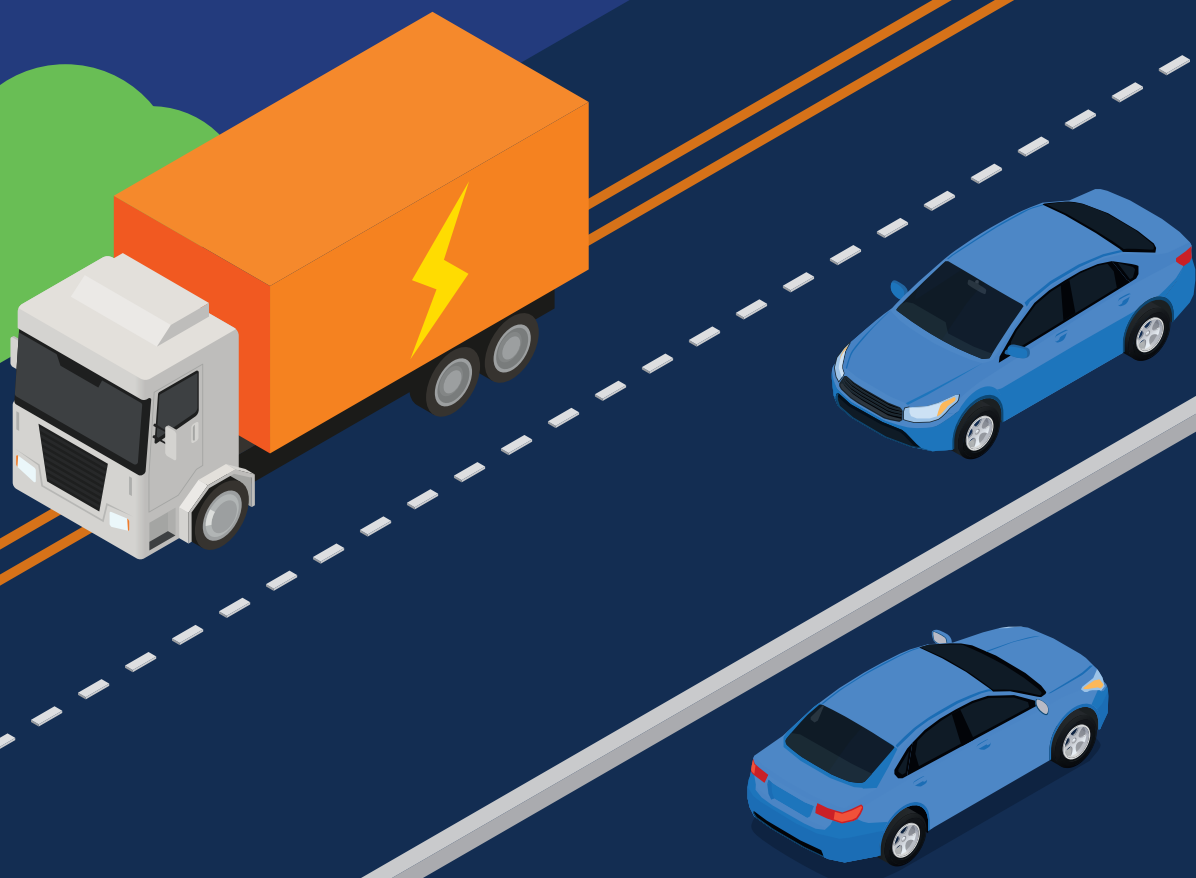




La route électrique

Il faut s'y préparer

Novembre 2023



Les auteurs



Servan Lacire

Conseiller technique
auprès d'Équilibre des
Énergies



Jean-Pierre Hauet

Président du Comité
scientifique d'Équilibre
des Énergies

Remerciements

Ont contribué au recueil d'informations et aux discussions : Alstom, Colas, Electreon, Elonroad Equans, IVECO, MAN, Vinci Autoroutes et TotalEnergies.

Toutefois, les conclusions de l'étude n'engagent que ses auteurs.



La route électrique

Il faut s'y préparer

Pour tout renseignement concernant cette étude,
utilisez le formulaire « Contact » sur le site de l'association
ou contactez **Équilibre des Énergies** :
10 rue Jean Goujon 75008 Paris
Tél. : +33 (1) 53 20 13 70
info@equilibredesenergies.org

www.equilibredesenergies.org

Résumé.....	6
Les principes de la route électrique	6
Trois solutions avec des avantages et des inconvénients	7
Les aspects économiques	8
L'analyse en TCO donne un avantage à la route électrique et plus spécifiquement à la solution rail.....	10
La problématique du déploiement	10
Conclusion	11
1. Introduction.....	13
Batteries et hydrogène : deux solutions possibles pour la décarbonation du transport de marchandises.....	14
L'émergence du concept de route électrique.....	15
2. Les techniques en lice : rails, caténares, induction	19
Architecture générale des systèmes	20
Les solutions rail.....	26
La solution caténares.....	32
La solution par induction.....	34
3. Aspects économiques : comparaisons avec les solutions batteries et hydrogène	39
Hypothèses économiques sur les coûts initiaux et les coûts de maintenance.....	40
Hypothèses de financement	42
Maintenance et entretien.....	42
Équipement des poids lourds.....	43
Coût de l'électricité.....	43
Application aux autoroutes A7/A9	44
Remarques sur la vitesse de déploiement	45
Extension des calculs à d'autres configurations autoroutières	46
Sensibilité au coût de l'électricité.....	47
4. Les stratégies de déploiement de l'ERS	49
La problématique du déploiement	50
Le rôle de l'Europe.....	51
Esquisse de planning	52
Le choix des opérations-pilotes	53
5. Conclusions.....	55
6. Annexes.....	59
Annexe 1. Les projets ERS dans le monde	60
Annexe 2. Coûts d'investissement des ERS	62
Annexe 3. Projets retenus en 2023 dans le cadre de l'AAP du gouvernement français et sélectionnés par BPI France.....	63
Annexe 4. Rappel sur la définition des TRL	64

Résumé

Le secteur de la mobilité électrique est en rapide évolution, stimulé à la fois par les progrès technologiques et par la pression réglementaire visant à décarboner le domaine des transports. Le véhicule électrique, qui n'était qu'une promesse il y a 10 ans, est devenu une réalité et s'étend à l'ensemble des transports routiers. L'industrie s'est mise en marche et, en même temps que se construisent des giga-usines de batteries, les constructeurs mettent tous les mois sur le marché de nouveaux modèles de véhicules électriques.

Pour autant, tout n'est pas encore résolu et des incertitudes demeurent sur la disponibilité à long terme des matériaux pour les batteries, sur le déploiement d'une infrastructure de bornes de recharge en disponibilité et en nombre suffisant, sur la capacité de la recherche et développement à tenir les promesses d'évolution des batteries en termes de coût, de durabilité, de capacité et de rapidité de la recharge.

L'enjeu est important car il concerne à la fois la possibilité de convertir à moyen terme l'intégralité du parc de véhicules particuliers, mais aussi de transformer le transport routier de marchandises, aujourd'hui largement producteur de CO₂, pour lequel la solution électrique, par l'autonomie encore limitée qu'elle permet, par ses coûts et ses temps de recharge, impose une adaptation des conditions d'exploitation qui peut être complexe à mettre en place.

Après avoir étudié dans le détail l'utilisation de l'hydrogène pour la décarbonation du transport routier de marchandises¹, Équilibre des Énergies s'est penchée sur une variante à la solution batteries : la recharge du véhicule en roulant, c'est à dire la route électrique ou ERS (*Electric Road System*).

Il y a déjà plus d'une dizaine d'années, plusieurs groupes de recherche, universités et autres acteurs économiques ont fait la promotion de la route électrique comme alternative à la solution 100 % batteries ou à l'hydrogène. Les techniques étaient encore balbutiantes à l'époque et elles concernaient alors

plus les départements de R&D et le monde universitaire que les directions d'exploitation.

Depuis, les techniques de l'ERS ont mûri et ont fait l'objet de nombreuses expérimentations de systèmes unitaires. Une importante étude a été réalisée en 2021 par un groupe de travail sous l'égide de la Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités (DGTIM) et a conclu à l'intérêt de cette solution.

Les principes de la route électrique

L'idée de base de la route électrique est de transposer aux véhicules routiers de transport de marchandises les systèmes qui alimentent certains véhicules pendant qu'ils roulent : les trains, les tramways et les trolleybus. Trois solutions sont en lice, avec des degrés de maturité différents : l'alimentation par caténaires, l'alimentation par un rail affleurant la voie et le transfert d'énergie électrique par induction à partir de bobines logées dans la couche de roulement.

Dans un tel système, les poids lourds restent cependant équipés d'un minimum de batteries pour assurer les trajets hors zone de recharge, qu'il s'agisse des portions non équipées ou des parties du trajet hors autoroute.

Les coûts impliqués et la coexistence avec d'autres usagers orientent ces solutions vers les autoroutes et les voies express, concédées ou non, plutôt que vers les nationales ou les départementales. Les poids lourds étant supposés conserver une autonomie de 250 km, une absence de système ERS sur plusieurs km, voire plusieurs dizaines de kilomètres, est acceptable. Même dans une vision à long terme, le taux d'équipement ne devrait pas dépasser 70 à 80 % pour éviter les points singuliers comme les ponts, les tunnels, les

1. *L'hydrogène dans le secteur du transport routier de marchandises – Équilibre des Énergies (octobre 2021).*

échangeurs ou les zones trop éloignées des réseaux de distribution d'électricité.

Par rapport à la solution tout batteries, le principal bénéfice de l'ERS est de limiter significativement la taille des batteries embarquées sur les poids lourds, en échange de l'immobilisation d'une quantité limitée de cuivre ou d'aluminium. C'est particulièrement vrai pour les transports longues distances, nationaux ou internationaux, qui circulent sur les autoroutes, ce l'est moins pour les transports régionaux ou locaux qui empruntent moins les voies rapides.

De plus, les solutions rail et induction pourraient être rendues accessibles aux véhicules particuliers et permettre de s'affranchir soit des véhicules hybrides, soit des véhicules dotés de très grosses batteries, augmentant par là-même le bénéfice pour la collectivité, d'autant plus que les poids lourds ne circulent pas les jours de pointe des véhicules particuliers.

Trois solutions avec des avantages et des inconvénients

Chacune des trois techniques offre des avantages et des inconvénients qui sont analysés dans le présent rapport. Elles sont à des niveaux de maturité différents et possèdent, surtout pour les solutions rail et induction, des variantes qui en font des familles de solutions.

L'alimentation par caténaires est une solution éprouvée sur les trains et les tramways depuis des années. Elle est, sur le plan purement technologique, la plus mature et a fait l'objet d'expérimentations en Allemagne, en Suède et aux Etats-Unis. Mais le fonctionnement dans le milieu ouvert qu'est une route ou une autoroute, avec un parc de poids lourds hétérogène, complexifie sérieusement le problème.

L'expérience du ferroviaire n'est pas directement transposable à l'ERS car le trafic des trains et des tramways est inférieur d'un ou deux ordres de grandeur à ce que sera la circulation sur une autoroute fréquentée et les poids lourds ne sont pas tous entretenus avec le même soin, ni aussi calibrés que les trains. L'usure sera importante avec les risques d'arrachement correspondants et donc de coupure plus ou moins partielle de l'autoroute pendant plusieurs heures.

Par ailleurs, il semble impossible, sauf à imaginer des systèmes très complexes, pour les hélicoptères de la protection civile de se poser sur l'autoroute pour évacuer les blessés graves en cas d'accident. De même, les caténaires compliqueront grandement le relevage avec des grues des poids lourds accidentés et couchés sur le côté. Ce dernier point, qui fait partie de la vie courante de l'autoroute, est vu comme essentiel pour les exploitants d'autoroute.

Le système sera réservé aux seuls poids lourds supérieurs à 26 t, ceux dont le gabarit permet d'atteindre la caténaire située entre 4,6 et 5,4 m et l'installation d'un double pantographe nécessitera de renforcer les cabines.

Les poteaux supportant la caténaire seront implantés le long des voies. Il faudra les protéger par des glissières en béton, ce qui augmente significativement le CAPEX et l'acceptabilité du système, dans l'environnement de l'autoroute, peut en souffrir.

Au final, le problème de la solution caténaires est qu'elle n'a pas encore été testée en environnement opérationnel réel et qu'il est difficile de savoir si les points évoqués précédemment se révéleront bloquants ou non.

Dans les solutions rail, les véhicules sont alimentés à partir d'un rail découpé en segments mesurant entre un et une dizaine de mètres. Il faut soit deux rails (solution Alstom), soit un rail découpé en segments d'un mètre (solution ElonRoad), alternativement positifs et négatifs afin que les patins du véhicule soient toujours connectés aux deux voies d'alimentation. Les segments ne sont mis sous tension que lorsqu'un véhicule roule dessus.

Le rail permet le transfert de puissances importantes, plusieurs centaines de kW, relativement aisément. Il est compatible avec le fonctionnement des poids lourds, même en pleine charge. Le système permet une utilisation en mode statique pour la recharge des véhicules à l'arrêt sur les quais de livraison ou dans les dépôts. L'utilisation par des véhicules légers est concevable.

Les exploitants d'autoroute soulèvent la question de la réfection de la couche de roulement de l'autoroute. Celle-ci a lieu tous les 15 ans environ et pourrait être rendue complexe : le rabotage de la chaussée doit se faire de part et d'autre du rail, ou alors il faudrait pouvoir déposer le rail d'alimentation.

Le risque pour les usagers et en particulier pour les motos doit être évalué. Le rail peut être glissant et sera nécessairement relativement large (8 à 10 cm). La liaison avec le reste de la chaussée pourra se dégrader avec le temps faisant apparaître des différences de niveau dangereuses pour les deux roues.

Alstom estime pouvoir apporter des réponses à ces questions, y compris à celle de la résistance du système dans les conditions hivernales ou extrêmes. L'expérience du tramway est utile mais les tests de systèmes autoroutiers réalisés en France sont des tests sur piste. Les prochains tests faisant suite à l'appel à projets lancé en 2022 en France devraient permettre de vérifier la viabilité de la solution rail en exploitation commerciale, dans des conditions réelles.

Le principe de la route à induction (*In-Road Inductive Charging System*) consiste à transférer l'énergie sous forme d'un champ électromagnétique variable émis à partir de bobines insérées dans le sol vers une ou plusieurs bobines situées sous le châssis du véhicule.

Plusieurs industriels développent leurs solutions, incompatibles entre elles à ce stade, en particulier la société israélienne Electreon.

La première application de l'induction est la recharge statique. La technique en est bien maîtrisée et ne présente pas de difficultés particulières en dehors du risque électromagnétique qui n'est pas à négliger.

La recharge par induction en roulant présente a priori de gros avantages : les bobines n'interfèrent pas avec le trafic et peuvent même être enfouies de façon suffisamment profonde pour ne pas gêner la rénovation de la couche de roulement.

Mais le système est complexe car le véhicule reste très peu de temps au-dessus de l'enroulement enterré (40 ms pour un enroulement de 1 m de diamètre à 90 km/h). Le problème est de développer des systèmes de commutation ultrarapides et d'assurer, avec un bon rendement, un transfert de puissance qui devrait atteindre, à 90 km/h, 80 kW par bobine. Les expérimentations actuelles font état de 25 ou 35 kW, ce qui est insuffisant.

Il faut également tenir compte des problèmes qui peuvent surgir du fait de l'échauffement de la couche de roulement par la chaleur engendrée par les enroulements et des difficultés à insérer les bobines dans des autoroutes en béton déjà existantes.

Des tests ont été faits ou sont en cours en Suède, en condition de circulation normale sur route ouverte, en France, à Dubaï, en Allemagne, en Israël, en Italie, aux Etats-Unis et en Corée du Sud, mais sur des techniques différentes (Electreon, VEDECOM, OLEV/KAIST).

Ces expérimentations ont montré la faisabilité technique de la solution. Néanmoins, la question de la puissance transmise n'est pas réglée et des progrès substantiels sont nécessaires. La solution par induction présente des avantages comparatifs potentiels par rapport aux autres solutions mais son niveau de maturité est moins avancé et on est encore loin de disposer d'une solution commercialisable.

Les aspects économiques

Équilibre des Énergies a calculé le coût de revient d'un système ERS à partir des données de trafic disponibles sur les tronçons d'autoroute A7/A9, sur la base des informations recueillies auprès des concepteurs de solutions et des informations fournies par les autres sociétés de l'écosystème (constructeurs de route, électriciens).

Les éléments sur lesquels cette étude est basée font apparaître des coûts inférieurs à ceux retenus dans le rapport de la DGTIM. Ces éléments nous ont été communiqués par les industriels concepteurs de solutions. On ne peut exclure un biais commercial dans une situation de compétition intense.

Les coûts des équipements périphériques, comme le réseau de distribution de l'électricité ou la présence ou non de barrières de sécurité en béton, sont du même ordre de grandeur que le système principal. Certains acteurs insistent la nécessité de ces barrières tandis que d'autres considèrent qu'elles ne sont pas indispensables. Les expérimentations mais aussi les réglages propres à chaque pays trancheront.

Les coûts vont évoluer à la baisse avec la maturation des systèmes et la compétition entre les acteurs, tandis que les expérimentations en grandeur réelle pourront faire apparaître des éléments qui n'ont pas été encore envisagés.

À ce stade, c'est l'ordre de grandeur qui est à retenir pour évaluer la faisabilité des solutions.

Coûts d'infrastructure et coûts de maintenance

Le tableau 1 récapitule les coûts d'infrastructure (CAPEX) requis par chaque solution, en millions d'euros par km équipé, pour un sens de circulation et avec un taux d'équipement de l'autoroute (ratio km équipés/km totaux) de 70 %.

Ces coûts d'investissement, pour une voie équipée dans les deux sens de circulation, représentent approximativement 25 % du coût moyen d'une autoroute en France.

La calcul des coûts de financement a été fait sur ces bases, en suivant les pratiques usuelles en matière autoroutière.

Équipement des poids lourds

Le coût d'équipement a été estimé à 20 k€ par poids lourd pour la caténaire et 15 k€ pour les deux autres techniques pour une durée de vie de 8 ans. La différence tient compte des remarques des constructeurs de poids lourds.

Application aux autoroutes A7/A9

En appliquant le modèle au trafic connu sur les autoroutes A7/A9, on obtient les résultats du tableau 2.

Le prix de vente du service rendu et le coût total de possession (TCO) rapporté à la durée de vie du véhicule peuvent ainsi être comparés aux estimations auxquelles Équilibre des Énergies était parvenue dans le cadre de son étude sur l'utilisation de l'hydrogène par les poids lourds.

Tableau 1 : Coûts d'infrastructure par km d'autoroute, pour un sens de circulation et pour chaque technique.

en k€/km	Induction		Caténares		Rail	
	CAPEX	Maintenance	CAPEX	Maintenance	CAPEX	Maintenance
Infrastructure passive (boucles d'induction - caténaire - rail)	150	5%	250	15 %	150	10 %
Électronique/ Equipements actifs	500	5 %	50	5 %	150	10%
Travaux d'installation (y compris les glissières de sécurité en béton)	150	-	425	-	150	-
Réseau moyenne tension	250	5 %	250	5%	250	5%
Total (k€/km)	1 050		1 025		700	

Tableau 2 : Estimation du prix du service rendu en 2030 et du TCO, en €/km, pour des trajets longues distances (> 500 km).

en €/km parcouru	Hydrogène (horizon 2030)	Batteries (horizon 2030)	Induction	Caténares	Rail
Estimation du prix de vente du service (marge incluse et hors surcoût du véhicule)	0,475	0,466	0,48	0,41	0,28
Coût total de possession (TCO)	0,793	0,783	0,78	0,70	0,67

Nota 1 : Ces chiffres n'incluent pas le péage ni le coût du péage, que l'on peut en moyenne estimer à 0,26 €/km et qui s'ajoute dans tous les cas.

L'analyse en TCO donne un avantage à la route électrique et plus spécifiquement à la solution rail

Les solutions ERS bénéficient du coût réduit de l'équipement du véhicule : les batteries sont de taille limitée et l'équipement du véhicule lui-même reste relativement accessible. De plus la capacité d'emport du véhicule est identique à celle du véhicule diesel et la structure du véhicule n'a pas à être renforcée pour supporter le poids des batteries.

Par rapport au rail, l'induction est pénalisée par le coût de maintenance/remplacement de l'électronique et par le moindre taux de transfert de l'électricité.

La caténaire est pénalisée par le coût de l'infrastructure passive, qui peut nécessiter des barrières de sécurité en béton, et par son coût d'entretien.

D'autres configurations autoroutières sont envisagées dans le rapport. Bien entendu, les résultats sont très sensibles au prix de l'électricité. Les calculs qui précèdent ont été effectués dans l'hypothèse d'un prix de l'électricité de 93 €/MWh qui intègre le fait que les points de connexion sont espacés et que les poids lourds ne roulent qu'aux heures de pointe, mais le positionnement relatif des résultats n'est pas affecté par les hypothèses que l'on peut retenir.

La problématique du déploiement

L'élaboration d'une stratégie de déploiement de l'ERS doit prendre en compte plusieurs considérations.

