la collectivité et le coût global de possession supporté par l'opérateur de transport. Diverses hypothèses sont testées concernant les véhicules et leurs impacts environnementaux.

37 – Résultats de l'analyse coûts bénéfiques

Les bilans sont fournis aux horizons 2020 et 2025 : pour l'autobus en détaillant les différentes zones urbaines de circulation, et pour les autocars en usage mixte urbain / interurbain.

57 – Annexes

Bilans détaillés

Document édité par :

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

Remerciement : Nous remercions l'**UTP** (Union des transports publics et ferroviaires), la **RATP** et **IVECO** pour les échanges constructifs que nous avons eus. Nous avons pu compter sur la diligence de **Corinne Charbit** pour mettre en forme ce document.

contributeurs

ST

Stéphane Taszka

Adjoint au chef de bureau de
l'économie de la transition
énergétique

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

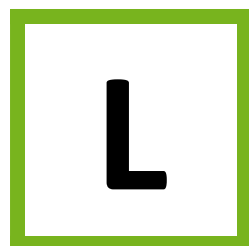
SD

Silvano Domergue

Chef du bureau de l'économie
de la transition énergétique

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

avant-propos



Le plan climat qui prévoit une neutralité carbone en 2050, la prise en compte de la qualité de l'air dans les zones urbaines, ainsi que l'article 37 de la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte qui prévoit le renouvellement des flottes d'autobus et d'autocars pour le transport public, sont autant d'éléments favorisant le développement des technologies alternatives au bus et au cars diesel, comme les motorisations électrique, hybride, hybride rechargeable ou le GNV (gaz naturel pour véhicules).

Cette étude a pour objectif d'évaluer ces technologies en les comparant au véhicule thermique, à la fois d'un point de vue socio-économique et du point de vue de l'opérateur de transport, aux horizons 2020 et 2025. À travers cette analyse, il s'agit d'identifier les technologies alternatives présentant un bilan socio-économique favorable comparé au véhicule alimenté au gazole.

Laurence Monnoyer-Smith

COMMISSAIRE GÉNÉRALE AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Messages clés

Un bilan coûts bénéfices a été effectué pour différentes technologies alternatives d'autobus et d'autocars, par rapport à leur équivalent à moteur au diesel. Les technologies alternatives (gaz naturel pour véhicules - GNV, hybride, hybride rechargeable, véhicule électrique) sont étudiées dans trois différents milieux de circulation en fonction de la densité de population : urbain très dense et urbain dense pour les autobus, et mixte, c'est-à-dire une moyenne pondérée de tous les milieux urbains et interurbain, pour les autocars. Ce bilan a été fait à la fois pour la collectivité (en tenant compte notamment des impacts environnementaux) et pour les opérateurs de transport (TCO – Total cost of ownership), pour deux horizons : 2020 et 2025.

Un plan de déploiement de l'hydrogène a été présenté par le ministre de la transition écologique et solidaire le 1^{er} juin 2018 ; cette technologie permet de développer des mobilités propres. Pour les transports publics, le bus électrique à hydrogène présente des modes d'utilisation équivalents au diesel (rechargement, autonomie, vitesse...) et n'émet ni CO₂, ni particules, responsables de la pollution atmosphérique. Cependant le manque de visibilité sur le modèle économique de cette technologie, aux horizons étudiés, ne nous a pas permis de l'intégrer dans les cas étudiés.

Bilans socio-économiques des bus et cars à motorisations alternatives (synthèse)

	2020		2025	
Cas urbain AUTOBUS	Très dense	Dense	Très dense	Dense
Cas mixte AUTOCARS				

Bilans pour l'entreprise de transports (TCO) (synthèse)

	2020		2025	
Cas urbain AUTOBUS	Très dense	Dense	Très dense	Dense
Cas mixte AUTOCARS				

Légende

Tous les bilans positifs pour les technologies alternatives	
Bilans positifs au moins pour véhicule électrique et/ou GNV	
Tous les bilans négatifs pour les technologies alternatives	

Les résultats sont évidemment fortement corrélés aux hypothèses d'évolution du coût des technologies qui sont détaillées dans la suite.

Pour les autobus

Pour les bus, l'intérêt socio-économique apparaît dès 2020 en urbain très dense pour les véhicules à motorisation exclusivement électrique et le GNV, avec des gains environnementaux et à l'usage (entretien et énergie) nettement plus marqués pour le tout électrique ou l'hybride rechargeable.

En 2020, en zone urbaine dense, aucune motorisation alternative n'a un meilleur bilan socio-économique que le gazole seul. Le GNV présente un bilan comparable au diesel, alors même qu'il génère un gain pour l'opérateur de transport de 40 000 € (approche TCO). Les technologies électriques et hybrides sont pénalisées principalement par le surcoût d'achat du véhicule et de la batterie. Toutefois, en approche TCO, le bus électrique est proche de l'équilibre. L'autobus hybride est quant à lui fortement pénalisé par le surcoût d'achat du véhicule mais également par des surcoûts d'entretien de plus de 20 000 €, liés à la complexité de la double motorisation.

En zone urbaine très dense, l'autobus GNV et l'autobus électrique affichent de meilleurs bilans que le bus thermique, à la fois pour la collectivité et l'opérateur de transport, en raison de gains importants en matière d'externalités environnementales (respectivement de 40 000 € et de 120 000 €) et de consommation d'énergie (resp. de 50 000 € et 130 000 €). Les gains de consommation et les gains sur le plan environnemental du bus hybride sont insuffisants pour afficher un bilan positif (le surcoût est de 36 000 €) en raison d'une technologie principalement thermique. La technologie hybride rechargeable permet, comme le tout électrique, de faire apparaître des gains sur le plan de la consommation d'énergie et sur le plan environnemental (resp. 140 000 € et 110 000 €) mais cela reste insuffisant.

Une rentabilité socio-économique et pour l'opérateur de transport qui pourrait être assurée pour l'ensemble des technologies en 2025 en urbain dense et très dense.

En 2025, en zone dense, toutes les technologies présentent un gain, en comparaison avec le gazole, à l'exception de l'autobus hybride. Toutefois, les hypothèses conservatrices prises ici d'un surcoût concernant l'achat et l'entretien du véhicule hybride expliquent ce bilan négatif et pourraient être remises en question. Les technologies électrique et hybride rechargeable améliorent nettement leur bilan par rapport à 2020 en raison de la baisse du prix des batteries et des surcoûts à l'achat qui diminuent entre 2020 et 2025. Le bus GNV, avec un bilan positif en zone dense améliore son bilan en zone très dense grâce à des gains environnementaux qui s'accroissent dans un milieu où les externalités sont valorisées à un coût plus élevé en raison de la densité de population plus importante.

Pour les autocars

Pour les autocars, un intérêt environnemental et financier moins marqué dans un milieu mixte qu'en milieu urbain.

En 2020, en milieu mixte, avec une part importante de trajets interurbains, les autocars à énergie électrique présentent des surcoûts socio-économiques importants en comparaison avec l'autocar diesel (plus de 100 000 €). Les gains environnementaux sont relativement faibles (de 10 000 € pour le GNV à 30 000 € pour le tout électrique), car, dans les zones peu denses, les externalités ont une valeur monétaire plus faible et les gains énergétiques sont réduits (25 000 € pour le GNV et 50 000 € pour le tout électrique). Les vitesses pratiquées se rapprochent d'un rendement optimum pour le diesel. Dans ces conditions, les gains environnementaux ne suffisent pas à compenser les surcoûts d'achat et le prix élevé des batteries. Le bilan de l'autocar GNV est bien meilleur mais reste négatif comparé au diesel (36 000 € de surcoût), car les gains en matière d'externalités et d'énergie ne suffisent pas à compenser l'investissement initial pour la station GNV. Toutefois, du point de vue de l'opérateur de transport, le coût du GNV s'approche de la solution diesel.

Un bilan socio-économique autour de l'équilibre en 2025 pour le GNV et l'électrique, et de plus fortes incertitudes pour l'hybride rechargeable.

En 2025, le surcoût socio-économique pour l'autocar GNV diminue faiblement en raison de l'augmentation du prix des carburants, mais le bilan reste légèrement négatif. Les technologies électriques ont des bilans qui s'améliorent nettement. En raison de la baisse des coûts d'achat des véhicules et des batteries, l'autocar hybride rechargeable divise par deux son surcoût socio-économique en 5 ans, même s'il reste négatif. Ce bilan négatif est dû aux hypothèses défavorables de surcoût d'entretien et à l'achat qui pourraient être remises en question.

L'autocar électrique est la seule technologie qui présente un bilan favorable face au diesel, en raison principalement de la baisse importante attendue du prix des batteries et du prix de véhicule (qui deviendrait aligné sur le thermique en 2025).

En approche TCO, l'électrique paraît très intéressant, et le GNV a un bilan légèrement positif.

En termes de recettes fiscales

L'adoption des technologies alternatives, électrique et GNV, se traduit par des pertes de recettes fiscales significatives.

Le bilan fiscal pour l'État, pour un bus acquis en 2020 circulant en zone urbaine très dense, traduit une perte de recettes par rapport à un bus diesel de 90 000 € pour l'électrique, 30 000 € pour l'hybride, 80 000 € pour l'hybride rechargeable et le GNV. Les énergies alternatives (électricité et gaz) sont en effet moins taxées que le diesel. **Ces pertes peuvent toutefois être mises en regard des gains en matière d'externalités environnementales qui sont du même ordre de grandeur, hormis pour le GNV pour lequel ils sont plus limités.**

Avertissement relatif aux hypothèses

Dans cette étude, nous avons tenu compte des progrès en matière de durée de vie des batteries. C'est pourquoi la batterie n'est renouvelée qu'une fois à mi-vie en ayant fait plus de 200 000 km. Les batteries d'autobus et d'autocars sont supposées plus coûteuses par unité de stockage en raison d'une capacité supérieure à celle des véhicules particuliers.

Il est également nécessaire de rappeler que les coûts éventuels liés à l'adaptation des dépôts existants et à la construction de nouveaux dépôts pour les bus électriques n'ont pas été pris en compte et peuvent rendre le bilan des technologies alternatives moins favorables. Les coûts des nouvelles stations GNV et des bornes de recharges ont cependant été intégrés dans l'étude.

Dans cette étude, les hypothèses relatives aux coûts des externalités ainsi qu'aux trajectoires de prix des énergies et de la taxe carbone sont identiques à celles de l'étude sur les voitures¹. En revanche, les trajectoires des prix des batteries sont supérieures à celles des prix des véhicules particuliers.

Pour les autobus et autocars électriques, les variations de consommation liées au dénivelé n'ont pas été prises en compte. Toutefois, celles engendrées par le confort thermique (climatisation en été, chauffage en hiver) ont été prises en compte.

¹ <http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Analyse%20co%C3%BBts%20b%C3%A9n%C3%A9fices%20des%20v%C3%A9hicules%20%C3%A9lectriques.pdf>

Introduction

Objectifs et cadre de l'étude

Les progrès technologiques offrent des solutions pertinentes, notamment à travers le développement de l'électromobilité, pour limiter les émissions de CO₂, la pollution atmosphérique ou les nuisances sonores dans les transports. L'étude permet de comparer les technologies électrique, hybride ou GNV à la technologie de référence thermique, pour l'autobus et l'autocar, dans différents milieux de circulation, aux horizons 2020 et 2025.



ÉLÉMENTS DE CONTEXTE

La France s'est engagée sur 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 12). Les décrets n° 2017-21 et n° 2017-23 du 11 janvier 2017 pris en application de l'article 37 de la loi définissent le cadre réglementaire de l'achat de véhicules propres par les opérateurs de transport public. La présente étude a été réalisée dans le cadre de l'étude d'impact de ces mesures relatives aux flottes d'autobus et d'autocars.

Dans le secteur des transports, le développement des technologies alternatives au véhicule thermique apparaît comme une des réponses aux enjeux climatiques, compte tenu notamment du mix national de production électrique largement décarboné, 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.

Les véhicules électriques et hybrides rechargeables présentent l'avantage de ne pas émettre directement 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 en phase d'utilisation. La production de l'énergie électrique ainsi que la fabrication de la batterie nécessaire à leur fonctionnement sont cependant sources d'émissions de polluants et de CO₂ qui doivent être prises en compte sur la totalité du cycle de vie d'un véhicule. Le véhicule GNV permet également de réduire les impacts en matière de pollution de l'air.

Cette étude compare les bilans environnementaux des différentes motorisations utilisées par les autobus et autocars afin d'évaluer leur impact en matière de changement climatique (émission de gaz carbonique - CO₂), de pollution atmosphérique (plus particulièrement les oxydes d'azote – Nox – et les particules fines) 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. La part des poids lourds dans ces émissions est de 20 % des émissions du secteur routier, alors que celle des autobus et autocars est d'environ 3 %. Dans le Plan Climat présenté le 6 juillet 2017, la France s'engage à atteindre une neutralité carbone en 2050.

La pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique a des impacts importants en matière de santé publique (maladies respiratoires, cardiovasculaires et cancers), particulièrement en zones urbaines. Même si la mise en œuvre du Plan particules et des Plans nationaux santé environnement (PNSE) a contribué à la réduction des émissions de polluants observée sur la période 2000-2016 (baisse des émissions de NO₂ de 49 %, des particules de diamètre inférieur à 10µm (PM₁₀) de 41 % et des

particules de diamètre inférieur à 2,5µm (PM_{2,5}) de 48 %, 16 agglomérations en 2016 ne respectent pas les normes en NO₂ et 3 pour les PM₁₀.

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.

Même si les émissions du transport routier ont baissé de près de 50 % entre 2000 et 2016, il 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 particules fines - PM₁₀- et 19 % pour les particules très fines - PM_{2,5}-), derrière le logement, principal émetteur *via* le chauffage résidentiel. Le transport routier est le secteur le plus polluant en matière de Nox.

Les nuisances sonores

Pour 54 % des Français, le bruit des transports est la principale source de nuisance, loin devant les bruits de comportements (21 %)⁵. À haute dose, le bruit n'a pas qu'un impact sur le système auditif mais il 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 liés à l'exposition au bruit ambiant dû aux transports terrestres et aériens.

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 et « Pollution de l'air et santé : le coût pour la société », Le point sur, n° 175 (CGDD) octobre 2013.

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).

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 37 prévoit que l'État et les acteurs publics [...] procèdent à des achats responsables avec des obligations de renouvellement du parc en faveur de véhicules plus sobres sur le plan énergétique. L'État, ses établissements publics, les collectivités territoriales et leurs groupements, le Syndicat des transports d'Île-de-France et la métropole de Lyon, lorsqu'ils gèrent directement ou indirectement un parc de plus de vingt autobus et autocars pour assurer des services de transport public de personnes réguliers ou à la demande, acquièrent ou utilisent lors du renouvellement du parc, dans la proportion minimale de 50 % de ce renouvellement à partir du 1^{er} janvier 2020 puis en totalité à partir du 1^{er} janvier 2025, des autobus et des autocars à faibles émissions définis en référence à des critères fixés par décret selon les usages desdits véhicules, les territoires dans lesquels ils circulent et les capacités locales d'approvisionnement en sources d'énergie. La proportion minimale de 50 % de ce renouvellement s'applique dès le 1^{er} janvier 2018 aux services dont la Régie autonome des transports parisiens a été chargée avant le 3 décembre 2009 en application de l'article L.2142- 1 du code des transports.

L'article 40 prévoit aussi que l'État définisse 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.

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Le but de cette étude est de comparer différentes technologies de motorisation alternatives au véhicule 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 de l'opérateur de transport 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 de deux types de véhicules neufs : un véhicule thermique en référence et un véhicule à motorisation alternative.

Les cinq technologies étudiées sont :

- Les bus et autocars thermiques diesel ;
- Les bus ou autocars gaz naturel pour véhicules (GNV) ;
- Les bus hybrides ;
- Les bus ou autocars hybrides rechargeables ;
- Les bus ou autocars tout électriques.

