

L'AUTOROUTE ÉLECTRIQUE

UNE INNOVATION POUR RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE CO₂ DU TRANSPORT DE MARCHANDISES

Résultats de l'étude – Février 2017

Contacts

Jean-Marc JANCOVICI – Associé-Fondateur Carbone 4

Aurélien SCHULLER – Consultant Senior – aurelien.schuller@carbone4.com

Sylvain BORIE – Consultant – sylvain.borie@carbone4.com



Une étude de Carbone 4, pour le compte de :



Ainsi qu'un leader européen de la construction de camions

Acronymes & Définitions :

- GES : Gaz à Effet de Serre ;
- PL : Poids Lourds. Dans l'étude, nous considérons les véhicules articulés composés d'un tracteur et d'une remorque, et d'un poids total autorisé en charge limité à 40 tonnes ;
- SPV : Special-Purpose Vehicle, ou société de projet. Il s'agit de la société dédiée qui construira et exploitera les infrastructures de distribution d'électricité le long de l'autoroute.

CONTEXTE & PRÉSENTATION DU CONCEPT D'AUTOROUTE ÉLECTRIQUE

Comme l'a récemment rappelé l'Accord de Paris lors de la COP21, nos économies doivent tendre vers une trajectoire de performance carbone, en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (GES) et la dépendance envers les combustibles fossiles. Le transport routier (des personnes et des marchandises), très dépendant des produits pétroliers, est un secteur concerné au premier chef : il représente 30% de la consommation d'énergie et des émissions de GES de la France.

Environ la moitié de ces émissions de GES sont dues au transport de passagers, pour lequel des solutions bas carbone émergent (par exemple le développement de véhicules hybrides ou intégralement électriques). L'autre moitié des émissions est due au fret, un secteur primordial de notre économie et qui repose très largement sur le transport routier, représentant environ 85% des marchandises transportées, parce qu'il est flexible, relativement peu onéreux et qu'il permet de couvrir de longues distances sans rupture de charge.

Les solutions sobres en carbone pour le fret attirent moins l'attention des médias, mais elles se développent peu à peu dans le fret urbain (là encore via le développement de véhicules électriques, mais

aussi grâce à l'optimisation des tournées de livraison).

Pour le fret sur longue distance, il y a moins d'alternatives bas carbone, le report modal vers le ferroviaire étant limité : le fret ferroviaire pâtit de coûts fixes importants et il est principalement adapté pour les marchandises en vrac des industries lourdes (énergie, acier, chimie, céréales). L'enjeu du fret sur longue distance est pourtant majeur : les émissions de GES des poids lourds (PL) représentent environ 5% des émissions nationales et entre 3 et 4% de la consommation énergétique française. La contribution des PL peut sembler faible, mais elle est très concentrée, puisque les PL ne représentent que 5% de la circulation routière totale.

Les véhicules intégralement électriques ne sont pas susceptibles d'être déployés à court terme pour couvrir les besoins du transport routier de longue distance : dans l'état actuel des technologies, les batteries électriques ne peuvent pas fournir un niveau suffisant d'autonomie pour rivaliser avec les carburants liquides. En outre, le stockage électrique à bord avec des batteries implique une hausse significative du coût du véhicule, ainsi que l'augmentation du poids et du volume de la chaîne cinématique du véhicule, au détriment de la cargaison.

Carbone 4, pour le compte d'acteurs majeurs impliqués dans la chaîne de valeur de l'énergie et du transport routier, a étudié une option novatrice pour **électrifier le transport de marchandises sur longue distance, sans qu'il y ait besoin d'avoir recours au stockage massif d'électricité à bord : les autoroutes électriques.**

Il s'agit de mettre en place une flotte de **poids lourds hybrides qui fonctionneraient avec une alimentation électrique continue le long de l'autoroute.** Le système de distribution d'électricité serait installé le long de la voie la plus à droite dans le sens de circulation, tout en la laissant praticable pour la circulation des autres véhicules, notamment des PL conventionnels. Les camions hybrides pourraient rouler avec leur moteur électrique sur l'autoroute, et avec leur moteur thermique pour effectuer les manœuvres (dépassement, entrée et sortie d'autoroute) ainsi que pour circuler en dehors de l'autoroute.