La validation des choix techniques

On a vu que le niveau de maturité de chacun des systèmes n'est pas équivalent. La solution caténaire est la plus avancée, suivie de la solution rail et, plus loin, de la solution induction qui n'a pas encore montré sa capacité à transférer une puissance suffisante.

Chacune des solutions nécessite encore des tests pour valider les techniques de base dans des conditions se rapprochant des conditions opérationnelles.

Ce sera le but des appels à projets lancés par différents pays européens dont la France en 2022.

Il est possible que ces tests permettent d'écarter l'une ou l'autre des solutions ou simplement d'avancer dans le choix d'options techniques propres à chacune des solutions. Par exemple : rail avec rainures ou rail plein, fréquences ou type de bobines pour l'induction, communication véhicule/infrastructure, etc. Mais il est peu probable que ces tests soient suffisants pour valider sur un plan opérationnel, dans des conditions de trafic réel, l'une des solutions.

L'étape suivante, nécessaire pour une telle validation, apparaît plus délicate car elle implique un changement d'échelle et des investissements importants. L'équipement d'un tronçon d'une centaine de kilomètres implique un effort financier de l'ordre de 1 à 2 M€/km par sens de circulation auquel il faut adjoindre le coût associé à l'adaptation d'une flotte de poids lourds significative. Adapter 500 poids lourds à l'une ou l'autre des solutions implique une dépense de l'ordre 7,5 à 10 millions d'euros.

Déploiement des infrastructures

Dans son étude sur l'hydrogène, Équilibre des Énergies avait montré que le déploiement des infrastructures pouvait être progressif, avec des stations de ravitaillement au départ très espacées, puis une densification du réseau de distribution couplée avec un remplacement des points de distribution simples par des stations de production.

Le déploiement du système ERS ne pourra pas être aussi progressif, même si une certaine latitude sera possible. Dès lors que les batteries des poids lourds seront réduites pour tirer parti de l'ERS, l'espacement entre les tronçons équipés devra être relativement court. Un scénario de déploiement par tronçon (et par flottes locales et captives) semble néanmoins possible, en commençant par les tronçons prioritaires.

Esquisse de planning

Compte-tenu des éléments qui précèdent, le planning le plus court ne donne pas un début de déploiement à grande échelle avant 2029/2030 et sous réserve qu'une impulsion soit donnée tant au niveau national qu'européen pour accélérer les tests en grandeur réelle et faire émerger celles des techniques qui mériteront d'être généralisées.

Le séquençement pourrait être le suivant :

- poursuivre, au niveau national, avec le soutien des fonds européens destinés à la R&D (Horizon Europe), les tests unitaires et les expérimentations portant sur des distances limitées (quelques kilomètres). Celles-ci vont être engagées en France suite à l'appel à projets lancé en 2022 dont les résultats ont été publiés en juillet 2023 ;
- mettre en place au niveau européen des groupes de travail incluant équipementiers, fabricants de poids lourds, transporteurs, autoroutiers, pour préciser les spécifications des techniques présélectionnées et les proposer à la normalisation. Cette phase peut conduire à lever certaines options mais n'implique pas de choix technologiques définitifs ;
- organiser et réaliser des opérations-pilotes tests sur des longueurs significatives (portions de 100 ou 200 km), avec la participation d'utilisateurs partenaires aux opérations de test. Ces opérations ne peuvent se concevoir que dans le cadre d'un programme européen. L'*Innovation Fund* qui bénéficiera de ressources en provenance du nouvel ETS dédié aux secteurs du bâtiment et des transports devrait inscrire l'ERS parmi les thèmes de ses futurs appels à propositions ;
- le début des déploiements à grande échelle ne pourra raisonnablement intervenir qu'une fois que les techniques mûres et normalisées auront émergé, sachant qu'il s'écoulera encore un délai important entre la décision de déploiement et le déploiement opérationnel : appels d'offres, industrialisation chez les fournisseurs...

Les opérations pilotes précitées pourraient :

- soit correspondre à un service de transport des remorques sur un parcours donné, en utilisant des tracteurs banalisés et mutualisés : les remorques seraient prises en charge sur une aire adaptée, attelées à un tracteur utilisation le système ERS et conduites jusqu'à une aire de restitution où elles seraient de nouveau attelées à des tracteurs conventionnels. Une telle solution pourrait être mise en œuvre pour réduire la pollution sur des segments spécifiques particulièrement affectés par la pollution, comme la vallée de l'Arve en Haute Savoie ;
- soit reposer sur segment limité mais suffisamment long pour être significatif, en invitant les transporteurs intéressés à adapter une partie de leur parc de tracteurs ou de remorques. Le segment tel que Paris-Orléans représenterait un bon candidat.

Conclusion

L'ERS présente aujourd'hui un intérêt certain pour parvenir à la décarbonation des transports de marchandises. Mais il ne pourra probablement émerger qu'après le déploiement en première phase des poids lourds équipés avec des batteries. Cette seconde phase pourrait s'insérer dans le calendrier du projet de règlement modifiant le règlement (UE) 2019/1242 en ce qui concerne le renforcement des normes de performance en matière d'émission de CO₂ pour les nouveaux véhicules lourds et visant à parvenir à un taux minimal de décarbonation de 90 % en 2040.

Bien entendu, rien n'est acquis : nous sommes dans un monde qui change rapidement et une percée technologique dans les batteries pourrait remettre en question l'intégralité des conclusions du présent rapport. Néanmoins, il est indispensable pour l'Europe d'anticiper et de préparer dès maintenant une variante vertueuse au modèle tout batteries et une alternative aux modèles hydrogène ou bioGNV. Les délais de test, validation et adoption sont trop importants pour attendre l'échec d'un quelconque modèle.

La recommandation d'Équilibre des Énergies est de sensibiliser les échelons nationaux et européens à l'enjeu de l'ERS dans la perspective du nouveau règlement précité, en cours de discussion. Il convient :

- au niveau national, de pousser les tests déjà prévus dans le cadre de l'appel à projets lancé en 2022. L'effort engagé par l'ADEME et les consortiums qui ont répondu à l'appel à projets doit être maintenu et si possible accéléré ;
- au niveau européen, de préparer sans attendre les tests en grandeur réelle avec une flotte de poids lourds significative et un équipement de l'ordre de 100 à 200 km avec chacune des techniques qui aura passé la première étape. La mise en place de l'ETS bâtiment/transport et l'extension du champ d'application de l'*Innovation Fund* qui devrait en résulter nous semblent constituer les leviers appropriés au montage de tels projets.

Dans une vision qui reste volontariste, l'ERS pourrait commencer à connaître son déploiement à grande échelle à partir de 2030 et contribuer ainsi à l'atteinte des objectifs visés pour 2040.

1

Introduction

Batteries et hydrogène : deux solutions possibles pour la décarbonation du transport de marchandises

En 2021, Équilibre des Énergies a publié une étude sur les possibilités de décarbonation du transport routier de marchandises², enjeu clé pour atteindre la neutralité carbone en 2050 et pour réduire la pollution dans les zones sensibles.

Plusieurs solutions ont été envisagées dont deux ont été retenues pour une analyse plus approfondie : l'électrification à base de batteries et l'utilisation de l'hydrogène dans des piles à combustible. Ces solutions ont été considérées comme étant les plus matures et les plus susceptibles d'un déploiement rapide. Il n'a pas été considéré que les carburants de synthèse et les biocarburants liquides connaîtraient des développements de grande ampleur car jugés prioritaires pour des modes de transport comme l'aérien pour lesquels il n'y a pas d'alternative. Le segment du biogaz comprimé (BioGNV) reste cependant une voie méritant approfondissement.

L'étude de 2021 a montré en premier lieu qu'aucune solution n'était compétitive par rapport au diesel et donc qu'il était indispensable que la décarbonation fasse l'objet de mesures incitatives fortes de la part des pouvoirs publics français et européens. Le projet de règlement, modifiant le règlement (UE) 2019/1242 en ce qui concerne le renforcement des normes de performance en matière d'émission de CO₂ pour les nouveaux véhicules lourds, va probablement engendrer une forte pression réglementaire en imposant, à horizon 2040, une réduction de 90 % des émissions des véhicules lourds. Dans cette perspective, la solution d'électrification par batteries s'imposera pour les transports routiers de marchandises courtes et moyennes distances, essentiellement pour les transports régionaux ou entre régions limitrophes, tandis que l'hydrogène pourrait disposer d'un avantage compétitif pour les transports sur longues distances, internationaux ou interrégionaux.

Pour autant, aucune des solutions n'est idéale et ne permet une substitution simple par rapport au diesel.

La solution « tout batteries » s'inscrit dans le prolongement naturel du développement du véhicule électrique mais présente, dans le cas des poids lourds, quelques inconvénients :

- le poids des batteries embarquées pour les transports longues distances est très important, même en tenant compte des progrès technologiques attendus . Ce surpoids de l'ordre de 1 à 3 tonnes (cf. infra) accroît la consommation du véhicule, même à vide et limite en partie la charge utile³ ;
- les conditions d'exploitation et les réglementations sur les temps de conduite des chauffeurs routiers imposent des temps de recharge relativement courts au regard des quantités d'électricité à charger ;
- la technique de recharge pour les très grandes capacités, jusqu'à 750 kWh voire 1 MWh, exigées par le transport longues distances est encore en développement avec des points restant à traiter comme le refroidissement des batteries, les câbles de recharge ou le branchement de câbles en HTA (1 000 V) ;
- les batteries sont des éléments coûteux, consommateurs de ressources qui peuvent devenir en tension, comme le lithium, le cobalt, le nickel, le graphite et le cuivre, et dont l'approvisionnement est polluant ou inégalement réparti sur la planète.

Cependant, les solutions tout batteries bénéficient d'investissements importants de la part des constructeurs et TESLA en particulier vient d'annoncer la commercialisation de son camion 36 t avec une autonomie réelle démontrée en charge allant jusqu'à 800 km, loin devant ses concurrents comme l'eActros de Mercedes-Benz qui affiche aujourd'hui une autonomie de 400 km pour une batterie de 420 kWh.

De plus, une normalisation de la recharge des batteries de grande capacité s'est mise en place autour du consortium CharIN au niveau européen. Ce consortium travaille en premier sur les connecteurs MCS (Megawatt Charging System), pour des bornes de recharge statique compatibles avec les longues distances soit un couple poids lourd de 800 kWh de batteries avec une puissance de recharge d'au moins 750 kW pour être compatible avec une recharge lors des pauses réglementaires de 45 minutes.

Enfin les batteries lithium-phosphate de fer (LFP) présentent des avantages qui ont font une priorité en Chine, pour les véhicules légers mais aussi pour les véhicules lourds.

1. L'hydrogène dans le secteur du transport routier de marchandises – Équilibre des Énergies (octobre 2021).

2. Les transporteurs routiers interrogés ont indiqué que dans la plupart des cas, ils étaient plus préoccupés par le volume transportable que par la limite du PTAC. De plus la législation pourrait autoriser un accroissement du PTAC pour limiter cet impact. En revanche, le poids des batteries transportées sera toujours présent, même lorsque le poids lourd circule à vide.

De son côté l'hydrogène bénéficie de plusieurs atouts non négligeables :

- son utilisation est similaire à celle du diesel, au moins en terme de durée des pleins ;
- il est stockable, ce qui permet de découpler sa production de son utilisation et d'effacer les électrolyseurs du réseau pendant les heures les plus tendues ;
- son déploiement peut être progressif et accompagner la montée en charge des utilisateurs.

Néanmoins l'hydrogène décarboné restera probablement une solution coûteuse.

L'étude d'Équilibre des Énergies a montré qu'en raison du rapport de 1 à 8 entre l'énergie volumique de l'hydrogène à 700 bars par rapport au diesel, on ne pourra pas envisager, en phase de déploiement industriel, de ravitailler les stations-service des autoroutes par camion. Il faudra soit le produire sur place par électrolyse, avec une électricité relativement coûteuse⁴, soit créer un réseau de pipelines ad hoc le long des autoroutes pour répondre à la demande et dans les deux cas, la solution se heurtera au rendement défavorable de la chaîne complète (électrolyse/compression à 700 bars/pile à combustible) qui ne dépassera pas les 40 %, même dans les hypothèses les plus optimistes de réutilisation des chaleurs fatales dégagées sur les électrolyseurs. Aujourd'hui, le rendement est plus proche de 30 %.

La production d'hydrogène vert dans des hubs massifs adossés à des énergies renouvelables bon marché, ou d'hydrogène bleu par reformage du méthane (SMR) accompagné de captage du CO₂ (CCS), intéressera en premier lieu les industries chimiques ou sidérurgiques qui auront la priorité faute de solutions décarbonées de substitution.

L'hydrogène utilisé n'aura de sens, pour un déploiement à grande échelle au-delà d'une période d'essai, que s'il est décarboné.

L'émergence du concept de route électrique

En parallèle à ces solutions, plusieurs industriels et organismes de recherche ont étudié et expérimenté, y compris en dehors des laboratoires, les possibilités de recharge en continu. C'est le concept de route électrique ou ERS (*Electric Road System*).

Plusieurs solutions sont aujourd'hui considérées, sans qu'aucune ne se soit encore imposée aux autres :

- les rails d'alimentation ;
- les caténaires ;
- l'induction.

Ces solutions sont présentées plus avant dans ce document et les avantages et inconvénients de chacune sont analysés en détail. Elles ont toutes en commun l'idée que la distribution de l'électricité au fur et à mesure de sa consommation est au moins aussi performante que le stockage par batteries ou la production d'hydrogène et qu'elles permettent de réduire la pression sur les matériaux rares :

- le rendement est amélioré puisque quasiment 100 % de l'électricité soutirée arrive au moteur du véhicule (peut-être un peu moins pour l'induction⁵) ;
- la taille des batteries sur les véhicules peut être largement réduite puisque l'autonomie nécessaire est réduite au trajet hors autoroute, soit 200 à 300 km environ, voire moins⁶ ;
- les batteries assurent aussi les compléments nécessaires pour les côtes importantes ;
- la recharge en roulant éviterait d'avoir à multiplier les chargeurs MCS et les chargeurs de nuit sur les parkings poids lourds et à augmenter la superficie de ceux-ci car les places poids lourd devront être séparées par des îlots accueillant les bornes, les poids lourds se branchant côté gauche

L'enjeu est majeur, avec des économies potentielles importantes en termes de matériaux rares pour les batteries, de consommation d'électricité et de contraintes sur le réseau de distribution.

4. La production locale d'hydrogène dans des stations-service se heurtera à plusieurs points : des contraintes réglementaires (les électrolyseurs de grande capacité sont des installations Seveso) et des contraintes de quantité d'électricité utilisée qui viendra en compétition avec les besoins de beaucoup d'autres consommateurs.

5. Le rendement de conversion de l'électricité depuis le réseau de distribution jusqu'aux bobines émettrices sera vraisemblablement similaire à celui des autres techniques, mais le rendement de l'induction sera aussi sensible à l'alignement du poids lourd avec les bobines et au passage d'une bobine à l'autre pendant que le poids lourd roule. Les tests en conditions opérationnelles permettront de confirmer ou d'infirmer ce point.

6. Certains industriels imaginent même des poids lourds avec quasiment pas de batteries, qui seraient destinés à évoluer sur autoroutes uniquement.

De plus, la technique de l'induction et dans une moindre mesure celle du rail, qui nécessitera des patins rétractables, pourraient être utilisables par les véhicules légers. Les avantages seraient multiples :

- accroissement du rayon d'action avec des batteries qui resteraient de taille limitée, sans avoir recours aux techniques hybrides ;
- commodité d'usage pour la recharge statique ;
- rentabilisation accélérée des infrastructures de la route électrique ;
- diminution des besoins en bornes de recharge rapide pour les véhicules légers. Ce point est particulièrement sensible car les grands départs en vacances ou pour les longs week-ends sont trop peu fréquents pour qu'on puisse dimensionner les infrastructures de recharge rapide sur ces seuls événements.

Ces études et expérimentations ne sont pas récentes : KAIST (Korean Advanced Institute of Technology) teste une solution par induction depuis 2011 dans le grand parc de Séoul et les tests sur les caténaires remontent à plusieurs années en Allemagne. Les techniques ont mûri et bénéficient aussi des progrès en matière d'aide à la conduite : régulateurs adaptatifs, maintien en ligne du véhicule. Ces progrès rendent beaucoup plus aisé un déploiement opérationnel d'une solution d'ERS car ils facilitent le respect du « couloir de recharge », quelle que soit l'option d'ERS retenue.

Aujourd'hui on recense dans le monde une douzaine de projets-pilotes et des réalisations plus importantes sont au stade des spécifications et même de l'appel d'offres en Suède et aux Etats-Unis (voir annexe 1). L'ERS ne peut donc plus être considéré comme une fiction et peut relever de la réalité industrielle à horizon 2030.

En France, le ministère des transports (DGTIM) a piloté une étude en 2021, sous la forme de trois groupes de travail ayant produit chacun un rapport avec la participation de nombreux acteurs. Cette étude, que le ministère des transports a publié sur son site, a confirmé l'intérêt de ce type de solutions.

Les trois groupes de travail étaient les suivants :

- GT1 : **Décarboner le transport routier de marchandise par l'ERS**, enjeux et stratégie, présidé par M. Patrick Péлата, ancien directeur général délégué du groupe Renault⁷ ;
- GT2 : **Solutions techniques, potentialités et verrous**, présidé par M. Stéphane Levesque, directeur de l'URF ;
- GT3 : **Expérimenter à grande échelle les systèmes de route électrique (ERS)**, présidé par M. Marc Gohlke, directeur du pôle CARA⁸.

En conclusion, l'étude tend à préconiser le rail comme solution technique pour la route électrique, même si une partie des participants, en particulier les gestionnaires d'autoroutes, ne se sont, à date, pas tous ralliés à cette solution.

Équilibre des Énergies estime nécessaire de revenir sur certaines hypothèses, en particulier sur la partie relative à la puissance minimale instantanée à délivrer à chaque poids lourd, estimée à 400 kW. Cette hypothèse est essentielle. Or le choix du seuil de 400 kW ne tient pas compte de l'apport de la batterie interne pour franchir les pentes ni du fait que l'ERS sera principalement utilisé par les transports longues distances et donc que la distance franchie sur autoroute sera largement supérieure aux 76 km retenus par le GT1 :

- le trajet moyen sur autoroute retenu par le GT1 est en effet celui publié par l'ASFA⁹ et correspond à 76 km, soit 50 minutes. Il intègre l'ensemble des transports qu'ils soient locaux, régionaux ou longues distances. Le GT1 estime qu'il faut recharger la batterie d'un poids lourd international dans ces 50 minutes, d'où les 400 kW nécessaires, alors que la puissance appelée par le moteur d'un 44 t en vitesse stabilisée à 90 km/h sur du plat est inférieure à 150 kW ;
- la vision d'Équilibre des Énergies est que l'ERS sera principalement utilisé par les transports routiers longues distances qui restent sur l'autoroute beaucoup plus longtemps. La puissance complémentaire pour recharger la batterie sera nettement inférieure et est estimée entre 200 et 250 kW ;
- il faut noter que la puissance transmise dans les expérimentations en Allemagne sur caténaires est entre 200 et 250 kW et en Suède entre 110 et 250 kW.

7. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/GT1%20rapport%20final.pdf>

8. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/GT3%20rapport%20final.pdf>

9. Association des Sociétés Françaises d'Autoroutes et d'ouvrages à péage

Les techniques bénéficient actuellement, dans plusieurs pays, d'investissements en R&D importants et leur déploiement à moyen terme présenterait un intérêt socioéconomique certain, en particulier si elles permettaient, tout en étant prioritairement axées sur les poids lourds, d'apporter une réponse à la recherche d'autonomie très longues distances pour les véhicules particuliers et au risque d'embolie des aires de recharge les jours de très fort trafic.

Les bénéfices économiques pour la collectivité semblent positifs sur le papier. Pour autant, un tel système ne peut se développer que si chacun des acteurs – transporteurs, réseaux de distribution, énergéticiens, autoroutiers, constructeurs de poids lourds – est prêt à la soutenir.

Les perspectives offertes par ces systèmes ont donc conduit Équilibre des Énergies à analyser plus en détail la maturité, les avantages et les inconvénients de chaque solution et les conditions de leur développement.

2

**Les techniques en
lice : rails, caténares,
induction**

Architecture générale des systèmes

Aperçu général

Trois techniques sont en cours d'étude ou de test par différents organismes : l'alimentation par rail, l'alimentation par caténaires et l'alimentation par induction. Toutes ces techniques ont comme caractéristique d'alimenter de façon quasi-continue les poids lourds en circulation afin d'assurer leur trajet et de recharger leurs batteries.

La fourniture de l'énergie au camion est faite par des cellules de longueur relativement courte : un à deux mètres pour l'induction, une dizaine de mètres pour le rail et quelques kilomètres pour les caténaires¹⁰ (figures 1 et 2). Les tensions utilisées pour alimenter les véhicules sont relativement faibles : de 800 V à 1 kV maximum, pour des raisons de sécurité¹¹.