Comparaisons selon les usages

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 un bus diesel à un bus électrique, GNV, hybride ou hybride rechargeable. Dans le cas mixte, avec de multiples usages et une grande part de trajets interurbains, on compare un autocar diesel à un autocar électrique, GNV ou hybride rechargeable. L'analyse se situe à deux horizons temporels de date d'achat des véhicules : 2020 et 2025.

Comparaisons selon les milieux de circulation

Les technologies sont étudiées dans trois différents milieux de circulation en fonction de la densité de population : urbain très dense, urbain dense, et « mixte » c'est-à-dire une moyenne pondérée de tous les milieux⁶.

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.

⁶ Qui regroupent outre les deux cités : urbain, urbain diffus et rase campagne (cf. Rapport Quinet pour la définition des milieux).

Introduction - Objectifs et cadre de l'étude

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.

Partie 1

Méthodologie et hypothèses générales de l'analyse coûts bénéfices (ACB)

Deux types d'analyse sont présentés : le coût socio-économique pour la collectivité et le coût global de possession supporté par l'opérateur de transport. Diverses hypothèses sont analysées concernant les véhicules et leurs impacts environnementaux.



MÉTHODE

La méthode est celle de l'analyse coût bénéfice sur la durée de vie du véhicule, avec un taux d'actualisation de 4,5 %. Deux années de référence sont prises : 2020 et 2025 (mise en circulation et actualisation à cette date, en € 2015). Les gains et coûts induits par le changement de motorisation se mesurent donc comme l'écart entre les coûts des véhicules à faibles émissions et ceux des véhicules diesel vérifiant la norme euro VI correspondant au standard européen en vigueur.

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 ou 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) est ainsi exclue de l'analyse. Toutefois, les pertes ou gains de recettes fiscales sont intégrés à travers le COFP (cf. ci-après). La contribution au service public de l'électricité (ex-CSPE) est intégrée dans le coût de l'électricité pour la collectivité (dans la mesure où elle finance les énergies renouvelables électriques).

L'analyse TCO prend en compte les coûts *financiers* supportés par les *opérateurs de transport collectif* (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 (autobus ou autocar, batterie, infrastructures de recharge), les coûts d'entretien du véhicule ainsi que l'assurance, les coûts liés à la consommation d'énergie (carburant ou électricité), tous exprimés toutes taxes incluses, hors TVA (les opérateurs n'acquittent pas la TVA). En particulier, l'analyse tient compte des exonérations partielles de taxes existant pour le carburant ou l'électricité utilisés par les autobus et autocars.

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).

⁷ L'évaluation socio-économique des investissements publics – Rapport de la commission présidée par Émile Quinet (CGSP), septembre 2013

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 consommations d'énergie et impacts environnementaux). Les coûts sont exprimés en €2015 et actualisés pour les deux années étudiées, en 2020 puis en 2025.

La valeur résiduelle des infrastructures et équipements est prise en compte si leur durée de vie économique est supérieure à celle des véhicules étudiés (cas des véhicules électriques, électriques rechargeables et GNV). Elle correspond à la valeur actualisée nette comptable. Ce montant actualisé, correspondant au reliquat non amorti d'une infrastructure, apparaît comme un gain en comparaison à la situation où on doit la construire immédiatement (cf. p. 34). Ce gain est intégré comme une valeur de revente la dernière année de vie du véhicule. Les stations de distribution de gazole sont considérées comme totalement amorties à la fin de vie des véhicules.

Externalités

Les externalités qui sont prises en compte dans le bilan socio-économique sont le CO₂, le bruit et la pollution atmosphérique (NO_x et particules). Ces externalités sont monétarisées conformément aux recommandations de la Commission Quinet⁹. Les valeurs relatives au bruit sont issues du Handbook (2014) car il permet une différenciation plus fine et mieux adaptée aux calculs pour cette étude. La valeur de l'externalité CO₂ évolue selon la trajectoire préconisée par France Stratégie (cf. page 23) et les valeurs des externalités liées à la pollution atmosphérique évoluent dans le temps comme le PIB/habitant (+1,3 %/an). La valeur tutélaire du CO₂ est actuellement en cours de révision.

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.

Les autres externalités habituellement considérées (congestion, insécurité) sont supposées identiques quelle que soit la motorisation.

Coûts d'opportunité des fonds publics (COFP)

Le remplacement d'un véhicule thermique dont le carburant est fortement taxé par 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, dont le coût est estimé ici conformément au rapport

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 : $A / (1+i)^n$.

⁹ L'évaluation socio-économique des investissements publics – Rapport de la commission présidée par Émile Quinet (CGSP), septembre 2013

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.

Le remplacement des véhicules de transport en commun par des technologies alternatives ayant un surcoût a également un impact sur l'équilibre financier des opérateurs de transport et sur le besoin en subvention d'exploitation. Cet effet sur les finances locales est pris en compte dans le COFP (en prenant 0,2 X surcoût TCO).

HYPOTHÈSES CONCERNANT LES VÉHICULES

Caractéristiques des véhicules

Pour les déplacements en zones urbaines, on fait l'hypothèse que le véhicule type est un autobus d'environ 12 m de longueur, de 2,5 à 2,55 m de largeur et d'un PTAC de 19 tonnes. On ne prend pas en compte les bus en accordéon qui font une longueur de 18 m.

Pour les déplacements interurbains, on fait l'hypothèse que le véhicule type est un autocar d'environ 12 à 13 m, de 2,5 à 2,55 m de largeur, d'un PTAC de 19 tonnes et d'une capacité comprise entre 55 et 60 places assises.

Les cinq technologies étudiées sont :

- Un véhicule thermique diesel
 - Il s'agit d'un véhicule de norme Euro 6 (applicable aux véhicules neufs depuis le 01/01/2014).
- Un véhicule à motorisation gaz naturel pour véhicules (GNV)
 - Le gaz utilisé pour les transports publics peut être soit du gaz naturel composé de méthane à 93 %, soit du biogaz issu de la fermentation de déchets ménagers ou des boues d'épuration, comprimé à 200-220 bars et stocké dans des bouteilles.
- Un véhicule hybride diesel / électrique.
 - Il existe deux types d'hybridation :
 - hybride série avec un moteur thermique couplé à un générateur qui alimente le moteur électrique utilisé à chaque arrêt / redémarrage. Le moteur thermique prend le relais du moteur électrique lorsqu'il n'y a plus d'énergie électrique.
 - hybridation parallèle avec un moteur électrique et un moteur thermique sur le même axe. Le moteur électrique assiste le moteur thermique lors des accélérations et récupère l'énergie lors du freinage. Le moteur thermique se met en route à partir de 20 km/h.
 - On suppose qu'un véhicule hybride réalise respectivement 20 % de ses trajets en mode électrique quand il circule en zone dense et 30 % en zone très dense (si le parcours est très roulant, avec moins de régime transitoire pour le moteur, induit par les démarrages et les arrêts, ces parts sont minorées). Actuellement, à notre connaissance, il n'existe pas d'autocars hybrides sur le marché.

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

- Un véhicule hybride rechargeable¹⁰.
 - Il possède un moteur électrique alimenté par des batteries et réalise 90 % de son parcours en mode électrique quand il circule en zone urbaine et 70 % en milieu mixte. Quand la batterie est vide, le bloc diesel répondant à la norme Euro VI prend le relais. La batterie d'un autobus hybride rechargeable est dotée d'une capacité de stockage de 190 kWh¹¹ (120 km d'autonomie), alors que celle d'un autocar est de 140 kWh (85 km d'autonomie). La technologie hybride rechargeable est difficile à développer pour les autocars en raison des batteries encombrantes qui limitent le volume disponible pour les passagers et qui peuvent poser des problèmes de centre de gravité selon leur emplacement.
- Un véhicule tout électrique.
 - Il ne possède qu'un moteur électrique alimenté par des batteries et réalise 100 % de ses trajets en mode électrique. L'autonomie moyenne d'un autobus est de 170 km avec une batterie d'une capacité de stockage de 270 kWh. Cependant, les consommations et autonomies varient fortement selon que le bus est climatisé ou non¹². L'autonomie d'un autocar est de 110 km avec une batterie d'une capacité de stockage de 190 kWh (l'autonomie d'un autocar est moindre, pour une même capacité de batterie, que celle d'un bus car il consomme plus d'énergie avec une vitesse supérieure lors des trajets interurbains). Les autocars électriques sont rares et plutôt utilisés pour des usages urbains comme le ramassage scolaire.

Hypothèses concernant le kilométrage annuel et la durée de vie

D'après le SDES (anciennement SOeS), le kilométrage annuel moyen pour la catégorie de véhicules « bus ou car » est de 36 580 km en 2014¹³. Il est de 30 175 km pour les autocars, 38 700 km pour les autobus de la RATP et de 40 600 km pour les autobus hors RATP¹⁴. On a donc pris pour hypothèse une distance moyenne de 30 000 km/an pour les autocars¹⁵ et 40 000 km /an pour les autobus. On considère que la durée de vie moyenne d'un car est de 16 ans et celle d'un bus de 15 ans¹⁶.

Tableau 1 – Kilométrage annuel et durée de vie des véhicules retenus dans l'étude

Usages	km / an	durée	km totaux
Autocar	30 000	16	480 000
Autobus	40 000	15	600 000

Sources : CCTN 2015 & RATP

¹⁰ A notre connaissance, seul un constructeur maîtrise actuellement cette technologie.

¹¹ Certains constructeurs considèrent que cette capacité est élevée.

¹² Un constructeur indique une capacité de stockage de 360 kWh et 300 km d'autonomie (mais seulement 200 km avec confort climatique).

¹³ Les comptes des transports en 2015 Tome 1 – 53^e rapport de la commission des comptes des transports de la Nation (CGDD), juillet 2016

¹⁴ Le transport collectif routier de voyageurs en 2014 : circulation en progression pour les autobus et stable pour les autocars - Chiffres et statistiques n°664 (CGDD), août 2015

¹⁵ La dispersion des kilométrages est importante selon les usages : 30 000 km pour le scolaire, 50 000 à 100 000 km pour le transport longue distance occasionnel, plus de 300 000 km pour les grandes lignes régulières comme les cars « Macron ».

¹⁶ Hypothèse basée sur la durée d'amortissement d'un bus RATP. Selon la centrale d'achat du transport public (CATP) un bus a une durée d'utilisation de 12 ans.

Hypothèses concernant les consommations unitaires des véhicules neufs

La consommation de carburant varie en fonction du milieu, du fait de vitesses moyennes différentes qui affectent le rendement du moteur. En pratique, les consommations sont supérieures en zones urbaines où les vitesses sont plus faibles et les arrêts redémarrages plus fréquents, qu'en urbain diffus ou en interurbain. Concernant l'autobus diesel, la consommation unitaire en fonction des différents milieux d'utilisation a été estimée à partir des courbes d'émissions COPERT¹⁷ pour les poids lourds qui permettent de calculer la consommation en fonction de la vitesse. La courbe de consommation de 2009 est appliquée à l'année 2015. On prend ensuite pour hypothèse que les consommations unitaires baissent jusqu'en 2025 de 1 %/an (hypothèse correspondant aux baisses de consommation observées depuis 2010¹⁸).

Afin de calculer les consommations unitaires, il convient de prendre une hypothèse concernant la vitesse moyenne pratiquée dans chaque zone.

L'UITP (l'Union internationale des transports publics) préconise d'utiliser les vitesses suivantes basées sur les tests SORT qui sont des tests en cycles réels sur route :

- SORT 1 : vitesse moyenne 12 km/h pour la zone très dense (39,4 L/100 km d'après les constructeurs)
- SORT 2 : vitesse moyenne 18 km/h pour la zone dense 39,4 L/100 km d'après les constructeurs)
- SORT 3 : vitesse moyenne 25 km/h pour la zone urbaine 39,4 L/100 km d'après les constructeurs)
- SORT 4 : vitesse supérieure à 30 km/h.

Les hypothèses UITP n'ont pas été reprises directement ici. Les vitesses pratiquées en milieu urbain sont supposées supérieures à celles des tests SORT, ce qui permet de calculer des consommations d'énergie plus conformes aux consommations observées.

Pour calculer la consommation moyenne sur l'ensemble des zones, on utilise une répartition calculée à partir de données relatives à la répartition du trafic d'autocars selon les milieux.

Tableau 2 - Répartition du trafic routier d'autocars selon les milieux utilisés dans l'étude

Milieu	Répartition du trafic par milieu
Urbain très dense	6%
Urbain dense	8%
Urbain	12%
Urbain diffus	54%
Interurbain	20%

Source : MODEV 2015

¹⁷ 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 : $C = 0,8248 - 2,084 \cdot 10^{-2} \cdot V + 2,57 \cdot 10^{-4} \cdot (-4) \cdot V^2 - 1 \cdot 10^{-6} \cdot V^3$ (en L/km)

¹⁸ Les comptes des transports en 2016 – Tome 1 – 54e rapport de la Commission des comptes des transports de la Nation.

Le tableau 3 précise les hypothèses prises sur les vitesses pratiquées dans les différentes zones ainsi que les résultats obtenus concernant la consommation unitaire.

Tableau 3 – Consommations unitaires réelles de carburant des autocars thermiques en fonction des milieux et des vitesses en 2020 et 2025

En L/100 km

Zone	Vitesse	2009	Part / zone	2020	2025
Très dense	15	56,7	6%	53,8	51,0
Dense	20	50,3	8%	47,8	45,3
Urbain	25	44,9	12%	42,6	40,4
Urbain diffus	40	33,8	54%	32,1	30,5
Interurbain	60	28,4	20%	26,9	25,5
Moyenne	39			34,9	33,1

Source : calculs CGDD d'après le modèle COPERT pour les poids lourds (2009)

Concernant l'autobus GNV, la consommation unitaire est fixée de sorte que les émissions de CO₂ (phases utilisation et amont) soient de 15 %¹⁹ inférieures à celles du véhicule diesel.

Concernant l'autobus tout électrique, il est considéré, en première hypothèse, une consommation de 130 kWh/100 km pour une circulation en milieu dense, 140 kWh/100 km en milieu très dense, 150 kWh/100 km pour la moyenne des milieux²⁰. Cette consommation ne tient cependant pas compte de l'énergie utilisée pour assurer le confort climatique à l'intérieur du véhicule (climatisation l'été et chauffage l'hiver qui, en l'absence de moteur thermique, crée une surconsommation importante)²¹. Ainsi par exemple, concernant le véhicule particulier, l'étude « Individual mobility: from conventional to electric cars » de la Commission Européenne, publiée en 2015, montre que la consommation des véhicules électriques est 40 % supérieure en hiver à celle de l'été. La consommation peut également varier en fonction des changements d'altitude. Le groupe de véhicules suivis dans cette étude évolue en milieu urbain. On fait donc l'hypothèse qu'en moyenne les consommations affichées par les constructeurs sont majorées de 20 % en raison du confort thermique en milieu urbain. En milieu mixte, les vitesses étant environ deux fois plus élevées, la majoration n'est que de 10 %. En effet, l'énergie utilisée pour le chauffage est proportionnelle à la durée et non aux kilométrages. Les topographies des villes étant très différentes, il est supposé ici que les variations d'altitude sont faibles et n'induisent pas de surconsommation significative.

Il convient de noter que le confort climatique et en particulier le chauffage peut être assuré par un système thermique, et non électrique, fonctionnant au fioul. Cette option a été écartée ici.

¹⁹ Le rapport de IFP Energies nouvelles de 2005 mentionne un gain de 15 % d'émissions de CO₂ (amont et aval compris) du GNV par rapport au diesel. Certaines sources mentionnent un gain de l'ordre de 25 %.

²⁰ Source RATP

²¹ L'UTP estime que cette surconsommation peut atteindre jusqu'à 30 %.