Ce type de projet semble une bonne façon de **réduire l'impact environnemental du transport**

routier de marchandises tout en optimisant l'utilisation des infrastructures de transport existantes. Sa mise en œuvre ne nécessiterait par ailleurs qu'une faible adaptation opérationnelle pour les acteurs du transport routier de marchandises : pas de rupture de charge et peu de formation pour adapter la conduite des chauffeurs.

Il existe différentes solutions technologiques pour distribuer l'électricité le long des autoroutes :

- **Alimentation conductive par caténaires.** Inspirée des systèmes existants pour l'alimentation des trains et des tramways, cette technologie repose sur la mise en tension de caténaires le long de l'autoroute et l'installation de pantographes sur les poids lourds. La technologie est en cours de recherche et développement par la société allemande SIEMENS sous le nom de marque « eHighway » ;
- **Alimentation conductive par rail au sol.** Un collecteur d'électricité appelé « pick-up » est installé sur les poids lourds et permet de collecter l'électricité par contact avec un rail affleurant à la surface de l'autoroute. Cette technologie est en cours de recherche et développement par l'entreprise ASLTOM, sous le nom de marque « APS », ainsi que par la société suédoise Elways ;
- **Alimentation inductive,** par transfert entre des bobines magnétiques intégrées dans l'autoroute et d'autres situées sous le camion. Cette technologie est en cours de recherche et développement par la société BOMBARDIER.

Au cours de l'étude, des entretiens ont été menés auprès d'experts représentant différents métiers au sein de différents secteurs (par exemple : l'exploitation et l'entretien des autoroutes, ou encore le transport d'électricité). Les échanges ont permis de s'assurer que ces différentes technologies de distribution d'électricité peuvent toutes être utilisées sur les autoroutes existantes, pour la vaste majorité du territoire, sans induire de contraintes pour l'équilibre du réseau électrique. Bien sûr, les coûts de construction et d'entretien ainsi que les contraintes physiques et opérationnelles peuvent différer entre l'une ou l'autre de ces options technologiques.