Les cellules sont installées sur la voie de droite ou sur la voie centrale de l'autoroute ou de la route et le camion, lorsqu'il se recharge, circule sur la voie ainsi équipée. Dans les trois cas, le camion doit rester aligné sur le centre de la voie avec une tolérance latérale de quelques dizaines de centimètres maximum. Le développement récent des aides à la conduite et au maintien sur la voie de circulation seront des atouts importants pour le respect de cet impératif.

Alimentation électrique

Les cellules elles-mêmes sont alimentées en basse tension. La longueur des câbles alimentant les cellules est limitée par la tension du réseau et la puissance utilisée, qui vient du nombre de poids lourds équipés et circulant sur le tronçon. Elle se compte en centaines de mètres ou kilomètres au maximum.

L'énergie est soutirée au niveau de points de raccordement aux réseaux de distribution (ENEDIS) ou de transport (RTE) situés à proximité de l'autoroute.

Les réseaux ENEDIS et RTE ne sont pas systématiquement proches de l'autoroute. Le coût et les délais de

création d'une nouvelle liaison entre le réseau public (transport ou distribution) et l'autoroute tous les kilomètres ou presque pourront être prohibitifs. Il pourra être intéressant de déployer dans l'emprise de l'autoroute un réseau HTA (moyenne tension) enterré qui permette de distribuer la puissance nécessaire sur quelques dizaines de kilomètres.

Comme il s'agira d'un réseau de distribution déployé dans un domaine public concédé, il faudra étudier le statut de ce réseau et les aspects réglementaires : il faudra décider de son caractère public ou privé et de l'entité qui aura l'autorisation de l'exploiter.

Les techniques ERS engendrent à la fois des régimes transitoires sur le réseau amont, beaucoup plus difficiles à gérer que sur des recharges stationnaires, et des harmoniques, dues à la conversion en courant continu, qui devront être filtrées pour éviter qu'elles ne perturbent le réseau amont.

Ces perturbations existent sur le réseau SNCF, mais sont en partie filtrées par la longueur des câbles.

L'alimentation des poids lourds doit se faire dans les deux sens de circulation, l'infrastructure d'alimentation est donc dupliquée de l'autre côté de l'autoroute. Éventuellement, un côté peut être alimenté à partir de l'autre côté en faisant passer le réseau moyenne tension sous l'autoroute.

Les pneus des véhicules étant isolants, les solutions rails et caténaires nécessitent une voie de retour pour l'électricité.

Puissances en jeu

La puissance consommée par un poids lourd en pleine charge roulant sur une portion plate de l'autoroute est de l'ordre de 150 kW auxquels il faut ajouter environ 100 kW¹² pour assurer la recharge de la batterie et les pertes de conversion/transport. La densité kilométrique peut aller jusqu'à 11 poids lourds par kilomètre¹³. Avec un taux d'équipement cible de 80 %, cela conduit à une puissance consommée de 2,2 MW/km

10. Il faut deux caténaires pour assurer la circulation du courant électrique car les pneumatiques des poids lourds sont isolants, alors que pour le train ou le tramway le retour se fait par le rail.

11. A titre de comparaison, le réseau ferroviaire est alimenté en 25 kV alternatif pour la partie réalisée après-guerre et 1 500 V continu pour la partie la plus ancienne. Le RER est alimenté en 1 500 V et le métro et les tramways sont alimentés en 750 V continu.

12. En tenant compte d'une capacité interne de batteries de 250 kWh, 100 kW correspondent à la recharge de la moitié de cette capacité en 1 heure ¼, acceptable pour un poids lourd effectuant des trajets longues distances. Cela laisse aussi de la capacité pour le franchissement de pentes un peu longues ou pour le franchissement de zones non équipées d'ERS.

13. Le respect des distances de sécurité permet d'aller jusqu'à 15 poids lourds par kilomètre. Il s'agit là d'un chiffre maximum, lorsque la technique sera intégralement déployée et utilisée.

Figure 1 : Schéma de principe d'un réseau d'alimentation d'un système ERS par caténaires.

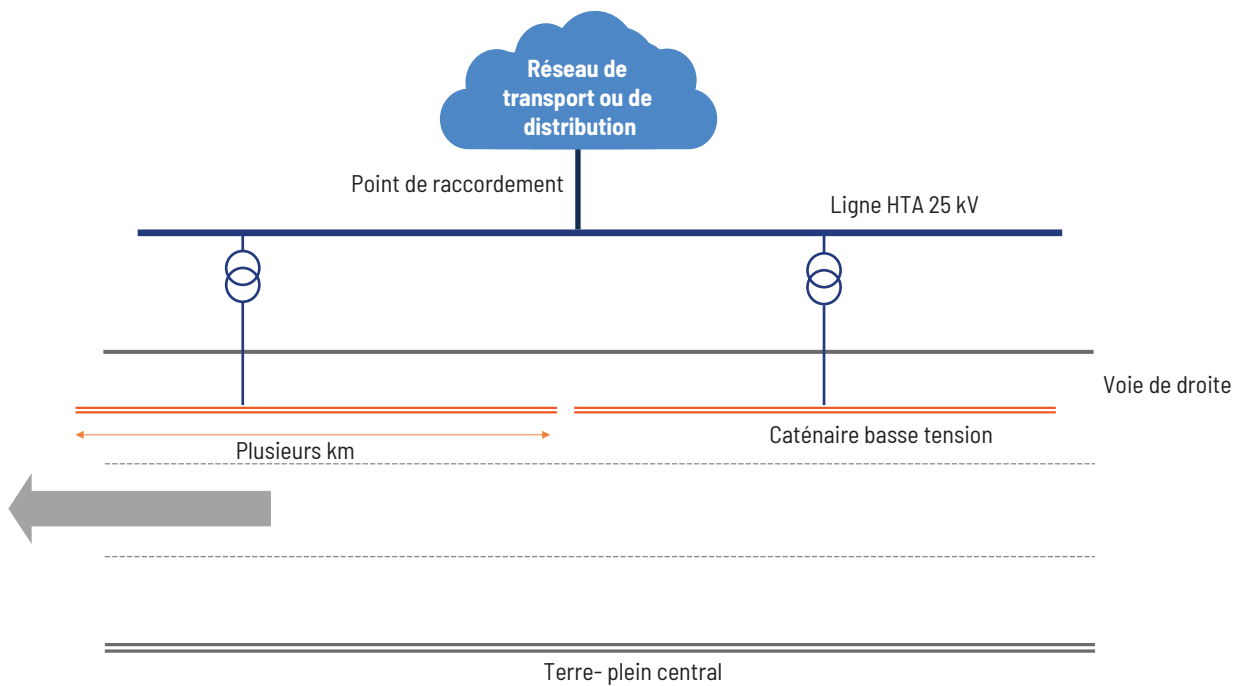
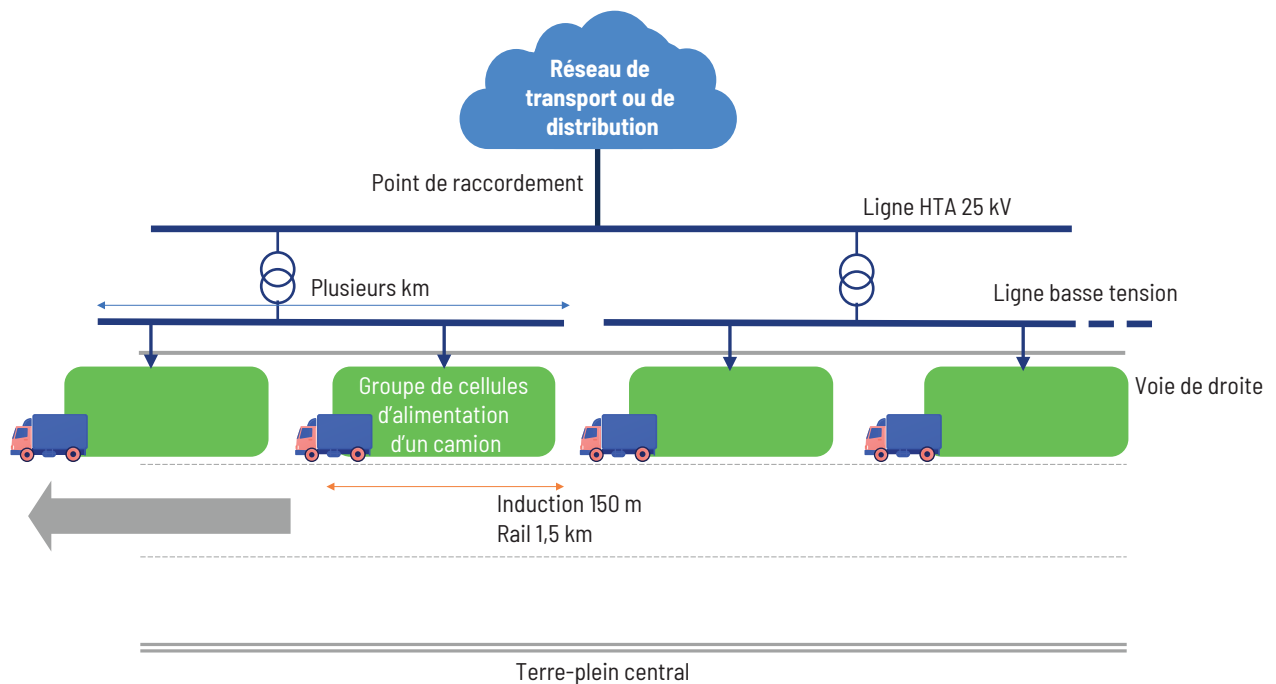


Figure 2 : Schéma de principe d'un réseau d'alimentation d'un système ERS par induction ou par rail.



pour les zones les plus chargées, lorsque le système sera intégralement déployé chez les transporteurs.

Un réseau de moyenne tension (HTA – 25 kV - triphasé) a une capacité maximale d'environ 13 MW. Cela permet de recharger simultanément 65 poids lourds à pleine puissance par point de raccordement. Cette puissance ne pourra pas être fournie en se raccordant à des points de soutirage du réseau d'ENEDIS desservant d'autres utilisateurs. Il faudra donc soit créer d'autres postes, soit se raccorder directement sur le réseau RTE.

En se basant sur le trafic des autoroutes A7/A9, la distance entre les poids lourds à l'heure de pointe varie entre 90 mètres et 300 mètres, avec une moyenne pondérée de 210 mètres. La longueur moyenne du tronçon entre deux raccordements au réseau électrique sera donc de 13,5 km, avec une fourchette allant de 8 km pour les tronçons les plus chargés à 20 km pour les autres. Elle sera beaucoup plus importante pour les tronçons d'autoroute moins fréquentés.

Il s'agit de contraintes à satisfaire lorsque l'ERS sera complètement déployé chez les transporteurs. Il est évident qu'il y aura une montée en charge progressive avec des renforcements du réseau et des points de soutirage au fur et à mesure. Il faudra asseoir le plan de montée en charge sur le résultat d'expérimentations. La longueur des segments devra être adaptée progressivement en fonction du trafic réel et des disponibilités des points de raccordement au réseau.

Les poids lourds ayant une autonomie de 250 km, une absence de système ERS sur plusieurs km, voire quelques dizaines de km, est acceptable, les batteries seront rechargées lorsque le poids lourd récupèrera le tronçon suivant. Même dans une vision long terme, le taux d'équipement ne devrait pas dépasser 70 à 80 % pour éviter les points singuliers comme les ponts, les tunnels ou les échangeurs.

Les intensités transmises sont importantes mais pas rédhibitoires : 200 kW sous 800 V correspondent à une intensité de 250 A.

Protection contre les surconsommations et limitation de la puissance appelée

Limitation liée à la technique des batteries

Un mécanisme lié à la technique actuelle des batteries fait que la puissance appelée par la batterie au cours de sa recharge n'est pas constante mais diminue au fur et à mesure de la charge : pour une batterie de 100 kWh entièrement vide se chargeant sur un système de recharge capable de délivrer une puissance de 100 kW, la recharge durera nettement plus qu'une heure : les 80 premiers kWh seront rechargés en presque 50 minutes mais les 20 derniers demanderont presque autant de temps.

La figure 3 montre que sur la plupart des véhicules actuels, la baisse de la puissance de charge diminue très rapidement et que, pour toutes les batteries, elle chute au-delà de 80 %¹⁴.

En prenant une marge de 100 kW pour la recharge des batteries au-delà des 150 kW nécessaires, la puissance totale de 250 kW ne sera appelée sur l'ERS que lorsque la batterie sera en partie déchargée, que le poids lourd gravira une pente ou se rechargera après une longue montée. Dans les autres cas la puissance appelée sera inférieure.

Surconsommations

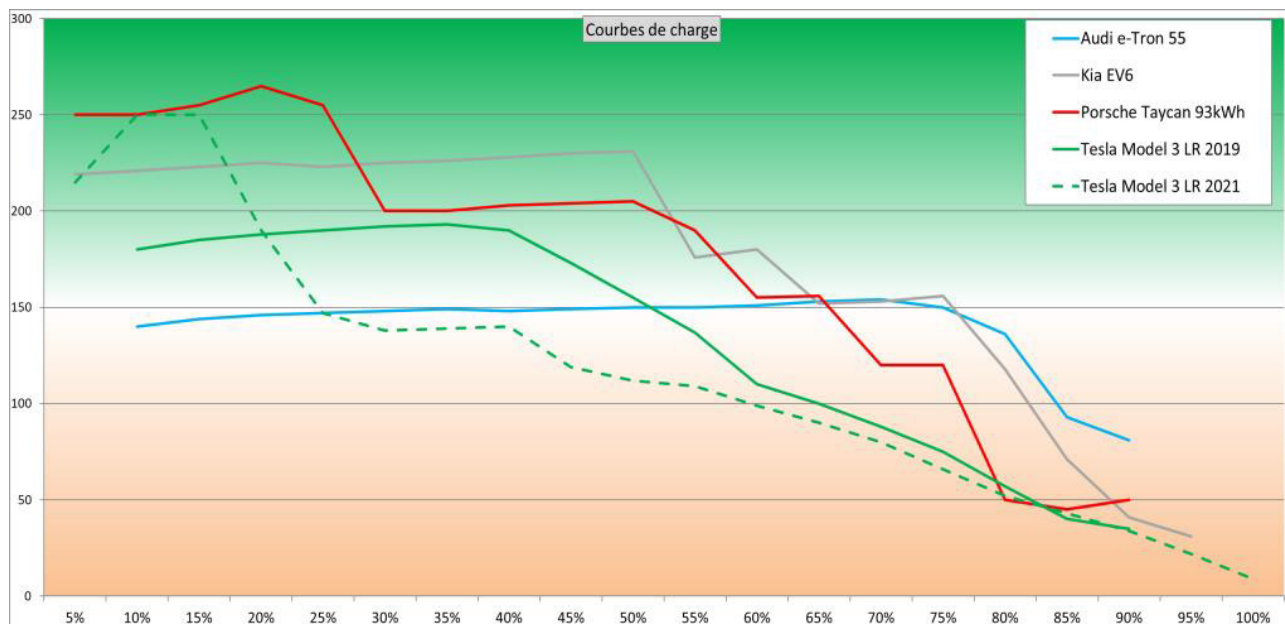
Dans un système électrique, la puissance appelée est définie par le consommateur (la charge). Un appel de puissance supérieur à celui autorisé par le système du fournisseur conduit à une surchauffe de celui-ci et éventuellement à une coupure par les disjoncteurs de protection.

Les conditions d'une telle surconsommation peuvent être multiples : défaut technique dans l'électronique de puissance du poids lourd, pente importante en montée (la puissance appelée pourrait aller jusqu'à 400 kW sur les pentes les plus importantes pour un poids lourd chargé), nombre de poids lourds en excès sur un segment.

La source devra donc pouvoir se protéger contre une surconsommation par la ou les charges, soit avec un dialogue avec celles-ci, comme c'est déjà le cas pour les bornes de recharge, soit avec une protection contre les surtensions ou un surdimensionnement.

14. De nouvelles techniques, autres que le Li-ion actuel, semblent prometteuses, telles que les techniques à électrolyte solide qui pourraient changer la donne en matière de temps de recharge et de linéarité de celle-ci.

Figure 3 : Courbes de charge de différents modèles de batteries de VE. Source : VW France.



Le système à induction paraît bien protégé naturellement : le poids lourd reste peu de temps sur une boucle ou un ensemble de boucles partageant un hacheur commun.

Le rail paraît également protégé pour les mêmes raisons. Cependant, si l'alimentation est réalisée tous les 1,5 à 2 km, il faudra mettre en place un système de protection pour éviter le risque de surconsommation si les poids lourds sont trop rapprochés.

La caténaire est le système le plus ouvert : tous les poids lourds présents sur le même segment pourront appeler autant de puissance qu'ils veulent, sans qu'un dialogue entre source et consommateurs puisse limiter les puissances appelées. Les expérimentations pourront fournir des indications sur les moyens de limiter ces risques.

Cette situation de surconsommation existe sur les trains ou les tramways (appel de puissance au démarrage ou restitution trop forte sur le réseau lorsque le train ou le tramway freine et réinjecte de l'électricité), mais le risque est réduit car le nombre de trains ou de tramways sur un même segment est limité par les procédures liées à la circulation des rames. Ce ne sera pas le cas pour les poids lourds.

Communication entre les poids lourds et l'infrastructure

Outre la fourniture de l'électricité, une communication entre les poids lourds et l'infrastructure est nécessaire, avec deux fonctions :

- identifier le poids lourd pour la facturation si celle-ci est basée sur la consommation. Dans le cas d'une facturation associée au péage, cette fonction n'a plus d'importance ;
- pour le rail comme pour l'induction, assurer la mise sous tension de chaque segment ou groupe de segments juste avant que le véhicule n'arrive dessus, ce qui laisse des délais de commutation de quelques dizaines de millisecondes.

En effet, pour des raisons de sécurité et de consommation électrique, il n'est pas possible de maintenir en permanence sous tension l'ensemble du rail ou des bobines du système à induction.

Pour rappeler quelques ordres de grandeur, un véhicule circulant à 90 km/h va parcourir un mètre en 40 ms. A contrario, il peut rester appairé pendant plusieurs minutes sur une même cellule en cas d'embouteillage. Si le système met sous tension plusieurs cellules simultanément pour être compatible avec la vitesse de circulation, il devra s'adapter en cas d'embouteillage à des vitesses et des intervalles réduits entre véhicules, afin de ne pas alimenter des cellules qui ne seraient pas utilisées ou pourraient présenter un risque pour des personnes ou des véhicules autres qui seraient au-dessus.

L'identification du véhicule et le dialogue véhicule-infrastructure sont prévus dans la norme ISO 15118. Néanmoins cette norme ne spécifie pas le canal physique de communication (elle prévoit le Wi-Fi mais il sera nécessaire d'en préciser la variante ou de spécifier un autre protocole). De plus, elle a été conçue, au moins dans ses premières versions, pour une recharge statique sans contact (par induction) ; il faudra donc vérifier que le dialogue d'authentification est possible à la vitesse des véhicules en tenant compte du nombre de communications générées par un trafic important.

Aspects contractuels et réglementaires pour un système ouvert

Dès lors que l'infrastructure n'est pas réservée à une flotte captive (voir chapitre sur le déploiement), il faut assurer un libre et juste accès à cette infrastructure aux différents transporteurs nationaux et étrangers. L'opérateur de l'infrastructure de recharge, qu'il soit ou non le concessionnaire de l'autoroute, bénéficiera d'un monopole de fait. Le prix du service (distribution, facturation) et ses conditions de révision devront être encadrés dans le contrat autorisant l'exploitation.

L'électricité fera donc partie du service fourni par l'opérateur et sera normalement incluse dans le prix global de la prestation. Il faudra adapter à ce service l'article L. 334-4 du code de l'énergie qui stipule aujourd'hui :

« Les opérateurs de recharge de véhicules électriques et hybrides rechargeables qui s'approvisionnent en totalité, pour les besoins de leur activité, auprès d'un ou de plusieurs fournisseurs de leur choix titulaires de l'autorisation prévue à l'article L. 333-1 n'exercent pas une activité d'achat d'électricité pour revente aux consommateurs finals au sens du même article L. 333-1 mais une activité de prestation de service. »

Il s'agira d'un service global, à charge pour l'opérateur du service ERS de trouver le meilleur fournisseur d'électricité pour répondre à ses obligations : coût global du service, énergie d'origine renouvelable... Le concédant devra alors inclure dans le contrat de concession les conditions de révision des prix du service rendu, en fonction notamment de l'évolution des coûts de l'électricité.

Il sera aussi nécessaire de mettre en place un système d'itinérance permettant à un poids lourd d'emprunter des itinéraires exploités par plusieurs opérateurs

et à ces derniers de s'assurer que le poids lourd sera effectivement reconnu et qu'ils seront payés pour le service rendu, via un système d'agents intermédiaires assurant cette fonction.

Il s'agit d'un système similaire à celui du télépéage inter-société (TIS-PL). Les opérateurs de télépaiement internationaux sont déjà bien rôdés au système. Le problème de l'itinérance de la recharge a donc des solutions mais aucune n'est définie aujourd'hui. Un organisme comme GIREVE¹⁵ ou équivalent pourra fournir une bonne base.

