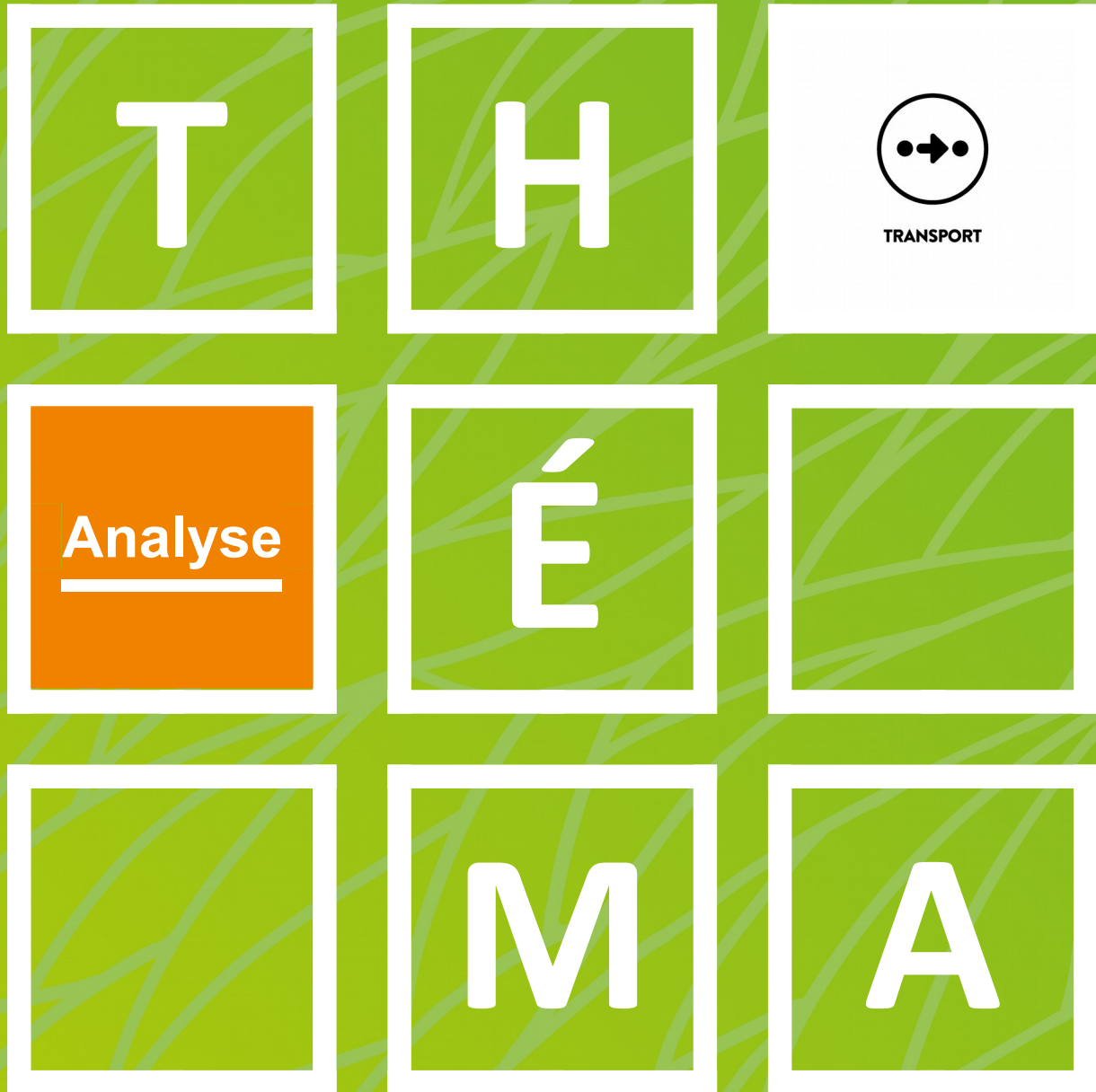


MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER,
EN CHARGE DES RELATIONS INTERNATIONALES SUR LE CLIMAT



Concept d'autoroute électrique Évaluation socioéconomique

JANVIER 2017

sommaire

Concept d'autoroute électrique

Évaluation socioéconomique

5 – Introduction

9 – Le concept d'autoroutes électriques

13 – Hypothèses de coûts du TRM retenues

25 – Étude du coût complet des différents options

35 – Modèle et méthode de calcul des bilans socio-économiques

39 – Bilan pour le scénario poids lourds hybrides sur les autoroutes électriques

49 – Bilan pour le scénario tracteur poids lourd électrique « navette » sur autoroute électrique

55 – Bilan pour le scénario poids lourds électriques sur autoroute classique

59 – Conclusion

63 – Annexes

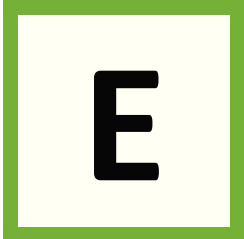
Document édité par :
**Le Service de l'économie, de l'évaluation et de
l'intégration du développement durable**

Remerciement : Par ces quelques mots, je tiens à remercier **Pauline Desangles** pour le travail préliminaire qu'elle a fourni lors du lancement de l'étude du concept des autoroutes électriques au cours de son stage au ministère.

contributeurs



avant-propos



E

n France, 27 % des émissions de CO₂ sont dues au secteur des transports, ce qui en fait la principale source d'émissions en 2015. Le Transport Routier de Marchandises (TRM) contribue pour un quart à ces émissions. Il assure 85 % du transport intérieur de marchandises en 2015 et sa place restera prépondérante dans les prochaines années. Au-delà des efforts à fournir sur l'amélioration de l'efficacité énergétique, c'est un changement vers une énergie de traction faiblement carbonée qu'il faudra opérer. Cette étude propose une analyse exploratoire de la viabilité économique de la solution d'électrification du TRM par le système des autoroutes électriques.

Laurence Monnoyer-Smith

COMMISSAIRE GENERALE AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Introduction



La France s'est fixé des objectifs ambitieux de réduction de ses émissions de gaz à effet de serre (facteur 4 à horizon 2050) qui l'ont conduite à définir dans la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) un ensemble d'actions visant l'ensemble des secteurs économiques. Dans le domaine des transports, il est impératif de réduire les émissions unitaires des véhicules en mobilisant notamment des sources d'énergie « décarbonées », biocarburants et électricité d'origine renouvelable et nucléaire. En effet, le véhicule électrique, même s'il est "zéro émissions" lors de son utilisation, doit être apprécié en considérant une analyse de cycle de vie incluant les éventuelles émissions associées à la production électrique ainsi que les émissions liées à la fabrication des véhicules (notamment des batteries).

La traction électrique s'est d'abord développée sur le segment des véhicules particuliers et des véhicules utilitaires légers. Les véhicules hybrides, qui combinent un moteur diesel ou essence à un moteur électrique, se sont développés sur le marché haut de gamme dans un premier temps, avant d'être progressivement proposés pour des gammes inférieures. Certains obstacles¹ ralentissent encore l'expansion du marché du véhicule électrique, comme leur faible autonomie.

La lente percée de ces modèles s'explique en premier lieu par leur prix. Les modèles de véhicules électriques d'aujourd'hui sont plus coûteux que les véhicules classiques. L'autonomie de la batterie reste également un problème majeur, avec la contrainte de recharges fréquentes du véhicule. Les travaux des laboratoires² visant à améliorer l'efficacité des batteries de lithium-air semblent toutefois encourageants.

À l'heure actuelle, le marché du poids lourd électrique n'existe pas encore en France. Des tests sont toutefois réalisés en zone urbaine, notamment avec le poids lourd hybride Volvo FE (dédié à la collecte des déchets) et le Renault Midlum 100 % électrique de 16 tonnes (produit en partenariat avec l'IFP Énergies Nouvelles et PVI avec financement Ademe). Le poids lourd hybride le plus gros fonctionnant en France est le Renault Hybride Premium de 26 tonnes, adapté pour les zones urbaines et périurbaines.

Le concept d'autoroutes électriques a été proposé pour traiter le cas du transport routier de marchandises à longue distance.

Ainsi en Allemagne, ENUBA (Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen) est un projet de recherche initié par le ministre fédéral allemand de l'environnement. Il vise à installer une caténaire au-dessus d'une des voies d'une autoroute à fort trafic pour permettre à des poids lourds équipés d'un pantographe de capter leur énergie de propulsion. Les véhicules peuvent être hybrides (double motorisation électrique et thermique) pour pouvoir rouler sur tous types de routes et ainsi assurer un service porte à porte, ou uniquement électriques dans le cas où ils sont dédiés à l'infrastructure, avec un changement de tracteur en début et en fin de parcours sur l'autoroute électrique (formule "navette").

1 Centre d'Analyse Stratégique, « [La voiture de demain : carburants et électricité](#) », Rapport & Document n° 7, 2011.

2 CEA, « [Dossier de presse sur les batteries lithium air](#) », 2010.

Siemens s'est associé aux constructeurs de poids lourds Mercedes, Scania et Volvo, pour l'expérimentation du projet ENUBA, respectivement en Allemagne, en Suède et en Californie.

Par ailleurs, outre la technologie caténaire, le système d'autoroute électrique peut être mis en application par un chargement des poids lourds électrique par induction ou par contact filaire au sol. Ce rapport s'intéresse seulement au cas de l'autoroute électrique par la technologie caténaire, connue en France car utilisée sur les Lignes à Grande Vitesse et sur les lignes de tramway. Un tel système présente donc l'avantage de ne pas reposer sur des technologies de rupture. Ce rapport se limite à une analyse économique exploratoire, les problématiques sur les aspects techniques liés à l'installation et à l'exploitation d'un tel système restant à approfondir.

Les questions suivantes peuvent alors être posées : un projet d'autoroute électrique peut-il être opportun socialement et économiquement en France ? Est-ce une solution alternative au transport de marchandises routier pour un environnement de meilleure qualité ?

L'étude présentée dans ce rapport tente d'évaluer si un tel projet d'électrification, financé ou non par les usagers, à travers un péage, est économiquement pertinent. Elle procède en deux étapes. Dans un premier temps, elle s'attache à évaluer les coûts marchands et non marchands de chaque mode de transport, en prenant des hypothèses sur le trafic concerné, *via* une approche en coûts complets. Cette première analyse permet de dégager une hiérarchie de vraisemblance des différents scénarios étudiés et de faire un tri parmi les choix technologiques. Dans un second temps, une analyse « en situation réelle » est effectuée, en se basant sur des données de trafic autoroutier et en utilisant le modèle de trafic Modev.

Introduction

Partie 1

Le concept d'autoroute électrique

Cette partie s'attache à définir le concept d'autoroute électrique et à décrire les scénarios retenus pour l'étude.



L'évaluation socio-économique du concept d'Autoroute Électrique (AE) est menée pour deux horizons de mise en place du service : en 2020 ou en 2030³. Les valeurs de référence considérées dans cette étude sont pour la plupart issues du « [Référentiel d'évaluation des projets de transport](#) » (à noter, l'évaluation ne présente toutefois pas d'analyse du risque systémique et est menée sur une période inférieure à la durée de vie des infrastructures) et de « [L'évaluation socio-économique des investissements publics](#) » du CGSP (Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective), rapport de la mission présidée par Émile Quinet.

CONTEXTE DU TRANSPORT ROUTIER DE MARCHANDISES EN FRANCE

Selon le [rapport](#) 2015 à la Commission des Comptes de Transport de la Nation (CCTN), ce sont plus de 328 milliards de tonnes.km (t.km) qui ont été transportées sur l'année 2014. Le secteur du transport a un poids économique majeur, puisqu'il représente 37 200 entreprises, 300 000 véhicules en fonctionnement, et près de 420 000 emplois.

Les émissions de CO₂ en France liées à l'activité du secteur des transports sont tout aussi conséquentes : 27 % des émissions totales du pays. Parmi ces émissions, un quart provient du transport routier de marchandises (TRM).

On observe une augmentation de la part des émissions de CO₂ liées au TRM malgré une baisse des consommations unitaires de carburant des poids lourds (PL) de -0,5 % par an sur la période 2007-2014 (CCTN 2015). Ceci s'explique par la hausse des trafics et de celle de la part modale du TRM, qui progresse régulièrement de 80 % en 2000, elle a atteint 87,5 % en 2014.

Une des solutions pour réduire les émissions de CO₂ du transport de marchandises est de changer le vecteur énergétique assurant la traction des Poids Lourds.

PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

L'équation économique d'une autoroute électrique (AE) est assez simple : d'un côté, une baisse des coûts de l'énergie de traction et des externalités environnementales liée à l'utilisation d'électricité comme carburant ; de l'autre, une hausse des coûts d'acquisition du PL et l'installation d'une infrastructure caténaire. Les modalités d'utilisation d'une AE sont multiples. Trois scénarios sont envisagés dans cette étude, en plus d'une situation de référence, correspondant à la situation actuelle. Plus précisément :

Situation de référence

Le transport routier de marchandises est assuré par un poids lourd thermique diesel sur l'ensemble de l'Origine-Destination (OD) et sans rupture de charge lors de l'opération de transport.

3 Ici, l'évaluation est menée sur une période de 20 ans, inférieure à la durée de vie des infrastructures (valeur résiduelle prise en compte) compte tenu des fortes incertitudes après 2050 sur différentes variables.

Partie 1 - Le concept d'autoroute électrique

Scénario PL hybride sur autoroute électrique

Le transport de marchandises est assuré par un PL hybride avec une bi-motorisation électrique/thermique sur l'ensemble de l'OD, le PL hybride pouvant circuler sur tous types de route. Il n'y a pas de rupture de charge. Les investissements nécessaires concernent le transporteur qui doit s'équiper d'un tracteur hybride, ainsi que le gestionnaire d'autoroute, qui doit équiper la voirie avec une infrastructure caténaire, en assurer l'exploitation, l'entretien et la maintenance.

Scénario tracteur PL électrique « navette » sur autoroute électrique

Le transport de marchandises est assuré par un tracteur électrique en fonctionnement navette. Le principe est le suivant : les tracteurs électriques, dédiés à l'autoroute électrique, permettent l'acheminement de la remorque du point d'entrée au point de sortie de l'AE. Ils pourraient être gérés par un opérateur disposant d'une flotte de PL électriques dédiés à l'AE et qui ferait payer ce service aux transporteurs. Les PL électriques font des trajets aller et retour sur l'AE entre deux plate-formes multimodales, à l'instar du train dans le cas des autoroutes ferroviaires. Ils attendent la remorque en début de parcours autoroutier et la détellent en fin de parcours. Un changement de tracteur est effectué pour le pré et post-acheminement. Il y a donc une rupture de charge lors du transfert de la remorque en début et en fin de parcours sur l'autoroute électrique. Les investissements nécessaires concernent des transporteurs qui s'équipent de poids lourds électriques de faible autonomie, permettant d'effectuer des trajets ciblés entre l'autoroute électrifiée et la plate-forme multimodale, et le gestionnaire d'infrastructure qui doit équiper les autoroutes de l'infrastructure caténaire. Le tracteur est donc connecté aux caténaires sur l'autoroute et est autonome en électricité grâce à des batteries sur des distances très courtes hors autoroute pour les opérations de chargement / déchargement.