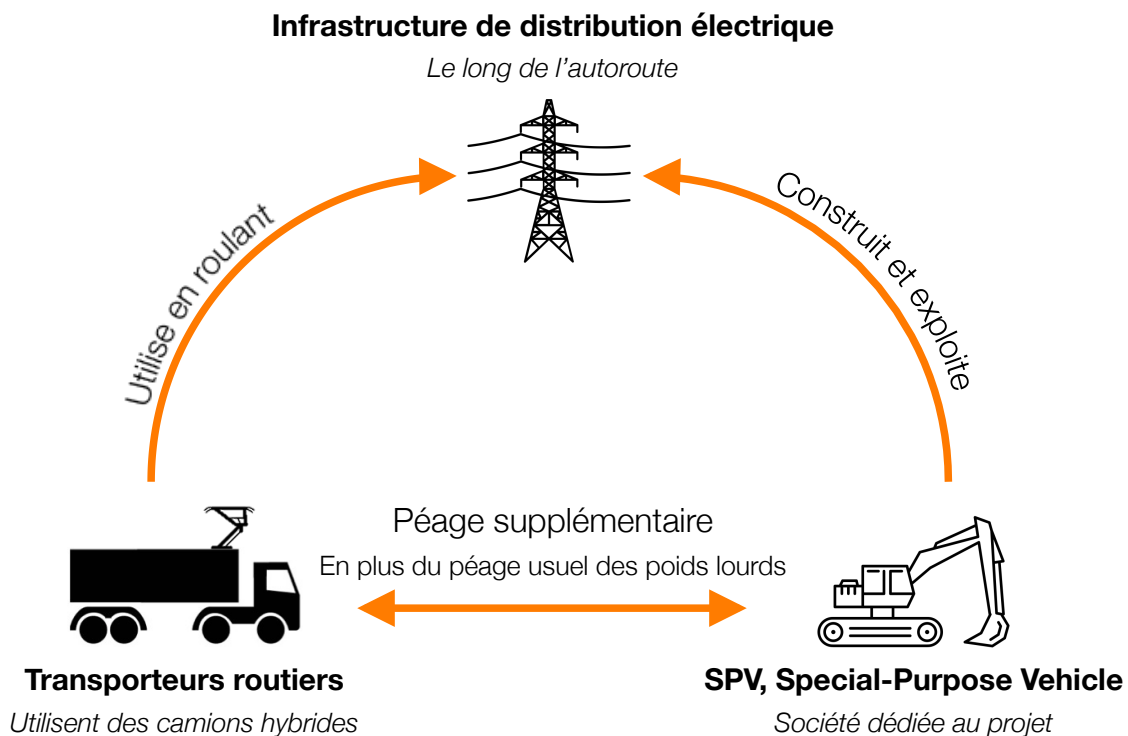
MÉTHODOLOGIE

Pour évaluer la pertinence économique des projets d'autoroutes électriques, nous avons modélisé l'équation économique des deux principales parties prenantes concernées :

- **La SPV, Special-Purpose Vehicle** : une société dédiée au projet qui construit et exploite l'infrastructure de distribution d'électricité le long de l'autoroute. Il peut s'agir d'une société totalement indépendante, ou bien d'une société liée aux concessionnaires d'autoroutes. Pour la technologie d'alimentation par caténaires (*a priori* la moins chère), la SPV devrait **investir environ 1,5 millions d'euros par kilomètre d'autoroute pour équiper les deux sens de circulation** (en tenant compte du raccordement au réseau de transport d'électricité, ainsi que de mesures de rehaussement de la sécurité de circulation). Les investissements initiaux de construction et

les coûts opérationnels de maintenance doivent être couverts par des **recettes d'exploitation, que nous avons modélisées à travers un péage sur les camions hybrides, prélevé en plus du péage habituel de l'autoroute** ;

- **Les transporteurs routiers** : en basculant vers les véhicules hybrides, les transporteurs routiers doivent payer un **surcoût pour la détention et la maintenance du PL. Ils doivent aussi s'acquitter du péage supplémentaire sur l'autoroute électrique, tandis qu'ils économisent sur la consommation d'énergie en payant de l'électricité plutôt que du diesel**. Dans notre modèle, nous estimons le **surcoût du leasing des poids lourds hybrides comme équivalent à un surcoût de 50% en termes de prix d'achat par rapport aux PL conventionnels**.



Étant donné que les coûts d'infrastructure sont supportés sur l'ensemble des utilisateurs, via l'intermédiation de la SPV, le péage supplémentaire pour les PL hybrides sera d'autant plus faible que les transporteurs se convertissent largement aux véhicules hybrides. Ainsi l'incitation pour les transporteurs routiers doit être assez forte pour

donner lieu à une conversion massive. Dans notre modèle, nous supposons que la conversion se produit si elle permet de générer des économies pour les transporteurs dès la première année de passage d'un PL conventionnel à un PL hybride. Cette condition de rentabilité économique se traduit par la détermination d'un nombre minimum de

kilomètres que doit parcourir le PL hybride sur l'autoroute électrique dans l'année pour couvrir le surcoût de détention du véhicule. Ce kilométrage minimal permet d'estimer le potentiel maximum d'adoption de l'innovation technologique, c'est-à-dire la proportion du trafic de PL sur l'autoroute qui peut être convertie en PL hybrides. Ce potentiel de conversion est supposé être atteint en 6 ans après la construction de l'infrastructure de distribution d'électricité, ce qui correspond à la période de détention moyenne d'un PL pour les transporteurs routiers opérant sur de longues distances.

En ce qui concerne la SPV, nous avons supposé que sa contrainte de rentabilité s'exprimait par la nécessité de positivité de la valeur actualisée nette des flux de trésorerie générés par le projet, sur une période de 20 ans, avec un taux d'actualisation de 4,5% par an au-dessus de l'inflation.

Nous étudions d'abord la viabilité économique du projet avec des hypothèses prudentes sur les paramètres de modélisation (voir l'encadré ci-dessous pour plus de détails).