On pourrait aussi envisager que l'électricité elle-même soit achetée par le transporteur opérant le poids lourd auprès du fournisseur de son choix. L'opérateur se trouverait dans une situation analogue à celle d'un gestionnaire de réseau de distribution, assurant la distribution, le comptage et la facturation de l'électricité pour le compte du fournisseur, comme ENEDIS le fait aujourd'hui en France.

Cette solution paraît néanmoins plus complexe à mettre en œuvre :

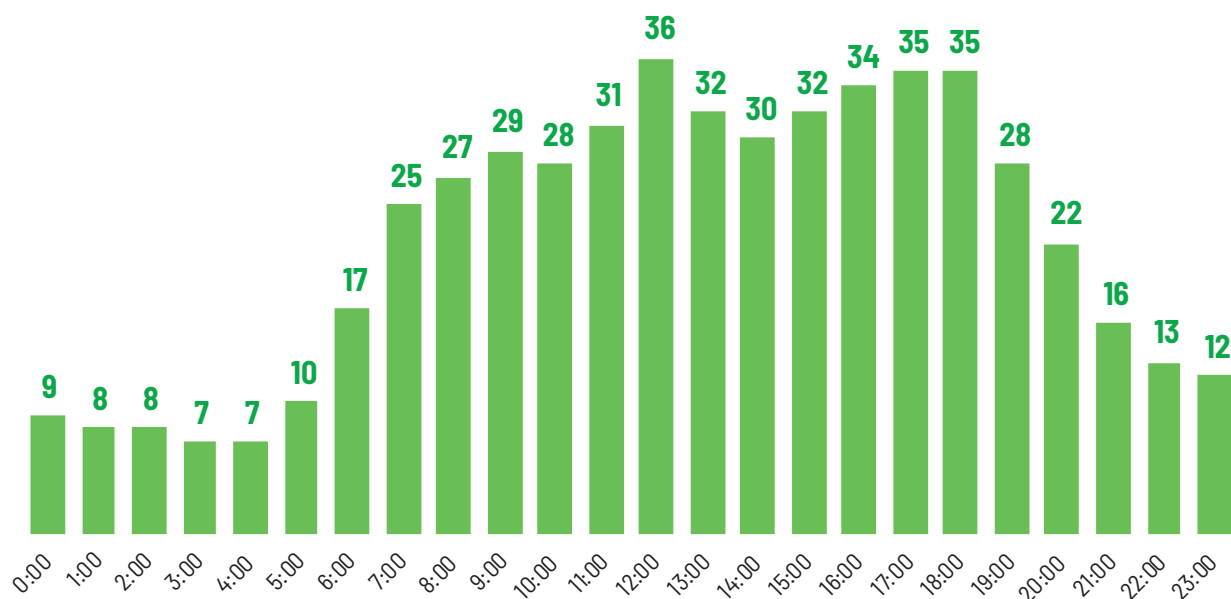
- l'opérateur ne connaîtrait pas directement l'abonné mais le connaîtra à travers le fournisseur, comme aujourd'hui les sociétés d'autoroute ne connaissent pas directement les poids lourds mais les fournisseurs d'abonnement au TIS-PL¹⁶ ;
- elle nécessiterait soit l'installation d'un comptage homologué sur le poids lourd, avec la complexité liée à la fourniture et l'entretien d'un compteur homologué communicant avec toutes les infrastructures existantes et intégré dans l'architecture électrique de chaque poids lourd, soit un compteur pour chaque segment ou bobine pour mesure la quantité exacte d'électricité consommée par chaque poids lourd. Dans ce dernier cas, la génération et le traitement de millions de tickets risquent de coûter cher en regard de la valeur de chacun d'entre eux ;
- l'opérateur de l'infrastructure deviendrait distributeur d'électricité, au même titre que les autres gestionnaires de réseau de distribution (GRD). Il faudrait alors faire évoluer la réglementation.

¹⁵ GIREVE est une plate-forme numérique agrégeant de multiples acteurs de la mobilité en Europe.

¹⁶ TIS-PL : Télépéage inter-société poids lourds.

Figure 4 : Entrée des poids lourds sur une aire de service – Moyennes du lundi au vendredi.

Source Vinci Autoroutes.



Profils de soutirage et impact sur le réseau

Le soutirage sur le réseau électrique a lieu tout au long de la journée en même temps que la circulation des camions.

Il ne sera pas nécessairement plus réparti que le soutirage de la recharge par batteries : la figure 4 montre que les arrivées des poids lourds sur les aires d'auto-route sont plutôt bien réparties dans la journée. Cela ne veut pas obligatoirement dire que la recharge sur les bornes sera aussi bien répartie mais donne quand même une indication de ce qu'elle pourrait être.

Pour l'ERS, en cas de situation critique, on peut imaginer un délestage localisé, une limitation temporaire de la vitesse des poids lourds ou une réduction de la quantité d'énergie fournie pendant quelques dizaines de kilomètres ou quelques dizaines de minutes en misant sur la capacité des batteries, mais au-delà, cela paraît difficile sauf à prendre le risque d'avoir des poids lourds en panne de batterie le long de l'auto-route et sur les aires de repos.

On doit noter que :

- pour les poids lourds fonctionnant sur batteries, la réduction de la fourniture d'électricité aurait un impact immédiat sur le temps de trajet et risque d'être mal vécu par les transporteurs ;
- a contrario, l'électrolyse pour la production d'hydrogène peut être interrompue pour répondre aux heures de pointe, un système de stockage permettant d'assurer la continuité de la distribution.

Surcoût d'équipement des véhicules

Chacune des trois techniques impose de doter les véhicules de plusieurs équipements :

- un système de collecte (pantographes, patins ou bobines d'induction). Cet équipement inclut aussi un mécanisme de mise en place/rétractation qui doit être particulièrement fiable pour se rétracter à l'approche de tout obstacle pour les caténaires ou lorsqu'il n'y a plus de rail pour les patins de collecte ;
- un système de maintien en ligne suffisamment précis ;
- un système d'électronique de puissance.

L'évaluation des surcoûts reste encore approximative, d'autant plus qu'il n'y a pas d'économie d'échelle évaluée, à ce stade. Les chiffres fournis par les sociétés conceptrices de l'infrastructure se situent dans une fourchette allant de 20 à 30 k€ par véhicule. Ces valeurs sont sans doute surestimées : le coût de l'équipement de certains prototypes est déjà en dessous de cette valeur pour l'induction. Le rail sera sans doute moins cher aussi dès qu'il y aura une industrialisation. Dans la section relative aux aspects économiques de l'ERS, nous retenons un surcoût de 15 k€ par véhicule pour le rail et l'induction et 20 k€ pour la caténaire, pour tenir compte du renforcement nécessaire de la cabine.

L'enjeu de l'équipement des poids lourds est structurant pour le déploiement de l'ERS en Europe. L'itinérance des poids lourds dans toute l'Europe

sera un élément essentiel qui guidera les décisions de la Commission européenne ainsi que celles des investisseurs.

L'équipement des poids lourds avec deux systèmes permettrait d'admettre que deux techniques soient déployées en Europe en évitant d'avoir à choisir une seule option. A priori, les solutions caténaires et rail pourraient partager la même électronique de puissance.

Économie sur les batteries et besoins en matériaux

La principale promesse de la route électrique est la recharge des véhicules pendant leur trajet et donc l'économie des batteries qui en résulte.

En prenant une autonomie minimale de 250 km contre 700 km pour les poids lourds internationaux à partir des hypothèses prises dans l'étude d'Équilibre des Énergies sur l'hydrogène, la capacité nécessaire de la batterie passe de 750¹⁷ kWh à 375 kWh, soit une économie en poids à l'horizon 2030 de 1 500 kg et une économie en CAPEX d'environ 31 k€¹⁸. L'économie nette est alors d'au moins 11 à 16 k€, selon la fourchette des coûts d'équipement du poids lourd pour l'ERS. Elle ne tient compte ni du gain complémentaire en poids sur la structure du poids lourd qui n'a plus besoin de supporter des 1,5 t supplémentaires, ni de l'économie en consommation associée.

De manière similaire, la quantité de matériaux (cuivre, lithium, nickel) serait diminuée de 50 %, soit une économie 26 000 tonnes de cuivre sur le parc poids lourds français en tenant compte d'un taux de pénétration de 80 % en 2050, d'une quantité de cuivre de 9 % par batterie et d'un parc poids lourds français longues distances de 243 000 unités.

Il faut comparer ce chiffre aux 60 000 à 100 000 t de cuivre nécessaires pour équiper à 80 % les 12 500 km d'autoroutes en France avec le système par induction, le plus gourmand en cuivre. Sans couvrir intégralement les besoins par les économies sur les batteries, l'économie n'est pas négligeable et la quantité totale de cuivre nécessaire reste relativement modeste comparée aux 170 000 t de cuivre consommées en France annuellement (cf. infra).

17. L'étude initiale sur l'hydrogène prenait en compte 1 MWh de batteries pour les poids lourds longues distances. Le déploiement des bornes de recharge le long des autoroutes va permettre une baisse de cette capacité dès lors que l'ERS commencera à être déployée.

18. Les hypothèses de l'étude d'Équilibre des Énergies sont une capacité de 750 kWh pour les batteries d'un poids lourd longues distances, avec un coût de 82 €/kWh en 2030. La densité énergétique est estimée à 250 Wh/kg à cet horizon (source : Wikipédia).

19. <https://www.ncc.com/about-ncc/about-the-group/other-brands/e-road-arlanda/>

Les solutions rail

Aperçu général

Le principe de la solution par rail consiste à alimenter le véhicule à partir d'un rail conducteur découpé en petits segments alimentés individuellement au passage du véhicule.

Plusieurs solutions sont actuellement en développement : une solution avec alimentation sur le côté de la voie, promue par Honda au Japon, et des solutions avec un ou deux rails au niveau de la chaussée. Cette étude ne considère que la solution au niveau de la chaussée, la solution d'alimentation latérale ayant paru aux auteurs poser des problèmes de sécurité et de complexité trop importants : distance avec la bande d'arrêt d'urgence, cas d'un obstacle sur celle-ci, etc.

Plusieurs variantes sont en cours de test :

1 Une solution développée par Elways a été testée dans le projet eRoadArlanda¹⁹. La caractéristique principale réside dans le fait que le rail comporte deux rainures correspondant au plus et au moins électriques (figure 5 et photo 1). Il n'y a pas de nécessité de segmenter le rail comme dans la solution d'Elonroad décrite ci-après. Cependant le système est sensible à la présence de corps étrangers (gravillons...) dans les rainures. Il requiert un nettoyage régulier du rail et cette difficulté ne semble pas être levée. De plus, la forme des rainures rend sans doute le système assez sensible à des écarts de direction brusques.

2 La solution développée par Alstom est dérivée de son expérience dans les tramways, mais modernisée avec le recours à une commutation électronique pour la mise sous tension des rails. Elle se fait avec deux rails conducteurs parallèles découpés en segments de 11 mètres. Les rails sont installés au niveau de la chaussée, de façon à ne causer ni surélévations, ni ornières, même légères (photo 2).

La solution Alstom est basée sur une sous-station électrique tous les km avec une boucle 20 kV, une alimentation en 750 VDC et une puissance distribuée allant jusqu'à 6 MW.



Figure 5 : Coupe de la chaussée équipée d'un double rail Elways. Ces rails sont alimentés à partir des câbles basse-tension qui assurent la commutation rapide entre segments. Les câbles basse-tension sont eux-mêmes alimentés à partir du câble haute tension. Source : Elways.



Photo 1 : Le rail Elways équipant le projet pilote de e-Road Arlanda en Suède. Source : Elways.



Photo 2 : Système Alstom avec double rail intégré dans la route. Source : Alstom



Suivi des effets du climat

Suivi des effets des opérations de la maintenance hivernale

Opération de déneigement et de salage

Photo 3 : Tests en conditions hivernales. Source : Alstom

Des tests ont été faits sur une piste de 50 m à l'Ifsttar²⁰ pour essais sur piste sèche et mouillée et sur une piste d'essai de 20 m dans les Vosges à 850 m d'altitude pour tester les conditions hivernales y compris l'impact de la fuite de courant quand la route est salée (photo 3).

L'alimentation est faite tous les 22 m pour distribuer l'énergie aux segments de 11 m.

Chaque segment est alimenté uniquement au passage du véhicule via une communication radio entre le véhicule et l'infrastructure. L'alimentation se fait uniquement au-delà de 30 km/h. En dessous de cette vitesse le camion est alimenté via ses batteries.

Le rail fait 5 cm de large et le patin en fonte est guidé pour rester dessus.

La solution Alstom est en cours de standardisation par le CEN/CENELEC dans le TC 9X dont le WG 30 travaille sur la normalisation pour les systèmes d'alimentation par le sol.

Une Technical Specification (TS 50717)²¹ a été publiée pour les patins et il y aura prochainement une « *new work item proposal* » pour la standardisation de l'infrastructure.

20. Ifsttar : Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux.

21. TS 50717:2022 Technical Requirements for Current Collectors for ground-level feeding system on road vehicles in operation. Il est rappelé qu'une TS est un document normatif qui ne s'impose pas aux Etats membres. Une TS peut coexister avec d'autres solutions et ne fait pas obstacle à l'existence de normes nationales. Une TS peut évoluer vers une norme européenne (EN) s'imposant aux Etats membres.

22. ElonRoad est une startup suédoise qui a notamment été retenue par le gouvernement suédois pour développer un projet-pilote dans la ville de Lund (photo 5). <https://elonroad.com/>

3 Dans la solution développée par Elonroad²², le rail est unique, plat et composé de segments consécutifs d'un mètre de longueur séparés par une jonction isolante (photo 4). Le rail est installé au niveau de la chaussée. L'électronique de puissance est installée dans le rail. Au niveau de chaque segment, un système radio permet de détecter l'arrivée du véhicule pour mettre le rail sous tension et collecter les informations nécessaires à la facturation.

Le segment est alimenté seulement au passage du véhicule pour des raisons de sécurité, ce qui impose une communication temps réel véhicule/rail et des temps de commutation rapides : à 90 km/h, un véhicule met 40 millisecondes pour parcourir un mètre.

La tension d'alimentation est comprise entre 800 et 1 000 V.

Le véhicule est équipé au minimum de trois patins. Les trois patins assurent une alimentation non interrompue même lorsqu'un des patins est sur la zone non alimentée entre deux segments. Le premier patin sert aussi à balayer le rail. Les segments conducteurs sont espacés d'un mètre et situés l'un derrière l'autre sur le rail. Pour assurer la voie de retour les segments sont alternativement alimentés en + et en -. À tout instant, un des patins collecteurs est en contact avec un segment alimenté en positif tandis que l'autre patin collecteur est en contact avec un segment alimenté en négatif (figure 6).

Un véhicule nécessitant une puissance supérieure à ce qu'un couple de segment peut délivrer, comme un tracteur, aura plusieurs jeux de deux patins répartis sur une plus grande longueur.

La puissance transmise annoncée par le constructeur est aujourd'hui de 200 kW par couple de segments. Le constructeur prévoit d'aller jusqu'à 300 puis 350/400 kW pour un camion.

Les segments sont assemblés en modules de 10 mètres de long posés dans une tranchée au milieu de la voie. Les modules sont clipsés les uns à la suite des autres et assurent la transmission de l'alimentation électrique d'un module à l'autre sur une longueur de 1,5 km. Tous les 1,5 km, une alimentation latérale permet de fournir la basse tension depuis un transformateur situé en bordure de l'autoroute. ElonRoad indique que cette distance devrait passer à 3 km ultérieurement.

Ce point devra être vérifié en fonction de la montée en charge du trafic car le câble dans le rail sera en basse tension et il ne véhiculera pas 2 ou 3 MW (voir supra) sur 2 ou 3 km.

La maintenance va porter sur les systèmes positionnés le long de la route (transformateurs et systèmes d'alimentation en courant continu) et sur ceux positionnés dans le rail. ElonRoad indique que les modules de 10 mètres peuvent être démontés relativement facilement pour que la maintenance ne porte que sur celui qui est en panne. Cela restera néanmoins une

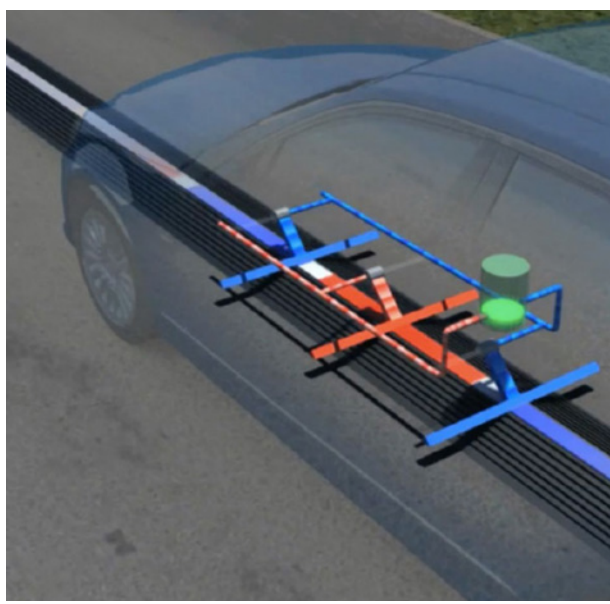


Figure 6 : Schéma de principe du système ElonRoad. Deux collecteurs prennent alternativement le plus et le moins sur le rail.

© Elon Road.

opération lourde et l'identification du module en panne sur des longueurs de 1,5 km peut être complexe si les outils adéquats n'ont pas été développés en amont. Il faut noter que, dans cette solution, des éléments actifs sont inclus dans le rail et donc difficilement accessibles. On trouve dans cette catégorie les commutateurs de mise sous tension de chaque couple de segments de 1 m et les balises de détection et de dialogue avec les poids lourds.

Un des sujets à surveiller sera la tolérance du système à la panne d'un des segments, tout comme la facilité d'identification de l'équipement en panne. On peut tolérer une panne de quelques segments entre deux opérations de maintenance nécessitant d'interrompre le trafic, mais la panne d'un kilomètre et demi serait moins acceptable.

Nota : la solution développée par Elonroad fait partie d'un des projets proposés dans une réponse à l'appel à projets émis en 2022 par l'ADEME.

Les avantages de la solution rail

- Le rail permet le transfert de puissances importantes, plusieurs centaines de kW, relativement aisément. Elle est compatible avec le fonctionnement des poids lourds même en pleine charge.
- L'usure est relativement faible, limitée au rail lui-même qui peut être remplacé, dans le cas de la solution ElonRoad, sans avoir à changer l'intégralité du système. Cependant, le choix du matériau (aluminium pour ElonRoad, acier pour Alstom) demandera un test de longue durée en conditions réelles pour s'assurer de sa durabilité.
- L'usure au niveau des patins devra aussi être mesurée en conditions réelles, même si leur remplacement sera plus aisé.
- Le système permet une utilisation en mode statique pour la recharge des véhicules à l'arrêt sur les quais de livraison ou dans les dépôts. Cela permet d'envisager d'équiper également les véhicules utilitaires légers et les camions de livraison. Même s'ils n'utilisent qu'épisodiquement la recharge sur autoroute, cela conduirait à une baisse des prix des équipements et à une généralisation du système.
- L'utilisation sur les véhicules légers est possible : le niveau de puissance transmise dépasse largement les besoins d'un SUV. En roulant dans la même file que les camions (donc à 90 km/h), les 200 ou 300 kW disponibles sont largement supérieurs aux 20 à 30 kW requis à cette vitesse. Les véhicules particuliers équipés pourraient donc se recharger en s'insérant de temps en temps dans la file des poids lourds.



Photo 5 : Expérimentation de la solution ElonRoad sur 1 km à Lund (Suède).

Source : ElonRoad.

- En revanche, la recharge à domicile, avec deux conducteurs nus sous tension demanderait une attention particulière pour la sécurité et reste incertaine.

Les inconvénients de la solution rail

- La pose du rail est « relativement facile » sur les chaussées en enrobé. La solution développée par ElonRoad ou d'autres peut être posée en creusant uniquement une tranchée dans la chaussée sur la
- largeur du rail et des tranchées transversales tous les 1,5 km pour l'alimentation du système. Sur des chaussées existantes en béton, comme c'est le cas dans certains pays d'Europe, l'installation nécessitera de creuser une tranchée. La complexité dépendra de la largeur du système et de la profondeur à découper mais le problème, souvent évoqué, ne semble pas insurmontable.
- La réfection de la couche de roulement de l'auto-route, qui a lieu tous les 15 ans environ, est rendue complexe : le rabotage de la chaussée doit se faire de part et d'autre du rail, ou alors il faut pouvoir

déposer le rail d'alimentation. Ce point est jugé majeur en termes de coût de maintenance de l'auto-route avec le rail, cela pourrait correspondre à une part significative des investissements à consentir à chaque renouvellement de chaussée. Il convient également d'étudier le cas des couches en dessous de la couche de roulement, qui sont également périodiquement refaites mais sur une période plus longue (environ 30 ans).