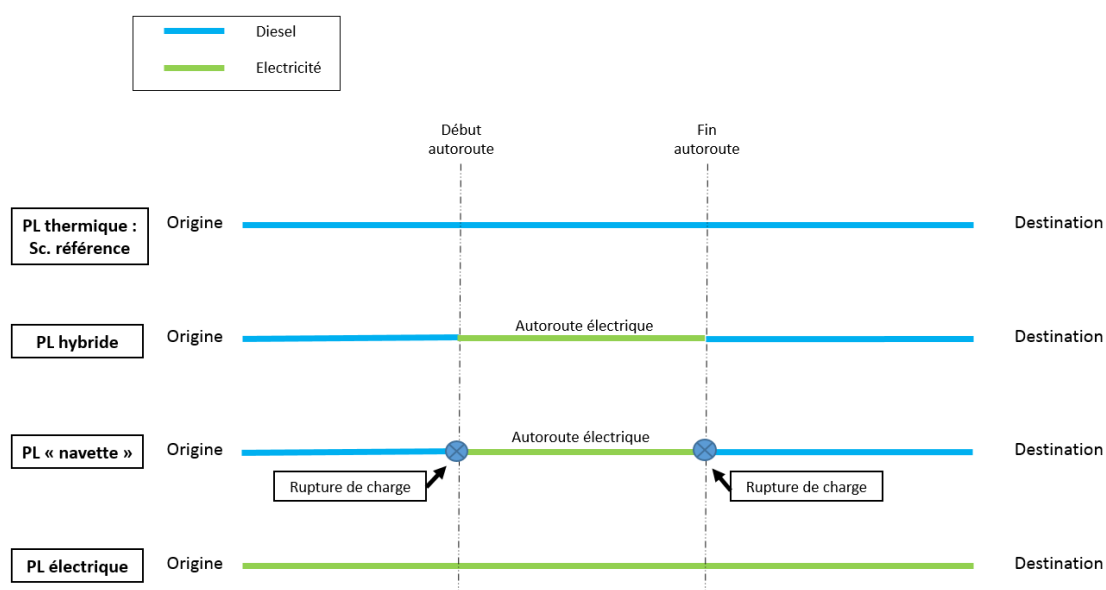
Scénario PL électrique sur autoroute classique

Le transport de marchandises est assuré par un PL électrique sur autoroute classique. Le PL est autonome en électricité sur l'ensemble de l'OD. Il n'y a pas de rupture de charge. Les investissements nécessaires concernent le transporteur qui doit s'équiper d'un tracteur électrique à forte autonomie, ainsi que les gestionnaires d'infrastructure, qui doivent équiper les autoroutes de bornes spécifiques de recharge électrique, en assurer l'exploitation, l'entretien et la maintenance.

Partie 1 - Le concept d'autoroute électrique

Les trajets des PL ont donc des modalités différentes, en fonction de leurs motorisations (figure 1).

Figure 1 - Schéma des trajets réalisés par des PL de motorisation différente



Source : Schéma CGDD

Partie 2

Hypothèses de coûts retenues pour le transport routier de marchandises

Cette partie s'attache à décrire précisément les hypothèses retenues sur les coûts marchands et coût externes et sur les conditions d'exploitation des poids lourds, des infrastructures, des énergies et des externalités.



Dans la suite de ce rapport, les chiffres proposés sont en €2015, les résultats sont euros constants et on ne s'intéresse qu'à des PL équivalents 40 tonnes.

COÛTS ET CONDITIONS D'EXPLOITATION DES POIDS LOURDS

Données sur l'utilisation du poids lourd

On suppose dans toute la suite que les conditions d'exploitation sont identiques pour tous les PL, quelle que soit leur motorisation. Ainsi, on ne fait pas de différences sur les variables définies ci-dessous.

On retient comme hypothèse que le kilométrage annuel d'un PL est de 112 700 km (source : Comité National Routier (CNR) 2014). Ce kilométrage n'évolue pas dans le temps. Par ailleurs, le nombre de jours d'exploitation du PL est fixé à 230 jours par an.

Les charges fixes d'un PL sont composées de (CNR 2014, pas d'évolution dans le temps) :

- L'assurance du véhicule et de la marchandise transportée : 2 639 €/an,
- La taxe à l'essieu : 516 €/an,
- Les charges administratives et autres charges indirectes : 18 387 €/an.

En divisant par le kilométrage annuel du PL, on obtient un montant de charges fixes de 0,19 €/PL.km.

Les charges variables (en dehors de celles liées à l'énergie) comprennent le remplacement des pneumatiques et les frais d'entretien et de réparation du PL. Le montant des charges variables est fixé à 0,11 €/PL.km. Cette valeur augmente de 1,2 % par an (source CNR, hors inflation).

Pour tous les PL empruntant l'autoroute (même en non électrifié), on retient un péage kilométrique moyen de 0,19 €/km (source CNR). Celui-ci évolue comme l'inflation avec une élasticité de 0,7 (source : rapport « [Projections de la demande de transport](#) », CGDD, 2016).

Le coût du personnel est identique pour les PL de motorisations différentes. On suppose que les données salariales ne varient pas au cours du temps. La valeur retenue est un coût horaire de 22,4 €/h, pour 7,5 h/jour, 216 jours d'activité et une vitesse moyenne du PL de 70 km/h, soit au final 0,32 €/PL.km (source CNR).

Données sur les consommations de carburant

Le chargement massique moyen d'un PL en France est de 64 % (CCTN 2015). Dans notre cas, comme on se place sur autoroute et qu'on s'intéresse prioritairement au transport à longue distance, on suppose que ce taux atteint 75 % pour des PL de 40 tonnes, dont la charge utile est de 26 tonnes. On suppose donc une charge moyenne effective de 19,5 tonnes par PL.

Partie 2 - Hypothèses de coûts retenues pour le transport routier de marchandises

Pour la consommation énergétique du PL thermique diesel, on suppose qu'entre 2020 et 2030, les gains sur les consommations unitaires de diesel sont équivalents à ceux observés de 2005 à 2015. Après 2030, on fait l'hypothèse qu'il n'y a plus de gains dans le temps sur les consommations unitaires (tableau 1).

Tableau 1 - Consommations de diesel d'un PL thermique à différents horizons

	2020	2030	2040
Diesel (L/100km)	33	30	30

Source : Calculs CGDD sur la base du modèle Renault Midlum

La consommation de diesel du PL hybride est supposée être la même que celle du thermique lorsqu'il en mode thermique.

Données sur les batteries et la consommation d'électricité

Les consommations retenues en 2014 sont estimées à partir des données du Renault Midlum, dans ses versions électriques, puis ramenée à celles des PL de PTAC 40 tonnes. On obtient ainsi la consommation d'électricité pour un PL « moyennement » chargé, au sens défini dans le précédent paragraphe. Les consommations varient très peu dans le temps (tableau 2).

Tableau 2 - Consommations d'électricité d'un PL électrique à différents horizons

	2020	2030	2040
Electricité (kWh/100km)	153	150	150

Source : Calculs CGDD sur la base du modèle Renault Midlum

Pour la consommation d'électricité, les gains seront quasi nuls dans le futur, les rendements des moteurs électriques étant déjà proches des 100 % aujourd'hui. La capacité de stockage de la batterie pour une autonomie de 400 km est de 600 kWh.

On retient des hypothèses optimistes pour l'évolution des performances et des coûts des batteries. Ainsi, on suppose une division par deux du prix des batteries entre 2020 et 2030, puis un ralentissement de la baisse entre 2030 et 2050 (division par 1,5 sur cette période de 20 ans). Le prix retenu pour un kilowatt-heure de stockage est issu des travaux de l'US Environmental Protection Agency (EPA)⁴. Il faut noter que celui-ci diffère assez nettement du prix des batteries de Véhicules Particuliers (VP), les cycles chimiques de production des batteries étant différents entre les deux types de batteries. Le prix diffère également en raison des utilisations différentes des batteries entre les VP et les PL.

On suppose la durée de vie de la batterie égale à 10 ans, étant donné le fort nombre de cycles de charges et décharges (directement lié aux conditions d'exploitation retenues). Le rapport de l'EPA mentionne que dès aujourd'hui, certaines batteries (Lithium-Iron-Phosphate) sont conçues pour durer au moins 7 000 cycles, ce qui permettrait déjà de répondre aux conditions d'exploitation définies ci-dessus.

4 EPA, Application of Life-Cycle Assessment to Nanoscale Technology: Lithium- ion Batteries for Electric Vehicles, 744-R-12-001, 2013

Partie 2 - Hypothèses de coûts retenues pour le transport routier de marchandises

Enfin, en ce qui concerne le poids des batteries et de leur énergie embarquée, on suppose que le rapport Wh/kg va augmenter dans le temps, notamment avec la mise en place progressive de la technologie Lithium-ion. Il est toutefois annoncé par les constructeurs que le rapport entre énergie et poids devrait évoluer plus faiblement que le prix de la batterie : on suppose une qu'il augmenterait de 50 % sur la période 2020-2030, puis, à nouveau 50 % pour la période 2030-2050 (tableau 3).

Tableau 3 - Hypothèses de coût et de poids des batteries d'un PL électrique

	2020	2030	2040
Coût batterie (€/kWh)	400	200	167
Energie/Poids de la batterie (Wh/kg)	110	165	220

Source : Hypothèses CGDD sur données EPA et EDF

NB : Les données de prix et sur les consommations unitaires des tableaux 2 et 3 ont été linéarisées dans nos calculs entre les valeurs données ici en 2020, 2030 et 2040.

Charge utile des poids lourds

On s'intéresse ici aux PL de PTAC 40 tonnes. Pour le PL thermique, on estime que sa charge utile atteint 26 tonnes. On estime que celle du PL hybride est de 25 tonnes, plus faible que le PL thermique en raison de sa double motorisation. La charge utile du PL électrique en fonctionnement navette est de 25 tonnes, pour les mêmes raisons. On suppose qu'il dispose d'une batterie de faible capacité lui permettant de faire 5 km en dehors de l'autoroute électrique. En revanche, la charge utile du PL électrique à forte autonomie est amoindrie, du fait de l'importance de sa batterie. Avec la diminution du poids des batteries dans le temps, la charge utile du PL électrique va augmenter au fur et à mesure. On suppose que le PL électrique a une autonomie de 400 km pour un fonctionnement classique. Le chauffeur de PL doit faire une pause obligatoire de 45 minutes minimum après 4,5 h de conduite. On suppose une recharge de la batterie lors de cette pause (même partielle, pour permettre au PL d'arriver à destination). Enfin, le poids de la batterie évolue favorablement au fil des années.

Par ailleurs, la directive 2015/79 permet de majorer le poids autorisé des véhicules utilisant des « carburants de substitution », et ce dans la limite d'une tonne. Il s'avère que les technologies permettant un transport décarboné sont comprises dans la définition des « carburants de substitution ». Ainsi, le surpoids de la technologie hybride n'est pas un handicap pour le PL hybride ou le PL navette. Pour le PL électrique à forte autonomie, la contrainte du poids de la batterie va être légèrement atténuée.

Au final, la charge utile réelle des différents PL est la suivante :

- PL thermique, hybride et navette : 26 tonnes,
- PL électrique 400 km d'autonomie : voir tableau 4.

Partie 2 - Hypothèses de coûts retenues pour le transport routier de marchandises

Tableau 4 - Charge utile d'un PL électrique à forte autonomie à différentes dates

	2020	2030	2040
Poids batterie pr PL élec. 400km (tonnes)	5,6	3,6	2,7
Poids déductible (directive 2015/79)	1,0	1,0	1,0
Charge utile finale (tonnes)	21,4	23,4	24,3

Source : Estimations CGDD sur la base de la Directive 2015/79

Ainsi, à horizon 2040, la contrainte sur la charge utile du PL électrique à forte autonomie est divisée par trois par rapport à 2020.

COÛT DU MATÉRIEL ROULANT

Les coûts du PL thermique et de sa remorque proviennent du CNR (données 2014). On ne suppose pas d'évolution des prix en euros constants sur la période 2020-2050.

Le coût de base du PL thermique, hybride, navette ou tout électrique est le même. En revanche, selon les cas, il existe un surcoût lié au pantographe, à la double motorisation et à la batterie. Pour estimer ces paramètres, l'étude se fonde sur des données issues de plusieurs rapports. Ainsi, un surcoût du pantographe est estimé par CE Delft⁵ ou par l'IFEU⁶ : en 2020, le surcoût du PL hybride est de 40 000 € (pantographe et double motorisation) ; en 2030, ce coût s'abaisserait à 25 000 €, grâce à une forte réduction des coûts sur le pantographe. On fait l'hypothèse que le surcoût d'un PL électrique est la moitié de celui du PL hybride (système plus simple, mais auquel on rajoute une batterie de faible autonomie). Le développement de ces technologies dans les prochaines années, associé à un effet volume de leur production, devraient conduire à une baisse du prix dans le temps.

Enfin, on fait l'hypothèse d'une durée de vie du tracteur et de la remorque de 10 ans, quelle que soit sa motorisation. On obtient ainsi les coûts des différents types de PL (tableau 5).

Tableau 5 - Surcoûts des PL selon différentes motorisations

	2020	2030	2040
PL thermique (k€)	76	76	76
Coût remorque (k€)	26	26	26
Surcoût PL hybride (k€) : double motorisation + pantographe	+ 40	+ 25	+ 15
Surcoût PL navette (k€) : motorisation électrique + pantographe + batterie 5 km	+ 23	+ 14	+ 9
Surcoût PL électrique forte autonomie (k€) : motorisation électrique + batterie 400 km	+ 245	+ 120	+ 100

Sources : CNR, CE Delft, IFEU, CGDD

5 Delft, Zero emissions trucks, an overview of state-of-the-art technologies and their potential, p. 77, 2013.

6 IFEU, Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr, p.218, 2015.

En coût total (avec surcoûts, batteries et remorque), du fait de la capacité de sa batterie, le PL tout électrique reste très au-dessus des autres types de PL, malgré la division par deux du prix de la batterie entre 2020 et 2040 (tableau 6).

Tableau 6 - Coût total des 4 types de PL étudiés

	2020	2030	2040
PL thermique (k€)	103	103	103
PL Hybride (k€)	143	128	118
PL "navette" élec. 5 km (k€)	126	117	112
PL élec. 400 km (k€)	368	235	210

LE COÛT DU TEMPS

Dans le scénario du PL navette il y a une rupture de charge et donc, une perte de temps. Les temps d'attente liés au chargement ou au déchargement représentent un coût, lié à l'immobilisation de la marchandise. Dans les modes de transport combinés, tels que le transport de marchandises ferroviaire, le temps complet lié à l'utilisation de l'autoroute ferroviaire (AF) inclut une durée forfaitaire d'une heure à chaque plate-forme multimodale pour les opérations d'enregistrement, chargement et déchargement de la semi-remorque, etc. (sources : [Bilan socio-économique AF Atlantique](#), juillet 2012 de RFF). On estime que le temps d'immobilisation de la marchandise en fonctionnement navette est réduit à 40 minutes, du fait de la plus grande simplicité des opérations de chargement et déchargement. Au total, chaque trajet par l'AE inclut donc 1 h 20 d'immobilisation de la marchandise (coût horaire du chargeur déjà pris en compte plus haut, p.14). Cela revient à dire qu'il n'y a pas ou peu d'attente pour le tracteur et que seule la marchandise est ralentie par le changement de tracteur et d'éventuelles formalités administratives. On retient l'hypothèse forte qu'il n'y a aucun retour à vide des tracteurs, ni sur l'AE, ni sur la partie pré- et post-acheminement.

Les valeurs du temps des différentes marchandises sont tirées du rapport Quinet, qui estime que ces valeurs varient dans le temps à hauteur de 2/3 du taux de croissance du PIB/habitant, soit 1,3 % d'ici 2030 et de 1,2 % de 2030 à 2050.

Partie 2 - Hypothèses de coûts retenues pour le transport routier de marchandises

La valeur du temps dépend également du type de marchandise (tableau 7).

Tableau 7 - Valeur du temps de différents types de marchandises

Type de marchandises	Valeur du temps de déplacement
Marchandises à forte valeur ajoutée Valeur indicative : > 35 000 €/t Exemples : transport combiné, conteneurs maritimes, messagerie, transports frigorifiques, route roulante, trafic roulier...	0,6 €/t/h
Marchandises courantes Valeur indicative : entre 6 000 et 35 000 €/t Exemples : autres trafics ferroviaires, maritimes et fluviaux	0,2 €/t/h
Marchandises à faible valeur ajoutée Valeur indicative : < 6 000 €/t Exemples : vrac, granulats...	0,01 €/t/h

Source : Rapport Quinet (CGSP 2013), valeur en €/2010/h en 2010

Dans l'impossibilité de différencier les types de marchandises pour l'ensemble des flux et du trafic observé, la valeur du temps retenue dans cette étude est celle attribuée aux marchandises courantes (tableau 8).