Principales hypothèses du scénario central :

- *Un prix constant du diesel pour les transporteurs routiers, à 1 € par litre, ce qui est une hypothèse raisonnable étant donné l'incertitude sur le prix futur du baril de pétrole et sur la fiscalité des produits pétroliers en France ;*
- *L'augmentation du prix de l'électricité de 80 € à 130 € par MWh en 20 ans, soit une poursuite des tendances récentes des prix pour les consommateurs industriels (tendance entre 2010 à 2014 selon le rapport « Electricity information » de AIE, publié en 2015) ;*
- *Un augmentation du trafic des poids lourds sur autoroute de 1,5% par an, ce qui correspond au taux de croissance tendanciel sur la période de 2009 à 2015 selon l'ASFA, l'Association des Sociétés Françaises d'Autoroute ;*
- *Des gains d'efficacité de la consommation des poids lourds qui s'inscrivent également dans la prolongation des tendances historiques : -1% par an pour les poids lourds thermiques, comme dans la période de 2007 à 2014 (d'après les « Comptes de transport de la Nation », publication du CGDD, datant de 2015). Les poids lourds hybrides sont supposés améliorer leur efficacité plus rapidement, ce qui se traduit par une baisse de -1,3% par an.*

SUR LES AXES À TRAFIC ÉLEVÉ, LES AUTOROUTES ÉLECTRIQUES SONT RENTABLES

Avec des hypothèses prudentes, la viabilité des autoroutes électriques est atteinte sur les autoroutes à très fort trafic (au moins 14 000 véhicules lourds par jour) dans des cas où l'une de ces conditions est remplie :

- le litre de diesel atteint un prix d'1,15 € ;
- les opérateurs de fret adaptent leurs parcours pour effectuer des liaisons dédiées sur les autoroutes équipées.

Toutes choses égales par ailleurs, un diesel à 1,15 € le litre correspond à un prix du pétrole de 80 \$ par

baril, ce qui est un scénario probable étant donné les prévisions des scénarios de l'Agence Internationale de l'Énergie par exemple. Dans de telles conditions, l'autoroute électrique est rentable pour les autoroutes à très fort trafic, sans que les transporteurs routiers n'aient à adapter leurs flux.

Afin de réduire de façon significative les émissions de CO₂ du transport routier, **nous avons étudié le déploiement d'autoroutes électriques sur tous les axes où circulent plus de 5 000 véhicules lourds par jour**. Cela représente près d'un tiers du réseau d'autoroutes concédées. Pour un tel déploiement, **le projet est intrinsèquement rentable si les deux conditions précédentes sont réunies : un prix du diesel de 1,15 € le litre et l'adaptation des schémas logistiques des transporteurs**.

D'autres domaines de rentabilité pour l'autoroute électrique sont étudiés en annexe de cette note.

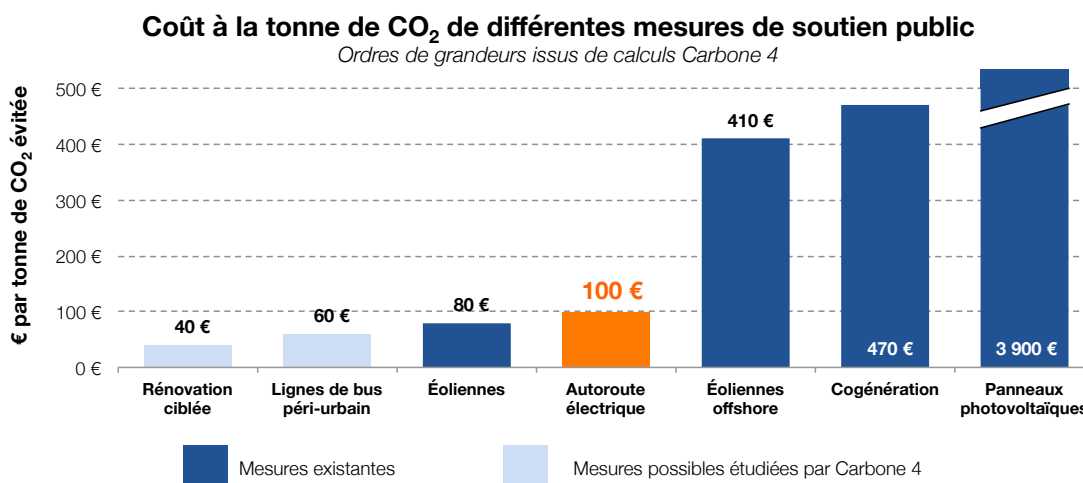
Déploiement sur l'axe le plus fréquenté	Déploiement massif
Section de 210 km Trafic de ~ 14 000 PL / jour	3 200 km d'autoroutes, 1/3 du réseau Trafic moyen de ~ 8 100 PL / jour
Sans adaptation des schémas logistiques des transporteurs	
Pour un surcoût modéré du camion hybride, plausible à moyen terme Ou Pour 1,15 € par litre de diesel ~ 80 \$ par baril toutes choses égales par ailleurs	Pour plus de 1,30 € par litre de diesel ~ 100 \$ par baril toutes choses égales par ailleurs
Avec adaptation des schémas logistiques des transporteurs	
Au prix actuel du diesel ~ 55 \$ par baril toutes choses égales par ailleurs	Pour 1,15 € par litre de diesel ~ 80 \$ par baril toutes choses égales par ailleurs
Coût du soutien public	
Avec prix actuel du diesel, coût du soutien public de moins de 50 € / tCO₂	Avec prix actuel du diesel, coût du soutien public de moins de 100 € / tCO₂