- **Le risque pour les usagers et en particulier pour les motos** : le rail peut être glissant et sera nécessairement relativement large (8 à 10 cm). La liaison avec le reste de la chaussée ne sera pas parfaite. Elle se dégradera avec le temps et localement des différences de niveau pourront apparaître, présentant un risque d'accident, en fonction du comportement de la chaussée et des matériaux de scellement pour l'ensemble des usagers et encore plus pour les deux roues.
- **Le rail ne fonctionnera pas en cas d'enneigement**, au moins tant que la route n'aura pas été complètement dégagée. Cependant, l'autonomie des poids lourds devrait être suffisante pour dépasser une zone recouverte par la neige, d'autant que les poids lourds rouleront bien en dessous des 90 km/h dans ces conditions d'enneigement.
- La résistance du système dans les conditions hivernales, en particulier la résistance au salage doit être validée : fuites de courant quand la neige se transforme en saumure, mais aussi corrosion chimique du rail sur le long terme.
- Une autre inconnue est la résistance aux conditions climatiques extrêmes, comme les inondations, d'autant que, dans la solution ElonRoad, les tronçons entre deux alimentations sont de 1,5 km et composés de rails de 10 m mis bout à bout. La résistance de l'ensemble à une inondation reste à tester sur la durée et il faudra disposer d'un système de détection des pannes pour identifier rapidement quel rail est défectueux en cas d'incident.
- Comme pour les autres systèmes d'ERS, il faudra vérifier la tolérance aux déviations latérales de positionnement. Les deux patins doivent rester en contact avec un rail plat au niveau de la route et dont la largeur est de l'ordre de 8 à 10 cm. La géométrie du système abaissant le patin doit permettre de tolérer quelques écarts de positionnement latéral. Certains constructeurs annoncent une tolérance d'une vingtaine de centimètres. Ce système bénéficiera des équipements d'aide à la conduite, avec un maintien automatique en ligne précis qui doit arriver à court terme sur les véhicules neufs.

Ces réserves sont importantes mais des solutions, qui restent à valider, peuvent y être apportées.

Le niveau de maturité de la solution rail

Des tests ont eu lieu en Suède sur plusieurs années avec la solution d'ElonRoad en parallèle aux tests sur la solution Elways. Au moment de la rédaction de cette étude, c'est la seule solution intégrant un rail plat qui a fait l'objet de tests en conditions réelles sur route ouverte. Le gouvernement suédois a lancé le 15 novembre 2022 un appel d'offres pour équiper l'autoroute E20 sur 21 km entre Hallsberg, Kumla et Örebro d'une solution ERS. Cet appel d'offres n'est pas spécifique au rail.

En France, des essais sur piste ont eu lieu. Plusieurs dossiers ont été déposés par des consortiums qui regroupent différents types d'industriels, dont des autoroutiers dans le cadre d'un appel à projets qui n'est pas spécifique au rail mais à toutes les solutions ERS. Les projets retenus en juillet 2023 sont décrits en annexe.

Une autre version du système d'ElonRoad est aussi commercialisée pour des recharges statiques.

Les expérimentations menées à ce jour ont démontré la faisabilité technique du système. Les puissances transmises pour la solution ElonRoad sont aujourd'hui de 200 kW pour des camions roulant à 80 km/h. Les tests prévus pour 2023 doivent permettre d'atteindre 100 km/h avec des puissances de 300 kW.

Les prochains tests doivent permettre de vérifier la viabilité en exploitation commerciale, dans des conditions réelles, sur plusieurs années : tenue de la chaussée, résistance du rail à l'usure, aux inondations et aux conditions climatiques extrêmes, validation du niveau de puissance à délivrer, tenue des systèmes de collecte, adhérence des véhicules et sécurité routière...

Une attention particulière sera portée aux tests que les autoroutiers français prévoient sur le danger pour les motos.

En rapport avec l'échelle des TRL (cf. annexe 4), le système rail peut être évalué au niveau 7 : « *Démonstration du système prototype en environnement opérationnel* ». Les tests en route ouverte et en situation réelle permettent de qualifier ce niveau, en particulier pour la solution ElonRoad, mais il manque encore le résultat d'expérimentations avec un nombre significatif de poids lourds sur la durée pour qualifier le système au niveau 8.

La solution caténaire

Dans cette solution, souvent appelée OCL (*Overhead Contact Line*), l'alimentation électrique se fait par deux caténaires parallèles suspendues au-dessus des poids lourds. Un double pantographe assure la connexion électrique. L'écartement des caténaires est choisi pour éviter tout risque de court-circuit (photo 6).

Le système est assez similaire à celui d'un tramway, avec des tensions d'alimentation comprises entre 600 et 800 V.

La longueur de chaque segment est déterminée par le nombre de poids lourds qui peuvent s'y alimenter (au-delà, il y aurait une baisse de tension) et aussi par la résistance des câbles et la chute de tension attendue. Elle peut atteindre quelques kilomètres.

À la différence d'un tramway, il n'y a pas de phénomène de démarrage du poids lourd qui dispose en outre de batteries intégrées, donc pas d'appel de courant de démarrage. Pour mémoire, celui-ci peut atteindre six fois le courant nominal. En cas d'embouteillage ou de panne du circuit, l'alimentation du poids lourd est assurée par sa batterie qui est aussi sollicitée lors du redémarrage. Le pantographe doit être rétractable automatiquement, pour passer dans les tunnels ou sous les ponts un peu bas.

Le coût de l'équipement du camion est de l'ordre de 30 k€. Dans la présente étude, nous avons supposé qu'il pourrait être ramené à 20 k€.

Les avantages de la solution caténaire

- La solution est simple et ne nécessite pas d'électronique complexe ou de dialogue entre l'infrastructure et le véhicule pour mettre uniquement sous tension le système au passage du poids lourd avec une commutation rapide. La caténaire ne présente pas de danger pour une personne marchant sur l'autoroute.
- Un système avec caténaires permet le transfert de puissances importantes, limitées par la tension électrique sur le câble et la longueur des tronçons qui peuvent atteindre plusieurs km. L'espacement entre les sous-stations dépend uniquement du nombre de poids lourds qui seront amenés à se suivre sur le même tronçon.
- Du point de vue technique, la solution est quasiment mature et a fait l'objet d'expérimentations depuis de

nombreuses années en Allemagne, en Suède et aux Etats-Unis. Les trains et tramways utilisent des caténaires depuis des décennies.

- Tous les équipements étant aériens, le système est compatible avec les chaussées existantes, y compris celles en béton. De plus les réparations et interventions seront plus simples qu'avec les systèmes intégrés à la chaussée, au moins au niveau de celles-ci. Il n'y aura pas d'impact sur la chaussée et moins de gêne pour la réfection de celle-ci, sous réserve que les machines puissent passer dessous.

Les inconvénients de la solution caténaire

- **L'expérience du ferroviaire n'est pas directement transposable à l'ERS** : le trafic des trains ou tramways est inférieur d'un ou deux ordres de grandeur à ce que sera la circulation sur une autoroute fréquentée : sur le tronçon Vienne Valence, on compte plus de 5 000 poids lourds longues distances par jour, très loin de la centaine de TGV ou même des trains de banlieue. L'usure et l'entretien seront beaucoup plus importants.
- **Les poids lourds ne sont pas tous entretenus avec le même soin, ni aussi calibrés que les trains et la route n'est pas aussi plate**. Le risque d'arrachement des caténaires sera plus important que sur le rail et, vu le trafic, cela arrivera à intervalles réguliers. L'arrachement d'une caténaire entraînera la fermeture de la voie voire du sens de circulation pendant plusieurs heures au minimum.
- Il sera impossible de refuser de l'électricité à un poids lourd non identifié : on ne peut pas supprimer l'alimentation de la caténaire parce qu'un poids lourd non identifié vient se connecter dessus sans aussi couper l'alimentation des autres poids lourds. Il faut dès lors envisager une tarification forfaitaire pour tout poids lourd équipé et/ou l'inclure dans le péage.
- Le système est sensible aux intempéries : neige et tempête. Les réseaux d'Enedis et de la SNCF sont un bon exemple de la sensibilité aux tempêtes qui surviennent régulièrement, ainsi qu'aux chutes de neige. Tous les ans ou presque, des portions d'autoroutes seront inutilisables pendant plusieurs jours pour les poids lourds équipés car le système aura été arraché par la tempête ou se sera effondré sous la neige.
- Il sera impossible pour les hélicoptères de la protection civile de se poser sur l'autoroute pour évacuer les blessés graves. De même les caténaires compliqueront grandement le relevage des poids lourds couchés sur le côté avec des grues. **Ce dernier point est vu comme bloquant par les exploitants d'autoroute**



Photo 6 : Poids lourd hybride roulant sur l'eHighway près de Darmstadt (Allemagne). Source : Siemens.

qui y sont confrontés une fois par semaine environ. Le premier point est aussi critique : l'évacuation par hélicoptère arrive plusieurs fois par an sur les autoroutes, en raison de l'encombrement de l'autoroute et celui du réseau secondaire qui ne permettent pas l'évacuation par la route. **Des incidents de ce type peuvent rendre le système inacceptable.**

- Le système sera réservé aux seuls poids lourds supérieurs à 26 t, ceux dont le gabarit permet d'atteindre la caténaire située entre 4,6 et 5,4 m. Pour des raisons de hauteur, il ne sera évidemment pas possible d'installer le système sur des fourgons ou des camions de petite taille et encore moins sur des véhicules particuliers.
- L'installation d'un pantographe nécessite de renforcer la cabine et de l'allonger : il doit imposer une certaine pression sur la caténaire et les cabines actuelles ne sont pas assez renforcées pour supporter cette pression.
- Les poteaux supportant les caténaires sont implantés le long des voies alors que la recherche de sécurité tend à dégager les bas-côtés de tout obstacle augmentant le risque en cas d'accident. Il faudra les protéger par des glissières en béton, ce qui augmente le CAPEX d'environ 225 k€ par kilomètre et par sens de circulation.
- Il pourra être enfin objecté que les caténaires portent atteinte aux paysages et à l'avifaune.

Le niveau de maturité de la solution caténaires

Le système des caténaires est celui qui présente, sur le plan de la technique pure, le plus haut niveau de maturité. Il est celui qui a été le plus testé et depuis plusieurs années : en Allemagne avec six tests différents, à Los Angeles (SoCal) et en Suède. Mais ces tests sont des tests unitaires et ne permettent pas de savoir comment le système se comportera en exploitation commerciale. Il reste à qualifier le système avec un trafic réel, composés de véhicules de configurations très diverses. Les tests effectués ont cependant montré que l'utilisation était compatible avec les conditions météo et le fonctionnement d'une autoroute.

En rapport avec l'échelle des TRL (cf. annexe 4), le système caténaire peut être évalué au niveau 7 : « *Démonstration du système prototype en environnement opérationnel* ». Les tests en route ouverte et en situation réelle permettent de qualifier ce niveau mais il manque encore le résultat d'expérimentations avec un nombre significatif de poids lourds sur la durée pour qualifier le système au niveau 8.

La solution par induction

Le principe de la route à induction (*In-Road Inductive Charging System*) consiste à transférer l'énergie sous forme d'un champ électromagnétique variable émis à partir d'une ou plusieurs bobines insérées dans le sol vers une ou plusieurs bobines situées sous le châssis du véhicule.

L'idée et les expérimentations ne sont pas nouvelles : le KAIST (*Korea Advanced Institute of Science and Technology*) mène par exemple, depuis 2011, une expérimentation en grandeur nature dans un parc à Séoul ainsi qu'avec des bus sur une ligne spécifique (figure 7). Mais la technique connaît une accélération dans son développement, tant pour une recharge statique des véhicules que pour une recharge en roulant en raison des avantages qu'elle offre, en premier lieu la disparition du dispositif de recharge, caténaires et pantographes ou patin.

Induction statique et induction dynamique

La première application de l'induction est la recharge statique de véhicules (particuliers ou commerciaux) au domicile, au dépôt ou lors d'arrêts pendant les trajets (feux rouges, arrêts de bus), pour s'affranchir du branchement du câble.

Ce fonctionnement est analogue à celui de la recharge sans fil des téléphones portables : le véhicule est équipé d'une bobine servant d'antenne réceptrice et vient stationner sur une autre bobine servant d'antenne émettrice. Cette antenne n'est pas nécessairement enterrée et peut être insérée dans un coussin posé sur le sol. Les deux antennes sont réglées sur la même fréquence de résonance et la transmission d'énergie se fait dans le champ électromagnétique dit « proche », où le champ magnétique est dominant, ce qui permet un bon rendement de transmission si l'émetteur et le récepteur restent rapprochés.

Cette technique fait l'objet de beaucoup d'attention et des entreprises, comme WiTricity²³, proposent des solutions pilotes de recharge par induction adaptables sur des véhicules existants, que ce soit pour des véhicules particuliers, des bus ou des flottes de véhicules de livraison.

La technique est bien maîtrisée en environnement statique et ne présente pas de difficultés particulières en dehors du risque électromagnétique (voir ci-dessous). Le bénéfice principal est de ne plus avoir de câble pour la recharge, ce qui est plébiscité par les utilisateurs.

La recharge en roulant est un problème plus complexe car il faut recharger le véhicule pendant qu'il circule. La difficulté est nettement supérieure, ne serait-ce que parce que le véhicule reste très peu de temps au-dessus de l'enroulement enterré (40 ms pour un enroulement de 1 m de diamètre à 90 km/h).

Figure 7 : Petit train rechargé par induction en roulant dans un parc à Séoul – KAIST.



23. Witricity (www.witricity.com) est une spin-off du MIT créée par le professeur Marin Soljačić, auteur d'une expérience de transmission d'énergie sans fil en 2007 démontrant la capacité d'allumer une ampoule de 60 W, depuis une source électrique située à environ deux mètres de distance, avec un rendement de 40 %. Voir : <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1143254?cookieSet=1>

Induction dynamique : principes généraux

Plusieurs solutions sont en cours de développement : la solution développée par KAIST, celle développée par l'institut pour la transition énergétique VEDECOM, la solution développée par Electreon²⁴, sans oublier les travaux d'ASPIRE et de l'Oak Ridge National Lab. Nous nous concentrons, dans la suite de cette étude, sur la solution Electreon mais les autres solutions reposent sur des principes similaires (figure 8).

Energie transférée : fréquences utilisées

Le système développé par Electreon utilise une fréquence de 85 kHz avec une alimentation sous 400 V, qui devrait passer à 1 kV prochainement. Le taux de transmission indiqué par Electreon est de 90 % pour une recharge statique et de 85 % pour une recharge dynamique, dans de bonnes conditions d'alignement. À ces valeurs il faut rajouter les pertes dans les systèmes électroniques.

La puissance transmise par chaque bobine est de 25 kW avec une évolution à 35 kW à brève échéance. Elle pourrait passer vers 80 kW aux alentours de 2024.

Il s'agit du principal point faible de cette technique : pour atteindre confortablement 200 kW voire 250 kW, il faut au moins six à sept bobines de 35 kW ou trois de 80 kW, en supposant que l'alignement soit optimal et le taux de transfert de 100 % ou presque.

Les bobines doivent être installées sous le tracteur, ce qui limite leur nombre à quatre ou cinq. Il n'est pas inenvisageable d'équiper les remorques mais cela poserait certaines difficultés : un surcoût non négligeable, car il faudrait équiper toutes les remorques susceptibles d'être accrochées à un tracteur utilisant l'ERS, et aussi des risques sur le fonctionnement avec un point de coupure entre le tracteur et la remorque.

Architecture du système à induction

Le fonctionnement à 85 kHz impose une distance relativement courte, de quelques dizaines de mètres maximum entre le hacheur qui produit le courant haute fréquence et l'antenne émettrice.

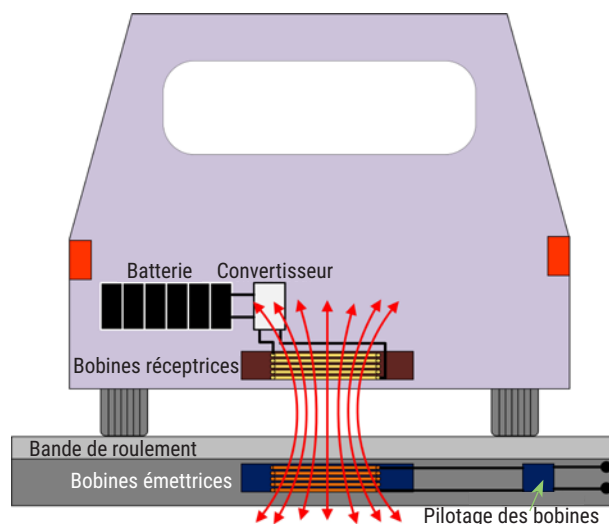


Figure 8 : Schéma de principe d'un système de recharge de véhicule électrique par induction.

Source : Auteurs.

La solution Electreon utilise des bobines de 1,70 m et des « management units » implantées tous les 40 mètres.

Les solutions étudiées mettent en commun un hacheur avec une soixantaine de bobines. Le hacheur est lui alimenté en basse tension. Les bobines sont alimentées au fur et à mesure de l'avancée du camion.

Les risques propres au système à induction

Le risque essentiel est celui lié aux ondes électromagnétiques, pour les passagers du véhicule ou pour les personnes à proximité, dans le cas d'un embouteillage ou d'une recharge statique. Mais il faut rappeler que la transmission se fait dans le champ électromagnétique proche où la composante magnétique dominante reste fortement directionnelle. Le plancher métallique du véhicule est réputé être suffisant pour éviter une exposition excessive des passagers au champ magnétique.

Les données fournies par les différents industriels indiquent une valeur résiduelle tout à côté du véhicule de l'ordre du microtesla, bien en dessous de la valeur limite de 6,25 microteslas fixée comme niveau de référence par le décret n°2002-775 du 3 mai 2002 pour la gamme de fréquences allant de 3 à 150 kHz. Cependant les seuils fixés par ce décret, cohérent avec les règles européennes et les recommandations de l'OMS, sont considérés comme trop laxistes par

24. Electreon (<https://electreon.com/>) est une société israélienne créée en 2013.

certaines organisations. Il y a donc là un point de vigilance auquel il faudra porter la plus grande attention.

Il faudra aussi vérifier les possibles interférences avec les systèmes embarqués des véhicules.

Axes de développement

Le principal axe de développement est l'augmentation de la puissance transmise dans le respect des règles de santé publique : s'il n'y a pas de progrès significatif dans ce domaine, la puissance transmise sera insuffisante pour les poids lourds longues distances.

Le second axe de développement pourrait être le remplacement du cuivre par de l'aluminium pour les bobines enterrées. Certains acteurs ont indiqué travailler sur cette évolution, mais sans donner plus de précision. Les propriétés de l'aluminium rendent cette hypothèse assez peu plausible.

Les avantages du système à induction

- Une solution adaptée à tous les types de véhicules : le système est adaptable aux véhicules utilitaires légers et aux véhicules particuliers ce qui permettrait d'accélérer l'amortissement de l'infrastructure et d'accroître le rayon d'action des véhicules électriques. La route à induction offrirait ainsi une alternative décarbonée aux véhicules hybrides rechargeables et permettrait à tout véhicule électrique, y compris aux petits véhicules à usage urbain avec de petites batteries et une puissance de recharge limitée, de parcourir de grandes distances.
- Une dynamique positive avec beaucoup de recherches et de développements dans le monde, en particulier aux États-Unis où plusieurs laboratoires sont associés à des start-ups et à des industriels et bénéficient de soutiens dans le cadre du plan Biden.
- L'équipement des véhicules particuliers irait de pair avec le développement de la recharge statique, sans fil, à domicile, en entreprise ou sur des emplacements équipés à cet effet.
- Une maintenance relativement aisée : dans les solutions étudiées, les équipements actifs sont accessibles et situés en dehors de la chaussée. Seules les antennes passives sont enterrées.
- Pas d'impact pour les véhicules non équipés et pas de risque pour les autres usagers de l'autoroute. Comme aucun équipement n'est apparent sur la

chaussée ou installé en hauteur, cette solution ne présente aucune modification pour les usagers de l'autoroute.

- Les antennes sont intégrées en dessous de la couche de roulement. Elles ne font donc pas obstacle à la réfection de celle-ci. En revanche, lorsque la couche de soutien sera refaite tous les 24 ans environ, les antennes seront enlevées au moment du rabotage de la couche et le cuivre recyclé.

Les inconvénients de la solution à induction

- Cette technique utilise beaucoup de cuivre et la partie qui sert dans les bobines n'est pas remplaçable en l'état actuel par de l'aluminium ou par un autre conducteur. Electreon a communiqué pour l'étude DGITM une consommation de 5,1 tonnes de cuivre par km d'autoroute et par sens de circulation se répartissant en :
 - 600 kg pour les sous-stations ;
 - 2 500 kg pour l'alimentation latérale dont une grande partie pourrait sans doute être remplacée par l'aluminium ;
 - 2 000 kg pour les bobines d'induction pour lesquelles il n'y a pas aujourd'hui de matériau de substitution.