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Concernant l'autobus ou l'autocar hybride rechargeable, on suppose que la part de trafic en mode électrique en milieu dense et très dense est de 90 % alors qu'en milieu mixte, en raison des trajets interurbains, elle est de 70 %.

Concernant les autobus hybrides, leur consommation de carburant en milieu urbain très dense est réduite de 30 %, en zone dense de 20 %²².

Tableaux 4 et 5 - Hypothèses concernant les consommations unitaires des véhicules, selon le milieu

Pour 2020

Consommations unitaires	2020		
	Milieu mixte / segment M1	Milieu dense / B1	Milieu très dense / B1
Autobus diesel (en l / 100 km)	34,9	47,8	53,8
Autobus GNV (en kg / 100 km)	27,3	37,3	42,1
Autobus hybride diesel (en l / 100 km)	34,9	38,2	37,7
Autobus électrique (en kWh / 100 km)	165,0	156,0	168,0
Autobus hybride rechargeable (en kWh / 100 km)	148,5	117,0	140,0

Pour 2025

Consommations unitaires	2025		
	Milieu mixte / segment M1	Milieu dense / B1	Milieu très dense / B1
Autobus diesel (en l / 100 km)	33,1	45,3	51,0
Autobus GNV (en kg / 100 km)	25,8	35,4	39,8
Autobus hybride diesel (en l / 100 km)	33,1	33,8	35,7
Autobus électrique (en kWh / 100 km)	165,0	156,0	168,0
Autobus hybride rechargeable (en kWh / 100 km)	148,5	140,4	168,0

²² L'UTP, à travers les retours d'expérience de deux opérateurs, estime que les gains sont inférieurs (20 % en zone très dense et 10 % en zone dense) et que dans certaines conditions d'exploitation (notamment avec une topographie défavorable) quasi nuls.

HYPOTHÈSES CONCERNANT LE COÛT ASSOCIÉ AUX DIFFÉRENTS IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Hypothèses concernant les émissions de GES (CO₂)

Plusieurs sources d'émissions sont identifiées²³ :

- 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 prend pour hypothèse la trajectoire Quinet²⁴ du prix du CO₂ avec une croissance à 56 €/t en 2020 et 100 €/t en 2030. Au-delà, on envisage une croissance de 4,5 %/an.

On suppose que le contenu CO₂ de l'électricité est de 53 g CO₂/kWh.

Tableau 6 – Contenu CO₂ des différentes sources d'énergie

Emissions de CO ₂	Valeur
Contenu CO ₂ de l'électricité (g CO ₂ /kWh) - 2020	53,0
Contenu CO ₂ du gazole - phase production (kg CO ₂ /l)	0,58
Contenu CO ₂ du gazole - phase combustion (kg CO ₂ /l)	2,49

Sources : arrêté du 10 avril 2012 & base carbone Ademe

NB : le contenu CO₂ pour l'électricité est donné pour 2025. Il décroît pour atteindre 25 gCO₂/kWh en 2030.

Les hypothèses relatives aux émissions dues à la production de batteries sont issues des données de l'Ademe²⁵.

Caractéristiques des batteries et émissions de CO₂

Les bus tout électrique sont supposés équipés de batteries de 270 kWh contre 190 kWh pour les autocars tout électriques (ils parcourent plus de distance). Les véhicules hybrides rechargeables ont des batteries de capacité de 30 % inférieure, soit respectivement 190 kWh et 140 kWh.

²³ 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 d'environ 6 % de biocarburant.

²⁴ La valeur tutélaire du carbone - Rapport de la commission présidée par Alain Quinet (CAS), juin 2008

²⁵ 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

On considère que les émissions de GES lors de la phase de la production d'une batterie d'autobus électrique de 270 kWh sont de 33 tCO₂. Cette hypothèse résulte de l'extrapolation de celle de l'Ademe pour la batterie de véhicule particulier (3 tCO₂ pour une batterie de 24 kWh), *au prorata* de la capacité de stockage de la batterie. Les émissions de GES pour la production de batterie des autres véhicules sont estimées de la même manière.

Hypothèses concernant la valeur de la pollution atmosphérique

Un certain nombre de polluants sont émis par les véhicules en circulation et lors des processus amont d'extraction de fabrication et d'acheminement des carburants. Ces polluants créent des nuisances qui dépendent de la population qui y est exposée. Cette dernière croît avec la densité de la zone dans laquelle circule le véhicule : faible en milieu rural, élevée en milieu urbain. S'agissant ici de trajets d'autocars, le coût sera moindre que pour des bus circulant en zone urbaine par exemple.

Pollution liée à la circulation

Le rapport du CGSP sur les externalités environnementales fournit des valeurs associées à la pollution atmosphérique pour les véhicules particuliers de norme euro 6 en fonction des différents milieux, mais ne fournit pas directement de valeurs pour les autobus et autocars de norme euro VI. En revanche le Handbook (2014) produit par la Commission européenne sur les externalités environnementales en fournit, à la fois pour les véhicules particuliers et les autobus et autocars. Le Handbook est utilisé pour déterminer un coefficient multiplicatif permettant de passer des valeurs du véhicule particulier à celles des autobus et autocars. Ce coefficient est ensuite appliqué aux valeurs associées à la pollution atmosphérique pour les véhicules particuliers en fonction des différents milieux fournies par le rapport Quinet. Elles sont exprimées ici en € 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 ne concernent que les pollutions liées à la combustion. En conséquence, on ne tient pas compte des coûts des pollutions liés à l'abrasion (freinage, contact avec la route, pneus) pour calculer le bilan. 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 dans la mesure où les émissions liées à l'usure sont supposées identiques pour les véhicules thermiques et pour les véhicules à faibles émissions.

Pour le calcul du cas « usage mixte », une moyenne pondérée est effectuée, basée sur les parts de trafic mentionnées précédemment. Dans ce cas d'usage, les populations sont moins exposées aux nuisances. De plus, l'impact du moteur diesel sur le plan de la 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 des émissions unitaires de polluants au-delà de la norme Euro VI.

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Il est supposé que le coût de pollution associé à la circulation d'un autocar au GNV est moitié moindre que celui d'un diesel²⁶ et que celui d'un autocar électrique est nul (car on ne tient pas compte de l'abrasion).

Tableaux 7 et 8 - Coûts associés aux pollutions liées à la combustion (en circulation)

En 2020

Pollution atmosphérique	Autobus (Euro VI)	Autocar (Euro VI)
Cas moyenne des milieux		
Coût gazole (c€ / km)	NP	0,64
Coût VE (c€ / km)	NP	0,00
Coût GNV (c€ / km)	NP	0,32
Cas milieu urbain dense		
Coût gazole (c€ / km)	0,85	NP
Coût VE (c€ / km)	0,00	NP
Coût GNV (c€ / km)	0,43	NP
Cas milieu urbain très dense		
Coût gazole (c€ / km)	3,13	NP
Coût VE (c€ / km)	0,00	NP
Coût GNV (c€ / km)	1,57	NP

En 2025

Pollution atmosphérique	Autobus (Euro VI)	Autocar (Euro VI)
Cas moyenne des milieux		
Coût gazole (c€ / km)	NP	0,68
Coût VE (c€ / km)	NP	0,00
Coût GNV (c€ / km)	NP	0,34
Cas milieu urbain dense		
Coût gazole (c€ / km)	0,91	NP
Coût VE (c€ / km)	0,00	NP
Coût GNV (c€ / km)	0,46	NP
Cas milieu urbain très dense		
Coût gazole (c€ / km)	3,34	NP
Coût VE (c€ / km)	0,00	NP
Coût GNV (c€ / km)	1,67	NP

NP : non pertinent

Sources : CCTN 2011 - Tome 2 - Dossiers d'analyse économique des politiques publiques des transports (CGDD), mars 2013
Évaluation socio-économique des investissements publics (CGSP), sept. 2013

²⁶ Données de l'Union Technique de l'Automobile du motocycle et du Cycle - Mesures réalisées sur banc véhicule sur un cycle ADEME - RATP. Données IVECO.

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Pollution amont

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

Concernant les pollutions amont²⁷ liées à la production des carburants (phase d'extraction, de transformation et d'acheminement) et de l'électricité, on multiplie les facteurs d'émission par la valeur tutélaire des polluants.

Tableau 9 - Facteurs d'émission pour la pollution atmosphérique par source d'énergie pour un véhicule particulier

En g/km

Polluants	Electricité	GNV	Diesel
Nox	0,02	0,02	0,04
SO ₂	0,02	0,03	0,06
PM	0,00	0,00	0,00

Source : Ademe, *Elaboration 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 10 - Valeurs tutélaires des polluants atmosphériques actualisées en € 2015/t

Polluants	Valeur
Nox	11 858
SO ₂	11 088
PM	220 990

Source : *L'évaluation socio-économique des investissements publics – Rapport de la commission présidée par Émile Quinet (CGSP), septembre 2013*

Pour les particules, les facteurs d'émission varient selon la densité de population. La valeur choisie correspond au milieu urbain diffus, en considérant que les sites industriels (raffineries, centrales électriques) sont situés majoritairement en zones péri-urbaines. Concernant les autres polluants, la valeur est identique dans toutes les zones.

²⁷ La phase amont correspond aux activités mises en œuvre pour que le moyen de transport dispose de sa source d'énergie (qu'il s'agisse de gazole, de GNV, d'électricité...) : il peut donc s'agir de l'extraction du pétrole, de son raffinage, de la distribution du carburant depuis la raffinerie jusqu'à la pompe. Dans le cas de l'électricité, il s'agit de l'extraction du combustible utilisé dans la centrale, de son transport et des émissions liées à son utilisation dans la centrale électrique.

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

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

On prend pour hypothèse que les émissions liées à la phase amont pour le GNV sont égales à la moitié de celles générées lors de la phase amont pour le diesel.

Ces valeurs, estimées pour le véhicule particulier, ont été multipliées par un facteur correctif correspondant au rapport de consommation entre véhicule particulier et bus ou car.

Pollution associée à la production de la batterie

À partir des données de l'Ademe, pour un véhicule particulier (VP), on évalue la pollution atmosphérique associée à la production de batterie (tableau 11). En utilisant les valeurs Quinet (2013) des polluants, on obtient pour une batterie de 24 kWh une valeur d'environ 600 €²⁸ pour une batterie de 24 kWh. Concernant les particules fines, la valeur tutélaire associée est celle retenue pour l'urbain diffus, étant supposé que l'usine de fabrication se trouve dans une telle zone. En supposant que l'usine de fabrication soit en rase campagne, le coût des émissions de particules serait divisé par 10 et le coût des émissions de polluants atmosphériques serait réduit de moitié (environ 300 €).

Tableau 11 – Coûts des émissions de polluants atmosphériques liées à production d'une batterie de 24 kWh en 2020

En €2015

Batterie VE	émissions (en g)	valeur tutélaire (€/t)	coût externe (en €)
Nox	7 500	11 858	89
SO2	16 500	11 088	183
PM	1 500	220 990	331
Total			603

Source : calcul CGDD à partir des valeurs « Quinet » et de l'étude ACV de l'ADEME sur les VE

Il est supposé que les émissions associées à la production des batteries de bus et cars sont proportionnelles à leur capacité de stockage. En appliquant ce ratio à la production de batteries des autobus et autocars, le coût de la pollution atmosphérique associée à la batterie, serait de 6 500 € en 2020 (pour une batterie avec 270 kWh de capacité de stockage et une masse de l'ordre de 2 tonnes).

²⁸ Calcul CGDD à partir des valeurs « Quinet » (2013) et étude selon le principe des ACV de l'ADEME sur les VE (novembre 2013).

Hypothèses concernant la valeur de la pollution sonore

Les valeurs pour les autobus et autocars sont tirées du Handbook (2014) produit par la Commission européenne sur les externalités environnementales. Elles sont différenciées en fonction de la zone géographique (dense, urbain diffus, rural), en fonction de l'intensité du trafic (dense, fluide) et de la période (jour, nuit). Dans le Handbook, les données sont ventilées par période, c'est pourquoi elles ont été utilisées ici plutôt que les valeurs « Quinet ».

Tableau 12 – Coûts marginaux du bruit par période, milieu* et densité de trafic par autobus et autocar

En €/1 000 km

Période	Trafic	Urbain	Suburbain	Rural
Jour	dense	44,0	2,4	0,4
	fluide	107,0	6,8	0,8
Nuit	dense	80,3	4,5	0,7
	fluide	194,7	12,7	1,5

* La définition du milieu urbain est ici celle du Handbook.

Source : Update of the Handbook on External Costs of Transport (DG MOVE), janvier 2014

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, au-delà de 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 moyennes²⁹.

Comme nous cherchons à évaluer les externalités liées à la circulation dans les milieux très dense et dense, il est nécessaire de préciser que le milieu urbain du Handbook doit être subdivisé en 3 sous-milieus que l'on qualifie de milieu urbain très dense, urbain dense et urbain (non étudié ici). Il a été nécessaire de prendre les hypothèses de travail suivantes. Il sera considéré ici que la valeur donnée par le Handbook en milieu urbain correspond à la zone « urbaine très dense ». Pour la zone dense, on considère que sa valeur est égale à la moyenne des valeurs en zone très dense et zone suburbaine. Pour la zone urbaine, la valeur est égale à la moyenne des valeurs en zone dense et zone suburbaine. On observe qu'en appliquant cette méthode la valorisation des externalités baisse environ de moitié en passant du milieu très dense au dense. En formulant cette hypothèse, la valeur des externalités baisse moins que la

²⁹ 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, mais également notamment au chauffage (cf. introduction).

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

densité de population qui est divisée par 3 entre le milieu très dense et dense, mais on peut l'expliquer par une densité plus forte autour des infrastructures de transports.

Tableau 13 – Coûts marginaux du bruit dans les 5 milieux par densité de trafic, 2020

En €/1 000 km

Période	Trafic	Urbain très dense	Urbain dense	Urbain	Suburbain	Interurbain
Jour	dense	44,0	23,2	12,8	2,4	0,4
	fluide	107,0	56,9	31,9	6,8	0,8
Nuit	dense	80,3	42,4	23,5	4,5	0,7
	fluide	194,7	103,7	58,2	12,7	1,5

Source : calculs CGDD à partir du Update of the Handbook on External Costs of Transport (DG MOVE), janvier 2014

Pour valoriser les émissions de bruit pour chaque milieu, il est nécessaire de calculer des moyennes pondérées en tenant compte à la fois des périodes et de la densité du trafic.

Cas de l'autobus

Dans le cas de l'autobus, on ne tiendra pas compte des valeurs de nuit, car les trafics sont marginaux. En effet, les valeurs de nuit s'appliquent à la période de 23 h à 7 h selon les critères HeatCo et de 22 h à 6 h selon les critères du Cerema et de France stratégie³⁰. On suppose donc que seules les valeurs de jours s'appliquent à la circulation des autobus selon la répartition des trafics calculée par Modev³¹ en fonction de la densité des trafics (tableau 14).

Tableau 14 – Répartition du trafic en milieux urbains dense et très dense selon la densité de circulation

Période	Trafic	Urbain très dense	Urbain dense
Jour	dense	11%	11%
	fluide	89%	89%

Source : MODEV 2015

Pour calculer les émissions de bruit produites par les autobus en milieu urbain dense et très dense, on utilise les valeurs du Handbook précédentes que l'on pondère par les trafics de jour respectifs des circulations dans ces deux milieux.

³⁰ Le Cerema et France Stratégie s'appuient sur les études Delft/INFRAS

³¹ MODEV – modèle de trafic fret et voyageur du CGDD

Cas de l'autocar

Dans le cas de l'autocar qui évolue dans un milieu mixte, composé des 3 sous-milieus urbains, du suburbain (ou urbain diffus) et de l'interurbain (ou rase campagne), la valorisation des externalités est calculée en croisant les trafics dans les 5 milieux avec les valeurs du Handbook.

Au sein de chaque milieu, les trafics denses et peu denses sont répartis (à partir des données Modev) par période (tableau 15)³².