Tableau 8 - Valeur du temps pour des marchandises courantes, à différentes dates

	2020	2030	2040
Valeur du temps (€/t/h)	0,23	0,25	0,28

Par ailleurs, la valeur du temps liée à l'immobilisation de la remorque est de second ordre et non comptée ici.

PRISE EN COMPTE DES EXTERNALITÉS ENVIRONNEMENTALES

On ne tient pas compte ici des externalités autres qu'environnementales. Ainsi, les coûts associés à l'insécurité routière et à la pollution sonore sont supposés identiques entre les différentes motorisations. Quant à la congestion, on considère qu'elle est intégrée au travers du coût complet d'infrastructure autoroutière reflété dans le péage (rémunération du capital et amortissement).

Les coûts externes environnementaux considérés comprennent la pollution de l'air et les émissions de CO₂.

L'externalité CO₂

Les émissions de CO₂ doivent être estimées pour les motorisations thermique et électrique.

Pour le thermique, les émissions de CO₂ liées à la phase amont de production des carburants (extraction, transport et raffinage) ne sont pas prises en compte. Seules les émissions directes,

Partie 2 - Hypothèses de coûts retenues pour le transport routier de marchandises

liées à la combustion des carburants lors de la circulation du véhicule sont considérées. Le contenu carbone du diesel retenu est de 2,49 kgCO₂/L de carburant. Le taux d'incorporation de biocarburants est de 7 % en 2020 ; on suppose ce pourcentage constant dans le temps.

Pour le véhicule à motorisation électrique, les émissions amont associées à la production d'électricité sont prises en compte, telles que définies par le Décret 2011-1336 sur le [contenu CO₂ des prestations de transport](#). Cette valeur est estimée en 2020, en retenant une hypothèse de baisse de 50 % des émissions de CO₂ lors la production d'électricité (tableau 9).

Tableau 9 - Contenu CO₂ de l'électricité à différentes dates

	2020	2030	2040
en gCO ₂ /kWh	45,0	22,5	22,5

Source : Décret 2011-1336

La solution électrique présente un avantage en termes d'émissions de CO₂ par rapport au diesel du fait du mix électrique français fortement décarboné. Ce gain s'annulerait pour un contenu CO₂ de l'électricité de 500 gCO₂/kWh (compte tenu des hypothèses de consommations précédentes).

- En première approximation, on néglige les émissions liées à la production des batteries, qui sont du même ordre de grandeur que les émissions liées à l'extraction et au raffinage du diesel. En effet d'après une étude de l'Ademe⁶, la production d'une batterie de véhicule particulier de 24 kWh conduit à l'émission de 3 tCO₂ (sur la base d'un mix électrique type France continentale). En extrapolant ce résultat à celui de la batterie de 600 kWh envisagée ici pour le tracteur électrique, on obtient un contenu CO₂ de 75 tCO₂. Cette valeur est probablement sous estimée, compte tenu d'effets non linéaires en fonction de leur taille intervenant dans le processus de fabrication des batteries. Par ailleurs, la consommation du tracteur diesel sur sa durée de vie (10 ans) est d'environ 336 000 L de diesel. Sur la base d'un contenu CO₂ pour la phase amont de production du diesel de 0,58 kgCO₂/L⁷, on obtiendrait environ 195 tCO₂ émis pour l'extraction, le transport et le raffinage du diesel. L'hypothèse d'écarter la prise en compte de la phase amont semble donc conservative. Par ailleurs les ordres de grandeur en jeu sont de second ordre par rapport aux émissions directes du tracteur diesel sur sa durée de vie qui sont de 835 tCO₂.

La valorisation monétaire du CO₂ est effectuée sur la base du rapport Quinet : le coût marginal unitaire du CO₂ augmente de 5,8 % par an (en euros constants) sur la période 2011-2030 (56 €/t en 2020, 100 €/tCO₂ en 2030), puis de 4 % par an jusqu'en 2050 (243 €/t CO₂).

⁶ Ademe, Élaboration selon les principes ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020, novembre 2013.

⁷ Sources : arrêté du 10 avril 2012 et base carbone Ademe.

L'externalité pollution locale

La pollution locale de l'air provient de l'émission de particules et de gaz (NO_x, SO₂, particules fines et COVNM, [Composé Organique Volatil Non Méthanique](#)) de la circulation routière. Elle aggrave la morbidité et induit une augmentation du taux de mortalité prématurée, elle nuit au cadre de vie et crée des dommages sur l'environnement et le climat. L'ampleur de l'impact dépend de deux paramètres principaux : les caractéristiques du véhicule en termes d'émissions de polluants et la localisation de la voirie (zone fortement ou faiblement peuplée). Dans cette étude, on retient la valeur du coût marginal de la pollution locale, donnée par le [Handbook on External Costs of Transport](#) 2014, pour un PL 40 t Euro 6c, supposé chargé à 19,5 tonnes. Le coût unitaire de la pollution locale évolue au taux moyen de croissance du PIB/habitant.

La pollution locale due à la circulation des PL lorsqu'ils sont en mode électrique est supposée nulle. On néglige la pollution émise lors de la production de la batterie électrique (tableau 10).

Tableau 10 - Monétarisation de la pollution locale des PL diesel à différentes dates

	2020	2030	2040
Pollution locale (c€/pl.km)	0,36	0,40	0,46

PRIX DES ÉNERGIES ET FISCALITÉ

L'étude a nécessité la construction d'une chronique des prix du diesel sur 2015-2050, basée sur le scénario « Current Policies » de l'Agence Internationale de l'Énergie qui suppose un Taux de Croissance Moyen Annuel (TCAM) sur le pétrole de 7 % sur 2015-2030 puis de 1 % ensuite, jusqu'en 2050.

Pour un transporteur qui utilise du diesel, on intègre deux taxes (tableau 11) :

- La Taxe Intérieure sur la Consommation de Produits Énergétiques (TICPE) : aujourd'hui, le montant de TICPE payé par les transporteurs pour un litre de diesel est plafonné à 43 c€/L, on suppose ce plafond maintenu dans le temps ;
- La taxe Carbone (TC), définie et calculée sur la trajectoire Quinet du prix du CO₂ définie précédemment, vient s'ajouter à la TICPE et est donc supporté par les transporteurs.

Tableau 11 - Prix pour le transporteur du litre de diesel à différentes dates

	2020	2030	2040
Diesel			
Prix HTT (€/L)	0,62	1,07	1,21
TICPE (€/L) (plafonnée)	0,43	0,43	0,43
TC (€/L)	0,14	0,25	0,39
Prix final (€/L)	1,19	1,75	2,03

Source : Estimations CGDD sur données AIE

Partie 2 - Hypothèses de coûts retenues pour le transport routier de marchandises

Il faut noter que le coût associé au carburant pour la motorisation thermique subit deux effets opposés : la hausse du prix du diesel et la baisse de la consommation unitaire. Au final, le coût unitaire d'un kilomètre roulé au diesel augmente, l'évolution du prix de ce carburant étant plus importante (3 % par an TTC sur 2020-2040) que la baisse des consommations unitaires (- 0,5 % par an sur la même période).

Pour l'électricité, on retient un prix HTT (hors toutes taxes) évoluant à 1 % par an auquel on rajoute les taxes (CSPE essentiellement). La CSPE est supposée couvrir les coûts du soutien au développement des énergies renouvelables : elle est supposée atteindre 50 €/MWh en 2025 puis se stabiliser. Le coût obtenu est donc un coût complet de fourniture, prenant en compte le financement des énergies renouvelables (tableau 12).

Tableau 12 - Prix de l'électricité à différentes dates (prix final hors TVA)

	2020	2030	2040
Electricité			
Prix HTT (€/MWh)	70,4	77,8	77,8
Taxes (€/MWh)	35,5	50,5	50,5
Prix final (€/MWh)	105,9	128,3	128,3

Source : Estimations CGDD sur données AIE

LES COÛTS D'INFRASTRUCTURE

Les transports par PL hybride et PL électrique nécessitent une infrastructure caténaire. Une première hypothèse de coût d'origine ferroviaire s'établit à 0,8 M€ par kilomètre. Cette valeur est probablement en deçà de celle de l'électrification d'une autoroute. En effet, dans le secteur ferroviaire, l'installation de l'électrification permet de couvrir deux voies avec deux poteaux.

Dans le cas d'une autoroute, l'électrification sur chaque côté de la voie est indépendante, d'où des hypothèses de coût d'électrification *a priori* supérieures. Les coûts d'infrastructures caténaires sont estimés par Siemens entre 1,5 et 2,5 millions d'euros par kilomètre (pour les deux sens de circulation). Le coût total d'investissement comprend les caténaires, le raccordement au réseau électrique, les sous-stations d'alimentation, l'électrification, les protections électromagnétiques, ainsi que les coûts de mise au gabarit des ouvrages d'art existants, le coût des équipements de télécommunication, les frais de maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'œuvre ainsi qu'une provision pour aléas et imprévus.

Dans les faits, l'hypothèse basse correspondrait à l'électrification d'une autoroute avec peu d'ouvrages d'art, autoroute assez plate, soumise à des conditions météo stables (le nombre de pylônes à mettre en place est plus faible si les lignes se détendent moins, et sont donc moins soumises à des écarts de températures extrêmes) et proche du réseau de transport électrique.

Partie 2 - Hypothèses de coûts retenues pour le transport routier de marchandises

Cette première hypothèse pourrait par exemple être envisagée sur l'autoroute entre Paris et Lille. Une autre hypothèse, à 2,5 M€/km, correspond à une autoroute alpine, avec de nombreux ouvrages d'art.

D'autre part, la durée de vie estimée d'une telle infrastructure est de 35 ans. On considère que le coût de l'infrastructure caténaire ne varie pas quelle que soit la date d'installation et on ne prend pas en compte d'éventuels surcoûts liés à la phase travaux (gêne au trafic sur l'autoroute par exemple).

Dans la suite on gardera les deux hypothèses suivantes :

- l'hypothèse de coût faible H1 « Siemens – » : le coût de l'infrastructure caténaire est de 1,5 M€ par km de voie ;
- l'hypothèse de coût haute H2 « Siemens + » : le coût de l'infrastructure caténaire est de 2,5 M€ par km de voie.

En ce qui concerne le scénario du PL navette, l'étude n'estime pas le coût des plate-formes de chargement et de déchargement (utilisées lors de la rupture de charge). Ces plate-formes sont des parkings goudronnés situés au niveau des zones de péage. Le coût de l'acquisition du foncier et des travaux de mise en place serait à estimer pour être plus précis, mais est négligé dans un premier temps.

En ce qui concerne l'entretien, les charges variables sont évaluées à environ 2 % de l'investissement initial dans le secteur ferroviaire (selon l'[étude](#) de Rainer *et al.*). Le système d'AE sur autoroute est nouveau, on majore donc cette valeur à 4 % étant donné qu'il est difficile d'estimer l'impact d'un fort trafic de PL hybride sur les caténaires. Cette valeur est également majorée puisque l'entretien va se faire sur une autoroute qui ne sera pas fermée aux autres véhicules ce qui sera sans doute également source de problèmes logistiques.

Le fonctionnement de PL électriques à forte autonomie nécessite la mise en place de bornes de recharge. On émet l'hypothèse optimiste d'une borne de recharge pour 4 véhicules, ainsi, dans des conditions d'utilisation optimales pour lesquelles les PL n'arriveraient pas en même temps, la borne de recharge serait presque tout le temps utilisée. On opte pour un coût d'une borne de recharge rapide et de son raccordement au réseau électrique de 65 000 €. Le coût d'entretien des bornes de recharge est estimé à 3 % de l'investissement initial ([rapport Etudes & documents n°41 CGDD](#)), soit environ 2 000 € par an. Une borne est supposée avoir une durée de vie de 20 ans. D'autres options seraient envisageables, mais ne sont pas retenues ici, comme le changement de batterie en stations ou la recharge partielle aux stations.

AUTRES HYPOTHÈSES

Le taux d'actualisation est pris égal à 4,5 %, correspondant au taux d'actualisation « public » préconisé par le rapport Quinet (CGSP, 2013). L'actualisation permet l'évaluation d'un même bien ou des services qu'il rend à différents instants. En particulier les technologies étudiées conduisent à un surcoût immédiat (à l'achat et/ou pour l'installation d'infrastructures) et un gain dans le futur (moindres consommations et impacts environnementaux favorables).

Les dépenses et recettes publiques supportent un « coût d'opportunité des fonds publics » (COFP) qui rend compte des distorsions générées par le système fiscal. Conformément au rapport Quinet, on retient comme hypothèse que 1 € d'argent public prélevé par l'État coûte 1,2 € à la collectivité, soit un COFP égal à 1,2.

Enfin, on suppose que le trafic routier de marchandises en France (en PL.km) augmente jusqu'en 2050 à hauteur de 1,45 % par an (source : rapport « [Projections de la demande de transport](#) », CGDD, 2016).

Partie 3

Étude du coût complet des différentes options

Cette partie présente un calcul de l'ensemble des postes de coûts pour chaque motorisation, à différentes dates. Les résultats pour une approche du point de vue du transporteur sont d'abord présentés, suivis de ceux liés à une approche « socio-économique ».



MÉTHODE DE CALCUL

Il s'agit de prendre en compte les différents postes de dépense pour un service de transport de marchandises par voie routière, ceci pour un PL de référence diesel, puis pour les trois scénarios de traction électrique étudiés dans ce rapport. Ces coûts évoluant dans le temps, on identifie les différents postes de dépense pour chaque PL pour trois années : 2020, 2030 et 2040. Le résultat est d'abord exprimé en euro par poids lourd kilomètre (€/PL.km), en incluant les trajets sur autoroute et hors autoroute, puis en euro par tonne kilomètre (€/t.km) pour tenir compte de la contrainte de charge utile liée au surpoids de la batterie dans le cas du PL tout électrique.

Certains postes de coûts correspondant à des charges annuelles : frais d'assurance, d'entretien, coût du personnel, etc. En revanche, le coût d'investissement du PL et des infrastructures est pris en compte à travers une annuité. Cette annuité correspond au montant constant qui permet de couvrir le remboursement de l'investissement initial et des intérêts sur la durée de vie du camion, avec un taux d'actualisation de 4,5 %.

Pour cette première analyse, il nous faut formuler deux hypothèses :

- Le paramètre clé pour le transporteur est le taux de parcours sur autoroute électrique (défini comme le kilométrage effectué sur une autoroute électrique rapporté au kilométrage total parcouru), qui impacte directement le gain sur le poste d'énergie de traction (rouler en électrique coûte moins cher au km que de rouler en thermique). On fait ici l'hypothèse que les PL hybride ont un taux de parcours sur autoroute électrique de 50 %. Ce chiffre est légèrement supérieur au taux de parcours des PL sur le réseau autoroutier observé aujourd'hui (35 %) car on peut imaginer que les PL empruntant une AE seront ceux dont le taux de parcours est le plus élevé. Ce chiffre est proche de ce qui est observé sur l'A6 et l'A7 ;
- Pour le gestionnaire d'infrastructure, le paramètre sensible est la part du trafic de PL utilisant l'infrastructure caténaire, qui définit le facteur de charge de cette infrastructure. On retient un taux de 50 %. Pour une autoroute ayant un fort trafic (comme l'A7), la moitié du trafic PL correspond à un trafic d'environ 4 000 PL hybrides par jour, incluant les deux sens de circulation.

Enfin, on considère qu'on électrifie un tronçon avec l'hypothèse basse de coût d'infrastructure, soit 1,5 M€/km.

RÉSULTATS D'UN POINT DE VUE « TRANSPORTEUR »

Dans une première approche, on s'intéresse à tous les coûts supportés par un transporteur routier, à savoir l'achat des véhicules, leur entretien, les frais kilométriques et de péage moyens observés sur une OD. En ce qui concerne le poste énergie, le coût du diesel est celui à la pompe, le transporteur paye les taxes existantes, à savoir la TICPE, dont sa composante carbone.