EFFICIENCE ÉCONOMIQUE POUR RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE CO₂

Toujours pour le déploiement sur le tiers du réseau autoroutier, la modélisation dans un scénario prudent (diesel à prix actuel et pas de modification des schémas logistiques) conduirait à une valeur actualisée nette des flux de trésorerie négative pour la « SPV globale » (couvrant toutes les autoroutes admissibles), d'environ 3 Md€ sur les 20 ans considérés (l'investissement initial d'environ 5 Md€ est partiellement, mais pas totalement, compensé). Un tel projet générerait d'importantes externalités positives : principalement la réduction des émissions de CO₂ de 30 MtCO₂ sur la période de 20 ans, mais

aussi la réduction du bruit, de particules fines et de la pollution NOx. Si l'on prend uniquement en compte les émissions de CO₂, cela signifie qu'un soutien financier pour compenser les pertes de la SPV représenterait un coût d'environ 100 € par tonne de CO₂ évitée. Ce coût est dans la fourchette basse des politiques de soutien existantes pour la transition énergétique : les subventions à la production d'électricité renouvelable coûtent en effet de l'ordre de 100 € à 4 000 € par tonne de CO₂ évitée, tandis que les coûts implicites du renforcement des normes thermiques pour la construction de nouveaux bâtiments s'échelonnent entre 500 € et 10 000 € par tonne de CO₂ évitée. (voir, à ce propos, la 4^{ème} Lettre du Carbone publiée par Carbone 4, « L'État au secours de la décarbonation de l'économie : combien ça coûte ? »¹)

¹ <http://www.carbone4.com/articles/letat-au-secours-de-la-decarbonation-de-leconomie-combien-ca-coute/>



Ainsi, **l'autoroute électrique est un projet de transition énergétique efficient en termes de coût par tonne de CO₂ évitée**, relativement à d'autres mesures qui peuvent être mises en œuvre par ailleurs. Un tel projet a également un impact positif sur la balance commerciale du pays via la baisse des importations de produits pétroliers, ce qui a un effet macroéconomique positif. À la valeur actuelle du prix du pétrole, le projet permet ainsi d'économiser 5 Md€ sur la balance commerciale

française au cours des 20 ans étudiés.

Enfin, un tel projet profiterait aux transporteurs routiers en améliorant leur situation économique lors de la conversion vers l'hybride car c'est un prérequis du modèle. Par exemple, l'électrification des autoroutes de plus de 5 000 véhicules lourds par jour permettrait d'atténuer les énormes contraintes économiques qui pèsent sur le secteur en générant une valeur actualisée nette de 1 Md€ d'économies pour les transporteurs routiers.