Tableau 15 – Répartition du trafic pour chaque milieu, en fonction de la densité du trafic et de la période

Période	Trafic	Urbain très dense	Urbain dense	Urbain	Suburbain	Interurbain
Jour	dense	10%	10%	10%	20%	20%
	fluide	70%	70%	70%	70%	70%
Nuit	dense	5%	5%	5%	0%	0%
	fluide	15%	15%	15%	10%	5%

Source : MODEV 2015, calcul CGDD

Pour chaque milieu, on calcule un coût marginal moyen par milieu en croisant les données du Handbook avec la répartition des trafics par densité selon les périodes ci-dessus.

Pour obtenir une valeur pour le milieu mixte, on calcule la moyenne des coûts marginaux pondérée par la part des trafics de chaque milieu.

Cas des motorisations alternatives

La méthode est la même que celle utilisée pour les véhicules thermiques.

Concernant les véhicules électriques, il est considéré que pour le cas urbain très dense, la nuisance sonore est nulle³³, et qu'elle est moitié moindre en milieu urbain dense. Il convient de préciser que cette hypothèse s'applique strictement au bruit du moteur, ce qui ne prend pas en compte les avertisseurs sonores pour les véhicules électriques et les annonces sonores potentielles au niveau des arrêts de bus. Pour les autres milieux, la nuisance est supposée identique. En effet, à faible vitesse (urbain très dense), c'est le bruit du moteur qui domine, à vitesses plus élevées c'est le bruit du roulement qui est déterminant.

Concernant les véhicules fonctionnant au GNV, d'après l'Association française du gaz naturel véhicule (AFGNV) ou le site web www.TRANS'BUS.org, le bruit est réduit de moitié par rapport à un véhicule diesel dans tous les milieux³⁴.

³² En l'absence de données plus précises, on fait l'hypothèse que la répartition du trafic relative aux milieux urbain, urbain dense et urbain très dense est la même.

³³ Ce très faible niveau sonore peut être facteur d'accident en réduisant le niveau de signalisation des véhicules électriques, mais ce phénomène n'est pas chiffré ici faute d'un recul suffisant.

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Au final, il en résulte les coûts marginaux suivants (tableaux 16 et 17).

Tableaux 16 et 17 – Coût de la pollution sonore pour les autobus et les autocars

En c€/km

En 2020

Pollution sonore	Autobus (Euro VI)	Autocar (Euro VI)
Cas moyenne des milieux		
Coût gazole (c€ / km)	NP	2,24
Coût VE (c€ / km)	NP	0,84
Coût GNV (c€ / km)	NP	1,12
Cas milieu urbain dense		
Coût gazole (c€ / km)	6,00	NP
Coût VE (c€ / km)	3,00	NP
Coût GNV (c€ / km)	3,00	NP
Cas milieu urbain très dense		
Coût gazole (c€ / km)	11,31	NP
Coût VE (c€ / km)	0,00	NP
Coût GNV (c€ / km)	5,65	NP

En 2025

Pollution sonore	Autobus (Euro VI)	Autocar (Euro VI)
Cas moyenne des milieux		
Coût gazole (c€ / km)	NP	2,39
Coût VE (c€ / km)	NP	0,90
Coût GNV (c€ / km)	NP	1,19
Cas milieu urbain dense		
Coût gazole (c€ / km)	6,40	NP
Coût VE (c€ / km)	3,20	NP
Coût GNV (c€ / km)	3,20	NP
Cas milieu urbain très dense		
Coût gazole (c€ / km)	12,06	NP
Coût VE (c€ / km)	0,00	NP
Coût GNV (c€ / km)	6,00	NP

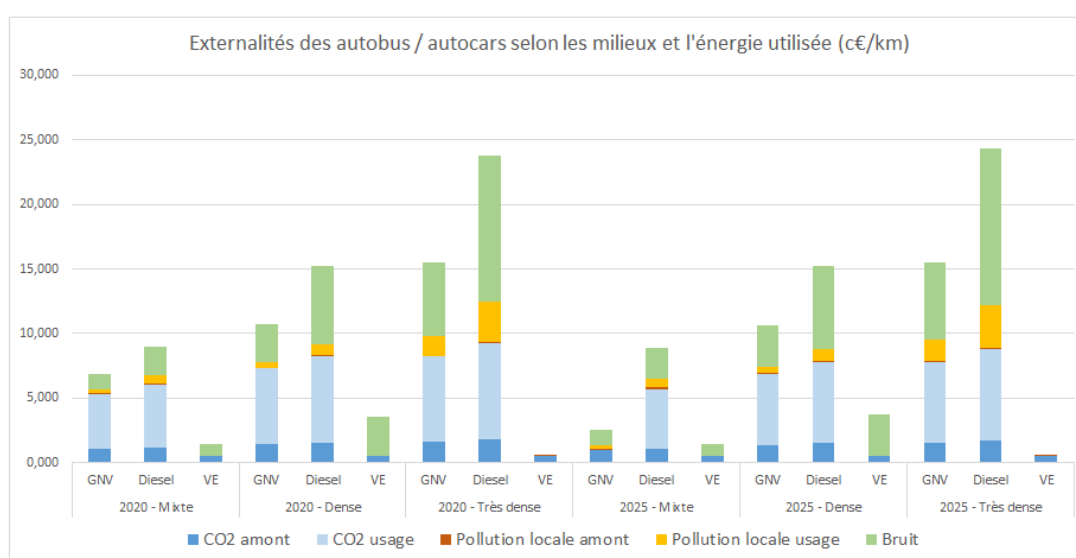
Source : calcul CGDD à partir des données MODEV et des valeurs du Handbook 2014

³⁴ D'après l'Association technique énergie environnement (ATEE), les résultats des mesures réalisées sur des autobus urbains, sont de l'ordre de 3 dB d'atténuation, soit 50 % de bruit en moins par rapport à la motorisation diesel.

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Le graphique de la figure 1 illustre de manière synthétique le poids des différentes externalités émises proportionnelles à la circulation (hors production de la batterie et du véhicule donc) par type d'énergie de traction.

Figure 1– Externalités des autobus ou autocars selon les milieux et l'énergie utilisée
En c€/km



Hypothèses sur les prix et coûts d'achat et d'usage

Prix d'achat

Les prix des autocars et autobus sont supposés identiques. Ils sont estimés HT³⁵ et incluent la carrosserie et la motorisation. Ils n'intègrent pas le coût d'achat de la batterie.

Le véhicule électrique 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 2020, en se basant sur le guide d'achat de la Centrale d'achat du transport public (CATP), le site web de l'UGAP, les informations communiquées par la RATP et du constructeur Iveco, on estime que le coût d'un bus diesel de norme Euro VI est en moyenne de 250 000 € HT. D'après la RATP le surcoût d'un bus GNV est de 40 k€ (45 k€ pour l'UGAP). Concernant les technologies hybrides, le surcoût estimé par la CATP est de 100 k€ (la RATP l'estime à 60 k€ mais il semble que le surcoût soit minimisé en raison des volumes importants d'achat), montant retenu. Pour le bus électrique, les surcoûts communiqués varient substantiellement (entre 150 k€ pour la CATP, 80 k€ pour la DGITM, la RATP a pour but de négocier un prix qui tend vers celui du thermique).

³⁵ Les prix HT sont utilisés pour réaliser le bilan socio-économique.

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Le développement des ventes de bus électriques et les économies d'échelle induites nous incitent à utiliser une hypothèse de surcoût basse pour 2020 de 60 k€ avec convergence du prix vers le prix du bus diesel à l'horizon 2025.

Pour 2025 on suppose que les coûts ont évolué de la manière suivante :

- une convergence du prix d'achat du véhicule électrique et du véhicule thermique ;
- en raison d'une complexité supérieure de la double motorisation par rapport au véhicule tout électrique, la baisse envisagée du prix de l'autobus hybride rechargeable est de 40 000 € en 2025 ;
- une baisse du prix de l'autobus hybride de 20 000 € en 2025 en raison d'une complexité supérieure de la double motorisation hybride diesel.
- le coût du véhicule GNV n'évolue pas car il s'agit d'une technologie mature.

Tableau 18 – Prix des autobus et autocars selon leur motorisation en 2020 et 2025

En € HTVA

Diesel thermique	250 000	250 000
GNV	290 000	290 000
Hybride diesel	350 000	330 000
Hybride rechargeable diesel	350 000	310 000
Tout électrique (hors batterie)	310 000	250 000

Source : calcul CGDD à partir des données de la CATP et de la RATP

Hypothèses concernant les prix de batterie

Le coût de la batterie a été construit sur la base de celle des véhicules particuliers comme suit : il est de 1 000 € par kWh de capacité de stockage en 2014³⁶, puis décroît de 10 % par an jusqu'en 2030. Le coût de la batterie est estimé à environ 500 €/kWh en 2025 et à 180 €/kWh en 2030. Étant donné les kilométrages effectués par les véhicules sur leur durée de vie, on suppose que la batterie est renouvelée une fois à mi-vie (7 ans pour un autobus et 8 ans pour un autocar).

Les premiers retours d'expérience parvenus seulement récemment concernant l'utilisation des véhicules électriques ont montré qu'il existait des problèmes d'exploitation liés à des défaillances de batteries. Les opérateurs concernés ont estimé qu'il fallait 25 à 30 % de bus en plus par ligne concernée. Il est supposé ici que la technologie sera stabilisée aux horizons étudiés.

Par ailleurs, il est tenu compte d'une valeur résiduelle des deux batteries utilisées. Cette valeur correspondant à une « seconde vie » au service du réseau électrique et est comptabilisée à travers un prix de revente à hauteur de 100 €/kWh de capacité de stockage.

³⁶ Donnée de la RATP.

Partie 1 - Méthodologie et hypothèses générales

Hypothèses concernant les infrastructures de recharge

À partir de données collectées auprès de la RATP et de constructeurs, on retient l'hypothèse que le coût d'une infrastructure de recharge électrique pour un autobus ou un autocar est de 40 000 €. Pour l'infrastructure de recharge GNV, le montant d'une station est d'environ 1 million d'euros pour 40 véhicules, soit 25 000 € par autobus ou autocar. La durée d'amortissement d'une infrastructure de recharge GNV est estimée à 20 ans. Ces hypothèses n'intègrent pas les éventuels surcoûts d'acheminement de l'électricité et des contraintes de sécurité spécifiques aux véhicules électriques qui limitent le nombre de bus dans un dépôt (60 à 80 bus au lieu de 100) qui peuvent nécessiter la construction de nouveaux dépôts et donc des investissements supplémentaires.

L'Ademe mentionne l'exemple de Lille métropole avec des coûts de 1,6 à 1,8 M€ (valeurs 2006/2007) pour une capacité de 150 bus avec remplissage à la place en charge lente et une station de charge rapide en sus. Mais en dehors de l'exemple lillois, l'Ademe estime l'investissement nécessaire à l'avitaillement rapide en GNV à 1,2 M€³⁷ pour 50 bus et l'avitaillement lent ou à la place à 560 k€, ce qui confirme l'ordre de grandeur communiqué par la RATP³⁸.

On suppose nul le coût d'investissement de la station diesel déjà acquise ; un changement de station générerait un coût irrécupérable et un nouvel investissement.

Coûts d'entretien et d'assurance

On suppose que les coûts d'entretien (ou de maintenance) et d'assurance varient en fonction des motorisations. Les différents coûts d'usage sont définis à partir de données publiées par la Centrale d'achat des transports publics (2015). Les coûts d'entretien sont exprimés en c€/km et les coûts d'assurance en €/an.

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

Technologie	Coût d'assurance	Coût d'entretien
Diesel thermique	1 400	21
GNV	1 600	21
Hybride diesel	1 600	25
Hybride rechargeable diesel	1 600	24
Tout électrique (hors batterie)	1 200	19

Source : estimations CGDD à partir des données de la CATP

Il est supposé que les véhicules GNV ont les mêmes coûts d'entretien et d'assurance que les véhicules thermiques. Le véhicule électrique de conception plus simple induit des coûts d'entretien et d'assurance inférieurs. Cependant les dispositifs de récupération de l'énergie

³⁷ Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains (Ademe), 2015

³⁸ L'UTP, en l'absence de stations publiques, estime que le GNV n'est pas adapté aux petites flottes en raison des investissements importants liés à l'infrastructure.

cinétique pendant les phases de décélération ou de freinage pour prolonger l'autonomie de la batterie sont susceptibles de renchérir ce coût (cf. CATP). De plus, l'UTP considère que le remplacement de véhicules thermiques par des véhicules électriques ou hybrides rechargeables peut générer, pendant une période transitoire, des surcoûts liés à la formation (écoconduite pour les conducteurs, formation et habilitation des électrotechniciens et mécaniciens). Le véhicule hybride, plus complexe, est plus onéreux en raison de sa double motorisation. Cependant, il est possible que les coûts d'entretien des motorisations électriques soient ici sous évalués en raison de surcoûts de maintenance liés aux batteries pour lesquels nous n'avons pas de données. Par ailleurs, concernant les modèles hybrides, certains éléments plaident au contraire pour une hypothèse de coûts d'entretiens inférieurs à ceux du diesel : meilleure utilisation du moteur thermique, absence de certaines pièces dont l'usure entraîne des coûts (pas d'embrayage, pas de démarreur, pas d'alternateur, pas de courroie d'accessoires), une chaîne de distribution ne nécessitant pas de remplacement et la réduction de l'usure des plaquettes du fait du freinage régénératif.

Le rapport de l'Ademe³⁹ sur les bus suppose un coût de maintenance pour le diesel de l'ordre de 30 c€/km. Le coût de maintenance du tout électrique est supposé de 55 c€/km, soit plus de 80 % supérieur à celui du diesel. Celui du GNV est de 36 c€/km (+22 % par rapport au diesel), mais, dans le corps du rapport, est mentionnée l'hypothèse qu'aucun surcoût n'existe pour les véhicules récents (p.24). Pour l'hybride électrique, le supplément est de +22 % également. Le coût de maintenance de l'hybride rechargeable est de 48 c€/km (+ 44 %).

Les coûts d'assurance ont été calculés en utilisant les mêmes ratios que les coûts d'entretien.

Les coûts d'entretien et d'assurance sont actualisés pour 2020 et 2025 à partir des taux de croissance annuels moyens (TCAM) des indices des prix à la consommation pour ces deux postes de coûts. On suppose que les coûts d'entretien croissent de 1,9 %/an hors inflation (ce qui s'explique par une complexité croissante des technologies) alors que les coûts d'assurance diminuent de 1,9 %/an hors inflation (ce qui est justifié par une augmentation de la sûreté et une baisse des sinistres). L'UTP observe que l'extension de la loi Badinter relative à la responsabilité civile rendant responsable les opérateurs pour les incidents liés à des passagers dans ou à proximité du bus pourrait avoir un impact sur le prix des polices d'assurance, qui n'est pas considéré ici.

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.

Les entreprises de transport en commun de voyageurs peuvent bénéficier, sur une base forfaitaire et sur demande de leur part, du remboursement partiel de la taxe intérieure sur la consommation des produits énergétiques (TICPE), assise sur leur consommation réelle de gazole au cours d'un semestre, utilisée pour les besoins de leur activité professionnelle. En

³⁹ <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/autobus-urbains-2015.pdf> (annexe 2).

appliquant les taux régionaux, la différence entre le taux plancher de 39,19 € et le tarif applicable dans la région d'achat est appliquée au volume de gazole utilisé.

La TICPE est plafonnée à 39,19 €/hl pour le diesel et elle est constante pour le GNV à 6,5 €/100 m³, soit 8,594 €/100 kg (6,23 €/MWh).

Depuis le 1^{er} janvier 2017, le tarif réduit sur la taxe de consommation finale de l'électricité (TICFE) fixé à 0,50 €/MWh s'étend aux bus électriques ou hybrides rechargeables (au lieu de 22,5 €/MWh avant cette date). Ce tarif réduit ne s'appliquait jusqu'ici qu'aux train, métro, tramway, câble et trolleybus.