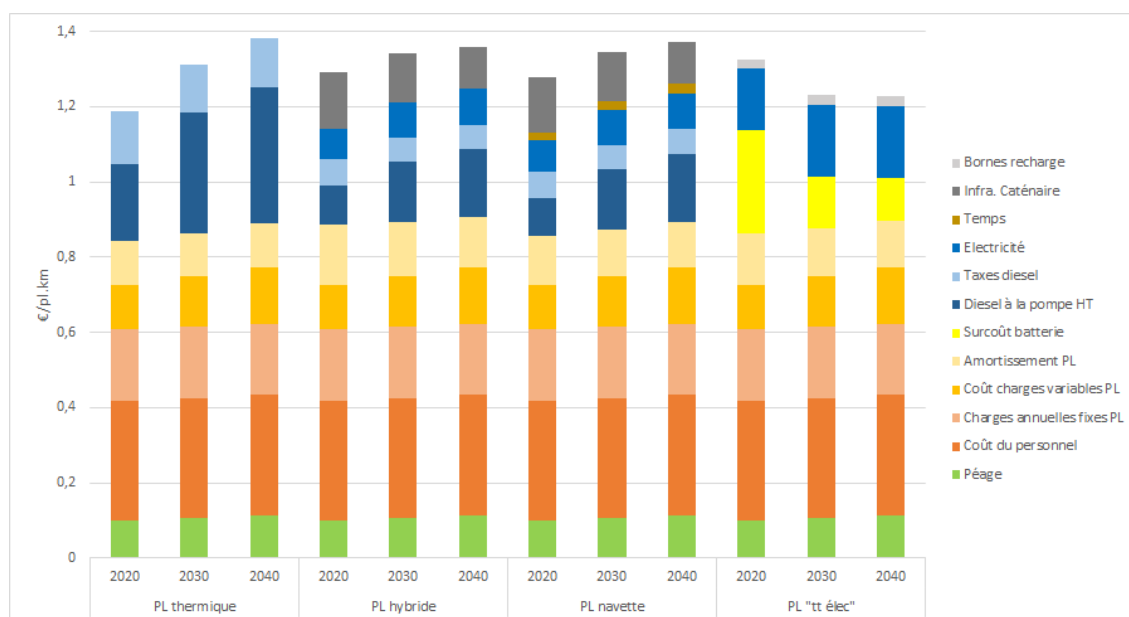
Partie 3 - Étude du coût complet des différentes options

Les résultats expriment ainsi tous les coûts du transporteur, en admettant que ce dernier supporte le coût des infrastructures. Ce premier graphique (figure 2) sert donc à la fois à illustrer la méthode de calcul et à synthétiser les principales hypothèses retenues. Les résultats sont tous pour une même OD : pour les PL hybride et navette, on utilise le trafic et le taux de parcours sur autoroute définis ci-dessus.

Résultats en €/PL.km

On arrive alors aux coûts kilométriques (figure 2) pour les différentes motorisations sur l'ensemble d'une OD, qui ont toutes le même taux de parcours sur autoroute : 50 %. C'est pourquoi le péage obtenu ci-dessous est de 10 c€/PL.km, soit la moitié du péage autoroutier classique (qui vaut 20 c€/PL.km), les transporteurs faisant la moitié de leur trajet sur autoroute.

Figure 2 - Coût complet à différents horizons pour les différentes technologies du point de vue transporteur, en €/PL.km



Lecture : Les différents postes sont regroupés par couleur. Ainsi, la partie fixe du péage est en vert. C'est la même pour toutes les solutions. Le bloc avec les couleurs orange et jaunes concerne l'investissement du camion et son entretien. Les barres colorées en bleu et bleu clair correspondent au coût des énergies, alors que les parties grisées correspondent au coût de l'infrastructure.

Il ressort que le PL électrique à forte autonomie est fortement pénalisé par le coût de la batterie en 2020. Avec des hypothèses optimistes de réduction du prix des batteries, cette option deviendrait rentable à partir de 2030.

Les options PL navette et hybride ne semblent pas viables en 2020 d'après les résultats présentés ici. En 2030 et 2040, la différence avec le PL thermique reste très faible, du fait du surcoût lié à la motorisation. La principale variable affectant le PL hybride est le taux de parcours sur autoroute. Celui-ci doit être aussi élevé que possible pour permettre des gains sur le poste énergie et infrastructure caténaire.

D'une manière générale, l'enjeu pour l'autoroute électrique est de maximiser le trafic effectué en mode électrique, afin de limiter le coût supporté par chaque PL au titre du financement de l'infrastructure. À cette fin, le mode hybride a l'avantage de la souplesse : tous les camions qui empruntent l'autoroute peuvent bénéficier de l'infrastructure, même pour des distances réduites, et ce sans rupture de charge. Il peut ainsi toucher un grand nombre de trajets. En revanche la massification nécessitera d'équiper de très nombreux PL, et pour ceux qui n'effectuent qu'une faible partie de leur trajet sur autoroute électrique, ou si la gestion des flottes nécessite des changements d'itinéraires fréquents, l'intérêt est réduit. Le fonctionnement en navette permet d'éviter à avoir à modifier les flottes de véhicule de chaque transporteur, mais implique une rupture de charge pour les marchandises transportées et l'utilisation de points d'entrées nécessairement peu nombreux. Ainsi, seuls des trajets sur autoroute électrique suffisamment longs seront concernés.

Résultats en €/t.km

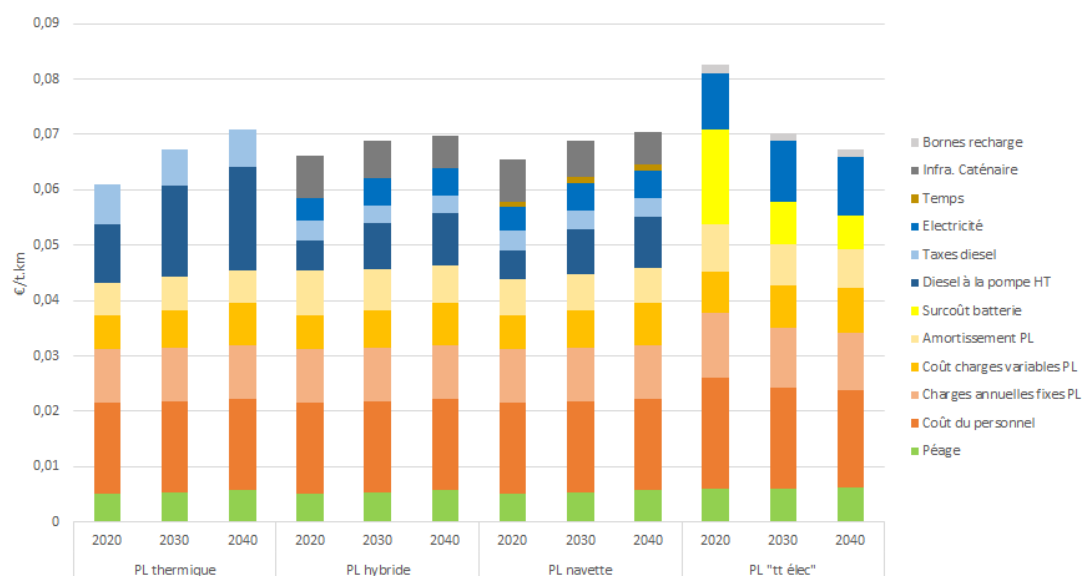
Une comparaison plus pertinente des différentes motorisations se fonde sur l'unité « €/t.km ». En effet, la charge utile diffère pour le PL électrique à forte autonomie. Ainsi, un transporteur effectuera son calcul sur cette unité de mesure s'il veut transporter la même quantité de marchandise en passant à une motorisation plus propre. Les charges utiles plus faibles des PL avec une motorisation électrique peuvent donc être contraignantes dans la promotion de PL propres. La charge utile joue un rôle majeur dans les résultats, même si la contrainte de poids des batteries devient plus faible dans le temps pour le PL électrique à forte autonomie.

En prenant des PL chargés à 75 % de leur charge utile, on ne modifie pas l'écart relatif entre les options thermique, hybride et navette, mais on dégrade les résultats du PL électrique à forte autonomie de plus faible charge utile : -15 % en 2020 (figure 3).

Sous ces hypothèses, le PL électrique à forte autonomie ne devient intéressant qu'à partir de 2040 grâce aux hypothèses favorables sur le prix des batteries et leur capacité énergétique.

Partie 3 - Étude du coût complet des différentes options

Figure 3 - Coût complet à différents horizons pour les différentes technologies du point de vue transporteur, en €/t.km



RÉSULTATS D'UN POINT DE VUE « SOCIO-ÉCONOMIQUE »

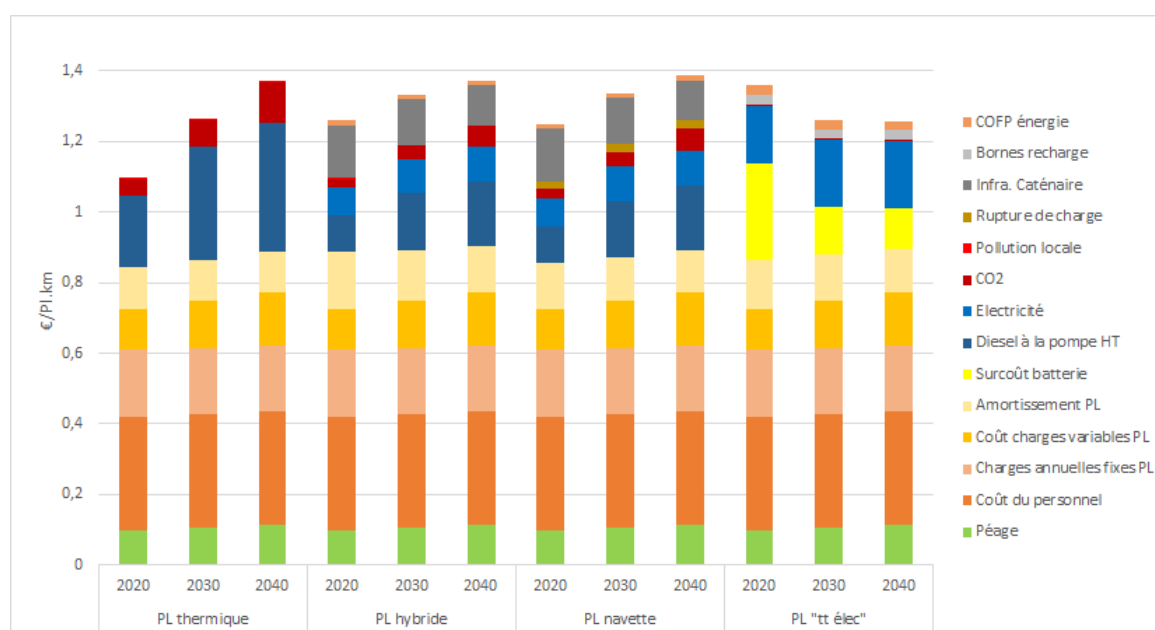
Dans cette partie, on retient une approche de coûts « socio-économique ». Cette approche s'attache à estimer les coûts réels supportés par la collectivité (y compris donc les coûts supportés par les personnes victimes des nuisances environnementales générées par l'utilisation d'un véhicule), qui correspondent à des investissements, des achats ou des externalités, sans prise en compte des transferts entre agents, en particulier vers l'État via la fiscalité (seul le COFP est pris en compte). La TICPE est ainsi exclue de l'analyse ici mais la CSPE qui est considérée comme une composante du coût de production de l'électricité est conservée. Dans cette partie, on attribue donc un coût au CO₂, aux particules fines et au temps perdu par la rupture de charge dans le cas du scénario PL navette.

Résultats en €/PL.km

On arrive au même type de résultats que précédemment (figure 4), avec le même code couleur. Viennent s'ajouter en rouge les externalités environnementales et en marron le coût de la rupture de charge (figure 4).

Partie 3 - Étude du coût complet des différentes options

Figure 4 - Coût complet à différents horizons pour les différentes technologies du point de vue socio-économique, en €/PL.km

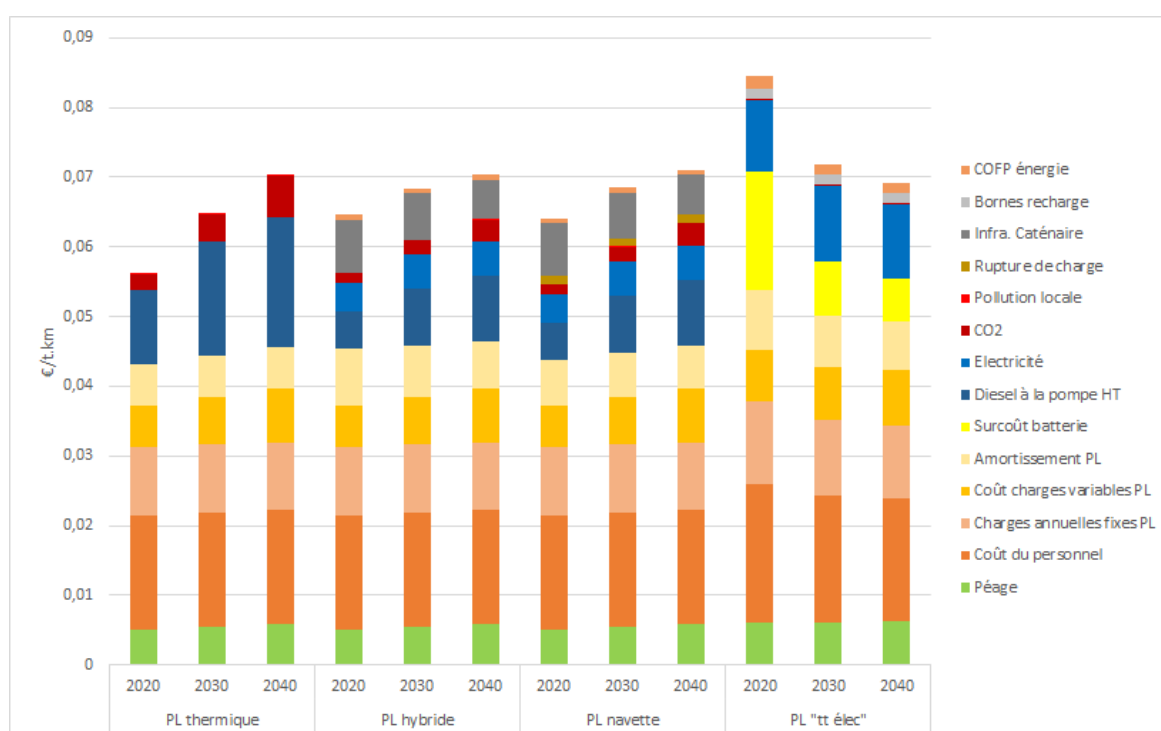


L'option diesel est dans ce cadre la plus avantageuse en 2020. Ensuite, pour 2030 et 2040, il n'y a pas de réelle différence entre la solution thermique et les options utilisant l'autoroute électrique. Cette fois encore, sans tenir de la contrainte de charge utile réduite, la solution du tout électrique semble intéressante dès 2030.

Résultats en €/t.km

On effectue alors le même calcul pour transformer les résultats en €/t.km (figure 5).

Figure 5 - Coût complet à différents horizons pour les différentes technologies du point de vue socio-économique, en €/t.km



Les conclusions sont similaires à celles de la partie précédente, à savoir un impact très important de la charge utile sur les résultats pour le PL tout électrique en 2020 et 2030.

SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES

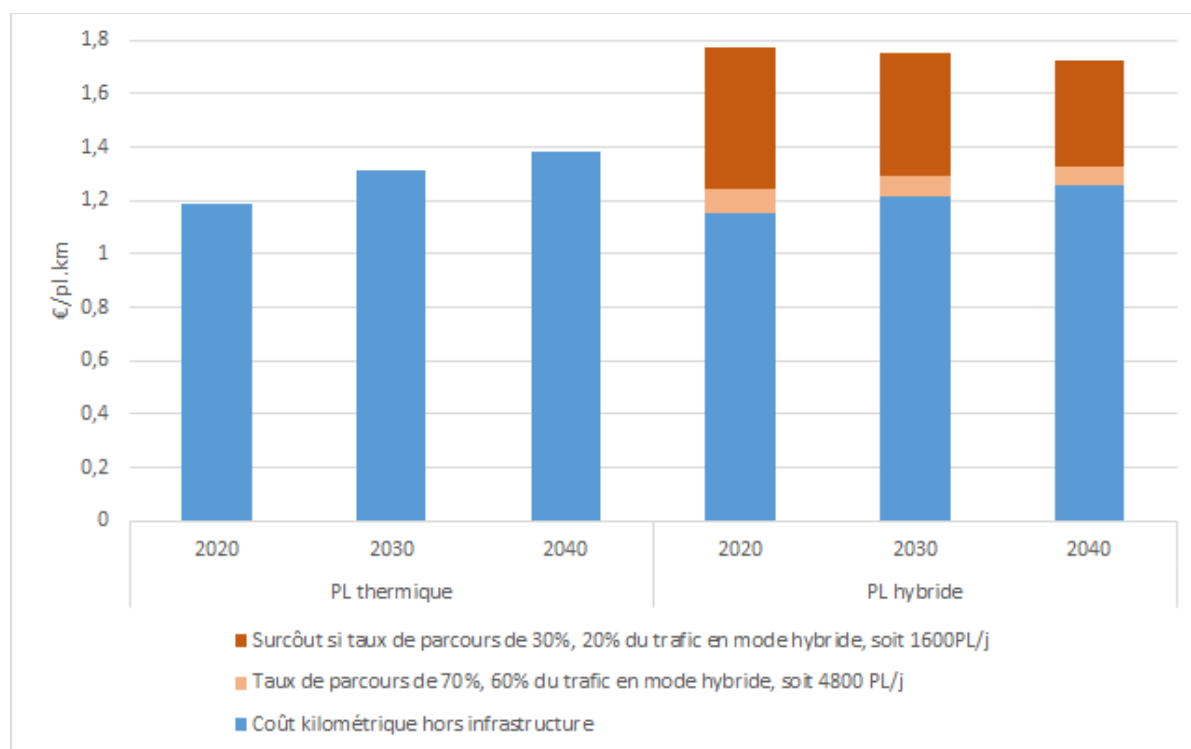
L'importance de la question de la charge utile est particulièrement perceptible sur le PL tout électrique à forte autonomie. Dans le cas précédent, la contrainte de charge utile pénalise fortement la solution du tout électrique. Ce point est à nuancer, car le taux de chargement des PL est en réalité assez faible selon l'enquête TRM 2014 et la contrainte est plus souvent volumique que massique. Le PL tout électrique est par ailleurs confronté à la question du temps de recharge, supposée réalisée sur les pauses des conducteurs tous les 400 km. Or, recharger une batterie de 600 kWh en moins d'une heure nécessite des puissances de plus de 600 kW. Les hypothèses sont donc assez optimistes sur ce point.

Partie 3 - Étude du coût complet des différentes options

Dans un premier temps, les camions tout électrique pourraient donc trouver leur rentabilité socio-économique sur les courtes distances (moins de problème de logistique et de temps de rechargement de batteries en présentant davantage de gains en termes d'externalités à la traversée des zones urbaines, notamment sur le bruit et les particules fines).

En ce qui concerne la comparaison des PL hybride et navette, les résultats sont très proches en termes de coût kilométrique sur l'ensemble de l'OD, à une même date (différence de quelques c€/PL.km). Les deux paramètres que sont le taux de parcours et le trafic en mode hybride sont dimensionnants (figure 6).

Figure 6 - Impact du taux de parcours et du trafic en mode hybride sur le coût kilométrique pour un transporteur



La partie bleue représente tous les coûts, hors ceux de l'infrastructure caténaire. La partie orange claire correspond au coût de l'infrastructure payée par les transporteurs si leur taux de parcours sur autoroute est de 70 % et en prenant 60 % du trafic utilisant l'AE. Si l'on abaisse ces deux valeurs à respectivement 30 % et 20 %, le coût pour le transporteur est matérialisé par la somme des deux blocs orange. Ainsi, si la circulation est importante avec un taux de parcours élevé, l'option du PL hybride devient plus intéressante que celle du PL thermique. En revanche, si le trafic en mode électrique est faible, un transporteur ne choisira pas l'option hybride, dont le coût serait prohibitif.

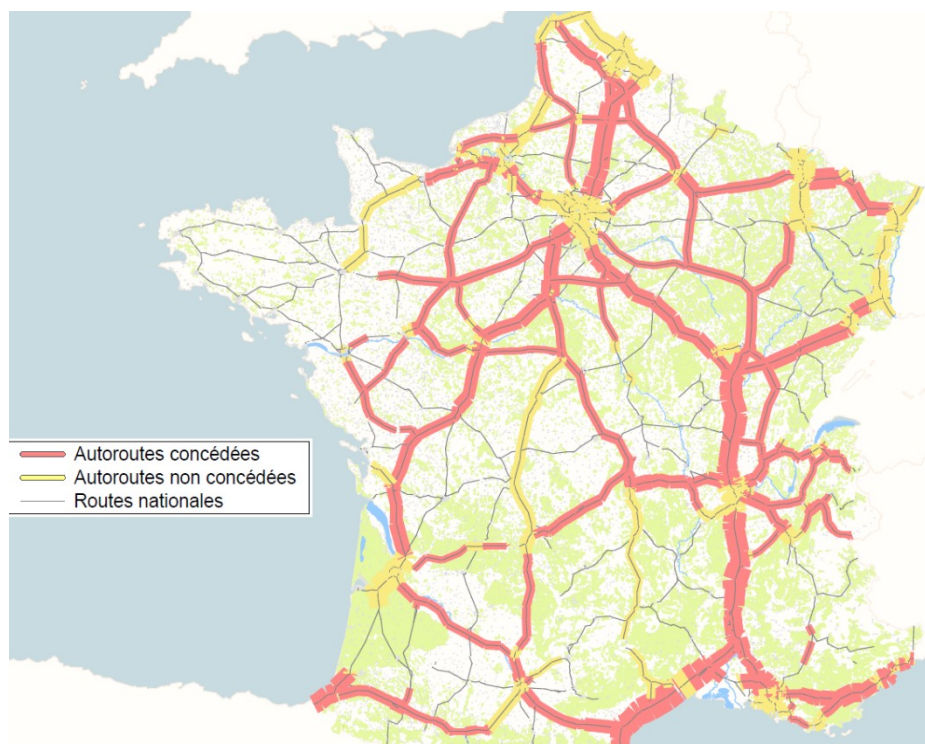
En conclusion, tant du point de vue transporteur que socio-économique :

- le tout électrique semble difficilement rivaliser avec le diesel dans les prochaines années, sa pertinence économique reste conditionnée à une évolution favorable de la technologie de la batterie à la fois en termes de coûts et de poids ;
- la solution autoroute électrique semble être en mesure de rivaliser avec le PL thermique, mais cela dépendra très fortement du trafic qui pourra basculer en mode électrique.

Sur la base de ce constat, il semblait intéressant de proposer quelques études de cas concrets sur des autoroutes existantes. Cet exercice nécessite de disposer d'une information fine sur les origines destinations des PL empruntant l'autoroute considérée. Cette information peut être obtenue en mobilisant le modèle Modev qui sera présenté par la suite.

Les niveaux de trafic des poids lourds sur les différentes autoroutes nationales sont hétérogènes (figure 7).

Figure 7 - Trafics poids lourds sur autoroutes d'après Modev, situation 2012



Source : Situation 2012 du trafic PL sur autoroutes, par Modev

Lecture : l'épaisseur des lignes traduit le niveau de trafic. L'épaisseur du trait de l'A1 entre Paris et Lille correspond par exemple à 13 000 PL/jour

La suite de l'étude consiste à s'intéresser à deux autoroutes à fort trafic dont l'électrification pourrait présenter un intérêt pour la collectivité.

Partie 3 - Étude du coût complet des différentes options

Partie 4

Description du modèle utilisé et de la méthode des bilans socio-économiques

Cette partie détaille rapidement le fonctionnement du modèle de transport Modev, utilisé pour les données de trafic dans l'étude. La méthode et les éléments estimés dans un bilan socio-économique sont ensuite précisés.



LE MODÈLE MULTIMODAL MODEV

Le ministère mène depuis plusieurs années une démarche de modélisation multimodale des flux de transport sur le territoire national et au niveau européen. Il développe d'un modèle multimodal de transport de voyageurs et de marchandises nommé Modev. Ce modèle permet une meilleure appréciation quantitative de l'impact de nouvelles offres d'infrastructures ou de services sur les flux de transport et leurs répartitions modales.

Modev prend en compte à la fois les flux de transport nationaux et la dimension internationale des flux de marchandises autour de la France. Il permet la modélisation des transports intermodaux de type combiné rail-route, autoroutes ferroviaires et maritimes et acheminements aux ports maritimes.

Le modèle de transport de marchandises a été mis à jour de manière à représenter la situation de 2007, nouvelle situation de référence. Le zonage du territoire au niveau agrégé (95 départements français, 60 régions étrangères et 25 ports), fin (325 zones d'emploi françaises, 60 régions étrangères et 25 ports) et intermédiaire à l'intersection des zonages agrégés et fins a été mis à jour avec les données socio-économiques de 2007. Un processus de désagrégation permet de disposer de matrices de référence sur un zonage fin, à la zone d'emploi en France : celui-ci comprend 342 zones en France correspondant aux zones d'emploi et le même découpage à l'étranger et pour les ports maritimes. Au total, l'ensemble des opérations du modèle (génération, distribution, choix modal, transformation véhiculaire, affectation, calcul des prix) sont effectuées sur le zonage fin avec 597 zones.

La matrice de demande finale obtenue s'appuie sur la base du zonage fin. Elle donne les origines destinations de l'ensemble du trafic de marchandises sur les autoroutes françaises A1, A4, A5, A6, A7, A10, A11, A61, A62, A71. Pour chaque Origine Destination, on connaît le nombre de PL.km réalisés, les itinéraires empruntés par les PL sur une ou plusieurs autoroutes. On connaît également la distance totale parcourue par les PL de l'Origine à la Destination (route et autoroute) et le taux de parcours effectué sur chaque autoroute électrique.

Une première analyse des données permet de cibler les autoroutes candidates à une électrification, où le trafic est dense et la distance parcourue par les PL suffisamment importante. Il s'agit des autoroutes A1, A6, A7, A10 et A11 pour lesquelles le débit est supérieur à 2 000 PL par jour. Ces autoroutes passent toutes par Paris et sont reliées, ce qui permet d'analyser les PL qui empruntent plusieurs autoroutes et qui sont susceptibles de parcourir des distances plus longues sur tronçon électrifié.

Compte tenu de ces éléments, l'analyse économique sera conduite pour les autoroutes A6 et A7. Selon Modev, le trafic sur l'A6 en 2020 est de 3,65 M veh.km/j, soit 8 100 PL par jour, et pour l'A7, il est de 2,36 M veh.km/j, soit 7 800 PL par jour.

MÉTHODE DE CALCUL DU BILAN SOCIO-ÉCONOMIQUE

Le bilan socio-économique est donné directement par l'équation ci-dessous. Il correspond à la différence entre les coûts de transport de marchandises avec l'utilisation d'une nouvelle motorisation à la situation de référence (ici, transport de marchandise par des PL diesel).

Le bilan économique intègre différents éléments : le coût complet des véhicules (coûts fixes et variables), les effets externes des différentes motorisations (environnementales et temps perdu) et le coût d'investissement lié à la mise en place de la nouvelle infrastructure.

Plus précisément, on calcule la valeur actualisée nette des coûts et avantages, au taux d'actualisation de 4,5 %, pour une période de 20 ans (afin de limiter l'incertitude de variables sensibles comme le prix des énergies) et on tient compte de la valeur résiduelle de l'infrastructure. On ignore par ailleurs la phase de montée en régime du projet, en supposant une électrification immédiate de tous les trajets pour lesquelles cette option est rentable.

$$VAN = \sum_{t=1}^{20} \frac{\Delta \text{Coûts}_{\text{fixes}}(t) + \Delta \text{Coûts}_{\text{énergie}}(t) + \Delta \text{Coûts}_{\text{externes}}(t) + \text{Coût}_{\text{infrastructure}}(t)}{(1 + TA)^t}$$

- $\Delta \text{Coûts}_{\text{fixes}}(t)$ est la différence, entre l'option évaluée et l'option de référence, des coûts fixes liés au PL pour l'année t. On rappelle qu'il faut investir dans deux PL de durée de vie de 10 ans pour couvrir la période étudiée ici,
- $\Delta \text{Coûts}_{\text{énergie}}(t)$ est la différence, entre l'option évaluée et l'option de référence, des coûts liés à l'énergie de traction pour l'année t,
- $\Delta \text{Coûts}_{\text{externes}}(t)$ est la différence, entre l'option évaluée et l'option de référence, de coûts externes pour l'année t,
- $\text{Coût}_{\text{infrastructure}}(t)$ est le coût de l'infrastructure caténaire pour l'année t, qui inclut : le coût d'investissement initial ; les coûts d'entretien estimé à 4 % de l'investissement initial ; la valeur résiduelle de l'infrastructure la 20^e année (l'infrastructure caténaire est supposée avoir une durée de vie de 35 ans mais le bilan socio-économique n'est que sur 20 ans).

Les calculs ont été faits pour les cas de l'A6 et l'A7, compte tenu de la longueur des tronçon et déduction faite de la valeur résiduelle (tableau 13).

Tableau 13 - Coûts totaux des infrastructures caténaires (entretien compris) à différentes dates de mise en service

	A6 (450 km)		A7 (300 km)	
	2020-2039	2030-2049	2020-2039	2030-2049
H1 Siemens (M€)	862	862	575	575
H2 Siemens (M€)	1 437	1 437	958	958

Partie 4 - Description du modèle et de la méthode de calcul des bilans socio-économiques

Partie 5

Bilan pour le scénario PL hybrides sur autoroute électrique

La comparaison entre un transport par poids lourd thermique et par poids lourd hybride est menée dans cette partie. Deux options de financement de l'infrastructure caténaire sont étudiées : l'une par des subventions publiques, l'autre par le concessionnaire autoroutier, qui répercute ce coût sur les transporteurs.



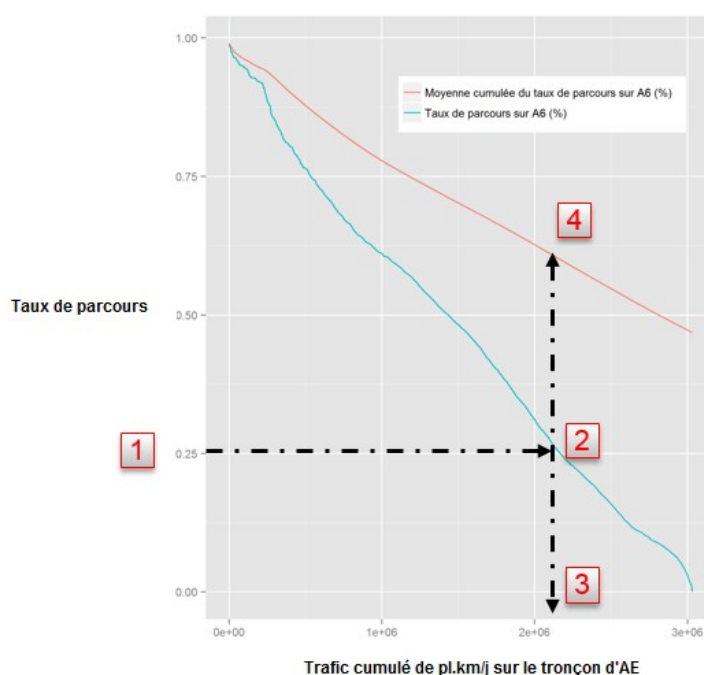
ANALYSE PRÉALABLE DU PROJET

Dans cette partie, on fait l'hypothèse que tous les PL ayant intérêt à utiliser la technologie hybride l'adoptent sans délai⁹. Ce choix dépend principalement du taux de parcours effectué sur AE qui définit le montant des économies réalisées sur le poste de l'énergie de traction, ces dernières compensant à partir d'un certain niveau, le surcoût lié à la double motorisation. Il s'agit donc dans un premier temps de déterminer quel est ce taux « pivot » (ou taux « d'indifférence »), puis, dans un second temps de déterminer quels sont les trajets qui dépassent ce taux pivot, combien de trafic ils représentent au total, et enfin quel est pour ces trajets le taux moyen de parcours sur AE (nécessairement supérieur au taux pivot).

Pour définir quelles sont les OD qui sont susceptibles d'être intéressées par le PL hybride, une analyse des trafics est réalisée à partir des données de Modev sur les autoroutes A6 et A7. Cette analyse estime le taux de parcours sur autoroute pour chaque OD et la moyenne cumulée du taux de parcours (figure 8). Cette dernière correspond au taux de parcours moyen pour toutes les OD ayant un taux de parcours sur autoroute supérieur à un taux donné.

⁹ En pratique, on identifie les OD pour lesquelles la traction électrique est rentable et on suppose que des PL hybrides seront utilisés sur ce segment de marché.

Figure 8 - Étude de trafic pour l'A6 (données Modev 2007)



Lecture : Pour l'autoroute A6, les OD sont triées par taux de parcours décroissant. Pour chaque taux de parcours pivot, (1) 0,25 pour l'exemple ici, et à partir de la courbe du taux de parcours (2), on détermine (3) le trafic des PL hybrides (lecture de l'abscisse) et (4) le taux de parcours moyen de toutes les OD, dont le taux de parcours est supérieur à ce taux pivot.

MÉTHODE DE CALCUL DU BILAN SOCIO-ÉCONOMIQUE

Le périmètre d'étude considéré ici est le trajet du PL sur l'ensemble de l'OD. Le taux de parcours va être la variable clé de l'étude étant donné que le surcoût du PL hybride ne se rentabilise que sur la partie électrifiée de son trajet.

Deux hypothèses peuvent être envisagées concernant la mise à contribution des transporteurs pour le financement de l'infrastructure :

- pas de péage supplémentaire (financement par d'autres voies, par un financement public avec intégration du COFP) ;
- péage supplémentaire (payé au gestionnaire d'autoroute qui est supposé réaliser les travaux d'électrification), pour couvrir la totalité du coût d'investissement.

La méthode de calcul retenue est la suivante : on recherche le niveau de taux de parcours sur autoroute électrique pour lequel le transporteur est indifférent entre le PL thermique et le PL hybride. Le surpéage est soit fixé de manière à couvrir le coût fixe d'investissement de l'infrastructure caténaire dans le cas d'un financement par les transporteurs, soit nul dans le cas d'un financement autre. Dans le premier cas, le péage est défini comme suit :

$$péage_{infra_{elec}} = \frac{Coût_{infrastructure}}{\sum_{t=1}^{20} \frac{trafic_{total} * trafic_{total_{electrique}}(X_p)}{(1+TA)^t}}$$

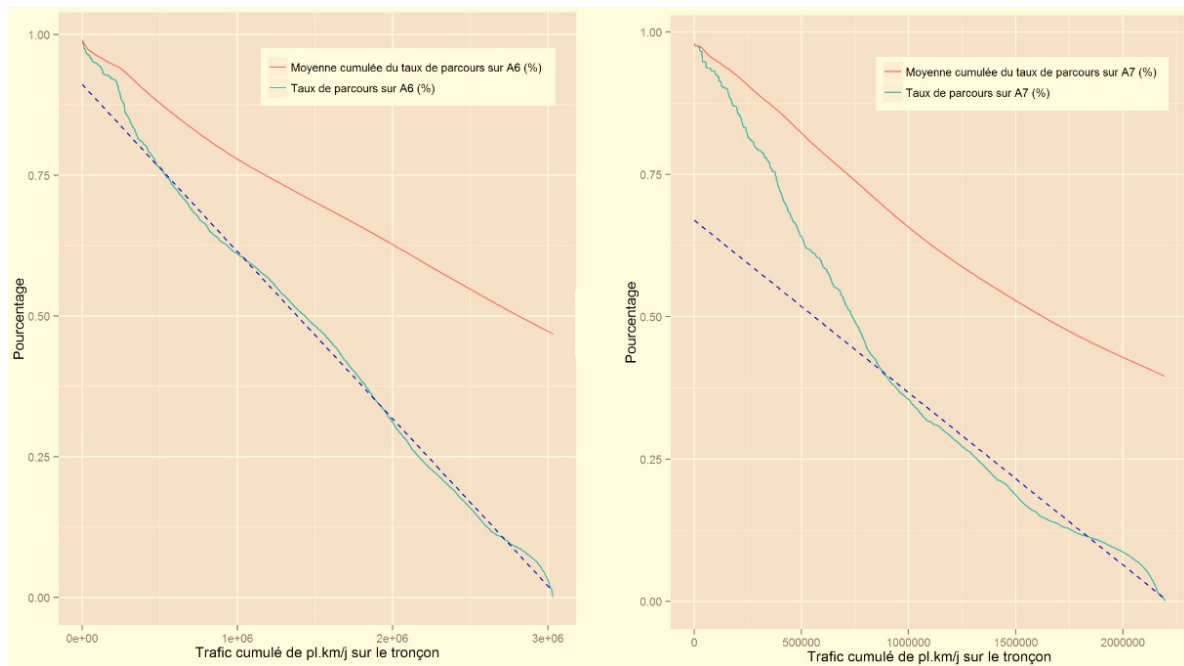
Avec :

- $Coût_{infrastructure}$ est le coût de l'infrastructure sur la période de 20 ans, amortissement économique et d'entretien compris, en tenant compte d'une valeur résiduelle à 20 ans,
- $trafic_{total}$ est le trafic total des PL sur l'autoroute considérée en PL.km,
- $trafic_{total_{electrique}}(X_p)$ est la part du trafic réalisé en mode électrique, dépendant du taux de parcours pivot X_p sur autoroute.

Cette équation permet donc de calculer un péage comme étant le coût de l'infrastructure divisé par le trafic total actualisé sur les 20 ans.

Ce péage dépend directement du trafic qui est en mode électrique. On fait la régression entre taux de parcours des OD classé de manière décroissante et trafic cumulé, sur les données de trafic de l'A6 et l'A7 (figure 9).

Figure 9 - Régressions entre le taux de parcours et le trafic cumulé pour l'A6 et l'A7



La linéarisation du taux de parcours en fonction du trafic cumulé permet d'exprimer simplement le trafic en mode électrique pour un taux de parcours pivot donné. On obtient ainsi une formulation du péage qui dépend directement de X_p .

Le taux de parcours pivot pour lequel le transporteur est indifférent entre les deux motorisations, est défini par l'équation suivante :

$$\sum_{t=1}^{20} \Delta \text{Coût } s_{\text{fixes}}(t) = 112700 * X_p * \sum_{t=1}^{20} \frac{\Delta \text{Coût } s_{\text{énergie}}(t) - \text{péage}_{\text{infra}_{\text{elec}}}(X_p)}{(1+TA)^t}$$

- X_p est le taux de parcours pivot,
- $\Delta \text{Coût } s_{\text{fixes}}(t)$ est la différence des coûts fixes liés au PL pour l'année t,
- 112 700 est le kilométrage annuel moyen d'un camion,

- $\Delta Coûts_{\text{énergie}}(t)$ est la différence des coûts liés à l'énergie entre les deux modes de transport pour l'année t^{10} ,
- $péage_{\text{infra}_{\text{elec}}}$ correspond au surcoût que le transporteur doit payer pour utiliser les caténaires. Dans le cas où le transporteur ne paierait pas pour l'infrastructure, celui-ci est nul, on peut donc directement trouver le taux de parcours pivot correspondant. Sinon, il doit être exprimé à partir de l'équation précédente exprimant le montant du péage en fonction du taux de parcours.

Dans le cas où un péage additionnel est assumé par les transporteurs, on résout donc un système de deux équations à deux inconnues (péage et taux de parcours pivot sur autoroute) :

$$\sum_{t=1}^{20} \Delta Coûts_{\text{fixes}}(t) = 112700 * X_p * \sum_{t=1}^{20} \frac{\Delta Coûts_{\text{énergie}}(t) - péage_{\text{infra}_{\text{elec}}}}{(1+TA)^t}$$

$$péage_{\text{infra}_{\text{elec}}} = \frac{Coût_{\text{infrastructure}}}{\sum_{t=1}^{20} \frac{trafic_{\text{total}} * trafic_{\text{total}_{\text{électrique}}}(X_p)}{(1+TA)^t}}$$

Par résolution numérique du système d'équations, avec comme conditions un péage positif ou nul et un taux de parcours compris entre 0 et 1, on détermine le taux de parcours pivot et le montant du péage correspondant. On en déduit alors le trafic intéressé par la solution du PL hybride.

BILAN SOCIO-ÉCONOMIQUE SANS PÉAGE ADDITIONNEL POUR LE TRANSPORTEUR

Ce premier bilan correspond à un surpéage nul. Ainsi, on maximise le trafic qui sera réalisé en mode électrique par des PL hybride. Comme expliqué ci-dessus, on en déduit alors le trafic réalisé en mode électrique sur autoroute par des PL hybrides. Ce trafic de PL hybrides correspond au trafic de l'ensemble des PL dont le taux de parcours sur autoroute est supérieur au taux de parcours pivot entre les motorisations diesel ou hybride.

Le bilan obtenu est la somme actualisée de tous les coûts et bénéfices liés à la technologie hybride sur une période de 20 ans, avec deux dates possibles de mise en service : 2020 et 2030 (tableau 14). On observe logiquement une baisse du taux de parcours pivot entre 2020 et 2030, le prix du diesel et du carbone (payé par le transporteur via la taxe carbone) connaissant une forte augmentation (+ 50 c€/L) sur la même période. Le nombre de PL hybride et le trafic résultant augmentent logiquement entre les deux dates de mise en service.

¹⁰ Le coût du carburant inclut la TICPE.

Partie 5 - Bilan pour le scénario PL hybrides sur autoroutes électriques

Tableau 14 - Bilan socio-économique de la motorisation hybride versus motorisation diesel, sans péage additionnel pour le transporteur

	A6		A7	
	2020-2039	2030-2049	2020-2039	2030-2049
Taux de parcours pivot	13%	6%	13%	6%
Nbre PL hybride/j début période	5 864	7 362	5 972	7 765
% trafic par PL hybride	72%	78%	76%	86%
Infra H1 Siemens	-862	-862	-575	-575
COFP infra	-172	-172	-115	-115
Surcoût PL	-187	-135	-112	-82
Variation coût énergie (hors TICPE et TC)	484	925	290	561
CO2	322	599	193	363
Pollution locale	19	25	11	15
COFP carburant	-126	-143	-76	-87
Total en M€	-523	237	-384	81
Infra H2 Siemens	-1 437	-1 437	-958	-958
COFP infra	-287	-287	-192	-192
Surcoût PL	-187	-135	-112	-82
Variation coût énergie (hors TICPE et TC)	484	925	290	561
CO2	322	599	193	363
Pollution locale	19	25	11	15
COFP carburant	-126	-143	-76	-87
Total en M€	-1 213	-453	-843	-379

Le bilan socio-économique est négatif pour l'A6 et l'A7 sur la période 2020-2030, quelle que soit l'hypothèse de coût pour l'infrastructure caténaire. Dans le cas d'un faible coût d'infrastructure, le bilan est positif sur la période 2030-2050. Les bilans sont pénalisés par le COFP sur l'infrastructure et sur la perte fiscale liée aux carburants. En effet, l'électricité est faiblement taxée comparée au diesel, l'utilisation accrue de la première entraîne donc une perte de revenus fiscaux pour L'État. Les principales sources de gains sont les bénéfices environnementaux et les économies sur l'énergie de traction. Mettre en place ces infrastructures dès 2020 ne serait donc pas viable. En revanche, suite à l'augmentation du prix de l'énergie et des externalités environnementales, un bilan positif semble atteignable en 2030 pour l'hypothèse basse de coût de l'infrastructure électrique.

BILAN SOCIO-ÉCONOMIQUE AVEC PÉAGE ADDITIONNEL POUR LE TRANSPORTEUR

Dans ce cas, il convient d'estimer si le projet d'investissement d'infrastructure caténaire est finançable par les transporteurs et de déterminer le montant de péage associé à l'usage de l'infrastructure.

La résolution du système de deux équations à deux inconnues présenté plus haut est effectuée pour les deux hypothèses de coût d'infrastructure.

La résolution numérique ne conduit à une solution (i.e. l'infrastructure peut être financée par le trafic en mode électrique) que dans deux cas : hypothèse basse de coût d'infrastructure électrique et horizon 2030. Dans les autres cas, il n'existe pas de solution. Pour ces valeurs de taux de parcours pivot et de péage, on établit selon le même principe que précédemment le bilan socio-économique (tableau 15). Dans ce cas, l'infrastructure étant financée par les usagers, il n'y a donc pas de COFP à prendre en compte pour le financement de l'infrastructure électrique.

Tableau 15 - Bilan socio-économique de la motorisation hybride *versus* motorisation diesel, avec péage additionnel pour le transporteur

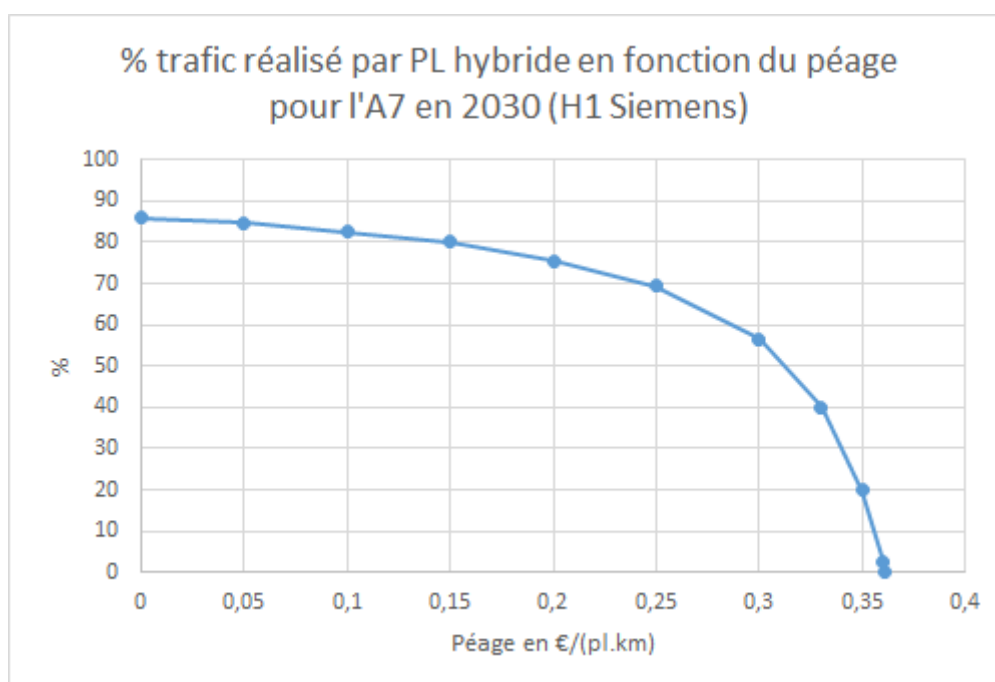
	A6		A7	
	2020-2039	2030-2049	2020-2039	2030-2049
<i>Infra H1 Siemens</i>				
Taux de parcours pivot		10%		11%
Nbre PL/j début période		7 024		7 150
% trafic par PL hybride		75%		79%
Infrastructure		-862		-575
Surcoût PL		-134		-80
Variation coût énergie (hors TICPE et TC)		920		545
CO2		595		353
Pollution locale		25		15
COFP carburant		-142		-84
Total en M€		401		174

Le montant du péage collecté assure le financement lorsqu'il existe une solution au système d'équations. Dans le cas de l'A6 sur la période 2030-2050, le péage lié à la construction de l'infrastructure caténaire est de 0,16 €/PL.km. Il est de 0,18 €/PL.km pour l'A7 sur la période 2030-2050.

Dans les deux cas où le financement de l'infrastructure électrique est effectué à travers un péage, on observe que le bilan socio-économique est plus favorable que celui obtenu dans la partie précédente. La perte de trafic en mode électrique résultant de l'imposition d'un surpéage est suffisamment faible pour ne pas contrebalancer le gain associé à la disparition du COFP.

Il peut paraître surprenant d'enregistrer une si faible perte de trafic, au vu du coût non négligeable que ce surpéage représente pour un transporteur. En regardant l'évolution du trafic en fonction du montant du péage, on montre que pour un péage inférieur à 20c€/km, le choix du transporteur entre PL thermique et PL hybride est assez peu affecté (figure 16).

Figure 16 - Pourcentage du trafic réalisé par PL hybride en fonction du péage pour l'A7



On peut également voir qu'à partir d'un niveau de péage de 0,37 €/km, il n'y a plus de trafic en mode électrique.

Ainsi, la perte de trafic liée au péage additionnel est moins importante que celle liée au COFP.

Partie 5 - Bilan pour le scénario PL hybrides sur autoroutes électriques

Partie 6

Bilan pour le scénario tracteur PL électrique « navette » sur autoroute électrique

La comparaison entre un transport par poids lourd thermique et par poids lourd électrique « navette », avec rupture de charge, est menée dans cette partie. Seule l'option d'un financement de l'infrastructure caténaire par des subventions publiques est étudiée.



ANALYSE PRÉALABLE DU PROJET

Dans ce scénario, on s'intéresse à l'opportunité qu'une partie du trajet d'un PL puisse être effectuée par un service de navette connectée à l'AE, sur la partie autoroutière de l'OD. On suppose dans cette section que l'État prend en charge le coût d'électrification de l'autoroute. L'idée ici reprend le concept des autoroutes ferroviaires.

Le service de navette impose une perte de temps pour les opérations de chargement et de déchargement, liées à la rupture de charge à l'entrée et à la sortie du tronçon électrifié. En outre, l'organisation des trajets des PL thermiques s'en trouve nécessairement modifiée. En effet, au lieu d'un trajet de bout en bout avec un seul tracteur, la marchandise va être cette fois acheminée par trois différents tracteurs : un de l'origine à la plate-forme à l'entrée de l'AE, une navette en mode électrique sur l'AE et un dernier tracteur thermique entre la sortie d'autoroute et la destination. On suppose que pour cette option, les transporteurs sont capables de réorganiser les flux de leurs PL thermiques sans désoptimiser leur utilisation. On ne suppose en particulier aucun retour à vide des PL thermiques, ce qui est une hypothèse forte.

La grandeur clef dans le choix d'utiliser la navette n'est pas le taux de parcours mais la distance minimale parcourue par le PL navette qui permettra de dégager suffisamment d'économie pour permettre de compenser le léger surcoût du PL navette et le coût lié à la perte de temps. Il s'avère qu'un transporteur est indifférent entre investir dans un poids lourd thermique ou électrique à faible autonomie lorsqu'il parcourt seulement quelques dizaines de kilomètres sur autoroute électrique (et ce même avec une hypothèse de trafic défavorable). Ceci s'explique par l'hypothèse basse de valeur du temps retenue, la rupture de charge a donc un coût très faible.

Presque tous les trajets sur autoroute pourraient donc être théoriquement intéressés par l'option navette. Dans les faits, le chargement et le déchargement des remorques nécessitent des plate-formes adaptées (dont le coût a ici été négligé). Or il n'est pas envisageable de construire de plate-formes à chaque sortie d'autoroute, pour des raisons de coûts, mais également car cela ne permettrait pas de massifier suffisamment le trafic : il pourrait y avoir des navettes qui repartiraient à vide). Par ailleurs, l'organisation logistique complexe imposée par la rupture de charge ne peut se justifier pour des parcours courts. Inversement, les études de trafic montrent que limiter fortement le nombre de plate-forme, par exemple en en plaçant simplement une à l'entrée et une à la sortie de l'autoroute, ne permet pas de capter beaucoup de PL. En pratique, on suppose dans un premier temps la mise en place de plate-formes logistiques sur autoroute tous les 100 km pour capter assez de trafic (et non seulement aux débuts et fins d'autoroutes).

MÉTHODE DU CALCUL

A partir des données de trafic sur l'A6 et l'A7, un tri est effectué pour définir le trafic et le nombre de PL faisant un certain kilométrage sur autoroute, par tranche de 100 km. Ainsi, on obtient le trafic des OD parcourant de 0 à 100 km sur autoroute, de 100 à 200 km, etc. pour les deux autoroutes A6 et A7. Le nombre de PL par jour est ensuite obtenu en divisant le trafic par la longueur d'autoroute (tableaux 16 et 17).

Partie 6 - Bilan pour le scénario tracteur PL électrique « navette » sur autoroute électrique

Tableau 16 - Données de trafic par tranches de distance pour l'A6

Trajet sur autoroute d'un PL	0-100 km	100-200 km	200-300 km	300-400 km	> 400 km	Total
Trafic en pl.km/j en 2020 sur l'A6	648 372	1 110 683	517 002	524 444	854 508	3 655 009
Nombre de PL/j correspondant en 2020	1 441	2 468	1 149	1 165	1 899	8 122

Tableau 17 - Données de trafic par tranches de distance pour l'A7

Trajet sur autoroute d'un PL	0-100 km	100-200 km	200-300 km	300-400 km	Total
Trafic en pl.km/j en 2020 sur l'A7	715 802	1 123 325	665 178	142 786	2 647 091
Nombre de PL/j correspondant en 2020	2 386	3 744	2 217	476	8 824

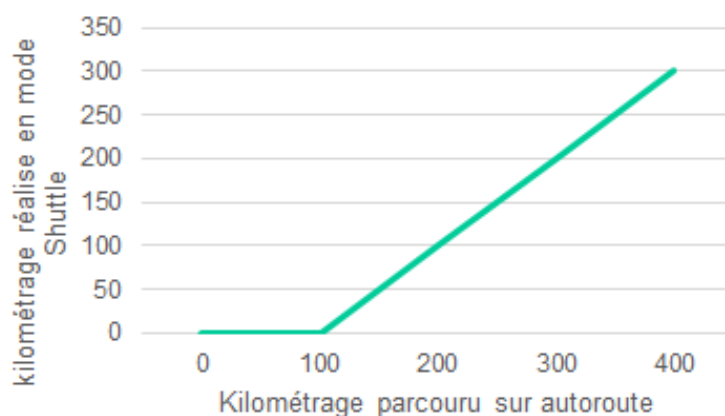
On note que seulement 18 % des PL parcourent l'A6 dans sa totalité et 5 % pour l'A7.

On associe alors le kilométrage moyen réalisé en mode navette à chaque « tranche » de kilométrage. On raisonne avec l'hypothèse de plate-formes placées tous les 100 kilomètres. Ainsi, on est sûr qu'un PL pourra faire 100 kilomètres en mode électrique s'il fait au moins 201 km sur autoroute. Pour les tranches intermédiaires, on raisonne en probabilité que le parcours sur AE intercepte les plate-formes de chargement / déchargement, en supposant que le trafic est uniformément réparti sur l'axe. Ainsi, un segment de 250 km sur autoroute a une demi-chance d'intercepter deux plate-formes distantes de 200 km et une demi-chance d'intercepter deux plate-formes distantes de 100 km. En moyenne sur l'ensemble du trafic, on estime donc que ces trajets de 250 km feront 150 km sur AE. Un kilométrage en mode électrique est alors associé à chaque trajet (tableau 18 et figure 11).

Tableau 18 - Kilométrage réalisé en mode navette en fonction de la distance parcourue sur autoroute

Trajet sur autoroute d'un PL	0-100 km	100-200 km	200-300 km	300-400 km	>400 km
Kilométrage moyen en mode électrique sur autoroute	0	50	150	250	350

Figure 11 - Kilométrage réalisé par un PL navette en fonction de la distance parcourue sur autoroute



En croisant les deux tableaux de données de trafic et de kilométrage réalisé en mode navette, on obtient le trafic réalisé en mode électrique sur AE : tableau 19.

Tableau 19 - Trafic PL réalisé en mode électrique sur l'A6 et l'A7

Trajet sur autoroute d'un PL	0-100 km	100-200 km	200-300 km	300-400 km	> 400 km	Total
Trafic en mode électrique (pl.km/j en 2020) sur l'A6	0	123 409	172 334	291 358	664 617	1 251 718
Trafic en mode électrique (pl.km/j en 2020) sur l'A7	0	187 221	332 589	118 988		638 798

Le trafic total réalisé en mode électrique est de 33 % pour l'A6 et seulement de 24 % pour l'A7. La nature des trafics sur l'A6 et l'A7 est différente : les nombreux trajets courts sur l'A7 expliquent le moindre trafic capté par le système de navettes.

Partie 6 - Bilan pour le scénario tracteur PL électrique « navette » sur autoroute électrique

BILAN SOCIO-ÉCONOMIQUE

Après le calcul de chacun des gains et coûts liés à l'utilisation de PL navettes, on obtient le bilan socio-économique, dans l'hypothèse d'un financement de l'infrastructure non assumé par les transporteurs (tableau 20).

**Tableau 20 - Bilan socio-économique de la motorisation électrique « Navette »
versus motorisation diesel**

	A6		A7	
	2020-2039	2030-2049	2020-2039	2030-2049
Nbre PL "navette"/j début période	2 522	2 912	1 517	1 751
% trafic par PL "navette"	31%	31%	17%	17%
<i>Infra H1 Siemens</i>	-862	-862	-575	-575
COFP infra	-172	-172	-115	-115
Surcoût PL	-85	-60	-34	-24
Variation coût énergie (hors TICPE et TC)	387	731	156	294
CO2	258	473	104	191
Temps	-55	-69	-33	-42
Pollution locale	15	20	6	8
COFP carburant	-101	-113	-41	-45
Total en M€	-616	-54	-533	-309
<i>Infra H2 Siemens</i>	-1 437	-1 437	-958	-958
COFP infra	-287	-287	-192	-192
Surcoût PL	-85	-60	-34	-24
Variation coût énergie (hors TICPE et TC)	387	731	156	294
CO2	258	473	104	191
Temps	-55	-69	-33	-42
Pollution locale	15	20	6	8
COFP carburant	-101	-113	-41	-45
Total en M€	-1 306	-744	-992	-769

Le bilan n'est jamais positif avec les hypothèses retenues. Ceci s'explique par la faiblesse du trafic capté par les navettes. Il convient toutefois de noter qu'en 2030 pour l'A6, le bilan est quasiment à l'équilibre, et serait positif sans prise en compte du COFP par exemple.

Rappelons cependant que le coût de construction d'infrastructures dédiées aux plate-formes de chargement et déchargement n'a pas été pris en compte. L'hypothèse de plate-formes tous les 100 kilomètres semble nécessaire pour capter davantage de trafic.

Dans le cas de plate-formes seulement à l'entrée et à la sortie de l'A6 ou de l'A7, le bilan est fortement dégradé : seules les OD parcourant plus de 300 kilomètres sur autoroute auraient été concernées, soit en termes de trafic 5 % pour l'A7 et 18 % sur l'A6.

Ainsi, même si le surcoût d'un PL navette est faible à l'achat, le bilan est largement négatif à cause du faible trafic réalisé en mode électrique.

Partie 7

Bilan pour le scénario PL électriques sur autoroute classique

Les options de transport de marchandises par poids lourd thermique ou par poids lourd « tout électrique » sont analysées, en prenant en compte une charge utile réduite liée au poids des batteries pour le transport par poids lourd électrique.



Partie 7 - Bilan pour le scénario PL électriques sur autoroute classique

BILAN SANS CONTRAINTE DE CHARGE UTILE

Pour ce premier bilan, on considère que tout le trafic s'équipe de PL électriques à forte autonomie. Les PL vont donc effectuer 100 % de leur trajet entre origine et destination en mode électrique. Dans ce scénario, il n'y a pas de caténaires à construire, c'est le surcoût lié aux batteries (et dans une moindre mesure, aux bornes de recharge) qui devient le principal poste de dépense supplémentaire pour les transporteurs.

Dans ces conditions, on obtient les bilans socio-économiques suivants avec les données de trafic sur l'A6 et l'A7, pour les périodes 2020-2040 et 2030-2050.

Tableau 21 - Bilan socio-économique du scénario PL électriques sur autoroutes classiques

	A6		A7	
	2020-2039	2030-2049	2020-2039	2030-2049
Nbre PL/j début période	8122	9380	7864	9081
Surcoût PL hors batterie	-241	-172	-156	-111
Coût batterie	-2 772	-1 833	-1 789	-1 183
Variation coût énergie (hors TICPE et TC)	1 252	2 362	808	1 525
CO2	833	1 529	537	987
Coût bornes de recharge	-149	-172	-144	-166
Charges variables entretien	-58	-67	-56	-65
Pollution locale	49	64	32	41
COFP carburant	-326	-365	-211	-236
Total (sans charge utile) M€	-1 413	1 346	-979	792

Le bilan obtenu est largement négatif sur la période 2020-2039. Le surcoût de la batterie est prépondérant dans le résultat observé. En revanche, à l'horizon 2030-2049, il semble y avoir un créneau pour le tout électrique, en première approche.

BILAN AVEC CONTRAINTE DE CHARGE UTILE

Dans ce paragraphe, on s'intéresse à la quantité transportée par les PL. On ne se concentre plus seulement sur le surcoût du PL électrique à forte autonomie, on estime également le nombre de PL électriques supplémentaires nécessaires pour compenser la charge utile réduite du PL électrique. Ce nombre baisse dans le temps avec les propriétés des batteries qui s'améliorent. Toutefois, pour ces PL supplémentaires, il faut considérer le coût total du PL (investissement, usage, etc.) et non seulement le surcoût du PL électrique puisque ces PL n'existent pas en situation de référence.

Partie 7 - Bilan pour le scénario PL électriques sur autoroute classique

En prenant en compte la charge utile réduite des PL électriques, dans le cas où les PL transportaient leur charge utile maximale, le résultat est largement négatif en 2020-2040 mais proche de zéro à un horizon plus lointain (tableau 22).

Tableau 22 - Bilan socio-économique du scénario PL électriques sur autoroutes classiques avec prise en compte du surcoût de la charge utile

	A6		A7	
	2020-2039	2030-2049	2020-2039	2030-2049
Nbre PL/j début période	8122	9380	7864	9081
Surcoût PL hors batterie	-241	-172	-156	-111
Coût batterie	-2 772	-1 833	-1 789	-1 183
Variation coût énergie (hors TICPE et TC)	1 252	2 362	808	1 525
CO2	833	1 529	537	987
Coût bornes de recharge	-149	-172	-144	-166
Charges variables entretien	-58	-67	-56	-65
Pollution locale	49	64	32	41
COFP carburant	-326	-365	-211	-236
Surcoût charge utile (*)	-2 109	-1 396	-1 355	-889
Total en M€ (avec différence charge utile)	-3 522	-49	-2 333	-97

(*) Incluant : achat camion, charges fixes et charges variables du camion, péage autoroutier, coûts du personnel, externalités environnementales et coût du temps, etc.

Il faut toutefois rester prudent sur cette conclusion, les hypothèses prises sur les prix et performances des batteries étant plutôt optimistes. Par ailleurs, davantage de PL sur les routes (hors autoroutes) accroît les coûts de congestion, non pris en compte ici.

Partie 7 - Bilan pour le scénario PL électriques sur autoroute classique

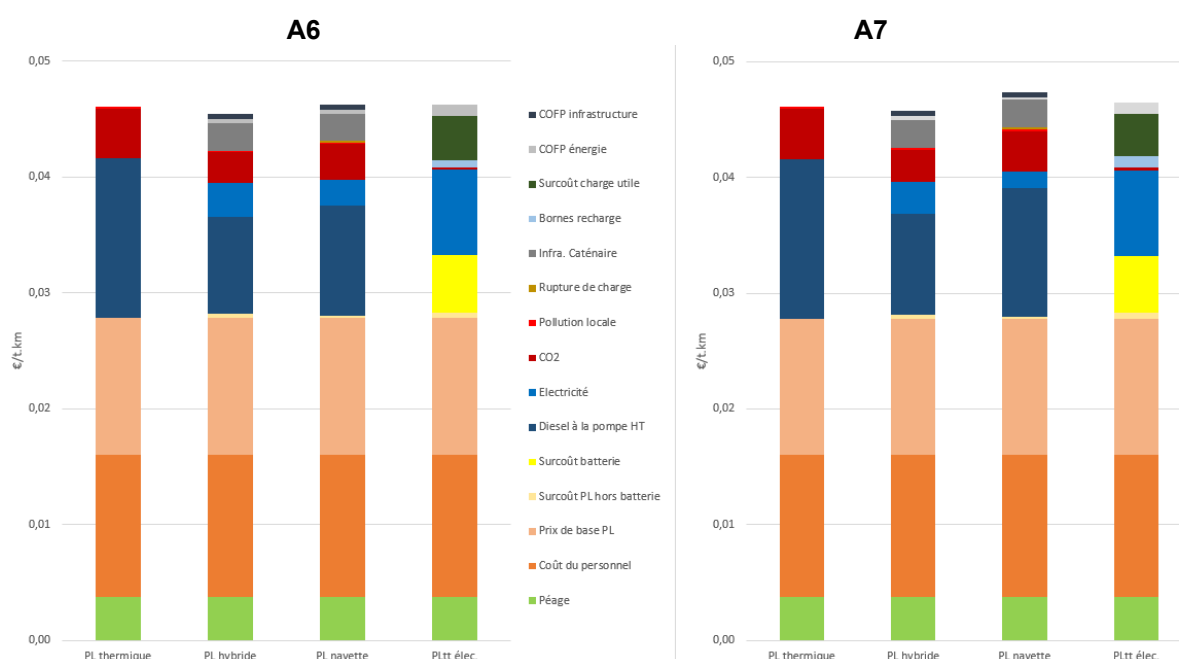
Conclusion



Conclusion - Bilan de l'analyse coûts-bénéfices, aspects et éléments à approfondir

Aujourd'hui, des projets d'AE sont déjà en place sur des tronçons courts en mode dédié en Suède ou aux États-Unis, pour l'industrie minière ou pour la desserte de zones portuaires, les fréquences et trafics étant très propices à l'utilisation de cette solution. Cette étude porte sur l'évaluation d'un projet d'autoroutes électriques (AE) en France sur des tronçons de plusieurs centaines de kilomètres, selon plusieurs modalités. Le bilan socio-économique des AE est favorable pour le PL hybride dans une hypothèse basse du coût de l'infrastructure caténaire (1,5 M€/km) et à l'horizon 2030. Il est possible d'exprimer les résultats en termes de coûts complets actualisés ramenés à l'unité de marchandise transportée¹¹ (figure12).

Figure 12 - Coût complet actualisé pour l'A6 et l'A7, période 2030-2049, en €/t.km



La solution hybride est envisageable à l'horizon 2030, compte tenu des hypothèses prises sur le coût d'infrastructure (1,5 M€) et du trafic potentiellement intéressé (supérieur à 6 000 PL par jour) et de son taux de parcours sur autoroute (supérieur à 50 %). Les éventuelles difficultés liées aux modalités de gestion du trafic sur autoroute sont à préciser, tout comme l'impact de la mise en place et de l'entretien des caténaires sur le trafic des autres véhicules utilisant l'autoroute qu'il convient de minimiser.

11 Par exemple, la composante de coût complet actualisé correspondant à l'investissement dans l'infrastructure est le montant d'investissement divisé par le trafic actualisé sur toute la période considérée.

L'utilisation de PL navette ne semble pas pertinente économiquement, compte tenu de la faiblesse du trafic pouvant être capté, et malgré les hypothèses optimistes retenues (pas de prise en compte des coûts des plate-formes de chargement et déchargement, pas de retour à vide de pré et post acheminement, pas de prise en compte de contraintes logistiques dans la définition du trafic captable). Une utilisation mixte de l'infrastructure électrique par des PL hybrides et des navettes n'est cependant pas à exclure.

La solution du tout électrique reste à préciser. Elle semble viable ici avec des hypothèses très favorables sur le coût et sur le poids des batteries, mais le problème de la charge utile pourrait constituer un frein majeur à son déploiement puisqu'il implique la mobilisation de davantage de PL, ayant eux-mêmes un impact en termes de congestion (non pris en compte hors autoroute dans l'analyse menée ici). Des questions se posent également sur la recharge des batteries qui pourrait s'avérer contraignante en temps ou coûteuse s'il faut installer des bornes très puissantes. Plutôt que tout électrique, des scénarios « hybride rechargeable » semblent plus probables et pourraient être envisagés. Ils auraient l'avantage de permettre une réduction du coût d'infrastructure, en électrifiant seulement les parties situées en dehors des ouvrages d'art, et en jouant sur l'autonomie en dehors des autoroutes des PL hybrides. Dans une telle hypothèse, les AE pourraient constituer un dispositif de recharge des PL hybrides rechargeables, leur permettant de circuler en mode électrique sur la batterie sur le réseau non électrifié, par exemple en zone urbaine.

Plusieurs questions restent en suspens dans cette étude. Un point concerne l'hypothèse de pénétration instantanée des marchés des PL hybrides et électriques. On assume dans l'étude que 100 % du trafic qui peut bénéficier du projet et de l'infrastructure caténaire le fait sans délai. Cette hypothèse très optimiste améliore sans conteste le bilan socio-économique. Plus généralement, d'autres questions se posent : si l'on imagine un réseau entre différents pays, quel sera l'impact sur les trafics ? A priori des effets de réseau pourraient intervenir : le trafic en mode électrique sur une autoroute donnée s'accroît si d'autres autoroutes connexes sont équipées, du fait du basculement potentiel d'un plus grand nombre de PL. À quelle vitesse pourrait être construit le réseau ? Quelles sont les limites et coûts par rapport au raccordement électrique dans les zones isolées ? Quelle puissance devra être apportée pour garantir un bon fonctionnement du service en heure de pointe ? Autant de questions qui devront être étudiées pour confirmer l'intérêt de cette solution innovante de transport de marchandise.

En effet, la conception de la sécurité électrique reste à préciser. Les supports de caténaires devraient être isolés par des dispositifs de retenue très lourds compte tenu de la probabilité de sortie de route bien plus élevée que dans le domaine des transports guidés, et des conséquences plus graves s'agissant d'un milieu ouvert. Se pose aussi la question des courants vagabonds dans les aciers d'ouvrages d'art non conçus pour cela. En outre, les contraintes de gestion de trafic impliquées par l'équipement d'une voie de ce type ont pu être sous-estimées, en particulier si le passage, pour un poids lourd hybride, d'une alimentation par caténaire à une alimentation par le carburant et vice versa, n'est pas instantané et que le changement de voie du poids lourd gêne l'insertion ou la sortie d'autres véhicules.

Conclusion - Bilan de l'analyse coûts-bénéfices, aspects et éléments à approfondir

Les coûts d'investissement sont estimés à partir d'une fourchette fournie par Siemens, qui reste soumise à caution. Les hauteurs libres nécessaires sont telles qu'une expérimentation sur route existante nécessiterait sans doute le rehaussement de la plupart des ponts la franchissant, l'élargissement de certains tunnels, le déplacement de panneaux de signalisation verticale et de potences de signalisation. Le coût d'entretien et de maintenance du système est grossièrement estimé à 4 % de l'investissement initial. Une analyse fine des sujétions associées serait nécessaire pour préciser le chiffre. Par ailleurs, l'aspect social associé à un changement de métier du gestionnaire routier qui le rapprocherait de celui d'exploitant de voies ferrées n'est pas abordé.

Enfin, il serait intéressant d'étendre l'analyse au bus électrique pour le transport de voyageurs qui pourrait constituer un trafic supplémentaire permettant de mieux rentabiliser l'investissement dans l'infrastructure électrique.

Une autre piste d'approfondissement concerne la comparaison du système d'autoroute électrique avec le dispositif d'autoroute ferroviaire. L'intérêt de cette comparaison est que les deux solutions demandent la même organisation du point de vue des transporteurs et qu'elles permettent toutes deux de limiter le recours aux carburants fossiles.

Annexes

Table des figures et table des tableaux

Abréviations et sigles

Références bibliographiques



Table des figures

Figure 1 : Schéma des trajets réalisés par des PL de motorisation différente

Figure 2 : Coût complet à différents horizons pour les différentes technologies du point de vue transporteur, en €/PL.km

Figure 3 : Coût complet à différents horizons pour les différentes technologies du point de vue transporteur, en €/t.km

Figure 4 : Coût complet à différents horizons pour les différentes technologies du point de vue socio-économique, en €/PL.km

Figure 5 : Coût complet à différents horizons pour les différentes technologies du point de vue socio-économique, en €/t.km

Figure 6 : Impact du taux de parcours et du trafic en mode hybride sur le coût kilométrique pour un transporteur

Figure 7 : Trafics PL sur autoroutes d'après Modev, situation 2012

Figure 8 : Étude de trafic pour l'A6 (données Modev 2007)

Figure 9 : Régressions entre le taux de parcours et le trafic cumulé pour l'A6 et l'A7

Figure 10 : Pourcentage du trafic réalisé par PL hybride en fonction du péage pour l'A7

Figure 11 : Kilométrage réalisé par un PL navette en fonction de la distance parcourue sur autoroute

Figure 12 : Coût complet actualisé pour l'A6 et l'A7, en €/t.km, période 2030-2049

Table des tableaux

Tableau 1 : Consommations de diesel d'un PL thermique à différentes dates

Tableau 2 : Consommations d'électricité d'un PL électrique à différentes dates

Tableau 3 : Hypothèses de coût et de poids des batteries

Tableau 4 : Charge utile d'un PL électrique à forte autonomie à différentes dates

Tableau 5 : Surcoûts des différentes motorisations

Tableau 6 : Coût total des 4 types de PL étudiés

Tableau 7 : Valeur du temps de différents types de marchandises

Tableau 8 : Valeur du temps pour des marchandises courantes, à différentes dates

Tableau 9 : Contenu CO₂ de l'électricité à différentes dates

Tableau 10 : Monétarisation de la pollution locale à différentes dates

Tableau 11 : Prix du diesel pour le transporteur à différentes dates

Tableau 12 : Prix de l'électricité à différentes dates (prix final hors TVA)

Tableau 13 : Coûts totaux des infrastructures caténaires (entretien compris) à différentes dates de mise en service

Tableau 14 : Bilan socio-économique de la motorisation hybride *versus* motorisation diesel sans péage additionnel pour le transporteur

Tableau 15 : Bilan socio-économique de la motorisation hybride *versus* motorisation diesel avec péage additionnel pour le transporteur

Tableau 16 : Données de trafic par tranches de distance pour l'A6

Tableau 17 : Données de trafic par tranches de distance pour l'A7

Tableau 18 : Kilométrage réalisé en mode navette en fonction de la distance parcourue sur autoroute

Annexes

Tableau 19 : Trafic réalisé en électrique sur l'A6 et l'A7

Tableau 20 : Bilan socio-économique de la motorisation électrique « Navette » *versus* motorisation diesel

Tableau 21 : Bilan socio-économique du scénario PL électriques sur autoroutes classiques

Tableau 22 : Bilan socio-économique du scénario PL électriques sur autoroutes classiques avec prise en compte du surcoût de la charge utile

Abréviations et sigles

AE : Autoroutes Électriques

CCTN : Commission des Comptes des Transports de la Nation

COFP : Coût d'Opportunité des Fonds Publics

CGDD : Commissariat Général au Développement Durable

CGP : Commissariat Général du Plan

CGSP : Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective

CNR : Comité National Routier

ENUBA : Electromobility in heavy commercial vehicles to reduce the environmental impact on densely populated areas

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie

MEEM : Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

Modév : Modèle multimodal de transport de voyageurs et de marchandises

OD : Origine-Destination

PIB : Produit Intérieur Brut

PL : Poids Lourds

RFF : Réseau Ferré de France

Sitra : Système d'informations sur les différents flux de marchandise (base de données) du SOeS

SNCF : Société Nationale des Chemins de Fer

TCAM : Taux de Croissance Annuel Moyen

TRM : Transport Routier de Marchandises

VAN : Valeur Actualisée Nette

VNF : Voies Navigables de France

VP : Véhicule Particulier

Références bibliographiques

CAS, Centre d'analyse Stratégique - Rapport & Document n° 7, 2011 - La voiture de demain : carburants et électricité.

CGDD mai 2011 - Les véhicules électriques en perspective : analyse coûts-avantages et demande potentielle, Études et documents n° 41.

CGDD octobre 2013 - Indicateurs de suivi de la politique de transport, Collection RéférenceS.

CGDD novembre 2015 - Les Comptes des Transports en 2013. Tome 1 - Collection RéférenceS.

CGDD juillet 2016 – Projections de la demande de transport sur le long terme, Collection Théma Analyse.

CGP, Commissariat général du Plan - Révision du taux d'actualisation des investissements publics, septembre 2005.

CGSP 2013 - Commissariat général à la stratégie et à la prospective, Évaluation socioéconomique des investissements publics, rapport de la mission présidée par Émile Quinet.

CNR - Comité National Routier - Enquête Longue Distance 2014.

MEDDE - Référentiel de l'évaluation socio-économique des projets de transport, 2014.

Commission européenne - Handbook on estimation of external costs in the transport sector, M. Maibach, C Schreyer, et al., 2008.

Siemens - Zéro-Emission Catenary Hybrid Truck Market Study, mars 2012.

Siemens - Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles.

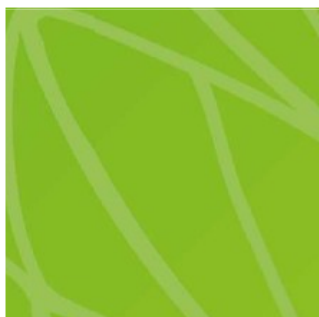
Conditions générales d'utilisation

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

Ce rapport se concentre sur l'analyse socio-économique monétarisée du concept d'autoroute électrique, il n'engage en rien la position du Ministère sur la pertinence des technologies évaluées.

Dépôt légal : Janvier 2017

ISSN : en cours



L'évaluation socio-économique présentée ici s'attache à caractériser la pertinence d'un nouveau mode de transport de marchandises « zéro émission » : les autoroutes électriques. Ce projet s'inscrit dans les préoccupations du ministère au regard de la durabilité des transports et de leurs impacts environnementaux, notamment du fait de leur rôle majeur en termes d'émissions de gaz à effet de serre.



Ce rapport conclut que le projet d'autoroute électrique pourrait être bénéfique à la société à l'horizon 2030 dans un contexte de prix élevé des carburants fossiles, notamment sous l'effet d'un signal prix du carbone compatible avec l'objectif facteur 4.

**Concept
d'autoroute
électrique**
Évaluation
socio-
économique



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.developpement-durable.gouv.fr