Cela conduit à environ 100 000 tonnes de cuivre pour équiper à 80 % les 12 500 km d'autoroute en France, soit 5 000 t/an si l'équipement se fait en 20 ans. Ce chiffre peut être comparé aux 172 400 tonnes de cuivre consommées en 2020 en France²⁵. Ce n'est donc pas un problème majeur d'autant que ce cuivre ne disparaîtrait pas et serait recyclé lors de la réfection de la chaussée. A cette consommation, il faudra retrancher l'économie en cuivre, nickel et autres matériaux sous tension qui pourraient être économisées dans les batteries. L'économie en cuivre est estimée à 26 000 t pour le cuivre seulement (cf. supra).

- Impact sur la structure de la chaussée. Les enroulements émetteurs sont enfouis sous la couche de roulement. Ils vont dégager une chaleur qui sera dissipée dans la chaussée elle-même. La tenue à long terme de la chaussée reste à vérifier, notamment dans le contexte du réchauffement climatique et des épisodes de canicule de plus en plus fréquents : une route en plein soleil l'été, dans laquelle les bobines d'induction chauffent en raison du trafic poids lourds et qui est soumise en même temps à l'impact des roues, pourrait se dégrader rapidement. Les expérimentations permettront de préciser cette question.

25. Source : <https://lelementarium.fr/element-fiche/cuivre/>

- Cette technique semble peu compatible avec les chaussées en béton existantes et la pose implique une intervention lourde sur la chaussée, plus importante que celle du rail : des liaisons latérales vers l'électronique de puissance qui est installée le long de la voie, de l'autre côté des barrières de sécurité, sont nécessaires tous les 100 mètres voire moins.
- Cependant, elle semble plus facile à mettre en œuvre sur des chaussées en béton en construction qui permettraient de figer la bobine et de mieux dissiper la chaleur dégagée.
- La puissance transmise est encore trop limitée et, de plus, il faut tenir compte des pertes dans le transfert de l'énergie. Des données, probablement optimistes, donnent un taux de transfert de l'énergie entre 80 et 90 %. À 35 kW par bobine, il faut six ou sept antennes réceptrices pour récupérer les 200 ou 250 kW considérés comme nécessaires pour assurer la viabilité du système. Cela pourrait imposer d'équiper également la remorque, ajoutant un niveau de complexité et de coût au système et pour autant que ce soit possible.

Des travaux sont en cours pour traiter cette question.

- Il est nécessaire que le véhicule reste bien en ligne pour que les cellules soient superposées. On peut estimer que la contrainte est intermédiaire entre celle de la caténaire et celle du rail. Electreon indique une tolérance latérale de ± 25 cm.
- Enfin, le problème de santé publique et de compatibilité électromagnétique (CEM) avec les équipements

embarqués doit être anticipé car il est probable que le développement de la technique suscitera des interrogations pouvant conduire à un rejet.

Le niveau de maturité de la solution à induction

Des tests ont été faits ou sont en cours en Suède, en condition de circulation normale sur route ouverte, en France, à Dubaï, en Allemagne, en Israël, en Italie, aux USA et en Corée du Sud, mais sur des techniques différentes (Electreon, VEDECOM, OLEV/KAIST...).

Ces expérimentations ont montré la faisabilité technique de la solution. **Néanmoins la question de la puissance transmise n'est pas réglée et des progrès sont nécessaires.**

Les prochaines expérimentations devront permettre de vérifier la tenue en conditions réelles : impact sur la chaussée, taux de transfert réel, validation de la puissance nécessaire...

En rapport avec l'échelle des TRL (cf. annexe 4), le système induction peut être évalué au niveau 6 : « *Démonstration du modèle système/sous-système ou du prototype dans un environnement significatif* ».

Il manque encore des tests opérationnels en situation réelle sur des routes ouvertes pour aller plus haut dans l'échelle. On est donc encore loin de disposer d'une solution commercialisable.

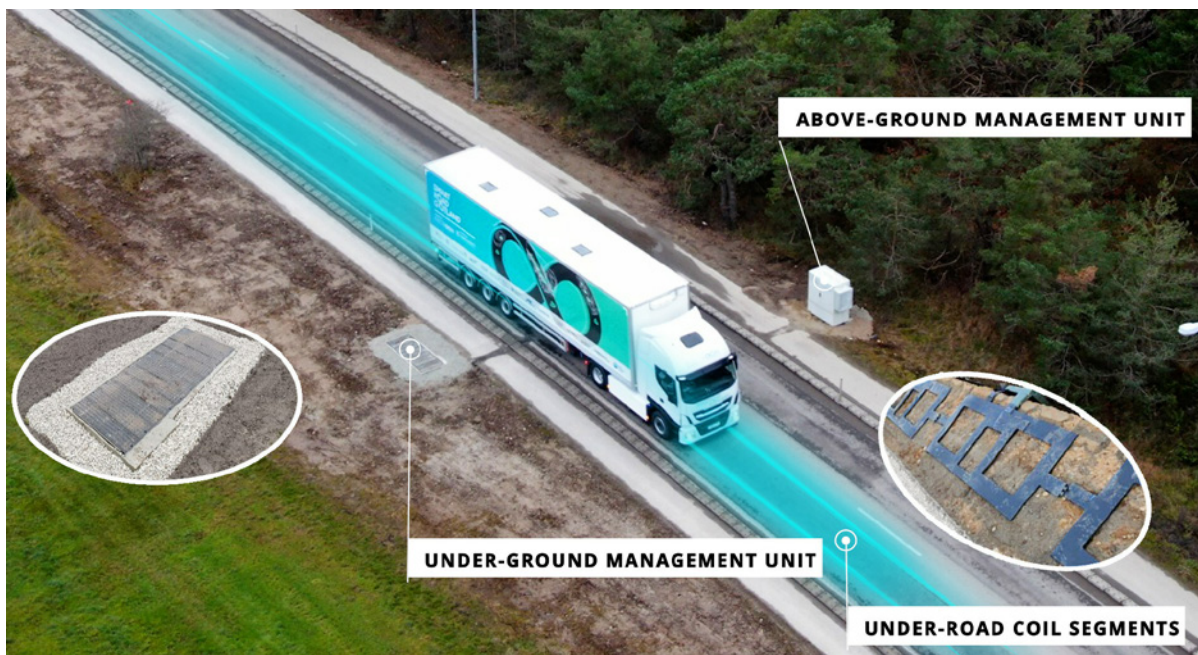


Photo 7 : Vue d'ensemble du système Electreon. Ce système sera testé dans le cadre d'une expérimentation menée avec Vinci avec le soutien de BPI France (voir annexe 3). Source : Electreon.

3

**Aspects économiques :
comparaisons avec les
solutions batteries et
hydrogène**

Sur la base des informations recueillies auprès des concepteurs de solutions et des informations fournies par les autres sociétés de l'écosystème (constructeurs de routes, électriciens...), Équilibre des Énergies a calculé le prix de revient d'un système ERS à partir des données de trafic disponibles sur les tronçons d'autoroute A7/A9 et déjà utilisées dans son étude d'octobre 2021 sur l'utilisation de l'hydrogène par les poids lourds.

Dans cette étude, Équilibre des Énergies a montré que le déploiement des infrastructures hydrogène pourrait être progressif, avec des stations de ravitaillement au départ très espacées, puis une densification du réseau de distribution couplée avec un remplacement des points de distribution simples par des stations de production.

Le déploiement du système ERS ne pourra pas être aussi progressif, même si une certaine latitude sera possible. Dès lors que les batteries des poids lourds seront conçues pour bénéficier de l'ERS, l'espace entre les tronçons équipés devra être limité. Un scénario de déploiement par tronçon (et par flottes locales et captives) semble néanmoins possible, en commençant par les tronçons prioritaires.

Hypothèses économiques sur les coûts initiaux et les coûts de maintenance

Le tableau 3 récapitule les coûts d'infrastructure (CAPEX) requis par chaque solution, en millions d'euros par km équipé pour un sens de circulation et moyennant le corps d'hypothèses qui suit.

Rail

Le système est mixte, avec une infrastructure passive importante et soumise à l'usure, mais aussi une électronique de puissance conséquente pour la mise sous tension des segments au fur et à mesure de l'arrivée du poids lourd.

La maintenance est estimée à 10 % pour tenir compte du surcoût de réfection de la chaussée tous les 15 ans.

Caténaires

Le coût de la maintenance de l'infrastructure passive représente la partie la plus importante, en raison à la fois de l'usure des caténaires par le trafic mais aussi pour tenir compte des dommages causés par des camions mal entretenus ou mal réglés, par une route non plane et par les aléas climatiques.

Le coût des travaux d'installation inclut la création de barrières de sécurité en béton tout le long des poteaux supportant les caténaires soit 225 k€/km pour chaque sens ainsi que des zones d'accès sécurisées estimées à 50 k€ tous les 2 km.

Induction

L'électronique de puissance inclut les hacheurs, estimés à 85 k€, le système de commutation pour mise sous tension des bobines et la communication véhicule/infrastructure pour la détection des véhicules quand ils arrivent sur la bobine ou sur le groupe de bobines. L'infrastructure passive comprend les bobines d'induction, les ferrites et les câbles de raccordement. La maintenance porte uniquement sur l'électronique. En effet, la perte d'une bobine ou d'un groupe de bobines pour une raison ou pour une autre ne compromettra pas le service et il n'y a pas d'intérêt économique à ouvrir la chaussée pour la remplacer.

Taux d'équipement de l'autoroute

Le taux d'équipement de l'autoroute (ratio km équipés/km totaux) a été pris à 70 %. Cela traduit le fait qu'en certains endroits, le coût ou le délai du raccordement au réseau de distribution sera prohibitif et qu'il vaut mieux ne pas équiper cette portion.

En tenant compte d'une puissance maximale transmise sur les zones équipées de 300 kW, lorsque le véhicule est sur une portion équipée – ce dont la faisabilité n'est pas acquise pour l'induction –, cela donne, compte tenu du taux d'équipement de 70 %, une puissance moyenne transmise sur l'ensemble du parcours de 210 kW, soit juste 60 kW de plus que la consommation du poids lourd à 90 km/heure sur du plat. On assure ainsi le rechargement des batteries sur la longues distances, mais pas pour les véhicules faisant un trajet régional.

Montée en charge

Le modèle retenu est basé sur l'équipement d'une seule voie de circulation dans chaque sens. Sur les tronçons où la circulation sera la plus forte, il faudra sans doute équiper deux tronçons sur la seconde partie de la concession, surtout si l'ERS équipe aussi des véhicules régionaux et des VL : sur le tronçon Valence-Orange, à l'heure de pointe, on aura plus de dix poids lourds longues distances au km.

Raccordement au réseau électrique

Pour simplifier les calculs, le modèle admet une distance standard entre deux raccordements, indépendante du trafic, de façon à assurer en moyenne un soutirage de 20 MW à l'heure de pointe par point de raccordement. La distance moyenne entre deux points de raccordement est ainsi de 11 km mais varierait dans la pratique entre 6 km et 50 km selon le tronçon et la densité des raccordements serait ajustée progressivement en fonction de la croissance du trafic.

Ces coûts sont significativement inférieurs à ceux du rapport de la DIGTM. Ils ont été communiqués aux auteurs par les industriels concepteurs des solutions.

Les coûts des équipements périphériques, comme le réseau de distribution de l'électricité ou la présence ou non de barrières de sécurité en béton, sont du même ordre de grandeur que le système principal. Par exemple, les barrières de sécurité en béton sont jugées indispensables en France si l'autoroute est équipée de caténaires, ce n'est pas le cas partout. Les expérimentations mais aussi les réglementations propres à chaque pays trancheront.

Les coûts vont évoluer à la baisse avec la maturation des systèmes et la compétition entre les acteurs, tandis que les expérimentations en grandeur réelle pourront faire apparaître des éléments qui n'ont pas été encore envisagés.

À ce stade, c'est l'ordre de grandeur qui est intéressant à retenir pour évaluer la faisabilité des solutions.

Tableau 3 : Coûts d'infrastructure par km d'autoroute, pour un sens de circulation et pour chaque technique.

en k€/km	Induction		Caténaires		Rail	
	CAPEX	Maintenance	CAPEX	Maintenance	CAPEX	Maintenance
Infrastructure passive (boucles d'induction - caténaire - rail)	150	5%	250	15 %	150	10 %
Électronique/ Equipements actifs	500	5 %	50	5 %	150	10%
Travaux d'installation (y compris les glissières de sécurité en béton)	150	-	425	-	150	-
Réseau moyenne tension	250	5 %	250	5%	250	5%
Total (k€/km)	1 050		1 025		700	

Hypothèses de financement

Conditions générales

Le calcul du financement a été basé sur l'hypothèse d'un montage financier de type concession avec un financement privé.

Le risque lié aux incertitudes sur la montée en charge du trafic et sur la maturité de la technique conduit à estimer à environ 15 % l'exigence de taux de retour sur investissement (TRI) demandé par les investisseurs. Le coût de la dette, hors inflation, est estimé à 5 % et la répartition entre fonds propres et dette à 50 % chacun. En conséquence, il a été retenu dans les calculs d'amortissement, un taux moyen de financement de 10 %.

Ces valeurs n'incluent pas les subventions que les pouvoirs publics pourraient accorder pour accélérer le déploiement de la technique. Un mix entre subvention à l'installation et subvention pour l'équipement des poids lourds permettrait à la fois d'alléger le coût de l'infrastructure mais aussi de réduire l'incertitude de la montée en charge du trafic poids lourds.

Dans l'étude d'Équilibre des Énergies sur l'hydrogène, le taux de financement avait été pris à 4,5 %, compte-tenu d'une maturité plus grande de cette solution, de l'action des pouvoirs publics pour faciliter le déploiement de l'hydrogène et de l'obligation annoncée d'installer une station hydrogène tous les 150 km sur le réseau européen TRT.

Le modèle financier reste une approximation. Il n'a pas été tenu compte des demandes des investisseurs de distribution de dividendes dès les premières années et du montage fonds propres/quasi fonds propres/dette.

Un financement de type partenariat public-privé (PPP) diminuerait largement le coût du km.

Durée d'amortissement

Le modèle fait intervenir deux durées d'amortissement comptables, alignées sur la durée de vie des équipements :

- 15 ans pour les équipements actifs et ceux liés à la couche de roulement de la chaussée.

Cette durée correspond peu ou prou à celle de l'électronique et celle de la couche de roulement de la

chaussée. Le coût de remplacement de l'électronique a été pris identique au coût initial. A fonction constante, les coûts de l'électronique baissent, mais on constate en général que les nouvelles fonctionnalités conduisent à maintenir les coûts.

- 30 ans pour ce qui est touché à la couche de structure de la chaussée, comme les bobines d'induction, les caténaires ou les alimentations pour le rail. Dans le cas de l'induction, les bobines étant installées sous la couche de roulement, elles ne seront remplacées que lors de la réfection de la couche de structure. Cela inclut les équipements et réseaux situés en accotement : barrières de sécurité en béton pour protéger des poteaux dans le cas des caténaires, massifs béton pour les poteaux des caténaires, réseau HTA d'alimentation, etc.

Pour le rail, la question reste ouverte, car cela dépend de la possibilité de refaire la couche de roulement sans retirer le rail, ou de raboter et couler la nouvelle couche de roulement à côté. Il est possible que le rail soit démonté et remonté à chaque réfection de la couche de roulement.

Pousser la durée d'amortissement à 50 ans pour des équipements qui ne seront pas impactés par la réfection de la couche de structure de la chaussée n'a qu'une faible incidence sur le prix de revient, compte tenu du modèle financier choisi.

Maintenance et entretien

Les taux de maintenance sont appliqués au capital initial. Ces taux dépendent à la fois du caractère clef de l'équipement et du risque d'usure prématurée.

L'infrastructure passive est essentielle pour les caténaires et de plus soumise à une usure importante, tandis que les boucles d'induction ne seront pas réparées si elles sont endommagées pendant la durée de la concession.

De même, si un hacheur tombe en panne dans un système à induction, l'exploitant attendra le moment opportun pour le réparer. En revanche si un commutateur tombe en panne dans un système rail, il pourra être nécessaire de le réparer relativement rapidement.

La maintenance de l'électronique a été fixée à 5 % du montant d'investissement initial, car la partie sensible n'est pas enterrée sous la route mais installée sur le côté de celle-ci.

Équipement des poids lourds

Tous les poids lourds ne seront pas équipés au premier jour. La montée en charge va dépendre du taux d'équipement des poids lourds neufs et de la durée de vie active des poids lourds.

Le coût d'équipement a été estimé à 20 k€ par poids lourd. C'est sans doute surestimé pour le rail et l'induction, mais correct pour la solution caténaire qui nécessitera un renforcement de la cabine pour supporter le double pantographe ainsi que des éléments pour monter et descendre celui-ci automatiquement.

Durée de vie des poids lourds

La durée de vie des poids lourds dans leur fonction de transport longues distances a été prise à 8 ans. Au-delà, le poids lourd thermique est supposé passer sur des trajets moins longs. La durée de vie des poids lourds électriques devrait être supérieure à celle des poids lourds thermiques, avec un remplacement des batteries à mi-vie. Cela conduira à une montée plus rapide du taux d'équipement puisque les premiers poids lourds équipés ne sortiront du parc que beaucoup plus tard. Néanmoins, l'incidence est très faible et il n'en a pas été tenu compte.

Taux d'équipement des poids lourds neufs

Le taux d'équipement des poids lourds neufs va dépendre à la fois des constructeurs et de l'appétence des transporteurs. Il sera d'autant plus fort que la confiance dans l'installation de la route électrique sera forte et que les constructeurs automobiles tiendront compte de l'existence de l'ERS en réduisant la taille des batteries dans les poids lourds.

Le modèle est calé sur un taux d'équipement final de 80 % pour les poids lourds effectuant des trajets longues distances, avec une montée en charge des poids lourds neufs progressive sur 10 ans : la première année, seuls 8 % des véhicules neufs sont adaptés à l'ERS, 16 % la seconde année.

La première année, seul 1 % du parc roulant est ainsi équipé et il faut attendre l'année 17 pour que 80 % du parc roulant soient équipés.

Il a été tenu compte d'une augmentation du trafic de 10 % entre 2001 et aujourd'hui.

Coût de l'électricité

Les coûts de l'électricité retenus sont ceux correspondants à des raccordements de 3 MW avec un tarif heures pleines pondéré hiver/été, soit 13 k€ d'abonnement mensuel par raccordement et 93,5 €/MWh.

L'étude n'a pas intégré à ce stade d'hypothèse de négociation globale qu'un opérateur d'infrastructure ERS pourrait mener avec un producteur d'électricité.

Le taux de marge commerciale est aussi appliqué sur les fournitures d'électricité, dans la mesure où il s'agit d'un service global fourni à l'utilisateur et non d'une vente d'énergie.

Application aux autoroutes A7/A9

En appliquant le modèle au trafic connu sur les autoroutes A7/A9, on obtient les résultats du tableau 4.

La solution induction est pénalisée par le coût de maintenance/remplacement de l'électronique et par le moindre taux de transfert de l'électricité.

La solution caténares est pénalisée par le coût de l'infrastructure passive qui nécessite des barrières de sécurité en béton par exemple et par son coût d'entretien.

Le prix de vente du service rendu peut être comparé aux estimations auxquelles Équilibre des Énergies était parvenue dans le cadre de son étude sur l'utilisation de l'hydrogène par les poids lourds (tableau 5).

A partir de ces éléments, en y ajoutant les coûts propres aux véhicules, il est possible d'établir un coût total de possession (TCO) rapporté à la durée de vie du véhicule pour chacune des solutions considérées (tableau 6).

L'analyse en TCO donne un avantage à la route électrique. Celle-ci bénéficie du coût réduit de l'équipement du véhicule : les batteries sont de taille limitée et l'équipement du véhicule lui-même reste relativement accessible. De plus la capacité d'emport du véhicule est identique à celle du véhicule diesel.

Tableau 4 : Données de base relatives aux segments autoroutiers A7/A9²⁶.

en €/km parcouru	Coût de l'infrastructure	Coût des fournitures d'électricité	Estimation du prix de vente du service (marge incluse)
Induction	0,19	0,20	0,48
Caténares	0,16	0,17	0,41
Rail	0,11	0,17	0,35

Tableau 5 : Estimation du prix du service rendu en 2030, en €/km, pour des trajets longues distances (> 500 km).

en €/km parcouru	Hydrogène (horizon 2030)	Batteries (horizon 2030)	Induction	Caténares	Rail
Estimation du prix de vente du service (marge incluse et hors surcoût du véhicule)	0,475	0,466	0,48	0,41	0,35

Nota 1 : Ces chiffres peuvent être rapprochés du coût équivalent du diesel soit 0,33 €/km selon l'étude hydrogène d'Équilibre des Énergies. Ils n'incluent pas le coût du péage, que l'on peut en moyenne estimer à 0,26 €/km et qui s'ajoute dans tous les cas.

Nota 2 : Si on se projette après la première période d'amortissement, lorsque l'autoroute est en réfection complète, les coûts diminueront largement : seule l'électronique et la structure passive doivent être remplacées, et le taux de financement baisse au niveau de celui retenu dans l'étude Équilibre des Énergies sur l'hydrogène.