Prix de l'électricité

Le prix de l'électricité est celui qui correspond à la fourniture aux industriels. Le prix de l'électricité pour l'opérateur de transport tient compte du plafonnement de la TICFE. On distingue le prix payé par l'opérateur, qui est de l'ordre de 70 €/MWh HTVA en 2020 et est supposé augmenter en moyenne sur 2015-2030 de 1 % par an (en réel) puis se stabiliser ensuite, du coût socio-économique qui intègre le coût global de fourniture de l'électricité. En particulier, le financement des énergies renouvelables par des subventions doit être pris en compte pour ce dernier. Avant la mise en place de la TICFE, la Contribution au service public de l'électricité (CSPE) était l'outil de financement des énergies renouvelables (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 stabilise⁴⁰. On obtient donc un niveau sensiblement supérieur et une croissance plus dynamique pour le coût socio-économique que pour le prix payé par l'utilisateur : de l'ordre de 100 €/MWh HTVA en 2020 et 120 € / MWh en 2030.

Ces hypothèses sont cohérentes avec celles prises pour l'étude « Analyse coûts bénéfices des véhicules électriques – Les voitures » (CGDD). Le prix de l'électricité en diffère car il s'agit ici d'un prix de fourniture pour un consommateur industriel raccordé sur le réseau électrique à un niveau de tension supérieur, dont la composante acheminement est plus faible.

Prix des carburants (hors toutes taxes - HTT) (en € 2015) :

- diesel : 0,50 €/L (HTT) en 2015 puis croissance de 5,5 % (réel) d'ici 2030 puis de 1,7 % par an ensuite ;
- gaz naturel : 0,70 €/kg (HTT) en 2020 (soit environ 50 €/MWh correspondant au prix HTT payé par un consommateur du secteur tertiaire), croissance de 2,7 %/an (réel) jusqu'en 2030, puis de 0,8 % par an ensuite.

Les trajectoires de prix des carburants sont construites en partant des prix moyens observés en 2015, puis en appliquant un taux de croissance annuel tenant compte du scénario *current policy* de l'AIE pour le pétrole (baril à 50 \$ en 2015, 130\$ en 2030 et 150 \$ en 2040) et le gaz (12,5 \$/Mbtu en 2030, contre 7,5 \$/Mbtu en 2015).

Ces hypothèses sont cohérentes avec celles prises pour l'étude Analyse coûts bénéfices des véhicules électriques – Les voitures (CGDD 2017).

⁴⁰ Il s'agit toujours d'euros 2015.

Partie 2

Résultats de l'analyse coûts bénéfices

Les bilans sont fournis aux horizons 2020 et 2025, en détaillant les différentes zones urbaines de circulation pour l'autobus et en usage mixte pour les autocars.



FOCUS SUR LE BILAN CO₂ DU BUS ÉLECTRIQUE

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

Dans le cas de la zone très dense en 2020, il s'agit de comparer un bus électrique équipé d'une batterie consommant 168 kWh/100 km à un véhicule thermique diesel dont la consommation en milieu urbain très dense est en moyenne de 53,8 l/100 km (cf. hypothèses de consommation). On fait l'hypothèse qu'en usage standard le véhicule parcourt 40 000 km / an, soit 600 000 km pendant sa durée de vie qui est de 16 ans. Au total, le véhicule thermique émet, pendant sa durée d'utilisation, environ 1 000 t de CO₂ (émissions amont et à la combustion). La production des deux batteries de 270 kWh émet de l'ordre de 60 t CO₂. Pour qu'un véhicule électrique obtienne un bilan équivalent au véhicule thermique, le contenu CO₂ de l'électricité doit être de 930 gCO₂/ kWh. Toute valeur en dessous de ce seuil permet donc au VE d'obtenir un meilleur bilan CO₂ 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 ; idem pour la consommation des véhicules électriques.

Tableau - Seuil d'indifférence « GES » entre les technologies électriques et thermiques en fonction du contenu CO₂ de l'électricité
en tenant compte des émissions de CO₂ associées à la production de la batterie

En g CO₂/kWh

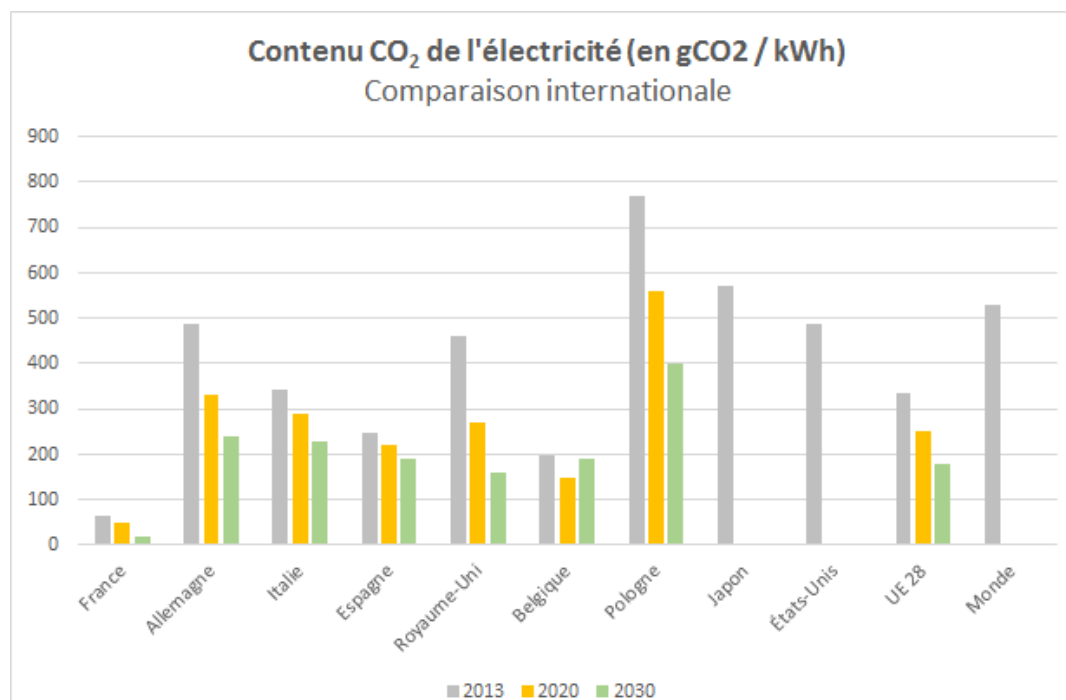
Cas	Véhicule	Kilométrage	2020	2025
Très dense	Autobus	600 000	923	872
Dense	Autobus	600 000	876	826
Mixte	Autocar	480 000	590	556

À titre de comparaison, d'après l'Agence internationale pour l'énergie²⁵ (AIE), le contenu CO₂ moyen en France de l'électricité en 2013 est de 64 gCO₂/kWh alors qu'il est de 486 g en Allemagne (voir graphique).

.../...

²⁵ CO₂ emissions from fuel combustion (IEA), 2015

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices



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

En 2020, le seuil serait de 590 gCO₂/kWh en zone mixte là où le véhicule thermique diesel est le plus performant. Ainsi, en usage mixte, le VE serait plus performant que le véhicule thermique en matière de CO₂, en Allemagne (330 g), au Royaume-Uni (270 g), en Italie (290 g) ou par rapport à la moyenne de 250 g de l'UE28 mais aussi en Pologne (560 g).

ZOOM SUR L'USAGE STANDARD DE L'AUTOBUS EN ZONE URBAINE TRÈS DENSE

Bilan socio-économique en zone très dense en 2020

La zone urbaine très dense, en raison d'une forte exposition des populations concernées aux externalités environnementales, constitue *a priori* une zone privilégiée pour le développement de l'autobus électrique. L'analyse socio-économique détaillée, comparant les coûts d'achat, d'usage et les externalités négatives du bus diesel à celui du bus électrique, révèle que ce dernier n'est pas encore compétitif en 2020 mais qu'il le deviendrait en 2025. De même, le bilan en matière de coûts complets de possession démontre la rentabilité de l'option électrique pour l'entreprise de transports.

Coût d'acquisition : un surcoût de 226 k€ HT

On fait l'hypothèse que l'autobus électrique (hors batterie) a un surcoût d'achat de 60 k€ en 2020 mais que son prix baisse au fil du temps pour converger vers celui du bus thermique en 2025.

L'écart sur le poste achat entre les deux technologies est essentiellement dû à l'achat de la batterie (plus de 100 000 €). Le prix de la batterie diminue au fil du temps, d'environ 500 €/kWh en 2020 à 180 €/kWh en 2025, si bien que la seconde batterie achetée au bout de 7 ans est sensiblement moins onéreuse (pour rappel, le calcul du coût procède à l'actualisation des dépenses futures). Il est tenu compte d'un prix de revente de chaque batterie (seconde vie) de 100 €/kWh, qui permet de réduire le surcoût global.

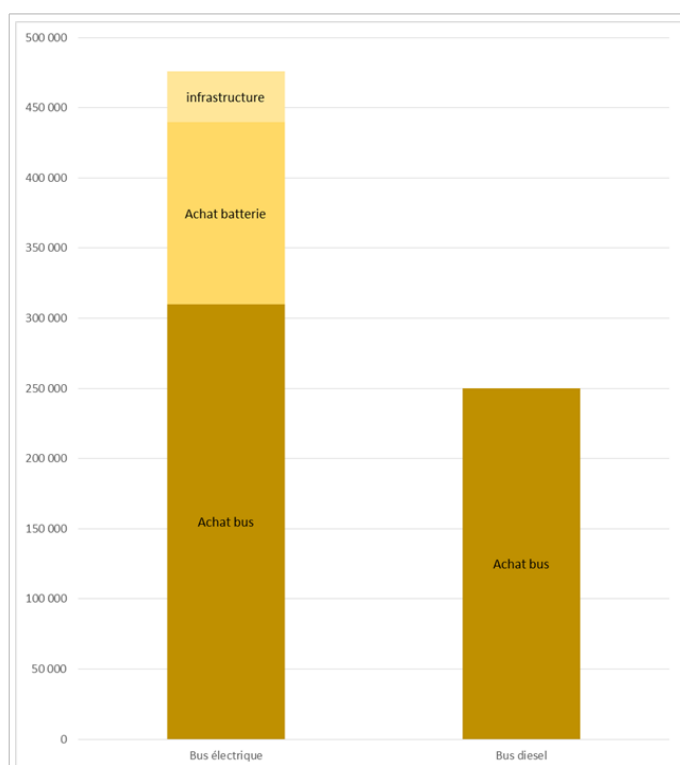
À l'achat, l'autobus électrique est également pénalisé par un investissement relatif à l'installation d'une station de recharge amortie sur 20 ans qui génère un surcoût de 36 k€/bus.

Au total à l'achat, la solution électrique est pénalisée par un surcoût de l'ordre de 226 000 €, qui se décompose en :

- surcoût du véhicule (60 k€),
- surcoût lié à la batterie (130 k€),
- surcoût lié à la borne (36 k€).

Figure 2 - Coûts d'achat comparés d'un bus électrique et d'un bus diesel

En €2015



Source : calcul CGDD

Coûts d'usage : une économie de 145 k€ HT

Dès 2020, les coûts d'usage du bus électrique 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 électrique mais également sur le plan énergétique.

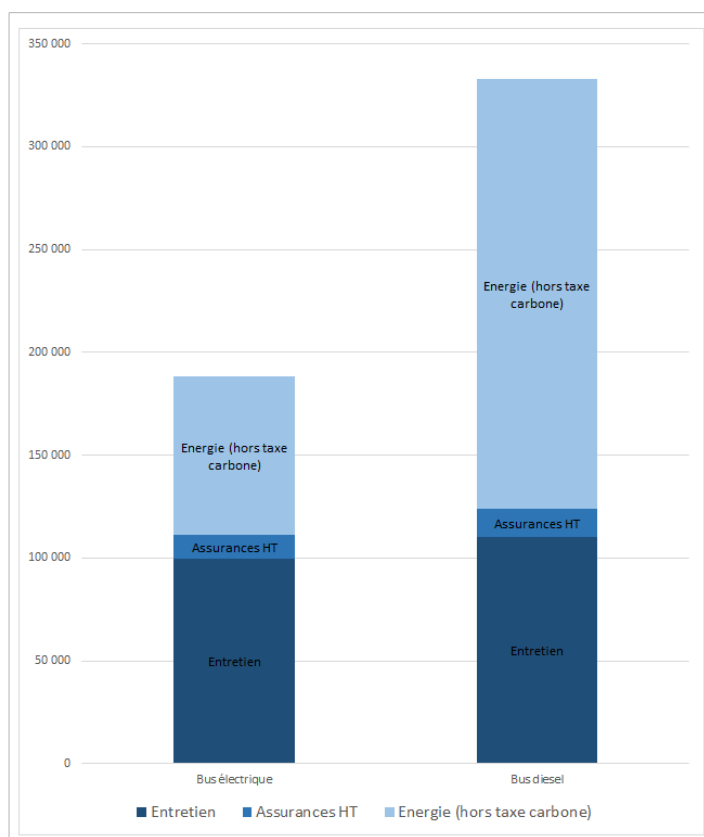
S'agissant d'une analyse socio-économique, les coûts considérés ici sont pris HTT (la TICPE est exclue). Dans ces conditions, il apparaît que le coût de l'énergie pour la solution électrique est plus de 60 % moins élevé que celui de la solution thermique.

Le gain de 145 k€ se décompose en :

- gain lié à l'entretien (11 k€),
- gain lié à l'assurance (2 k€),
- gain lié à l'énergie (132 k€).

Figure 3 - Coûts d'usage socio-économique comparés d'un bus électrique et d'un bus diesel

En €2015, hors toutes taxes



Source : calcul CGDD

Externalités : gain environnemental de 118 k€ HT

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). Les particules émises du fait de l'abrasion²⁶, donc de l'usure des freins, de l'usure des pneus et de la route représentent la grande majorité des émissions (environ 95 %) par rapport à celles émises du fait de la combustion pour un véhicule thermique, Euro VI.

²⁶ Calcul à partir des facteurs d'émission 2016 du Citepa, pour les particules de moins de 10 micromètres.

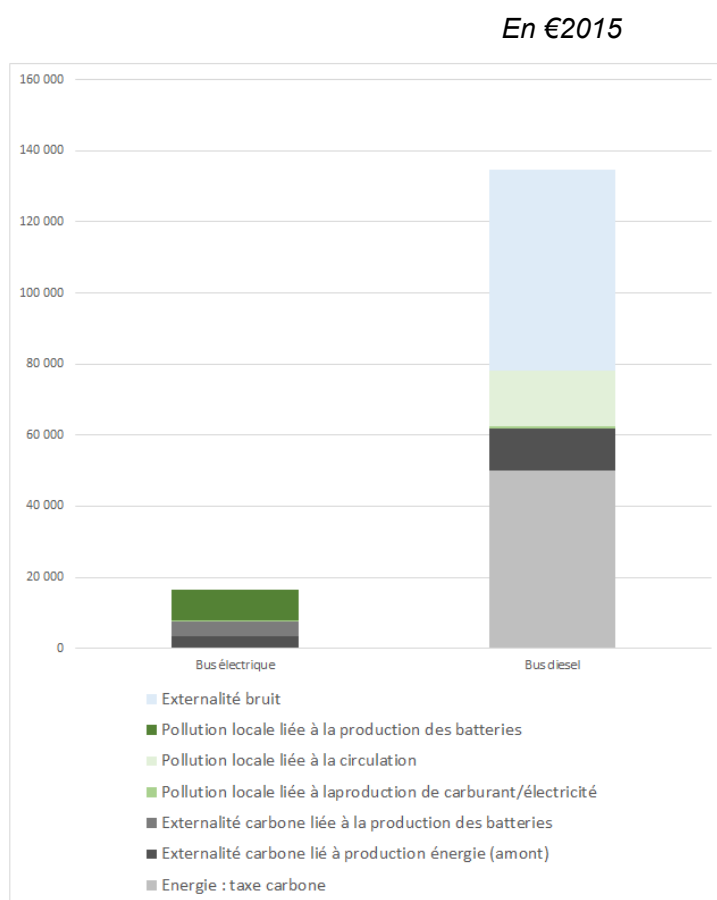
Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

Pour l'autobus thermique, les émissions de CO₂ liées à la consommation de carburant représentent 46 % du coût total des externalités, le bruit 42 % et la pollution atmosphérique 12 %.