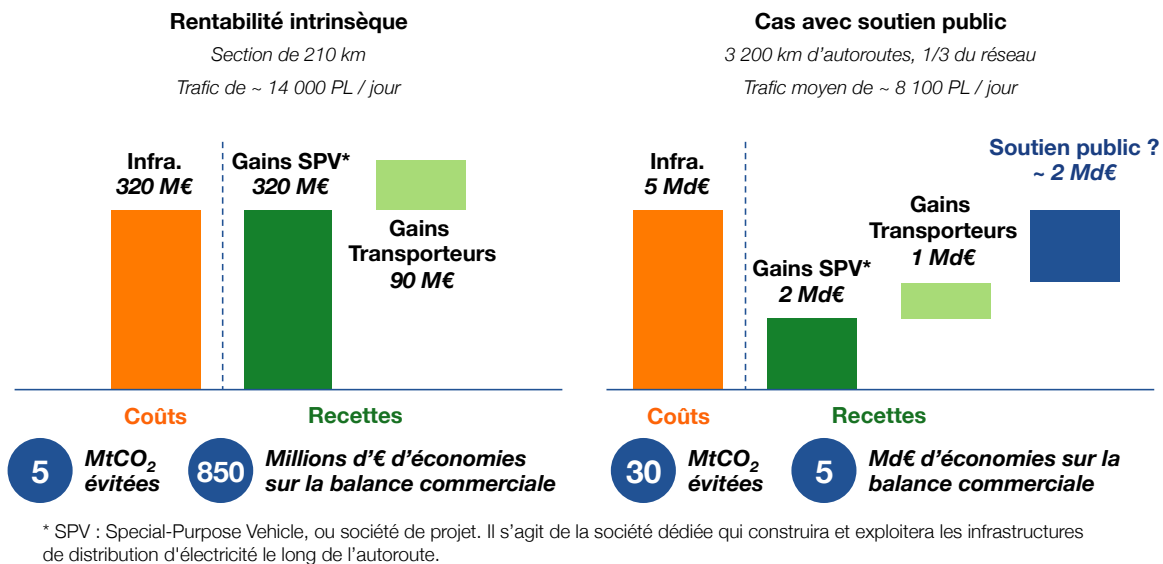
Impact de projets d'autoroute électrique sur 1/3 du réseau autoroutier :

- **5 Md€ de réduction des importations de pétrole** avec la valeur actuelle du prix du pétrole
- L'allègement de la situation économique du secteur du transport routier en générant des **économies cumulées d'une valeur actualisée de 1 Md€** sur 20 ans pour les transporteurs
- La **réduction des émissions de 30 MtCO₂** sur 20 ans à un coût de **100 € par tonne de CO₂ évitée**
- *Autres impacts environnementaux positifs : réduction du bruit, des émissions de particules fines et de NOx*

CONCLUSIONS

Les autoroutes électriques méritent la profonde considération des pouvoirs publics (collectivités locales, gouvernements et Union Européenne) : dans certains cas de forte circulation et de transporteurs dédiés à un trajet, la rentabilité de l'autoroute électrique est atteinte dans les conditions actuelles de marché, mais pour avoir un impact significatif sur les émissions de CO₂ du transport, un soutien financier de 3 Md€ permettrait une réduction de 30 MtCO₂ à un coût raisonnable tout en générant des externalités environnementales positives et en ayant un effet macroéconomique bénéfique. Il est intéressant de noter que le montant de 3 Md€ est comparable à l'investissement annuel dans l'ensemble du réseau ferroviaire en France, ou encore similaire au montant du Plan de Relance Autoroutier, récemment entamé en France. Mais l'aide monétaire directe n'est pas la seule façon dont les différents organismes publics pourraient soutenir de tels projets. Nous détaillons quelques recommandations à cet égard dans la section qui suit.

Évaluation économique de l'autoroute électrique sur 20 ans Deux cas de figure



RECOMMANDATIONS POUR LA MISE EN ŒUVRE DE PROJETS D'AUTOROUTES ÉLECTRIQUES

1. Sans coût direct pour les finances publiques, les projets d'autoroutes électriques pourraient être financés dans le cadre de la politique de transition énergétique, par une légère augmentation de la taxe sur les carburants payée par tous les usagers de la route ; une autre option est la garantie financière publique qui pourrait être accordée à la SPV, ou la possibilité pour la dette du projet d'être (re)financée à des taux bas par la Banque Centrale Européenne. La France peut également prolonger la durée des contrats de concession de sociétés d'autoroutes, en échange d'investissements supportés par ces sociétés. De telles extensions ont déjà été négociées dans le passé, et permettraient de ne pas alourdir les comptes publics.
2. Plus largement, pour réduire le risque du projet, les prix futurs imputés aux transporteurs routiers qui se convertiraient aux poids lourds hybrides (par exemple l'électricité et le péage supplémentaire) pourraient être garantis à un niveau constant, afin de créer la visibilité nécessaire pour les opérateurs économiques et les investisseurs.
3. Les pouvoirs publics peuvent soutenir les projets d'autoroutes électriques par la réglementation : par exemple, la généralisation des zones à circulation restreinte (ZCR) dans les villes peuvent soutenir le marché

des poids lourds hybrides ou électriques en général. La généralisation des camions électrifiés ferait alors croître la maturité commerciale de l'électromobilité en générale, ce qui pourrait bénéficier indirectement aux poids lourds étudiés dans la présente étude, même si ceux-ci n'ont pas vocation première à accéder aux ZCR (à moins de dimensionner leur batterie pour cette application, ce qui mériterait un complément d'étude).

4. Enfin, les pouvoirs publics peuvent faciliter la recherche et le développement de démonstrateurs du projet, y compris pour des cas d'applications spécifiques tels que les ports, les mines ou encore les tunnels. Les démonstrateurs pourront permettre d'explorer des aspects complémentaires : la consommation de carburant, la réduction des émissions, mais aussi les aspects liés à la sécurité routière par exemple. En effet, des projets d'autoroute électrique combinés avec des systèmes de pilotage automatique pourraient réduire l'accidentologie routière.

Il est important de noter que nous avons travaillé avec le surcoût actuel d'un poids lourd hybride. Une augmentation de la taille du marché du camion hybride pourrait très certainement rendre cette technologie plus abordable, et le développement d'un marché du véhicule d'occasion plus mature permettrait aux constructeurs ou aux intermédiaires financiers de garantir la reprise des véhicules après utilisation, une condition importante pour les transporteurs routiers qui louent des camions par crédit-bail.

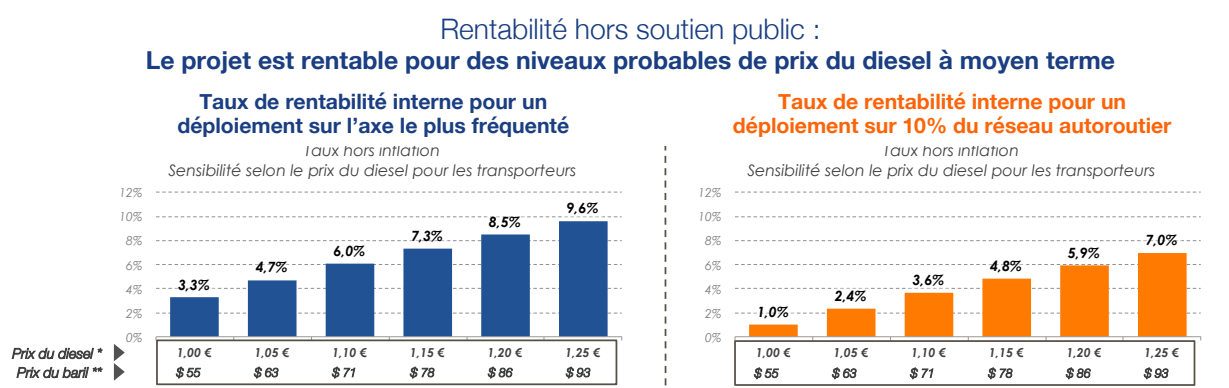
ANNEXE :

RENTABILITÉ OU COÛT DU PROJET, SENSIBILITÉ AU PRIX DU DIESEL

Afin de mettre en lumière les zones de pertinence des projets d'autoroute électriques, des simulations économiques sur 25 ans ont été réalisées afin de déterminer la variation de deux indicateurs en fonction du prix du diesel (supposé constant sur la période) :

- la variation du taux de rentabilité interne pour un cas de déploiement sur les axes les plus fréquentés (l'axe de plus de 14 000 véhicules lourds par jour ou bien le top 10% des axes les plus fréquentés) ;
- le coût à la tonne de CO₂ évitée dans le cas d'un déploiement sur le tiers du réseau autoroutier.

Cette analyse sur une période de 25 ans (au lieu de 20 ans dans les pages précédentes) permet de mettre en lumière la pertinence du projet pour des prix du diesel qui sont relativement plausibles à court terme si l'on imagine une hausse du prix du baril de pétrole, ou bien si la fiscalité sur les carburants liquides viendrait à augmenter.



Cas d'un déploiement massif (tiers du réseau) avec soutien public :

Le projet est intéressant du point de vue de la collectivité car il s'agit d'une mesure d'atténuation qui est peu coûteuse rapportée aux émissions de CO₂ évitées