Tableau 6 : Coût total de possession propre à chaque solution (€/km parcouru) pour les longues distances (> 500 km).

en €/km parcouru	Hydrogène (horizon 2030)	Batteries (horizon 2030)	Induction	Caténares	Rail
Coût total de possession	0,793	0,783	0,78	0,71	0,64

26. Tous les calculs ont été faits sur la base des coûts de l'énergie et des taux d'intérêts connus avant la guerre en Ukraine. Les valeurs sont données en euros constants.

Remarques sur la vitesse de déploiement

La vitesse de déploiement des solutions ERS dans le parc poids lourds peut être considérée comme élevée, comparée à la vitesse de déploiement des véhicules électriques pour lesquels il a fallu une dizaine d'années pour atteindre 1 % du parc.

Le déploiement de la mobilité électrique dans les véhicules particuliers a décollé tardivement car il a fallu investir en R&D et en industrialisation ce qui a demandé du temps. D'autre part, il a fallu attendre une pression forte de la part de la Commission européenne sur le taux d'émission moyen de CO₂ des véhicules. Mais depuis, le taux de déploiement s'est fortement accru (figure 9).

Dans le cas de l'ERS, Les poids lourds bénéficieront de la R&D des véhicules particuliers et seront déjà équipés en batteries lorsque l'ERS commencera son déploiement. Il s'agira simplement d'équiper un poids lourd d'un système de collecte différent, pas de concevoir un poids lourd de A à Z.

Hormis la solution caténaires, les premiers poids lourds seront simplement équipés d'un dispositif de collecte supplémentaire, sans diminution de la masse de la batterie. Ce n'est qu'en seconde phase qu'ils seront conçus autour de l'ERS, avec des batteries de taille réduite.

Il peut être objecté que le déploiement du véhicule électrique aura été beaucoup plus lent, mais il s'agissait à l'époque d'un départ « arrêté » à un moment où

l'offre se réduisait à la ZOE et la première TESLA, où la présence de bornes était embryonnaire et où la pression réglementaire sur les constructeurs était faible.

Le déploiement du véhicule électrique a connu une véritable accélération dès lors que ces conditions ont été remplies, comme le montrent les chiffres de l'AVERE France.

Les poids lourds bénéficieront d'un « départ lancé » avec une pénétration de l'électricité apportée par les poids lourds à batteries déjà conséquente.

Le coût du service est très sensible à la rapidité de l'adoption de la solution par les entreprises de transport. Cela tient en partie au fait que le déploiement ne peut pas être aussi progressif que celui des bornes de recharge ou des stations de recharge par hydrogène. La montée en charge porte sur le renforcement du réseau électrique, la densification des points de raccordement à RTE mais le système d'alimentation des poids lourds doit quant à lui être déployé en grande partie dès le début. L'essentiel du CAPEX est donc dépensé dès les premières années.

Il faut noter que les techniques induction et rail pourraient bénéficier d'un complément de revenu apporté par les véhicules individuels utilisant la technique.

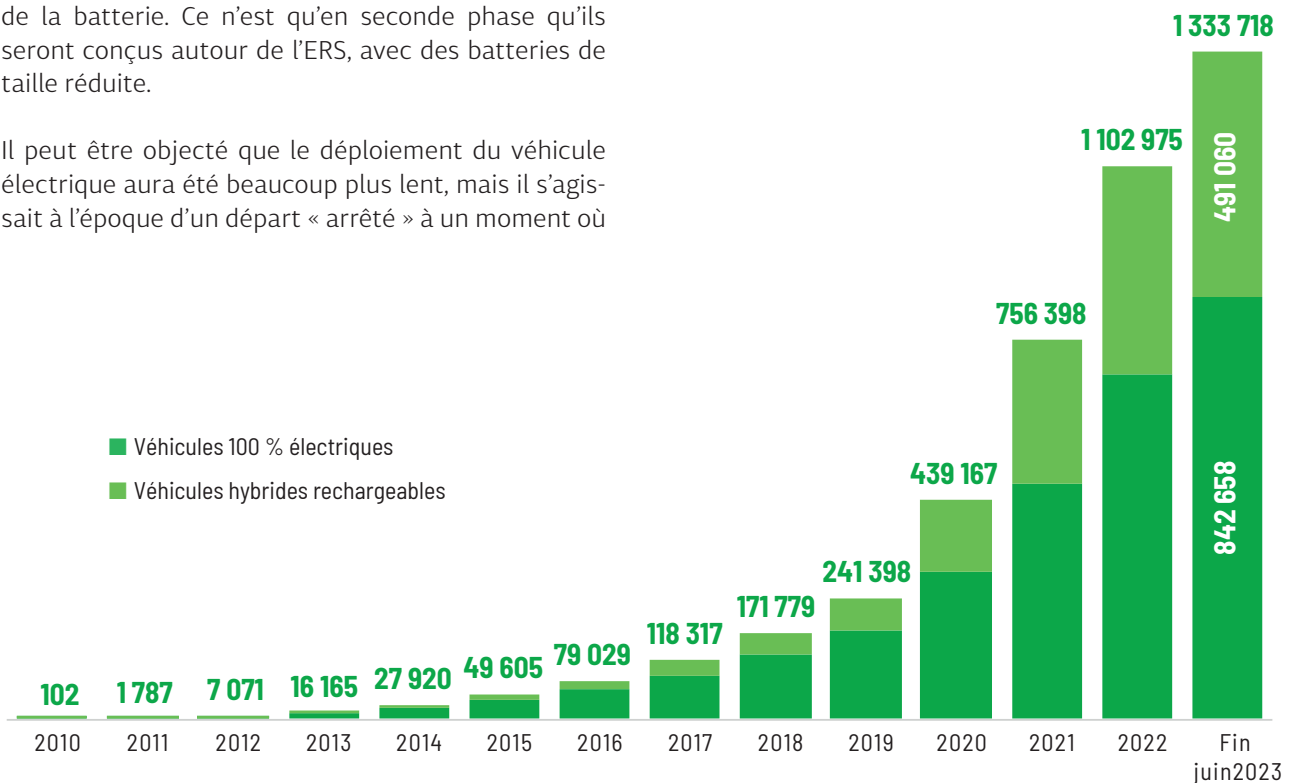


Figure 9 : Évolution du parc roulant automobile depuis janvier 2010. Source : AVERE France.

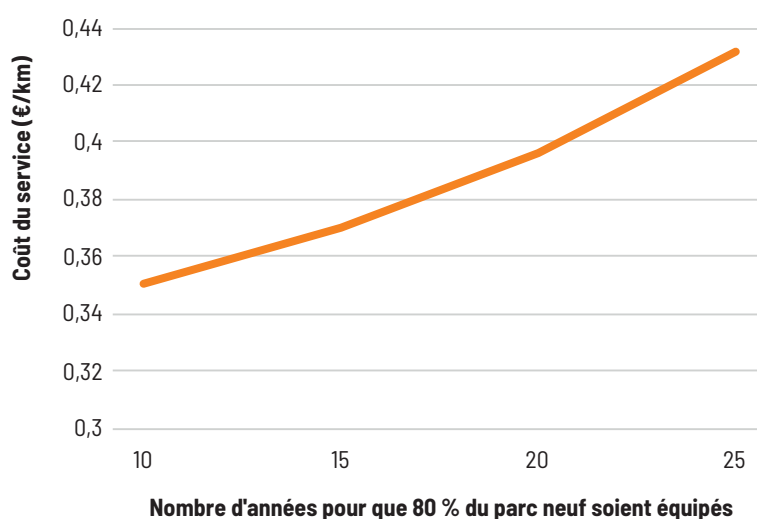


Figure 10 : Sensibilité du service à la vitesse de déploiement – Cas du rail.

A titre d'exemple, le tableau 7 montre, pour la solution rail, les différences entre différents segments du secteur A7/A9 selon le trafic qu'ils supportent.

Le tableau 7 fait apparaître un rapport de 2,3 entre la moyenne des tronçons et le tronçon non concédé. On touche-là l'un des inconvénients de l'ERS comparé aux solutions hydrogène ou poids lourds 100 % batteries : si le tronçon n'est pas suffisamment équipé pour assurer le transit, le poids lourd ne pourra pas l'utiliser, et ce quel que soit le trafic supporté, alors que l'hydrogène et les bornes de recharge peuvent être déployées plus progressivement.

Extension des calculs à d'autres configurations autoroutières

Les calculs précédents ont été faits à partir des données de trafic sur les autoroutes A7/A9 qui présentent un cas favorable car le trafic y est particulièrement important. Il est évident que sur des axes moins fréquentés l'équation sera moins favorable car, même si on peut espacer les points de raccordement au réseau de distribution ou de transport, cette économie ne s'étendra pas au réseau de distribution moyenne tension ni à l'infrastructure. Il faudra le même taux d'équipement de l'autoroute car celui-ci dépend de la capacité de la batterie du poids lourd et non du trafic.

Pour un déploiement réel, il est évident que le tronçon Lançon-Nîmes de 82 km, peu fréquenté, ne serait pas équipé. En compensation, les tronçons adjacents seraient un peu plus équipés pour permettre aux poids lourds de recharger leurs batteries.

Par contre, certaines voies express, en particulier en Bretagne, devront être équipées, même si le trafic est modéré comparé à A7/A9. Le coût du service en sera majoré d'autant.

Les calculs sur le TCO sont basés sur l'équipement des poids lourds avec une seule technique. Si l'on considère qu'il puisse y en avoir plusieurs, le coût d'équipement des poids lourds augmentera d'autant.

Tableau 7 : Comparaison des coûts et prix de vente entre les segments A7/A9 en fonction du trafic.

Tronçon	Trafic poids lourds (par jour)	Coût de l'infrastructure (en €/km)	Coût des fournitures d'électricité (en €/km)	Estimation du prix de vente du service (marge incluse) (en €/km)	Rappel montant du péage (en €/km)
Tronçon le plus chargé	13 017	0,062	0,17	0,29	0,22
Tronçon moyen	8 120	0,11	0,17	0,35	0,24
Tronçon minimal	4 840	0,17	0,17	0,42	0,33
Lançon-Nîmes	1 625	0,50	0,17	0,83	Non concédé

Sensibilité au coût de l'électricité

Les événements de 2022 ont montré que les tarifs de l'énergie ne sont pas aussi stables qu'ils ont pu l'être dans les années passées. Le coût du nucléaire historique, censé être reflété par l'ARENH, est très inférieur au coût de l'électricité qui sera produite par les EPR dont la construction est à présent envisagée et le prix du gaz, qui impacte fortement le marché de l'électricité, va continuer être soumis à des variations dans un sens ou dans l'autre en fonction d'évènements aux évolutions imprévisibles.

Les techniques utilisées ont une sensibilité très différente au coût de l'électricité. En particulier, l'hydrogène peut être produit dans des hubs alimentés en électricité d'origine nucléaire ou d'origine renouvelable. Cependant l'étude d'Équilibre des Énergies a montré que rapidement l'essentiel de la production pour le transport routier longues distances sera probablement assuré par des électrolyseurs installés localement dans les centres de distribution. Le coût de base de l'électricité pour la production d'hydrogène

ou pour la recharge des batteries en station-service ne sera pas très éloigné de celui pour l'ERS.

La solution induction est pénalisée par son moindre taux de transfert.

Cependant, il faut garder en mémoire que ces taux de transfert sont du déclaratif de la part des constructeurs. Les expérimentations permettront de mieux le mesurer.

Quel que soit le prix de l'électricité, on voit sur la figure 11 que la solution rail conserve son avantage compétitif et que, plus le prix du kWh est élevé, plus les écarts se creusent par rapport à la solution hydrogène.

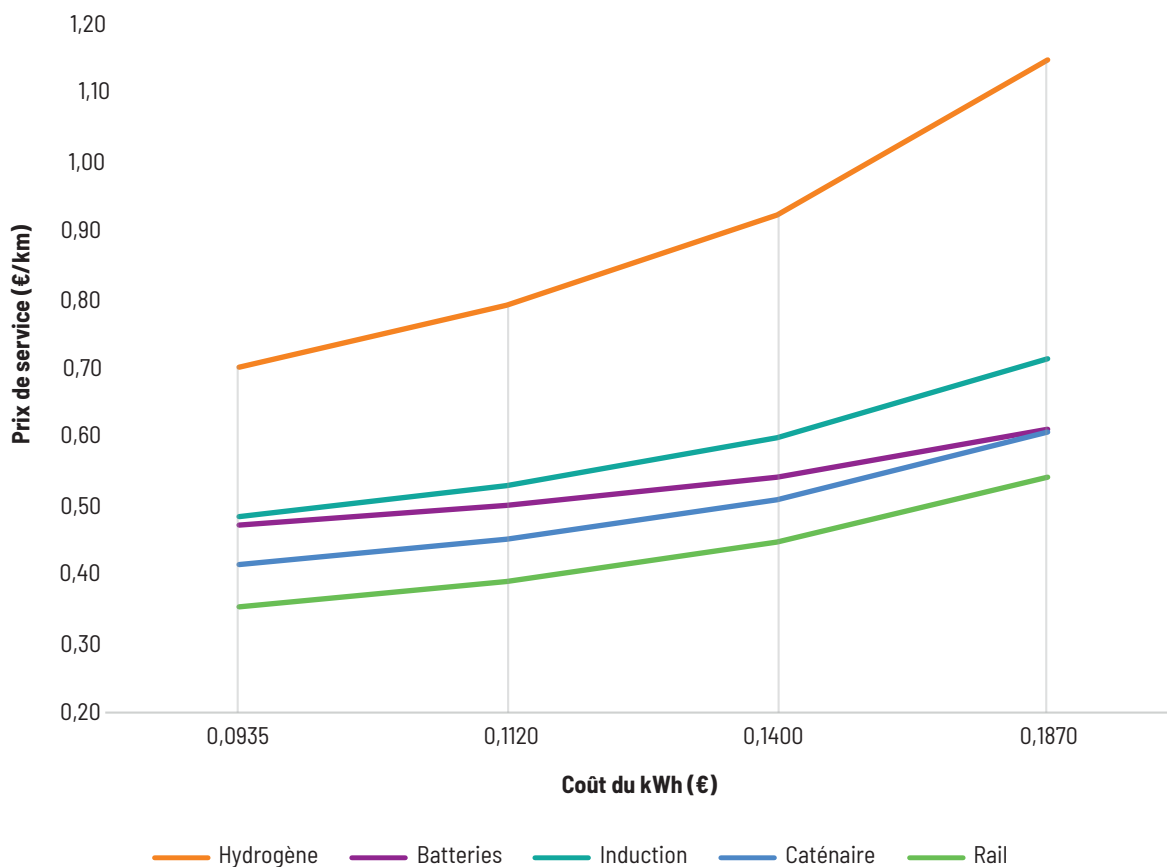


Figure 11 : Sensibilité du prix de revient au service rendu par différentes techniques au prix de l'électricité.

4

Les stratégies de déploiement de l'ERS

La problématique du déploiement

Validation et passage à l'échelle

L'étude d'Équilibre des Énergies sur l'utilisation de l'hydrogène par les poids lourds a montré que les véhicules 100 % batteries constitueront une solution satisfaisante pour les transports routiers régionaux et locaux, tant sur le plan opérationnel que sur le plan économique. Le déploiement de l'ERS pourrait leur apporter un gain environnemental en réduisant la taille des batteries. Cependant le coût d'un tel déploiement sur les routes nationales ou secondaires risque d'être beaucoup plus élevé que le coût du déploiement sur les autoroutes et le taux d'acceptation par les transporteurs risque d'être encore plus long que pour les transports longues distances, retardant d'autant la rentabilité. L'équipement des routes nationales ou secondaires en infrastructures de type ERS ne semble pas en conséquence devoir être considéré.

La route électrique concerne essentiellement les transports de marchandises ou de personnes sur longues distances et sur les autoroutes. Dans le cas des solutions rail et induction, les déplacements de véhicules particuliers peuvent être pris en considération également.

Le niveau de maturité de chacun des systèmes n'est pas équivalent. Du fait de l'expérience dans des domaines connexes, chemins de fer, tramways, métros, on peut considérer que la solution caténaire est, sur le plan technique, la plus avancée, suivie de la solution rail et de la solution induction. La preuve de concept semble quasiment acquise pour la solution caténaire mais subsiste le gros problème de la gestion des incidents et de la sécurité (accès des moyens de secours et risques induits par les poteaux supportant les caténaires). La maturité est proche d'être atteinte par la solution rail. Elle est plus éloignée pour la solution induction car sa faisabilité est subordonnée à la possibilité de transférer de façon opérationnelle à partir de chaque bobine une puissance d'au moins 50 kW. La solution induction est au niveau TRL 6 tandis que les deux autres solutions sont au niveau TRL 7.

On constate que chacune des solutions nécessite encore des tests expérimentaux qui peuvent être menés sur des tronçons d'envergure limitée sans déploiement de nature commerciale. Ces tests sont essentiels pour valider la solution dans des conditions opérationnelles. En admettant que ces tests soient positifs, l'étape suivante apparaît plus délicate car elle

implique un changement d'échelle et des investissements importants. L'équipement d'un tronçon d'une centaine de kilomètres implique un effort financier de l'ordre de 1 M€ à 2 M€/km par sens de circulation auquel il faut adjoindre le coût associé à l'adaptation d'une flotte de poids lourds significative. Adapter 500 poids lourds à l'une ou l'autre des solutions implique une dépense de l'ordre 10 millions d'euros.

Il se pose donc un problème de passage à l'échelle, rendu plus complexe par le fait que trois techniques sont en compétition sans qu'aucune ne se détache de façon claire aujourd'hui. De plus, pour chacune des techniques, plusieurs industriels ou instituts développent des systèmes concurrents non interopérables : rail avec rainures ou rail plein, fréquences et type de bobines pour l'induction, communication véhicule/infrastructure...

Le problème du choix technique

Le strict minimum pour un déploiement d'envergure en Europe sera qu'à terme les techniques déployées permettent qu'un poids lourd puisse traverser tout le territoire de l'UE sans avoir à changer de tracteur en cours de route. Il faut donc que les techniques déployées ne soient ni trop nombreuses, ni incompatibles entre elles pour qu'un poids lourd puisse, le cas échéant, si aucune technique unique ne s'est imposée, être équipé de plusieurs dispositifs de collecte. On peut par exemple imaginer un tracteur équipé de patins pour collecter l'électricité sur le rail et de pantographes pour la collecter sur les caténaires. Mais la faisabilité d'une telle coexistence reste à démontrer, tout comme l'existence de plusieurs systèmes de rails serait problématique et rappellerait les temps pas si anciens où l'écartement des voies de chemin de fer pouvait varier d'un pays à l'autre.

Ces questions de choix technique et d'interopérabilité, et d'interopérabilité s'il devait en y avoir plusieurs, seront essentielles pour rassurer les investisseurs qui financeront les infrastructures et pour sécuriser les sociétés de transport qui devront équiper leur parc et assurer un déploiement à un coût raisonnable.

Les solutions retenues devront être chacune soutenues par un écosystème d'entreprises afin de garantir la multiplicité de fournisseurs tant pour l'équipement des poids lourds que pour l'infrastructure. Elles doivent donc émerger de consortiums industriels qui les porteront ensuite vers une instance de normalisation, vraisemblablement en Europe le CEN et le CENELEC.

Cette normalisation doit recouvrir à la fois les aspects liés à la recharge comme la hauteur des caténaires, les tolérances sur les dimensions, la fréquence pour l'induction, la tension, etc. et les aspects liés au dialogue véhicule/infrastructure et à la facturation, pour garantir l'interopérabilité.

Le rôle de l'Europe

Au vu de la politique de la Commission européenne et des règles de décision, on voit mal l'Europe imposer dès maintenant, au travers de la normalisation par exemple, une seule technique sur le territoire européen. D'une part les incertitudes techniques ne sont pas levées et d'autre part les intérêts industriels divergents entre les pays vont freiner les tentatives de choix unique.

De plus les discussions avec les différents équipementiers qui ont servi de base à l'élaboration de cette étude ont montré qu'il sera probablement difficile d'imposer une seule technique.

Si aucune impulsion n'est donnée, on peut penser qu'une seule technique par famille (rail, induction, caténaire) finira quand même par s'imposer, mais cela se fera en grande partie sous la pression du marché. Compte-tenu de la compétition entre les entreprises travaillant sur ces sujets et de l'absence de dialogue, cela prendra un temps considérable et une dispersion des efforts industriels. Les expériences précédentes, telles que la compétition entre HD DVD et Blue Ray ou BetaMax et VHS, montrent que les combats entre deux techniques peuvent durer plusieurs années avant qu'un des deux consortiums ne finisse par renoncer.

Or aujourd'hui, il n'y a même pas encore de consortiums industriels constitués, mais essentiellement des startups qui se battent pour imposer leur technique en bénéficiant de soutiens nationaux.

La seule solution pour organiser et accélérer le processus est que l'Europe se saisisse du sujet, prenne le relais des initiatives nationales et impose un séquençement permettant de faire émerger la ou les meilleures techniques.

La mise en place d'une stratégie de financement s'appuyant sur les véhicules financiers mis en place par l'Europe pour le soutien des initiatives industrielles, au travers de l'*Innovation Fund* notamment, peut avoir un effet décisif. En s'alignant sur la méthode



suivie pour le développement des techniques de capture et de stockage du carbone, une solution pourrait être le financement par l'Europe d'opérations pilotes en grandeur réelle sur une distance suffisante, typiquement de 100 à 200 km, bâties en concertation avec des sociétés de transport impliquées dans les tests. Ces tests devront avoir lieu dans plusieurs pays représentatifs de différentes conditions de transport et d'exploitation des autoroutes. Ils seraient sélectionnés sur appels d'offre et comporteraient impérativement une phase d'avant-projet permettant de garantir la faisabilité des solutions.

Esquisse de planning

Compte-tenu de l'avancement de chacune des techniques et des éléments qui précèdent, le planning le plus court ne donne pas un début de déploiement à grande échelle avant 2030/2031 au plus tôt et sous réserve qu'une impulsion soit donnée tant au niveau national qu'europpéen pour accélérer les tests en grandeur réelle et faire émerger celles des techniques qui mériteront d'être généralisées.

Le séquençage pourrait être le suivant (figure 12) :

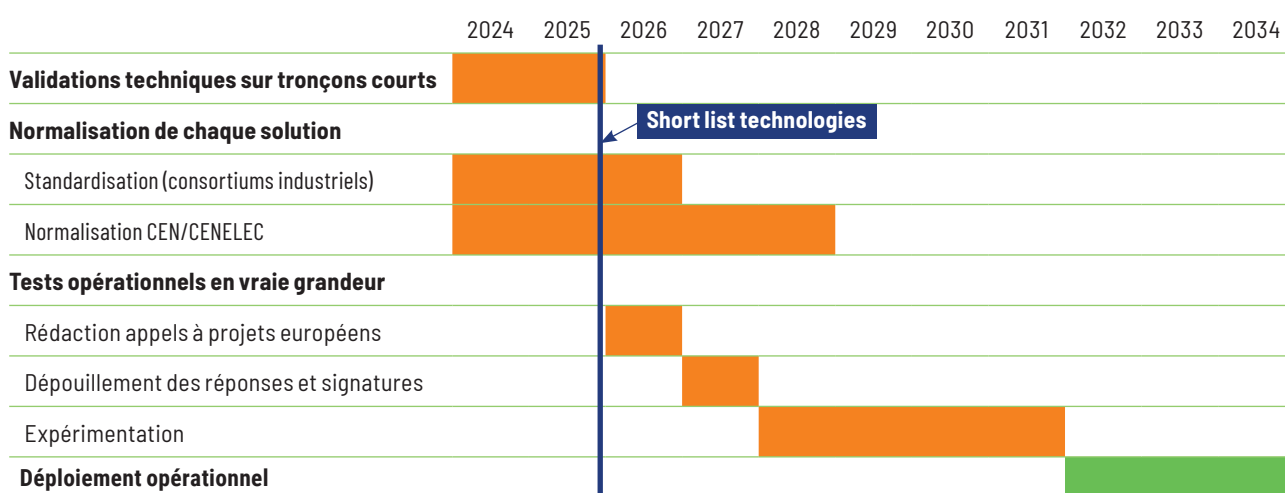
- poursuivre, au niveau national, mais avec le soutien des fonds européens destinés à la R&D (Horizon Europe), les tests unitaires et les expérimentations portant sur des distances limitées (quelques kilomètres) ;
- mettre en place au niveau européen des groupes de travail incluant équipementiers, fabricants de poids lourds, transporteurs, autoroutiers, pour préciser les spécifications des techniques présélectionnées et les proposer à la normalisation. Cette phase peut conduire à lever certaines options mais n'implique pas de choix technologiques définitifs ;

- organiser et réaliser des opérations-pilotes tests sur des longueurs significatives (portions de 100 ou 200 km), avec la participation d'utilisateurs partenaires aux opérations de test, afin de valider la ou les techniques destinées à être généraliser :
 - vérifier la faisabilité technique sur un certain volume de poids lourds et une grande longueur ;
 - valider les impacts sur la chaussée (cas du rail et de l'induction) ;
 - valider les impacts sur le fonctionnement de l'autoroute, dans des cas réels : accidents, embouteillage, pluie ou neige.

Ces opérations-pilotes devraient s'inscrire dans un cadre européen et être soutenues, comme indiqué précédemment, par l'*Innovation Fund* qui sera alimenté à partir des revenus tirés du nouvel ETS applicable aux transports et aux bâtiments. On sait que l'Allemagne s'intéresse tout particulièrement à la solution caténaire. La France pourrait proposer deux projets : l'un fondé sur le rail, l'autre sur l'induction, mais aussi, le cas échéant, tester les caténaires si des opérateurs industriels souhaitent le faire ;

- le début des déploiements à grande échelle ne pourra raisonnablement intervenir qu'une fois que les techniques mûres et normalisées auront émergé, sachant qu'il s'écoulera encore un délai important entre la décision de déploiement et le déploiement opérationnel : appels d'offre, industrialisation chez les fournisseurs, etc.

Figure 12 : Esquisse de planning du développement des techniques ERS au niveau européen.



Le choix des opérations-pilotes

Dans un contexte d'incertitude sur l'avenir de l'ERS et sur la ou les techniques qui prévaudront, le montage d'opérations-pilote sur des tronçons de 100 ou 200 km, mobilisant un nombre d'usagers suffisant, ne sera pas chose aisée. Deux cibles pourraient permettre l'émergence de projets : le ferroutage sur autoroute ou le déploiement sur une ligne à fort trafic.

Le ferroutage sur autoroute

L'idée développée par plusieurs opérateurs d'autoroute serait de développer un service de transport des remorques sur leur autoroute, ou sur un segment, en utilisant des tracteurs banalisés et mutualisés : les remorques seraient prises en charge sur une aire adaptée, attelées à un tracteur utilisation le système ERS et conduites jusqu'à une aire de restitution où elles seraient de nouveau attelées à des tracteurs conventionnels.

L'intérêt d'un tel système est de permettre le déploiement d'une solution d'ERS sur une zone restreinte sans attendre l'émergence complète d'un standard. Certaines techniques (caténaïres et rail) sont suffisamment proches du niveau de maturité requis pour que cette idée soit réalisable dans les années qui viennent et que l'équipement d'un parc de tracteurs permette de créer un début d'industrialisation dans le cadre de l'appel d'offre qui serait lancé.

Une telle solution pourrait ainsi être mise en œuvre pour réduire la pollution sur des segments spécifiques particulièrement pollués, comme la vallée de l'Arve en Haute Savoie, mais d'autres régions sont également possibles, en particulier sur A7/A9.

Les autoroutiers ont indiqué avoir reçu des marques d'intérêt réel de la part des transporteurs qu'ils ont contactés et leurs premiers modèles montrent une réelle faisabilité.

Le principal inconvénient de cette solution est sa pérennité : si les techniques qui émergeront au niveau européen se révèlent incompatibles avec la technique choisie, le système installé sera marginalisé au niveau des coûts et il faudra réinvestir pour permettre le fonctionnement avec les autres. Toutefois, cet inconvénient est atténué par le fait que les tracteurs pourraient rester affectés au service des tronçons équipés même si leur technique n'est finalement pas appelée à se généraliser.

Le second handicap est le nécessaire investissement à réaliser par le concessionnaire autoroutier : déploiement de l'infrastructure, achat du parc de tracteurs, recrutement et formation des chauffeurs. Un soutien européen ou national sera indispensable.

Déploiement sur une ligne à fort trafic

Les sociétés de transport fonctionnent en partie avec la notion de lignes. Cela ouvre la possibilité de déployer l'ERS sur un segment limité mais suffisamment long pour être significatif et d'inviter les transporteurs intéressés à adapter une partie de leur parc de tracteurs ou de remorques.

En France, un segment tel que Paris-Orléans représenterait un bon candidat : longueur raisonnable, existence de clients pour les transporteurs aux deux extrémités du segment, présence de sociétés de transport opérant sur cette ligne spécifique. Là aussi, les autoroutiers ont reçu des marques d'intérêt réel.

5

Conclusions

L'ERS présente un intérêt certain pour parvenir à la décarbonation des transports de marchandises. Il est clair cependant qu'elle ne pourra émerger qu'en seconde phase, après le déploiement en première phase de poids lourds équipés à 100 % avec des batteries. Cette seconde phase pourrait coïncider avec le calendrier du projet de règlement modifiant le règlement (UE) 2019/1242 en ce qui concerne le renforcement des normes de performance en matière d'émissions de CO₂ pour les nouveaux véhicules lourds et visant à parvenir à un taux minimal de décarbonation de 90 % en 2040.

La faisabilité technique de l'ERS n'est pas très loin d'être démontrée. Parmi les trois techniques, les solutions caténaires et rail sont les plus avancées, mais la solution induction offre des avantages potentiels intéressants, en particulier la transparence pour les autres usagers de la route. Au stade actuel, aucune solution ne peut être éliminée.

La prochaine étape pour chacune d'entre elles est de vérifier le fonctionnement dans des conditions opérationnelles de dimensions réduites au départ puis plus importantes pour vérifier qu'elles tiennent leurs promesses et valider leur viabilité en conditions réelles. Ce sera aussi un moyen de départager ces techniques entre elles.

Les équations économique et financière de la route électrique se présentent plutôt mieux que celles des solutions alternatives sur longs parcours qu'Équilibre des Énergies a précédemment étudiées, solution 100 % batteries et solution hydrogène.

Certes, ces techniques concurrentes ont un degré de maturité plus avancé que les techniques ERS et une meilleure progressivité dans la montée en charge. Elles vont donc disposer d'un laps de temps significatif pour se déployer.

Néanmoins l'ERS présente aussi l'avantage d'être facilement maîtrisable par des acteurs européens et offre des bénéfices potentiels importants en économie de ressources rares (cobalt et autres métaux critiques pour les batteries, platine pour les piles à combustible et les électrolyseurs), un impact réduit sur le réseau électrique dû au profil de soutirage et un rendement de la chaîne quasiment aussi performant que celui des batteries, donc une consommation d'électricité réduite.

C'est une technique complémentaire de celle des batteries, qui peut venir étendre l'écosystème des solutions de mobilité électrique.

Équilibre des Énergies estime donc souhaitable de poursuivre les efforts sur l'ERS tant au niveau national qu'au niveau européen.

Au niveau national

Équilibre des Énergies recommande que la France soit présente dans le processus de développement des filières ERS et que des tests soient poursuivis ou mis en place pour lever les incertitudes qui pèsent encore sur le fonctionnement en conditions opérationnelles, pour acquérir le savoir-faire et participer à la qualification d'une ou plusieurs techniques dans les conditions d'exploitation rencontrées sur le territoire (climat, modèle financier...).

L'ambition doit être de mettre en place, dans un premier temps, deux ou trois tests sur des tronçons opérationnels, avec quelques dizaines de poids lourds équipés sur au moins deux autoroutes concédées ou non et de tester rails, induction et éventuellement caténaires. L'appel à projets lancé en 2022, dont les résultats ont été dévoilés en 2023, répond à cet objectif. Il permettra de réaliser trois expérimentations (annexe 3).

Au niveau européen

C'est au niveau européen que les choix finaux devront être faits afin de parvenir à une infrastructure européenne d'ERS cohérente, fondée sur une technique unique ou à défaut sur des techniques suffisamment interoperables pour permettre la libre circulation des camions dans l'espace européen.

Équilibre des Énergies recommande de porter au niveau de la Commission européenne l'idée de lancer, à partir de 2026, dans le cadre de l'*Innovation Fund*, des appels à projets visant à la réalisation d'opérations-pilotes sur des tronçons de 100 à 200 km dans des zones où un trafic suffisant de poids lourds équipés pourra être mobilisé. Chaque opération, précédée d'un avant-projet détaillé destiné à en assurer la validité, associerait des industriels fournisseurs d'infrastructures et des constructeurs de poids lourds. Les tronçons équipés devraient être répartis sur un ensemble de pays représentatifs de l'Union européenne avec des sociétés de transport longues distances utilisant ces lignes ainsi constituées.

Le montant des subventions européennes tournerait aux alentours de 100 à 150 M€ par projet avec le dixième devant être alloué à une phase d'avant-projet détaillé.

En parallèle, et sans attendre les conclusions qui se dégageront vers 2030 de ces opérations-pilotes à grande échelle, les travaux de normalisation de chacune de ces solutions devraient être accélérés afin d'éviter une dispersion des spécifications à l'intérieur même de chaque technique.



© AdobeStock

6

Annexes

Annexe 1

Les projets ERS dans le monde

France

Une feuille de route nationale + des appels d'offres en cours pour tester les techniques.

Royaume-Uni

Un ERS à caténaires près de Glasgow + des plans de développement plus large.

Suède

Deux projets de démonstration + un appel d'offres pour la première section commerciale de 21 km.

Allemagne

Deux clusters avec caténaires, plusieurs projets en cours sur l'induction.

Etats-Unis

Focus sur le développement de l'ERS à induction (seule technique retenue dans les plans de Jo Biden ; fin des projets caténaires aux Etats-Unis) – R&D sur l'induction à haute puissance, plusieurs sites de test. De plus en plus de projets (tous les projets sont à induction) :

- Detroit (Michigan) : pilote de recharge à induction.
- ASPIRE : Indiana DOT.
- ASPIRE : Utah Inland Port, Utah.
- ASPIRE : Florida Turnpike, Floride.
- SunTrax Facility ERS Pilot, Central Florida Expressway (CFX).

Italie

Boucle à induction de 1 km pour teste sur autoroute.

Israël – Un ERS à induction près de Tel Aviv + des plans pour l'équipement de 200 bus.

Inde

Projet d'ERS entre Delhi and Mumbai, 250 km.

Détail des projets américains

Detroit In-Road Electric Charging Pilot à Detroit, Michigan

- Cas d'usage statique et dynamique.
- Chaussée d'un mile de recharge dynamique.
- Accord entre Electreon and Michigan DOT pour développer et mettre en œuvre un système de recharge sans fil accessible au public extensible au-delà du projet d'un mile.
- Phase 1 : Q3 2023 ; Phase 2 : Q3 2024.

ASPIRE²⁷, Indiana DOT, Michigan

- Banc de test à West Lafayette (In) de 400 m, avec l'université Purdue.
- 220 kW, test de recharge dynamique en trois phases.
- Démarrage de la construction au printemps 2023.

ASPIRE Utah Inland Port Authority, Utah

- Salt Lake City, UT avec l'Université d'Utah.
- Les fournisseurs de technique n'ont pas encore été choisis.
- Subvention de 15 M\$ de l'Etat d'Utah pour démontrer le potentiel de la mobilité électrique appliquée au fret afin d'améliorer la qualité de l'air.
- Le projet va se focaliser sur le transport des containers depuis la gare de l'Union Pacific Project à Salt Lake City vers des entrepôts locaux.

ASPIRE, Florida Turnpike, Floride

SunTrax Facility ERS Pilot, Central Florida Expressway (CFX)

- Puissance variable de 11 kW à 200 kW.
- Coût : 10 M\$ - Nouveau tronçon d'autoroute de 5 miles avec une chaussée de 1 200 mètres électrifiée.
- Construction de la chaussée avec installation des dalles en 2025.
- Ouverture prévue de la chaussée au début de l'année 2026.

27. ASPIRE : Advanced Sustainability through Powered Infrastructure for Roadway Electrification.

Annexe 2

Coûts d'investissement des ERS

	Durée d'amortissement (années)	Induction		Caténaires		Rail	
		CAPEX	Maintenance	CAPEX	Maintenance	CAPEX	Maintenance
Coût infrastructure passive/km sur un sens	30	150 000 €	5 %	250 000 €	15 %	150 000 €	5 %
Coûts annexes (barrières de sécurité...).	30			225 000 €			
Coût des travaux + enrobé /km sur un sens de circulation	30	150 000 €		250 000 €		150 000 €	
Coût électronique de puissance un boîtier de 1 000 € pour deux antennes de 1 m chacune	15	500 000 €	10 %	50 000 €	5 %	150 000 €	10 %
Coût réseau moyenne tension et sous-stations	30	250 000 €	5 %	250 000 €	5 %	250 000 €	5 %
Taux d'équipement (km équipés/km totaux)		70 %		70 %		70 %	
Taux de transfert de l'électricité		80 %		95 %		95 %	
Total		1 050 000 €	0 €	1 025 000 €	0 €	700 000 €	0 €

Annexe 3

Projets retenus en 2023 dans le cadre de l'appel à projets du gouvernement français et sélectionnés par BPI France

	Charge as you drive	RED4Fret Equans	E-Road Mont Blanc
Partenaires	<ul style="list-style-type: none"> • Vinci Autoroutes • Vinci Construction • Université Gustave Eiffel • Cerema • Hutchinson • Elonroad • Electreon 		<ul style="list-style-type: none"> • Alstom • GREENMOT-Drive Innovation • FAAR-PRONERGY • Mersen • Université Gustave Eiffel • ATMB (Autoroutes et Tunnel du Mont Blanc)
Objectif	Tester la recharge dynamique sur rail conducteur (Elonroad) et sur induction sur une autoroute ouverte à la circulation	<ul style="list-style-type: none"> • Tester la recharge dynamique sur caténaire sur une autoroute ouverte à la circulation • Un test prévu dans l'est de la France 	<ul style="list-style-type: none"> • Tester la recharge dynamique sur rail conducteur (Alstom) sur une autoroute ouverte à la circulation
Essais	<ul style="list-style-type: none"> • Des essais préalables sur piste fermée au CEREMA • Deux tronçons de 2 km sur A10 • Un tronçon induction Electreon (un poids lourd 40 t et un bus) • Un tronçon rail Elonroad 	<ul style="list-style-type: none"> • Un test prévu dans l'est de la France • 2 km équipés avec deux véhicules hybrides caténaires/batteries 	<ul style="list-style-type: none"> • Des essais dès mi-2024 sur piste fermée à Transpolis (500 m) • Installation ensuite sur 1 km sur la RN 205 (mi 2025) • VUL, un car et un camion 40 t
Durée	3 ans	Le dossier est en cours de contractualisation (attendue T4 2023) car le projet a été déposé en janvier 2023	
Budget	26 M€		

Annexe 4

Rappel sur la définition des TRL

Description

1

Principes de base observés et rapportés

Plus bas niveau de maturité technologique. La recherche scientifique commence à se traduire en recherche appliquée et développement. Les exemples peuvent inclure des études papiers des propriétés de base d'une technique.

2

Concepts ou applications de la technique formulés

L'invention débute. Une fois les principes de base observés, les applications pratiques peuvent être inventées. L'application est spéculative et il n'y a aucune preuve ou analyse détaillée pour étayer cette hypothèse. Les exemples sont toujours limités à des études papier.

3

Fonction critique analysée et expérimentée ou preuve caractéristique du concept

Une recherche et développement active est initiée. Ceci inclut des études analytiques et des études en laboratoire afin de valider physiquement les prévisions analytiques des éléments séparés de la . Les exemples incluent des composants qui ne sont pas encore intégrés ou représentatifs.

4

Validation en laboratoire du composant ou de l'artefact produit

Les composants technologiques de base sont intégrés afin d'établir que toutes les parties fonctionnent ensemble. C'est une "basse fidélité" comparée au système final. Les exemples incluent l'intégration 'ad hoc' du matériel en laboratoire.

5

Validation dans un environnement significatif du composant ou de l'artefact produit

La fidélité de la s'accroît significativement. Les composants technologiques basiques sont intégrés avec des éléments raisonnablement réalistes afin que la soit testée dans un environnement simulé. Les exemples incluent l'intégration 'haute fidélité' en laboratoire des composants.

6

Démonstration du modèle système/sous-système ou du prototype dans un environnement significatif

Le modèle ou le système prototype représentatif (bien au-delà de l'artefact testé en TRL 5) est testé dans un environnement significatif. Il représente une avancée majeure dans la maturité démontrée d'une . Les exemples incluent le test d'un prototype dans un laboratoire "haute fidélité" ou dans un environnement opérationnel simulé.

7

Démonstration du système prototype en environnement opérationnel

Prototype dans un système planifié (ou sur le point de l'être). Représente une avancée majeure par rapport à TRL 6, nécessitant la démonstration d'un système prototype dans un environnement opérationnel, tel qu'un avion, véhicule... Les exemples incluent le test du prototype sur un avion d'essai.

8

Système réel complet qualifié à travers des tests et des démonstrations

La preuve a été apportée que la technologie fonctionne sous sa forme finale et avec les conditions attendues. Dans la plupart des cas, cette TRL représente la fin du développement de vrais systèmes. Les exemples incluent des tests de développement et l'évaluation du système afin de déterminer s'il respecte les spécifications du design.

9

Système réel prouvé à travers des opérations/missions réussies

Application réelle de la sous sa forme finale et en conditions de mission, semblables à celles rencontrées lors de tests opérationnels et d'évaluation. Dans tous les cas, c'est la fin des derniers aspects de corrections de problèmes (bug fixing) du développement de vrais systèmes. Les exemples incluent l'utilisation du système sous conditions de mission opérationnelle.



Association loi de 1901 Équilibre des Énergies
10, rue Jean Goujon - 75008 Paris - France
T. +33 (0)1 53 20 13 70
info@equilibredesenergies.org

equilibredesenergies.org