Pour l'autobus électrique, plus de 80 % du coût lié aux externalités provient de la production des batteries (pollution atmosphérique et émissions de CO₂) et les 20 % restants sont générés par la production d'électricité. Comme seule la phase de combustion est prise en compte, la pollution liée à l'usage du véhicule apparaît comme nulle.

Le coût du bruit est nul en zone urbaine très dense, car on suppose qu'une vitesse inférieure à 30 km/h ne génère pas de nuisances sonores.

Figure 4 - Coûts comparés des externalités d'un bus électrique et d'un bus diesel



Source : calcul CGDD

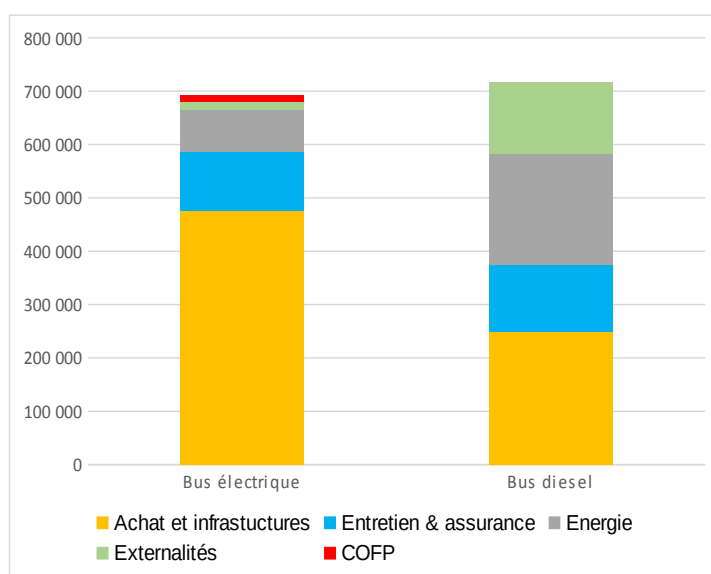
Surcoût socio-économique 2020 : -24 k€

Outre les éléments décrits précédemment, il faut tenir compte également d'un coût d'opportunité des fonds publics (COFP) de 11 980 € qui correspond à la TICPE non collectée, une fois déduit le gain correspondant aux taxes sur l'électricité (qui tient compte du plafonnement de la TICFE à 0,5 €/MWh).

Le bilan socio-économique en 2020 fait apparaître un coût complet sur la durée de vie du véhicule de 694 k€ pour le bus électrique et de 718 k€ pour le bus diesel. Le bilan est donc favorable au bus électrique en zone très dense dès 2020.

Figure 5 - Coûts socio-économiques : bus électrique vs bus diesel en zone très dense

En €2015



Source : calcul CGDD

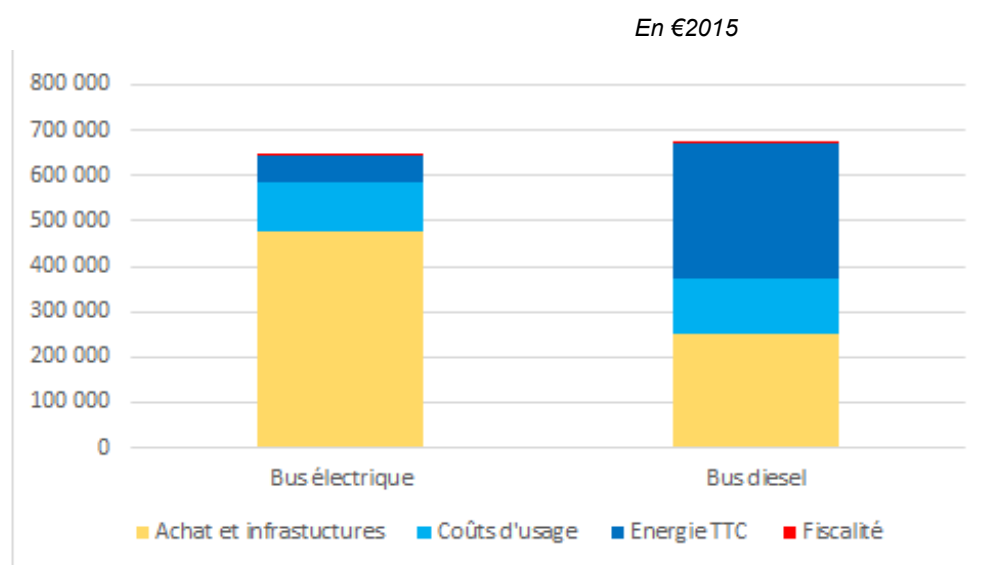
Coût pour l'entreprise de transports (TCO) en 2020

Le bilan TCO du point de vue de l'entreprise de transports s'avère également positif pour le bus électrique en 2020. En effet, il est évalué à 645 k€ pour le bus électrique et à 671 k€ pour le bus 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 le gazole (relativement à l'électricité), bien que soit pris en compte dans le calcul le plafonnement de la TICPE (qui représente environ 40 k€ d'économie). Le gain pour l'entreprise de transports sur le poste

énergie est important avec une facture énergétique plus de cinq fois moins élevée que celle d'un véhicule thermique.

Figure 6 - Coûts pour l'entreprise de transports : bus électrique vs bus diesel
(tenant compte du plafonnement de la TICPE sur le diesel et de la TICFE sur l'électricité)



Source : calcul CGDD

Le gain pour le bus électrique de 26 k€ HT se décompose de la manière suivante :

- achat, batterie et infrastructures : + 225 k€
- entretien et assurance : - 12 k€
- énergie : - 239 k€

AUTOBUS : RÉSULTATS COMPLETS

Et en 2025 ?

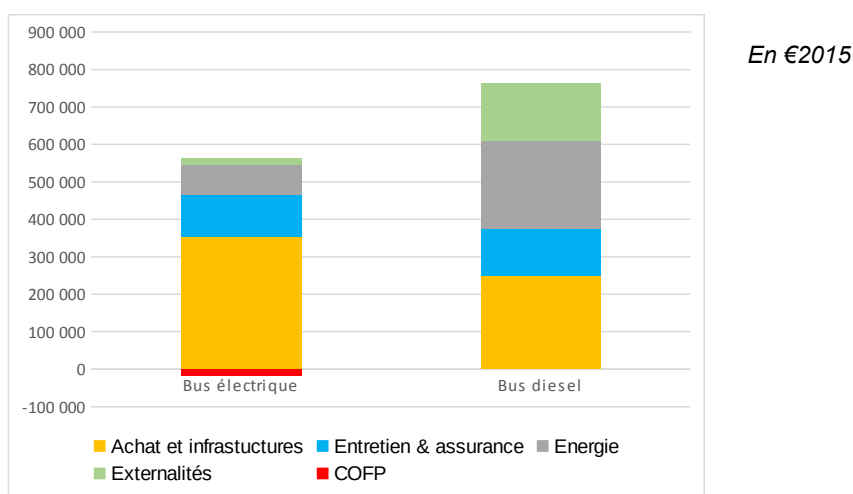
Entre 2020 et 2025, les prix d'achat des bus électriques et des batteries sont supposés en baisse et permettent d'améliorer le bilan sur le poste achat qui devient nettement moins défavorable au VE. De plus, l'augmentation prévisible du prix des énergies fossiles, plus importante que celle de l'électricité 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 1 % par an.

En 2025, les bilans socio-économiques et TCO deviennent largement positifs pour le bus électrique, en zone urbaine très dense.

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

Le bilan socio-économique en 2025 fait apparaître un coût complet de 548k€ pour le bus électrique et de 763 k€ pour le bus diesel.

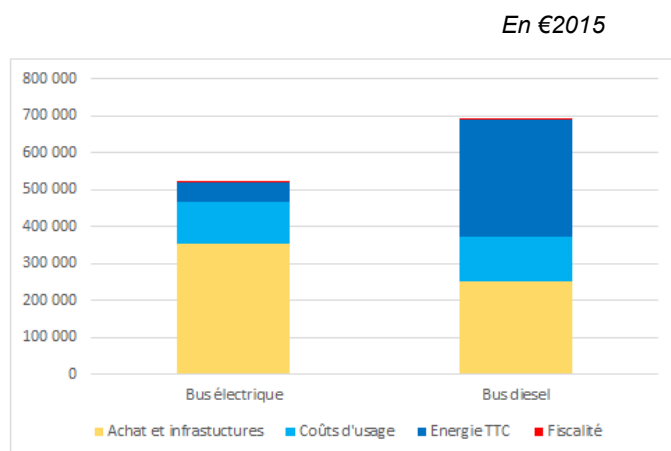
Figure 7- Coûts socio-économiques 2025 : bus électrique vs bus diesel



Source : calcul CGDD

Le bilan TCO montre un coût de 520 k€ pour le bus électrique et de 691 k€ pour le bus diesel.

Figure 8 - Coûts pour l'entreprise de transports 2025 : bus électrique vs bus diesel



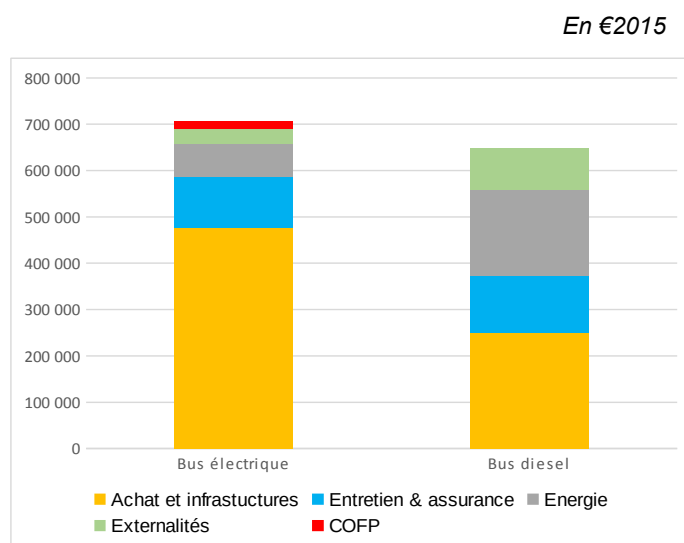
Source : calcul CGDD

Et en zone dense ?

Coût socio-économique 2020

En 2020, en zone dense, le bilan socio-économique du bus électrique est négatif en raison de coûts d'achats élevés et insuffisamment compensés par les gains liés à l'usage. Le bilan pour le bus électrique est dégradé par rapport à la zone très dense, car les gains en matière d'externalités, notamment en matière de pollution atmosphérique et de bruit, sont limités. En effet, en zone dense, le bus électrique, avec une vitesse supérieure, produit des nuisances sonores (qui restent inférieures de 50 % à celle du bus thermique). De plus, en zone dense, la population exposée est moins importante, ce qui se traduit par des coûts externes inférieurs et un bilan environnemental du bus thermique moins négatif par rapport à la zone très dense.

Figure 9 - Coûts socio-économiques en zone dense en 2020 : bus électrique vs bus diesel



Source : calcul CGDD

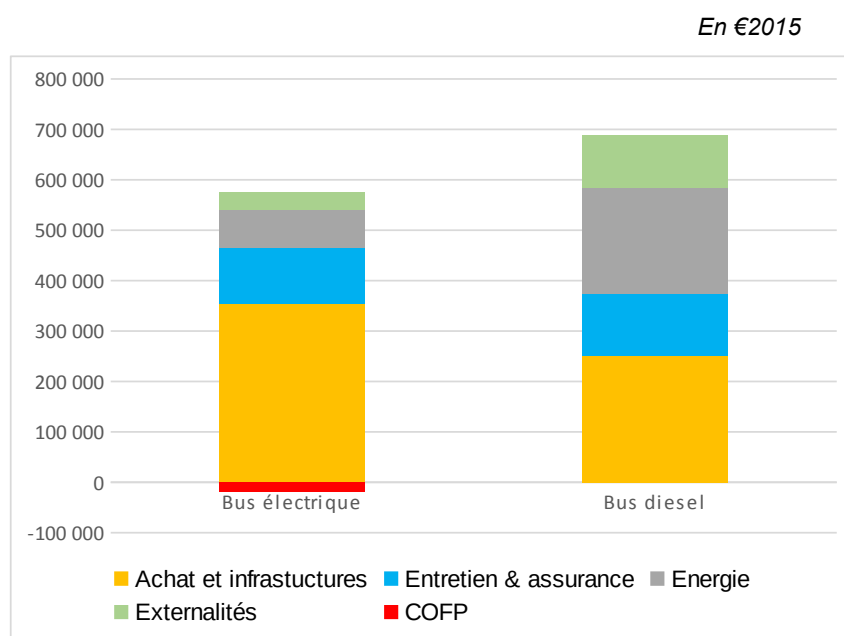
Coût socio-économique 2025

Entre 2020 et 2025, le bilan socio-économique du bus électrique en zone dense s'améliore en raison principalement de la baisse du coût des batteries (réduit de moitié en 5 ans) et des coûts d'achat des véhicules électriques réduits de 60 000 €. Malgré une baisse de la consommation unitaire de 1 %/an pour les bus thermiques, l'augmentation du coût du CO₂ pénalise fortement cette technologie. De plus, les coûts liés aux externalités comme la pollution atmosphérique augmentent mais restent plus faibles pour le VE, ce qui accentue l'avantage des véhicules électriques.

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

En conclusion, le VE devient rentable par rapport au bus diesel. En effet, il améliore son bilan entre 2020 et 2025 (de 707 à 562 k€) alors que celui du véhicule thermique se dégrade (de 649 à 688 k€).

Figure 10 - Coûts socio-économiques en zone dense en 2025 : bus électrique vs bus diesel



Source : calcul CGDD

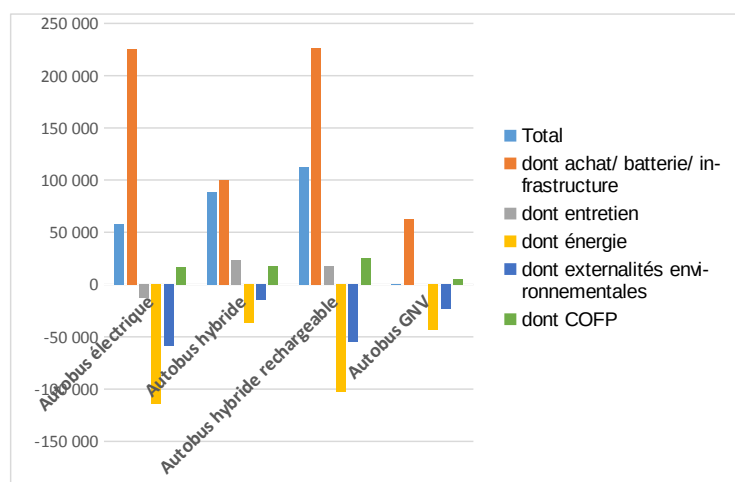
Et pour les autres technologies?

En 2020

Bilan socio-économique en milieu urbain dense en 2020

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

Figure 11 - Motorisations autobus : surcoûts socio-économiques des technologies alternatives en zone dense, par rapport à la solution conventionnelle diesel (2020)



Source : calcul CGDD

En zone dense, à cette date, aucune technologie ne présente un bilan socio-économique meilleur que le bus thermique diesel conventionnel, à l'exception du GNV.

Globalement, les bus GNV présentent le meilleur bilan, face au bus thermique, en raison d'un surcoût d'achat limité de 40 k€ et d'un surcoût d'installation de la station GNV de 25 k€ / bus totalement couverts par des gains sur le plan énergétique et environnemental. Le bilan quasi équilibré, est légèrement négatif de moins de 0,5 k€.

L'autobus électrique présente le meilleur bilan en matière d'usage aussi bien pour le bilan environnemental et énergétique que pour l'entretien. Cependant il est pénalisé par des surcoûts d'achat (60 k€), de la batterie qui est renouvelée une fois (environ 100 k€) et d'infrastructure (40 k€/bus) qui s'élèvent au total à 200 k€.

L'autobus hybride rechargeable présente un bilan négatif de l'ordre de 112 k€. Les performances de cette technologie sur les plans énergétique et environnemental sont assez proches de celles du bus électrique mais le bilan est encore plus pénalisé par un coût d'achat du véhicule supérieur de 40 k€ à celui du bus électrique. Il est également pénalisé par des coûts d'entretien élevés en raison de la complexité de la motorisation intrinsèque à cette technologie.

Malgré des gains énergétiques et des gains environnementaux deux à trois fois inférieurs, le bilan de l'autobus hybride est meilleur que celui de l'hybride rechargeable (87 k€). Le véhicule hybride est principalement pénalisé par son surcoût d'achat de 100 k€ par rapport à un bus thermique et, comme pour toutes les technologies hybrides, par des surcoûts d'entretien liés à la bi-motorisation.

Bilan socio-économique en milieu urbain très dense en 2020

Le bus GNV présente un bilan positif en 2020. Comparé à la zone dense, le gain énergétique est amélioré en zone très dense de plus de 10 % et le gain environnemental est quasiment doublé. Ces gains permettent au bus GNV d'obtenir un bilan positif de 26 k€.

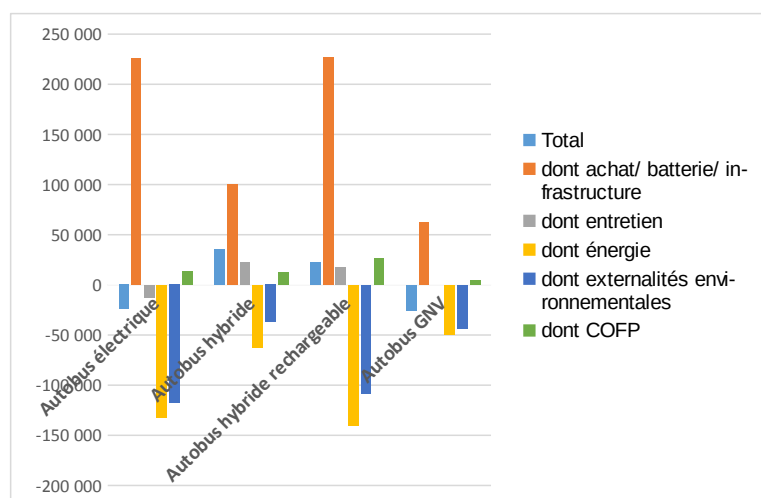
L'autobus électrique présente un bilan quasi équivalent en zone très dense avec un gain de près de 20 k€ en matière d'énergie et de 60 k€ sur le plan des externalités environnementales par rapport au milieu dense, principalement en raison d'un gain substantiel en matière d'émission de bruit, car le bus électrique n'en produit pas à vitesse réduite en zone très dense. Le gain socio-économique s'élève à 24 k€.

L'autobus hybride rechargeable présente comme le bus électrique un bilan amélioré en zone très dense, car il effectue 90 % des trajets en mode électrique, ce qui lui permet d'afficher un bilan environnemental et énergétique très amélioré mais dans des proportions moindre que le bus électrique (70 k€ pour les 2 postes). Le surcoût socio-économique est cependant limité (+22 k€).

L'autobus hybride améliore également son bilan de près de 45 k€. Les gains se répartissent presque également entre le bilan énergétique et les externalités environnementales (plus de 20 k€ pour les deux postes). Les gains sur le plan environnemental sont inférieurs à ceux des autres technologies, car la technologie hybride ne permet pas d'obtenir de gain substantiel en matière de pollution sonore. Le bilan reste donc négatif à - 36 k€.

Un facteur pourrait jouer en faveur des technologies hybrides. Il a été estimé dans les hypothèses que leur coût d'entretien était supérieur d'environ 15 % à celui d'un véhicule diesel conventionnel. Or certains éléments plaident au contraire pour une hypothèse de coûts d'entretiens inférieurs à ceux du diesel : meilleure utilisation du moteur thermique, absence de certaines pièces dont l'usure entraîne des coûts (pas d'embrayage, pas de démarreur, pas d'alternateur, pas de courroie d'accessoires), une chaîne de distribution ne nécessitant pas de remplacement et la réduction de l'usure des plaquettes du fait du freinage régénératif. Le poste entretien pèse pour plus de 100 k€ dans le coût complet. Le bilan pourrait ainsi devenir positif pour les VHR, et éventuellement pour les VH.

Figure 12 - Motorisations autobus : surcoûts socio-économiques des technologies alternatives par rapport à la solution conventionnelle diesel, en zone très dense (2020)



Source : calcul CGDD

En 2025

Bilan socio-économique en milieu urbain dense en 2025

Entre 2020 et 2025, tous les bilans comparés au véhicule thermique conventionnel s'améliorent en zone urbaine dense pour devenir positifs, à l'exception des de l'autobus hybride.

L'autobus GNV améliore substantiellement son bilan énergétique en raison d'une hausse des prix des carburants liquides plus forte que celle du prix du gaz naturel. Le bilan environnemental s'améliore également, car les coûts externes sont indexés sur le PIB. Le bilan socio-économique évolue entre 2020 et 2025 de -0,5 k€ à 17 k€.

Entre 2020 et 2025, l'écart de prix à l'achat entre le bus thermique et le bus électrique a été comblé ce qui lui permet d'afficher un bilan amélioré de 60 k€ pour le poste achat. Le prix des batteries diminue également. Au total pour le poste achat de batterie, le surcoût diminue de plus de 120 k€. Le bilan énergétique s'améliore également de plus de 20 k€ et le bilan environnemental de plus de 10 k€. Entre 2020 et 2025, le bilan socio-économique s'améliore nettement pour devenir positif en évoluant de -58 k€ à 125 k€.

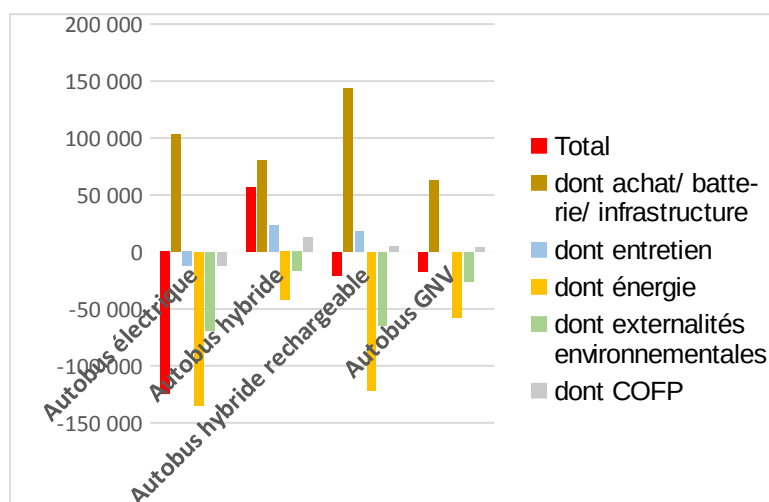
L'écart constaté en 2020 entre technologies hybrides et véhicule thermique se réduit en 2025 principalement en raison de la baisse des prix d'achat du bus hybride et du bus hybride rechargeable respectivement de 20 k€ et 40 k€.

Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

L'autobus hybride rechargeable présente un bilan positif de 20 k€, principalement en raison de la baisse du prix d'achat de 40 k€ et de la baisse du coût des batteries d'un montant équivalent. Comme pour le véhicule électrique le bilan énergétique et le bilan environnemental s'améliorent nettement car en zone dense, le bus hybride rechargeable réalise 90 % de ses trajets en mode électrique.

Le bilan de l'autobus hybride s'améliore tout en restant négatif à -57 k€, ce qui correspond essentiellement à la baisse de 20 k€ du prix d'achat à laquelle s'ajoute des gains énergétiques et environnementaux de 8 k€. Ces gains apparaissent moins importants que pour les autres technologies en raison de l'utilisation du moteur thermique en zone dense pénalisé par la hausse du prix du gazole.

Figure 13 – Motorisations autobus : surcoûts socio-économiques des technologies alternatives par rapport à la solution conventionnelle diesel, en zone dense (2025)



Source : calcul CGDD

Bilan socio-économique en milieu urbain très dense en 2025

Toutes les technologies alternatives à l'autobus thermique affichent un bilan positif en zone très dense en 2025. Les motorisations électriques améliorent nettement leur bilan entre 2020 et 2025 avec un gain supérieur à celui du bus GNV et du bus hybride.

Pour le bus GNV, le bilan s'améliore de 26 k€ à 47 k€, principalement en raison d'un gain énergétique de plus 15 k€ et d'un gain modéré de 4 k€ sur le plan environnemental.

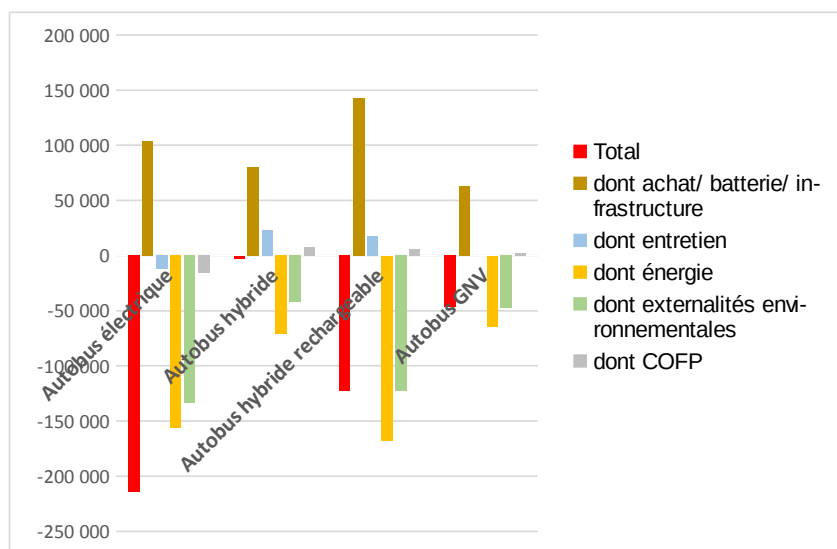
Partie 2 - Résultats de l'analyse coûts bénéfices

Le bus électrique améliore substantiellement son bilan (de 24 k€ à 215 k€). Les gains en matière d'externalités environnementales et sur le plan énergétique entre 2020 et 2025 de plus 40 k€ et la baisse du coût d'achat de 60 k€ ainsi que la baisse du prix des batteries de plus de 50 k€ permettent au bus électrique d'atteindre un bilan nettement positif.

Le bilan socio-économique du bus électrique rechargeable s'améliore entre 2020 et 2025 (de -24 k€ à +125 k€) et devient positif. Le gain observé se répartit quasiment de manière égale entre le prix d'achat du véhicule qui baisse de 40 k€, le coût de la batterie qui diminue de plus de 40 k€ et le poste énergie / externalités pour lequel les coûts diminuent aussi de près de 40 k€.

Pour l'autobus hybride, le bilan s'améliore (de -36 k€ à +3 k€) et devient légèrement positif. L'essentiel du gain observé provient de la baisse du prix d'achat de 20 k€. La baisse de consommation de 1 % par an lui permet également d'obtenir des gains sur le plan énergétique (9 000 €) et en matière d'émission de CO₂ mais les gains sont limités en matière de bruit et pollution atmosphérique.

Figure 14 - Motorisation autobus : surcoûts socio-économiques des technologies alternatives par rapport à la solution conventionnelle diesel, en zone très dense (2025)



Source : calcul cgdd

AUTOCARS

2020

En usage moyen, avec une part importante de trajets interurbains et en milieu urbain diffus (2/3 des trajets), le bilan des technologies alternatives à l'autocar diesel conventionnel est systématiquement négatif.

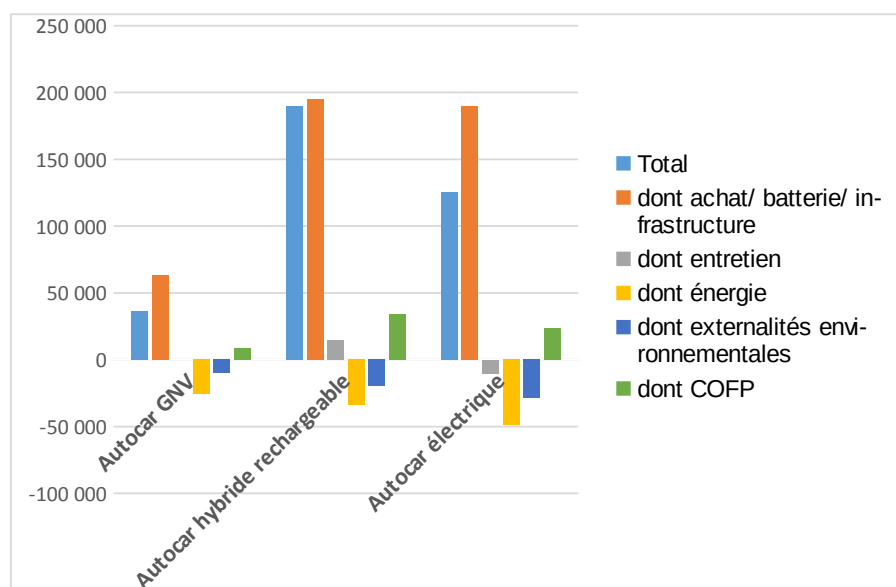
Le cas de l'autocar hybride n'est pas étudié car la grande part d'usage sur des trajets interurbains avec des vitesses élevées et un rendement optimisé du moteur thermique rendent l'intérêt de l'autocar hybride assez faible comparé à un autocar diesel.

L'autocar électrique présente un surcoût de 125 k€. Il affiche un bilan positif en matière d'entretien, (10 k€), d'énergie (49 k€) et d'externalités environnementales (29 k€). Cependant ces gains ne compensent pas les surcoûts d'achat des véhicules, des batteries et d'infrastructure dont le montant est de 190 k€. Les gains observés comparés à ceux obtenus en zones dense et très dense sont limités car le rendement du moteur thermique est meilleur en milieu mixte. De même, on observe que les gains environnementaux sont deux fois inférieurs à ceux constatés en milieu urbain dense et près de 4 fois plus faibles qu'en milieu très dense. Les deux tiers des trajets sont effectués dans des zones peu denses, donc moins de populations sont exposées au bruit et à la pollution atmosphérique ce qui explique une valorisation monétaire des externalités plus faible. Par exemple, en matière de bruit, le coût au véhicule/km est 5 à 10 fois moins élevé en milieu mixte qu'en zone dense ou très dense.

L'autocar hybride rechargeable qui effectue 70 % de ses trajets en mode électrique réalise des gains inférieurs sur le plan énergétique et environnemental à l'autocar électrique (respectivement 35 k€ et 20 k€). Il est fortement pénalisé par la double motorisation avec un coût d'achat supérieur au véhicule thermique de 100 k€ et des surcoûts d'entretien de près de 15 k€. Il affiche donc un surcoût socio-économique de 190 k€.

Le bus GNV présente le bilan le moins défavorable parmi les technologies alternatives en milieu mixte. Le bilan négatif de -36 k€ s'explique par des gains limités en matière de pollution atmosphérique et de bruit en raison de la faiblesse des densités des zones traversées. Les gains en matière d'énergie et d'externalités compensent le surcoût de l'investissement lié à la station mais pas le surcoût d'achat du véhicule qui s'élève à + 40 k€.

Figure 15 – Motorisations autocars : surcoûts socio-économiques des technologies alternatives par rapport à la solution conventionnelle diesel, en zone mixte (2020)



Source : calculs CGDD

2025

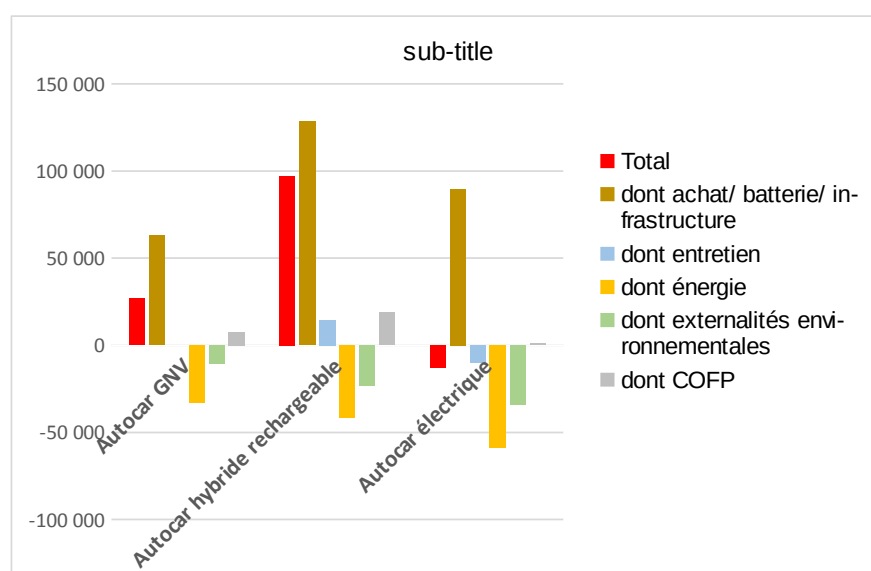
Entre 2020 et 2025, le bilan socio-économique de l'autocar électrique en milieu mixte s'améliore substantiellement pour atteindre 13 k€/bus en 2025. Il s'agit de la seule technologie qui présente un bilan légèrement positif. Le gain essentiel est dû à la baisse du coût d'achat de 60 k€ entre 2020 et 2025 mais également à la baisse du prix des batteries qui permet un gain de plus de 40 k€. Comparés aux gains liés à l'achat du véhicule et des batteries, les gains sur le plan énergétique (10 k€) et environnemental (5 k€) sont limités, notamment en raison de la hausse des coûts des externalités indexées sur le PIB et de celle des carburants limitée par l'hypothèse de baisse des consommations des bus thermique de 1 % par an.

Le bilan de l'autocar hybride rechargeable s'améliore dans des proportions moindres que celles de l'autocar électrique en évoluant de - 190 k€ à - 97 k€. En 2025, le prix d'achat de l'autocar hybride diminue de 40 k€ et le prix des batteries de 26 k€. Les gains sur le plan énergétique en 2025 sont moins importants que ceux du véhicule électrique (7 k€) car cette technologie utilise du diesel sur 10 % des kilomètres parcourus. Sur le plan environnemental, les gains sont inférieurs à ceux de l'autocar électrique (4 k€, soit 2/3 des gains de l'autocar électrique) en raison des nuisances propres au moteur thermique.

Le bilan de l'autocar GNV s'améliore de -36 k€ à -27 k€ essentiellement sur le poste de la consommation d'énergie (7 k€). Le gain du GNV en matière de bruit en zone non urbaine étant

limité, les gains en matière d'externalités environnementales sont faibles (1 k€). Ils sont inférieurs à ceux des technologies électriques (de 3 à 4 k€). Une hypothèse de baisse des prix de cette technologie comparable à l'autocar hybride rechargeable (40 k€), en raison d'économies d'échelle au niveau de la production du véhicule, rendrait le bilan positif.

Figure 16 – Motorisations autocars : surcoûts socio-économiques des technologies alternatives par rapport à la solution conventionnelle diesel, en zone mixte (2025)



Source : calculs CGDD

Annexes

Bilans détaillés

Bibliographie



Bilans détaillés

Les bilans ci-après s'interprètent de la manière suivante :

- Pour le bilan en matière d'externalités ou pour le bilan fiscal, quand le total est positif, cela signifie que la solution alternative a un coût inférieur à la solution conventionnelle (thermique).
- Concernant le bilan TCO ou le bilan socio-économique, on raisonne en termes de surcoût économique. Un résultat négatif s'interprète alors comme un gain pour la solution alternative comparée à la solution conventionnelle.

Ils sont exprimés en euros 2015.

Autobus

Cas autobus urbains 2020 (en €2015)

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
Autobus électrique	58 357	47 482	- 4 124	15 000	117 984	54 213	7 264	56 506
Autobus hybride	14 663	7 700	963	6 000	37 137	15 324	4 861	16 952
Autobus hybride rechargeable	54 716	43 185	- 1 968	13 500	108 328	49 190	8 282	50 856
Autobus GNV	23 686	6 279	2 408	15 000	43 431	7 076	8 102	28 253

Surcoût pour l'entreprise de transport (TCO)

Surcoût (HTVA)	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
Autobus électrique	3 712	189 606	36 064	-12 197	-209 761	-25 552	189 606	36 064	-12 197	-239 025
Autobus hybride	70 736	100 000	0	23 181	-52 445	34 524	100 000	0	23 181	-88 657
Autobus hybride rechargeable	53 065	190 724	36 064	17 928	-191 652	47 119	190 724	36 064	17 928	-197 598
Autobus GNV	-43 434	40 000	22 540	0	-105 974	-56 892	40 000	22 540	0	-119 432
Autobus électrique TTC	4 167	227 528	43 277	-14 924	-251 714	-30 950	227 528	43 277	-14 924	-286 830

Bilan fiscal pour l'État

Impact recettes fiscales	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)
Autobus électrique	-91 815	-50 162	-44 544	2 891	-91 815	-50 162	-44 544	2 891
Autobus hybride	-16 807	-8 902	-7 905	0	-28 412	-15 049	-13 363	0
Autobus hybride rechargeable	-73 215	-40 059	-35 572	2 416	-82 633	-45 146	-40 089	2 602
Autobus GNV	-69 707	-5 268	-39 525	-24 914	-78 559	-5 937	-44 544	-28 078

Surcoût socio-économique

Bilan socio-économique (surcoût)	Urbain dense						Urbain très dense					
	Total	dont achat/ batterie/ infrastructure	dont entretien	dont énergie	dont externalités environnementales	dont COFP	Total	dont achat/ batterie/ infrastructure	dont entretien	dont énergie	dont externalités environnementales	dont COFP
Autobus électrique	57 537	225 670	-12 437	-114 351	-58 357	17 012	-23 938	225 670	-12 437	-132 440	-117 984	13 252
Autobus hybride	88 666	100 000	22 941	-37 122	-14 663	17 509	35 638	100 000	22 941	-62 754	-37 137	12 587
Autobus hybride rechargeable	112 052	226 788	17 689	-102 916	-54 716	25 207	22 029	226 788	17 689	-140 018	-108 328	25 898
Autobus GNV	423	62 540	0	-43 686	-23 686	5 255	-25 791	62 540	0	-49 233	-43 431	4 333

Annexes

Cas autobus urbain 2025 (en €2015)

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
Autobus électrique	69 145	56 984	-3 840	16 000	133 724	65 139	8 309	60 276
Autobus hybride	16 848	9 428	1 020	6 400	41 939	18 682	5 175	18 083
Autobus hybride rechargeable	64 622	51 933	-1 711	14 400	122 682	59 211	9 222	54 248
Autobus GNV	26 173	7 622	2 550	16 000	47 353	8 590	8 625	30 138

Surcoût pour l'entreprise de transport (TCO)

Surcoût (HTVA)	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
Autobus électrique	-139 831	67 449	36 064	-12 197	-231 146	-171 675	67 449	36 064	-12 197	-262 991
Autobus hybride	46 999	80 000	0	23 181	-56 182	8 206	80 000	0	23 181	-94 974
Autobus hybride rechargeable	-49 651	107 214	36 064	17 928	-210 858	-51 486	107 214	36 064	17 928	-212 693
Autobus GNV	-51 661	40 000	22 540	0	-114 201	-66 164	40 000	22 540	0	-128 704
Autobus électrique TTC	-168 084	80 939	43 277	-14 924	-277 376	-206 297	80 939	43 277	-14 924	-315 589

Bilan fiscal pour l'État

Impact recettes fiscales	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)
Autobus électrique	-86 830	-60 896	-28 825	2 891	-86 830	-60 896	-28 825	2 891
Autobus hybride	-15 922	-10 807	-5 115	0	-26 916	-18 269	-8 648	0
Autobus hybride rechargeable	-69 234	-48 631	-23 019	2 416	-78 147	-54 807	-25 943	2 602
Autobus GNV	-66 038	-6 395	-25 577	-34 066	-74 424	-7 207	-28 825	-38 392

Surcoût socio-économique

Bilan socio-économique (surcoût)	Urbain dense						Urbain très dense					
	Total	dont achat/batterie/infrastructure	dont entretien	dont énergie	dont externalités environnementales	dont COFP	Total	dont achat/batterie/infrastructure	dont entretien	dont énergie	dont externalités environnementales	dont COFP
Autobus électrique	-124 768	103 513	-12 437	-135 003	-69 145	-11 696	-214 536	103 513	-12 437	-155 916	-133 724	-15 972
Autobus hybride	56 793	80 000	22 941	-42 061	-16 848	12 761	-2 777	80 000	22 941	-71 103	-41 939	7 324
Autobus hybride rechargeable	-20 493	143 278	17 689	-121 502	-64 622	4 664	-123 189	143 278	17 689	-167 651	-122 682	6 177
Autobus GNV	-17 193	62 540	0	-57 169	-26 173	3 609	-46 763	62 540	0	-64 429	-47 353	2 479

Autocars

Cas autocar mixte 2020 (en €2015)

Bilan en matière d'externalités

Gain environnemental	Total	dont CO2	dont pollution locale	dont bruit
Autocar GNV	9 710	3 679	1 617	4 414
Autocar hybride rechargeable	19 651	17 829	- 2 022	3 845
Autocar électrique	28 717	26 426	- 3 202	5 493

Surcoût pour l'entreprise de transport (TCO)

Surcoût (HTVA)	Total	dont achat véhicule + batterie	dont infrastructure	dont entretien assurance	dont énergie
Autocar GNV	2 028	40 000	23 159	0	-61 131
Autocar hybride rechargeable	138 674	157 811	37 055	14 765	-70 956
Autocar électrique	71 410	155 313	34 300	-10 101	-108 101

Bilan fiscal pour l'État

Impact recettes fiscales	Total	dont composante carbone de la TICPE	dont TICPE hors composante carbone	dont taxe électricité (TCFE) ou taxe sur le GNV (TICGN)
Autocar GNV	-39 975	-3 087	-22 110	-14 778
Autocar hybride rechargeable	-32 175	-18 257	-15 477	1 559
Autocar électrique	-45 964	-26 081	-22 110	2 228

Surcoût socio-économique

Bilan socio-économique (surcoût)	Total	dont achat/ batterie/ infrastructure	dont entretien	dont énergie	dont externalités environnementales	dont COFP
Autocar GNV	36 346	63 159	0	-25 503	-9 710	8 401
Autocar hybride rechargeable	189 742	194 865	14 514	-34 034	-19 651	34 047
Autocar électrique	125 399	189 612	-10 351	-48 620	-28 717	23 475

Annexes

Cas autocar mixte 2025 (en €2015)

Bilan en matière d'externalités

Gain environnemental	Total	dont CO2	dont pollution locale	dont bruit
Autocar GNV	10 878	4 459	1 711	4 709
Autocar hybride rechargeable	23 493	21 296	-1 904	4 101
Autocar électrique	34 366	31 540	-3 033	5 859

Surcoût pour l'entreprise de transport (TCO)

Surcoût (HTVA)	Total	dont achat véhicule + batterie	dont infrastructure	dont entretien assurance	dont énergie
Autocar GNV	-2 039	40 000	23 159	0	-65 198
Autocar hybride rechargeable	62 771	91 311	37 055	14 765	-80 360
Autocar électrique	-41 032	55 371	34 300	-10 101	-120 602

Bilan fiscal pour L'État

Impact recettes fiscales	Total	dont composante carbone de la TICPE	dont TICPE hors composante carbone	dont taxe électricité (TCFE) ou taxe sur le GNV (TICGN)
Autocar GNV	-37 871	-3 741	-14 049	-20 082
Autocar hybride rechargeable	-30 399	-22 124	-9 834	1 559
Autocar électrique	-43 427	-31 606	-14 049	2 228

Surcoût socio-économique

Bilan socio-économique (surcoût)	Total	dont achat/ batterie/ infrastructure	dont entretien	dont énergie	dont externalités environnementales	dont COFP
Autocar GNV	26 914	63 159	0	-32 954	-10 878	7 587
Autocar hybride rechargeable	96 943	128 365	14 514	-41 310	-23 493	18 867
Autocar électrique	-13 074	89 671	-10 351	-59 014	-34 366	986

Bibliographie

- Les comptes des transports en 2016 – Tome 1 – 54e rapport de la Commission des comptes des transports de la Nation, juillet 2017
- Les comptes des transports en 2015 Tome 1 – 53e rapport de la commission des comptes des transports de la Nation (CGDD), juillet 2016
- Le transport collectif routier de voyageurs en 2014 : circulation en progression pour les autobus et stable pour les autocars - Chiffres et statistiques n°664 (CGDD), août 2015
- Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains (Ademe), 2015
- 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
- Update of the Handbook on External Costs of Transport (DG MOVE), janvier 2014
- 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
- Rapport de la Commission des comptes et de l'économie de l'environnement - Santé et qualité de l'air extérieur (CGDD), juillet 2012 et « Pollution de l'air et santé : le coût pour la société », Le point sur, n° 175 (CGDD), octobre 2013
- L'évaluation socio-économique des investissements publics – Rapport de la commission présidée par Émile Quinet (CGSP), septembre 2013
- Enquête TNS – Sofres, « Les Français et les nuisances sonores » (Ministère du développement durable), mai 2010
- La valeur tutélaire du carbone, rapport de la Commission présidée par Alain Quinet (CAS), juin 2008

Annexes



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 1^{er} juillet 1992 — art. L.122-4 et L.122-5).

Dépôt légal : octobre 2018
ISSN : 2552-2272



Pour réduire les externalités environnementales (CO₂, pollution atmosphérique, bruit) produites par les motorisations diesel conventionnelles, les motorisations alternatives pour les autobus ou autocars constituent-t-elles une piste pertinente, pour les entreprises de transports collectifs et pour la collectivité ? Dans quelles conditions et à quels horizons ?

Si le véhicule électrique et le GNV sont déjà rentables du point de vue collectif en zone urbaine très dense en 2020, les autres technologies (hybride et hybride rechargeable) ne le deviennent qu'en 2025.

Dans le cadre d'un usage mixte avec une grande part de trajets interurbains, le véhicule thermique reste en 2020 plus performant que les technologies alternatives mais à partir de 2025 la solution électrique devient plus rentable.

L'hybride apparaît comme une technologie de transition et son intérêt dépendra de l'évolution des coûts d'achat et d'entretien.

Dans les différents cas d'usage, le GNV est la technologie alternative la plus rentable à court terme mais la baisse du coût des batteries conjuguée à la baisse des prix des véhicules rend la solution électrique plus performante à l'horizon 2025.

**Analyse coûts
bénéfices des
véhicules
électriques**
Les autobus et
autocars



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.gouv.fr



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE