



Potentiel de décarbonation du TRM via l'hybridation et l'efficacité aérodynamique des semi-remorques en France

Louis-Pierre Geffray (IMT) et Roland Schaumann (Ian Motion)

L'année 2025 marque des avancées majeures pour la décarbonation des poids lourds avec une période de clarification technologique et l'arrivée de nouveaux véhicules électriques plus performants permettant de disposer d'autonomie routière de 600 km à 40 t, sans recharge intermédiaire. Malgré ces progrès technologiques menés en parallèle d'efforts continus sur les pratiques, notamment en termes d'écoconduite, les réductions d'émission projetées à date par le SGPE en 2030 pour le transport de marchandises en France sont moitié moindres que celles à atteindre pour respecter les objectifs français¹. Ce constat incite donc à s'intéresser à de nouveaux leviers, additionnels, pour accélérer la réduction des émissions du transports routiers. Ce *Policy Brief* souhaite donc démontrer à la fois la pertinence de déployer des déflecteurs aérodynamiques sur les ensembles routiers et de doter les semi-remorques de systèmes d'hybridation non rechargeables à batterie pour réduire la consommation en carburant des tracteurs routiers. Pour cela, des analyses technico-économiques ont été réalisées. Ce policy brief conclut sur des gains économiques et environnementaux significatifs.

L'analyse s'appuie sur une série d'auditions d'acteurs clés de la filière ainsi que sur l'expertise de l'entreprise Ian Motion quant au dimensionnement et développement de solutions d'électrification.

¹ SGPE, Transport : synthèse de la mise en œuvre du plan mars 2024, en ligne : <https://www.info.gouv.fr/upload/media/content/5/09/0001dadd629747febad088d92fdc7c990844354914c.pdf>

MESSAGES CLÉS

L'installation de déflecteurs latéraux à l'extrémité arrière des semi-remorques permet d'atteindre un potentiel de réduction de consommation d'au moins 0,9 l/100 km. La généralisation de tels systèmes sur 150 000 remorques du pavillon français (43 % du parc) permettrait une réduction des émissions de 0,4 MtCO₂ pour une durée d'amortissement de seulement 2 à 3 ans. Ces systèmes apporteraient, en outre, un gain de compétitivité de 0,65 point par semi-remorque équipée.

Le développement d'une solution d'hybridation légère électrique non rechargeable sur les remorques présente le potentiel d'une réduction

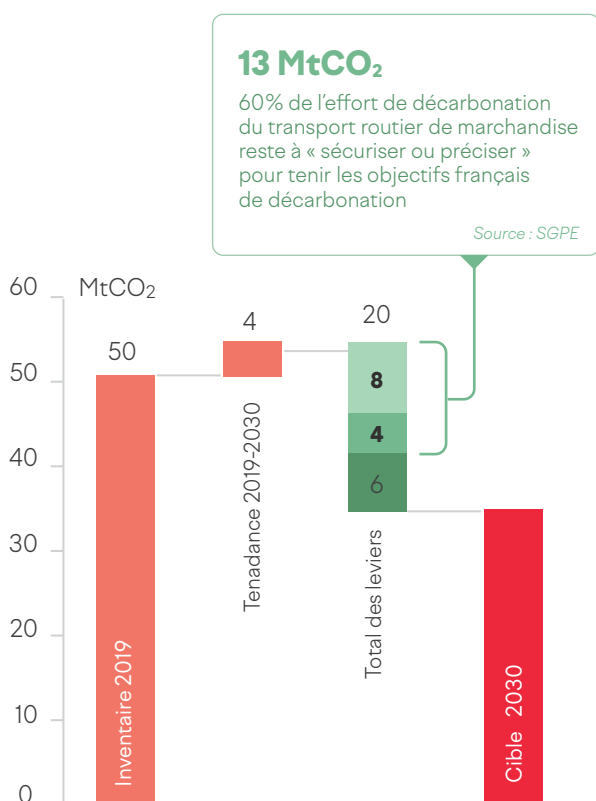
de consommation d'au moins 10 % sur un parcours routier en usage régional. Ce système déployé sur 10 % des semi-remorques en circulation en 2030 permettrait une réduction directe des émissions du pavillon français d'environ 0,3 MtCO₂ ; additionnelle aux déflecteurs. L'amortissement pourrait être opéré en 5 ans avec une aide d'état de 7 k€ pour un coût initial estimé à 29 k€. Une telle solution doit être perçue comme l'opportunité de développer un projet industriel français, mutualisé entre acteurs carrossiers comme brique technologique permettant de répondre à l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de CO₂ de -10 %¹ pour les semi-remorques en 2030 par rapport à 2025.

¹ Standards CO₂ poids lourds, en ligne, page 50 : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401610

CONTEXTE ET ENJEUX

En France, la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) définit des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans différents secteurs avec pour ambition la neutralité carbone en 2050. Le secteur des transports, et plus particulièrement le secteur du transport de marchandises, se voit ainsi attribuer des objectifs propres permettant de sécuriser les cibles françaises à 2030. Selon le SGPE, le transport terrestre de marchandise doit ainsi viser un objectif de 34 MtCO₂ à cet horizon, soit une baisse de 32 % des émissions sur une décennie (relativement aux 50 MtCO₂ émis en 2019)².

FIGURE 1. Émissions du transport routier de marchandise en France



Les données récentes rendent possible un état d'avancement de la décarbonation des poids lourds en France. Les compilations de l'IMT sur la base du SDES permettent ainsi de calculer que les poids lourds du pavillon français ont consommé 8,65 millions de m³ de diesel B7 en 2019 contre 8,16 millions en 2023 ; soit une baisse de 5,7 % dont 1 point de pourcentage est lié à la baisse de la demande (veh.km). Ce chiffre est

² SGPE, Transport : synthèse de la mise en œuvre du plan mars 2024, en ligne : <https://www.info.gouv.fr/upload/media/content/5/09/0001dadd629747febad088d92fdc7c990844354914c.pdf>

conservateur puisqu'il exclut la croissance forte du B100, comptant pour environ 0,27 millions de m³ additionnels en 2023³. Un carburant pour lequel une précédente étude de l'IMT a, par ailleurs, démontré que le potentiel de décarbonation en France est à relativiser très nettement, compte tenu d'effets de vase communiquant avec le B7⁴.

Dans ce contexte, et malgré une électrification forte des immatriculations neuves de poids lourds à attendre dans les prochaines années, il est incontestable que les objectifs de décarbonation français ne seront pas atteints sans efforts supplémentaires. L'IMT a donc souhaité objectiver la performance environnementale et économique de leviers complémentaires de décarbonation des poids lourds. Les deux leviers ici analysés se concentrent sur les remorques des tracteurs routiers⁵. Ils visent à en améliorer la performance aérodynamique et à récupérer l'énergie dissipée au freinage. Concrètement, l'étude propose d'installer aux extrémités arrières des remorques – compatibles – des déflecteurs aérodynamiques et d'ajouter sur les remorques neuves une motorisation électrique à batterie jouant le rôle d'hybridation, en soutien à la motorisation du tracteur routier.

Alors que le secteur du transport routier pâti depuis la mi-2023 d'une faible demande en répercussion du contexte économique, cette analyse souhaite objectiver la valeur ajoutée des solutions proposées pour permettre aux transporteurs routiers d'accroître leur compétitivité. Rappelons que le poste de dépense en carburant d'un semi-remorque représente au minimum de l'ordre de 25 % du prix de revient d'une prestation de transport. Une réduction de consommation de 4 % permet donc 1 % de compétitivité supplémentaire dans un secteur où la marge opérationnelle est réduite à quelques points de pourcentage seulement. La consommation des véhicules est ainsi d'ordre 1 sur le résultat des entreprises de transport.

³ SGPE, en ligne : https://www.linkedin.com/posts/fr%C3%A9d%C3%A9rik-jobert509-ba4139_zoom-fiscalit%C3%A9-du-carburant-b-100activity-7--7285029465846382593V?utm_source=share&utm_medium=member_desktop

⁴ IMT, Biocarburant de première génération dans le transport routier : mieux comprendre les dynamiques à l'œuvre et les enjeux à venir, en ligne : <https://institut-mobilites-en-transition.org/publications/biocarburant-de1-re-generation-dans-le-transport-routier-mieux-comprendre-les-dynamiques-a-loeuvre-et-les-enjeux-a-venir/>

⁵ Rappelons que les tracteurs routiers représentent au sein des poids lourds du pavillon français 86 % des t. km, 69 % des veh. km et de l'ordre de 82 % des émissions de CO₂, IMT, en ligne : https://institut-mobilites-en-transition.org/wp-content/uploads/07/2024/IMT_PL_2024.pdf

1. MÉTHODOLOGIE ET SUPPORT

Pour ce travail, l'IMT s'est appuyé sur un partenaire : l'entreprise lan Motion, spécialisée en conception et production de systèmes électriques à batterie pour différentes applications. Les connaissances de lan Motion correspondent aux besoins de l'étude avec, notamment, une connaissance fine des enjeux techniques, économiques et réglementaires liés à l'électrification de véhicules ou engins off-road.

Pour étudier les deux leviers de décarbonation, notre démarche a consisté à :

- évaluer le potentiel de réduction de la consommation d'un tracteur routier s'il est équipé d'une remorque avec déflecteurs aérodynamiques ou doté d'une hybridation électrique ;
- estimer le surcoût des systèmes et de leur amortissement possible par l'exploitant ;
- étudier le contexte réglementaire et évaluer les mesures nécessaires au déploiement de tels systèmes
- décrire les conditions de mise en œuvre et de déploiement en France.

Plus précisément, la démarche suivie pour l'évaluation du potentiel de réduction de la consommation des tracteurs routiers a consisté à :

- déterminer une loi de route sur la base de valeurs de coefficients de résistance aérodynamique et de valeurs de résistance au roulement issues d'une publication de l'ICCT qui synthétise les valeurs les plus récentes de la plupart des constructeurs européens ;
- considérer différents profils de vitesse VECTO, correspondant aux cycles normatifs réglementaires employés pour quantifier la consommation d'énergie des poids lourds et cela, pour des usages urbains, régionaux et long-courriers ;
- sur la base de ces profils de vitesse et de la loi de route précédemment déterminée, calculer la consommation d'un poids lourd à moteur thermique doté d'une remorque sans déflecteurs aérodynamiques et sans assistance électrique et ainsi vérifier la cohérence des résultats avec les ordres de grandeur connus de consommation des poids lourds en opération réelle ;
- intégrer les deux leviers étudiés dans la simulation pour estimer les réductions de consommation à attendre et donc les réductions d'émissions de CO₂ associées ;
- dimensionner techniquement les solutions en considération d'un équilibre maximisant la performance économique tout en intégrant des critères minimum de durabilité ;
- quantifier les prix de revient et de vente des systèmes dimensionnés ;
- établir le bilan économique des solutions et calculer leur durée d'amortissement dans le cadre fiscal français ;

- analyser les enjeux réglementaires fortement dimensionnant ou les freins à lever.

La suite de l'exposé reprend ces principaux jalons méthodologiques et expose les résultats obtenus.

2. DÉFINITION D'UNE LOI DE ROUTE ET VÉRIFICATION DU MODÈLE

La première étape de l'analyse consiste à créer un modèle de simulation permettant de reconstituer les consommations en carburant des poids lourds routiers selon leur performance intrinsèque, leur usage routier et leur charge embarquée. Ce travail est confié à lan Motion qui s'appuie sur ses connaissances propres et la littérature scientifique. Après plusieurs itérations, il est retenu un véhicule semi-remorque au S.Cx de 5,0 et à la consommation spécifique de 190g/ kWh ; valeur équivalente à un rendement moteur moyen de 44,5 %. Ce niveau de performance se veut représentatif des générations de tracteurs routiers commercialisés en 2024.

Les profils de vitesse considérés reprennent les standards établis dans la réglementation européenne et sont constitués par les cycles VECTO⁶ poids lourds. Ces données d'entrée visent à reproduire l'usage d'un poids lourd dans différentes conditions. Elles renseignent sur la vitesse et le dénivelé en fonction du temps pour des parcours urbains, régionaux, et long-courriers. La figure 2 illustre le profil de vitesse retenu pour un usage régional.

Finalement, les lois de route établies permettent de simuler et de définir des consommations de référence pour un poids lourd 100 % thermique diesel. Les résultats obtenus sont, à dire d'experts du secteur, suffisamment proches de la réalité pour valider le modèle mis au point. Le tableau 1 présente ces résultats en fonction du type de parcours et du taux de charge.

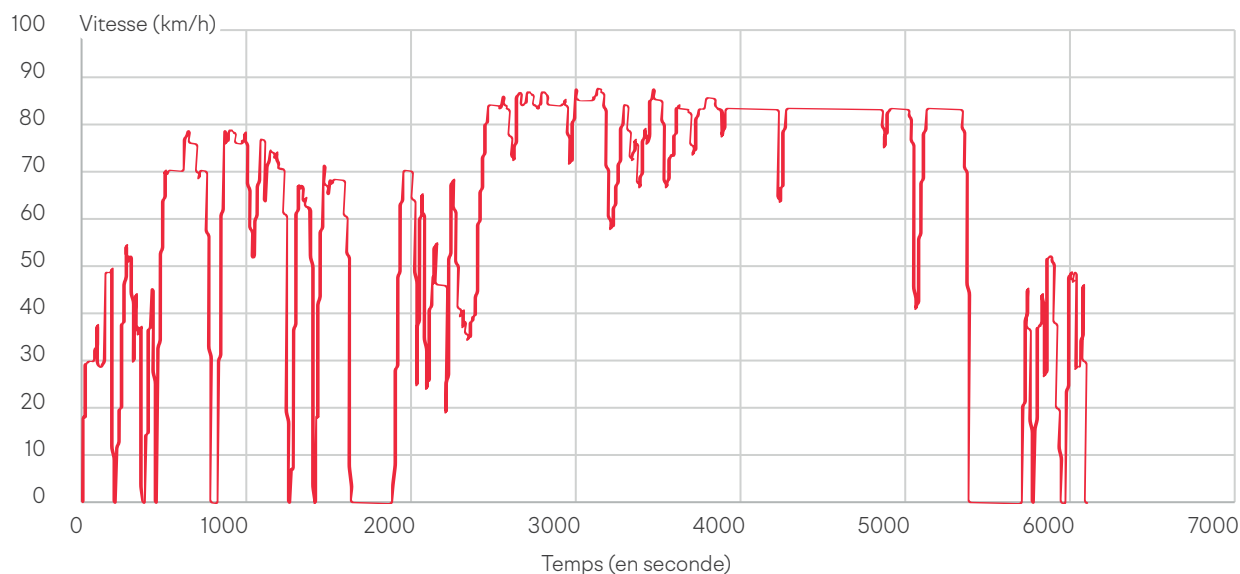
TABLEAU 1. Consommations de référence considérées pour un poids lourd diesel

Taux de charge	87 %	50 %	10 %
Poids moyen	40,1 t	29,0 t	17,0 t
Régional	34,4 l/100 km	26,6 l/100 km	18,2 l/100 km
Long-courrier	30,1 l/100 km	24,1 l/100 km	17,8 l/100 km

Note : la très faible proportion de semi-remorques opérant exclusivement en zone urbaine amène à ne pas considérer le cycle urbain dans nos travaux

6 VECTO : « Vehicle Energy Consumption Calculation Tool », est l'outil de simulation de référence introduit par le cadre réglementaire européen pour simuler les émissions des poids lourds et remorques sur la base des variables fournies par les constructeurs

FIGURE 2. Loi de route VECTO poids lourds pour un usage régional



3. PREMIER LEVIER : DÉFLECTEURS AÉRODYNAMIQUES

Les 10 dernières années ont marqué des progrès significatifs sur la performance aérodynamique des tracteurs routiers vendus en Europe et en France. Les déflecteurs de toit se sont généralisés dans un nombre élevé d'activités de transport, suivis plus récemment par le développement de carénages latéraux. De manière additionnelle à ces équipements optionnels, les fabricants de poids lourds présentent depuis quelques mois des refontes importantes concernant l'architecture même des cabines de leurs véhicules permettant de réduire les consommations de -3% à -5% par rapport à la référence de 2020. Ces progrès sont permis par de nouvelles réglementations en termes de dimensions et se traduisent à titre d'exemple par la gamme de Volvo FH Aero⁷ et la nouvelle cabine des Mercedes Actros E et Actros L. Ces améliorations sont d'autant plus décisives sur les variantes à motorisation électrique pour lesquelles elles permettent d'allonger sensiblement l'autonomie.

L'inventaire de ces progrès amène donc à considérer que les efforts d'investissement ont été réalisés par les constructeurs de poids lourds, sous contraintes des règlements CO₂, et que la marge technique d'amélioration encore disponible est très faible sur les véhicules neufs. À ce jour, l'installation de dispositifs aérodynamiques sur les tracteurs routier est même encouragée par l'État

français via une fiche CEE standardisée⁸. Finalement, en ce qui concerne les leviers de politique publique, la variable d'ajustement restant à disposition sur les tracteurs routiers consisterait à obliger les acteurs à recourir aux variantes les plus performantes aérodynamiquement. Cette éventualité n'est pas retenue plus longuement au regard des forts taux de pénétration déjà atteints pour les tracteurs routiers disposant de ces innovations. Nous considérons que les tracteurs routiers neufs non équipés à ce jour, le sont pour des contraintes d'usages et terrains induites par des applications spécifiques.

Toutefois, les systèmes permettant d'améliorer la performance aérodynamique des remorques sont peu déployés à l'échelle du marché français comme européen. La performance environnementale d'un ensemble routier reste ainsi quasi-exclusivement l'apanage du tracteur routier. Pourtant, l'ajout de déflecteurs arrières latéraux sur une remorque permettrait de réduire le S.Cx de l'ensemble de l'ordre de 15%. Fort de l'outil de simulation développé dans le cadre de ce policy brief, il est possible de déduire qu'une telle amélioration permettrait une baisse de la consommation de carburant de -2,2% en usage régional à 40,1t de poids moyen, soit -0,9l/100 km. Ces résultats reflètent les estimations communiquées par les acteurs commercialisant ce type de solution, à l'image du Groupe Pommier qui évoque une baisse de -2,5%⁹. La réduction obtenue est

⁷ Volvo Trucks, FH Aero, en ligne : <https://www.volvotrucks.fr/fr-fr/trucks/models/volvo-fh-aero.html>

⁸ ADEME, fiche TRA-EQ115-, véhicule de transport de marchandise optimisé, en ligne : <https://calculateur-cee.ademe.fr/pdf/display/80/TRA-EQ115->

⁹ Groupe Pommier, déflecteurs aérodynamiques arrières, Airwin, en ligne : https://www.pommier.eu/sites/default/files/pim/files/DOCUMENTATIONS/LEAFLETS/FP1000_FR/fp1057_AIRWIN_FR.20%BD.pdf

FIGURE 3. Système de déflecteur aérodynamique Airwin développé par l'entreprise Pommier



relativement invariante de la charge du poids lourds et logiquement d'autant plus élevée que l'usage tend vers un parcours autoroutier. À la vitesse maximale autorisée sur autoroute de 90 km/h, la réduction de consommation atteint même -5,9 % soit -1,7 l/100 km pour un poids lourds circulant à mi-charge (29 t). Notons qu'une telle routine d'usage n'est pas si rare, dans le transport frigorifique notamment.

TABLEAU 2. Réductions de consommation à attendre par l'usage de déflecteur aérodynamique sur semi-remorque

Taux de charge	87 %	50 %	10 %
Poids moyen	40,t	29,0 t	17,0 t
Régional	-0,9 l/100 km	-0,9 l/100 km	-0,1 l/100 km
Long-courrier	-1,3 l/100 km	-1,3 l/100 km	-1,3 l/100 km
Vitesse constante 90 km/h	-1,5 l/100 km	-1,7 l/100 km	-1,7 l/100 km

Sur 1,2 million de kilomètres, les émissions directes de CO₂ évitées à l'usage grâce au dispositif aérodynamique testé seraient comprises entre 30 tCO₂ et 40 tCO₂ par semi-remorque roulant au diesel B7 selon l'usage, régional ou long routier. Par ailleurs, les auditions menées ont permis de conclure que le coût unitaire de tels dispositifs est finalement très réduit : 3k euros pour une paire de déflecteurs arrières. Si l'on considère un kilométrage annuel moyen de 100 000 km, ces innovations pourraient alors être amorties en 2 à 3 années seulement. Par ailleurs, ce coût doit être mis en regard du prix de vente des remorques neuves bâchées ou à température dirigée oscillant respectivement entre 35 000 et 70 000 euros. Ces constats interrogent donc sur le non-développement à date de ces solutions. Les éventuelles contraintes opérationnelles induites ne semblent pas justifier le

constat dressé ; une frilosité des acteurs vis-à-vis de l'entretien et des questions relative au vieillissement des dispositifs pourrait être un frein. Sans être conclusif sur ces questions, un travail d'explication et d'information doit être imaginé, à l'initiative des pouvoirs publics, pour la diffusion de ces innovations. Enfin, nous l'avons vu, alors que les tracteurs neufs disposent déjà majoritairement de déflecteurs aérodynamiques, la fiche CEE existante au niveau français pourrait être revue pour encourager l'équipement prioritaire des remorques. Il pourrait également être opportun de réfléchir à l'obligation d'installer de tels dispositifs sur les remorques compatibles qu'elles soient neuves ou roulantes dans le parc (par exemple celles âgées de moins de 5 ans). Un réel travail de conduite du changement doit être mené auprès des acteurs et fédérations alors que ces innovations existent déjà depuis de très nombreuses années. Renault Trucks a présenté un concept reprenant ces éléments, il y a plus de 10 ans maintenant¹⁰.

Ces propositions ne constituent finalement qu'une anticipation des évolutions à venir. En effet, à l'horizon de quelques années, ces solutions aérodynamiques devraient se généraliser sur les remorques neuves puisque les standards CO₂ poids lourds imposent une baisse de l'impact carbone des remorques de 10 % en 2030 par rapport à 2025¹¹. Dans un schéma relativement volontariste où ces innovations seraient déployées dès à présent, il est alors raisonnable de penser que les déflecteurs aérodynamiques pourraient être déployés sur 70 % du parc de remorques compatibles circulant en France d'ici 2030. En prenant une hypothèse conservatrice de 60 % de remorques compatibles et alors que le SDES nous informe sur un parc d'environ 350k unités, le potentiel d'ici 5 ans se chiffre à 150k remorques à équiper. Sur la base de ce volume de véhicules et d'un kilométrage annuel moyen de 100 000 km, il est possible d'estimer une baisse des émissions de CO₂ de 0,4 MtCO₂ par an en 2030 grâce à ces dispositifs. Cette réduction de CO₂ est équivalente à la mise à la route d'environ 180 000 voitures particulières électriques.

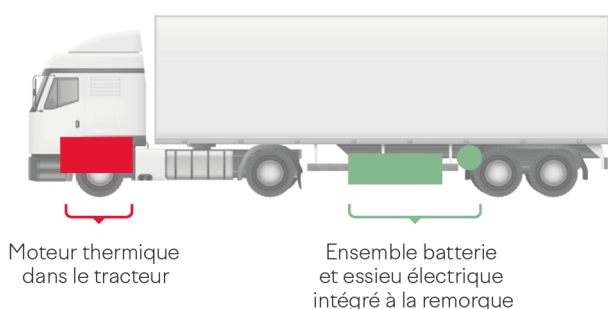
4. SECOND LEVIER : HYBRIDATION ÉLECTRIQUE À BATTERIE

Les poids lourds modernes disposent de différents systèmes de freinage permettant d'assurer une sécurité optimale tout autant qu'une moindre usure des organes mécaniques. En ce sens, le parc roulant dispose pour une

¹⁰ Renault Trucks, projet optifuel lab 2, en ligne : <https://www.youtube.com/watch?v=3zh3ccgyU6w>

¹¹ Standards CO₂ poids lourds, en ligne, page 50 : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401610

FIGURE 4. Schéma descriptif de la solution hybride testée



part importante de systèmes de freinage additionnels aux freins mécaniques. Les systèmes employés – freins sur échappement, freins à résistance électrique ou freins hydromécaniques – visent à convertir l'énergie cinétique en chaleur et à l'évacuer efficacement. À l'exception des poids lourds électriques capables de recharger leur batterie au freinage, l'énergie cinétique des poids lourds thermiques (diesel, biodiesel, HVO, gaz, biogaz) est donc systématiquement perdue. Cette section présente une brique technologique nouvelle, positionnée sur la remorque, capable de récupérer cette énergie au freinage pour la restituer à l'accélération et ainsi diminuer la consommation du tracteur routier. Le système fait appel à une batterie électrique de faible capacité. Le système s'apparente ainsi à une solution d'hybridation légère non-rechargeable, que la figure 4 schématise.

Dans le but de quantifier les réductions de consommation permises par un tel système, le dispositif est intégré aux lois de route précédemment établies. Certaines contraintes sont intégrées au calcul, notamment :

- la demande de couple réalisée par le conducteur est scindée en deux demandes distinctes, la première à destination du moteur thermique et la seconde à destination du moteur électrique ;
- la demande de couple faite au moteur électrique ne peut par ailleurs pas excéder le couple maximum du moteur électrique ;
- l'état de charge de la batterie doit être le même au départ et à l'arrivée

Une fois ces conditions établies, le paramétrage technique de la solution est affiné avec pour objectif de trouver le meilleur compromis entre un coût de revient minimisé et des économies de carburant maximisées. Pour cela, un optimum technique est recherché entre le potentiel maximal de récupération d'énergie au freinage (influant sur la taille de la batterie et la puissance du groupe moteur électrique) et la baisse de consommation sur cycle régional.

Finalement, les caractéristiques du système retenu sont les suivantes :

- batterie d'une capacité brute de 32 kWh ;

- groupe motopropulseur électrique d'une puissance de 140 kW ;
- pour minimiser le coût de la solution et sa complexité, le système n'est pas rechargeable – aucun apport extérieur d'énergie, autre que le freinage, n'est envisagé.

La masse du système est estimée, au premier ordre, à 1500 kg soit une surcharge de 1300 kg par rapport à un essieu classique non électrifié. Cet alourdissement, bien réel, ne remet pas en question la diffusion du mécanisme. En effet, la surcharge serait très majoritairement portée par les essieux de la remorque n'engendrant qu'une contrainte marginale sur la limitation en charge de l'essieu moteur du tracteur routier thermique. Par ailleurs, une dérogation au poids roulant maximal autorisé pourrait être instruite à l'image de celles en vigueur pour les dispositifs de freinage additionnels qui bénéficient d'un abattement de 500 kg¹².

Le travail de sensibilité mené pour l'étude nous amène finalement à considérer une capacité nette de 29 kWh et une plage de SOC¹³ utile de 20 % centrée sur 50 % de niveau de charge. Ces choix de dimensionnement engendrent le recours à des batteries Li-ion aux performances de durabilité élevées. En effet, plusieurs dizaines de milliers de cycles devront être atteints pour parvenir à une durée de vie supérieure à 1 millions de kilomètres. Un travail important de développement et de test en vieillissement devra permettre d'identifier les typologies de batterie permettant de répondre à ce cahier des charges, sans pour autant que de difficultés structurelles émergent à ce stade. Le système ainsi défini, permet alors d'atteindre les économies de carburant présentées dans le tableau 3.

TABEAU 3. Réduction de consommation à attendre par l'apport du système d'hybridation

Taux de charge	87 %	50 %	10 %
Poids moyen	40,1 t	29,0 t	17,0 t
Régional	-4 l/100 km	-3 l/100 km	-1,6 l/100 km
Long-courrier	-1,9 l/100 km	-1,5 l/100 km	-0,8 l/100 km

La réduction de consommation est ainsi de 11,5 % en usage régional à 40 t soit près de 130 t CO₂ évitées sur 1,2 million de kilomètres. Une performance qui compense très largement les émissions liées à la fabrication du système (+6 t CO₂)¹⁴.

¹² Article R4-312 du code de la route, en ligne : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074228/LEGISCTA000006177084/?utm_source=chatgpt.com

¹³ SOC : state of charge, niveau de charge de la batterie

¹⁴ L'empreinte carbone de la batterie utilisée pour le calcul du bilan carbone est de 100 kg CO₂/kWh

5. CONSIDÉRATIONS ÉCONOMIQUES DE LA SOLUTION D'HYBRIDATION

Après avoir clairement démontré les intérêts environnementaux d'une hybridation légère sur semi-remorque, il est proposé d'approfondir les enjeux économiques pour le déploiement d'un tel système. Pour cela, lan Motion et l'IMT ont cherché à définir le prix de vente du système d'une part, et sa durée d'amortissement dans un cadre d'usage et fiscal donné au regard des économies de carburant attendues.

5.1 Prix de vente du système

La définition du prix de vente estimé du système proposé s'est appuyée sur un inventaire précis des composants. Puis, grâce à une dizaine d'interview auprès d'acteurs spécialisés à l'échelle européenne comme internationale, lan Motion a estimé le prix de revient des composants selon des hypothèses de sourcing et de volumes. Enfin, l'expérience en propre de l'entreprise a permis d'apprécier le temps additionnel de main d'œuvre pour la fabrication et le montage d'une unité hybride sur une semi-remorque classique.

Les principaux coûts considérés et leurs hypothèses associées sont présentées dans le tableau 4.

TABLEAU 4. Coût estimé d'achat des composants des composants

	Prix unitaire HT (€)	Quantité (-)	Prix HT (€)	Origine	Autre
Essieu/pont électrifié monté	9 500	1	9 500	CH	Pour 100 pièces
Pack batterie monté	200	32	6 400	EU	Pour 3 200 pièces unitaires
Unité de distribution d'énergie	1 000	1	1 000	EU	Pour 100 pièces
Faisceau de puissance	750	1	750	EU	Pour 100 pièces
Faisceau signal	500	1	500	EU	Pour 100 pièces
Supervision	300	1	300	EU	Pour 100 pièces
DCDC	400	1	400	EU	Pour 100 pièces
Autre	1 000	1	1 000	EU	Pour 100 pièces
TOTAL			19 850	EU	

Note : la catégorie autre inclue notamment le prix du capital.

Au coût d'achat des composants, s'ajoute les coûts de main d'œuvre estimés à 2 250 €/veh et la marge du fabricant fixée à 30 %, soit 6 750 €. Dans ces conditions, le coût du système optionnel lors de l'achat d'une remorque est évalué à 29 k€ HT. Ce prix de vente associe une marge importante justifiée par le caractère fini du marché adressé. En effet, puisque le nombre de semi-remorque à équiper est limité dans le temps – du fait de l'électrification des poids lourds (disposant par nature d'un système équivalent de récupération d'énergie) –, il est considéré que les acteurs économiques s'engageant dans le développement d'un tel système doivent pouvoir dégager une marge bénéficiaire dès les premiers exemplaires commercialisés. Il est par ailleurs à noter qu'un volume critique de quelques centaines de pièces est à atteindre pour être en mesure de proposer ce prix de vente.

5.2 Viabilité économique dans le contexte fiscal et de prix de l'énergie en France

Parallèlement, un scénario d'évolution du prix du gazole routier destiné au transport de marchandises en France est développé pour juger du retour sur investissement du système. Le scénario intègre les dispositifs fiscaux inscrits dans la loi française, notamment la fin du remboursement partiel de TICPE en 2030. À l'inverse, et dans une démarche conservatrice pour les besoins de la simulation, la transposition du mécanisme ETS2 est considérée comme neutre sur le prix du diesel en France ; compensée par une baisse équivalente d'accise sur le diesel¹⁵. Le tableau 5 présente l'évolution du prix du litre de gazole, dans ces conditions, lorsqu'il est destiné au transport routier de marchandises.

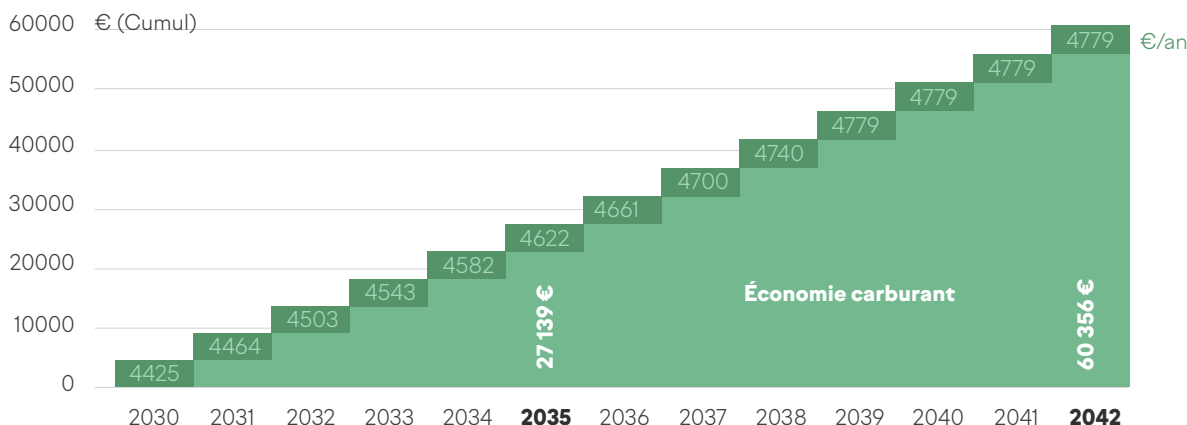
TABLEAU 5. Évolution du prix du gazole TRM français considéré dans l'étude

	€/l		€/l
2025	1,405	2030	1,405
2026	1,198	2031	1,417
2028	1,223	2032	1,43
2028	1,223	2033	1,442
2028	1,223	2034	1,455
2029	1,235	2035	1,467

Note : le prix HTT du gazole est considéré en augmentation linéaire de 1,6 %/an comparable à l'évolution moyenne observée sur les 10 dernières années en France. L'évolution à la hausse du prix du diesel TRM observée en 2030 est lié à la suppression du remboursement partiel de TICPE en France.

¹⁵ Notons que ce choix de simulation permettrait, en outre, au pavillon français de réduire de 4c€/l l'écart de compétitivité du diesel français par rapport au pavillon espagnol. L'application du mécanisme ETS2 en Espagne, dans l'hypothèse d'un prix à €45/t de CO₂ ne pouvant être complètement amorti par une baisse de fiscalité en Espagne.

FIGURE 5. Amortissement de la solution d'hybridation



Selon les hypothèses retenues, nous pouvons mettre en exergue la capacité d'amortissement du système hybride en fonction des années d'opération. La simulation présentée ci-après considère une mise en opération en 2030 même si de premiers exemplaires pourraient être mis à la route en 2028. Cette hypothèse est retenue pour représenter le business case d'un part importante des volumes (considérant une montée en cadence des productions). Finalement, les conditions fiscales et de prix de l'énergie à partir de 2030, associées au surcoût de la remorque laissent alors envisager un amortissement sur 6 ans. Cette durée peut sembler importante dans l'univers des tracteurs routiers où les flottes sont usuellement renouvelées tous les 4 ans. Pour autant, elle est faible au regard de la durée de détention classique des remorques comprise entre 10 et 20 ans. Les équations environnementales comme économiques semblent donc réunies. L'amortissement de la solution en moins de 5 années, souvent mise en avant par les acteurs interrogés, supposerait un soutien public à l'achat. Le mécanisme des certificats d'économie d'énergie pourrait être mis à contribution dans cet objectif. La bonification, restant à définir, devrait alors viser une aide unitaire à l'achat de 7k€ par dispositif. Le cas échéant, cette solution hybride pourrait être encouragée via des conditions avantageuses d'amortissement comptable.

5.3 Enjeux réglementaires

Alors que des prototypes de remorques électrifiées sont en test en Europe, des évolutions réglementaires sont en cours d'instruction pour favoriser le développement de ces nouvelles solutions de transport. À titre d'exemple, la réglementation UN ECE R100 couvre à présent la sécurité des batteries pour les catégories O, autrement dit les remorques de poids lourds. Toutefois, d'autres enjeux importants restent à lever. Notamment, il conviendra à l'avenir de disposer d'un cadre clair pour statuer d'un canal de communication standardisé entre

le tracteur routier et la remorque. Ceci pour proscrire toute accélération non désirée et ainsi éviter le risque de « mise en portefeuille¹⁶ » des ensembles routiers équipée d'une solution hybride. Cet élément soulève des enjeux et discussions importantes sur la nécessité de revoir le règlement de l'ONU n°13 lié au freinage ainsi que d'établir des prescriptions en termes d'attelage et de communication avec le véhicule tracteur, dans le cadre du règlement de l'ONU n°55. Les auditions menées ont permis également d'identifier l'existence d'un standard d'échange d'information numérique entre les tracteurs et leurs remorques, la norme ISO 11992-2¹⁷. Tout développement futur devra s'atteler à l'analyse fine de ces différents cadres réglementaires ou standards internationaux.

Face aux questions soulevées et à leur relative complexité, les discussions entre les autorités semblent s'orienter vers une traction limitée à seulement 25 km/h. L'IMT souhaite alerter sur le fait que ce scénario rendrait alors caduque tout développement. En effet, dans ce cas de figure, les économies de carburant en cycle régional seraient limitées à seulement 0,4 %.

Enfin, il est à noter que l'outil de simulation VECTO-trailer permettant de juger de la performance environnementale des remorques n'intègre pas, dans son éventail de solutions à date, l'éventualité d'un apport de traction par la remorque, puisque ces dernières sont jusqu'à présent définies comme des véhicules non moteur. Si les freins réglementaires sont levés, il conviendra alors de requalifier l'outil VECTO-trailer pour intégrer la possibilité

¹⁶ Pour un véhicule articulé, il s'agit du fait de se trouver à un angle aigu, causant une immobilisation, un accident.

¹⁷ Norme ISO 2-11992, Échange d'informations numériques sur les connexions électriques entre véhicules tracteurs et véhicules tractés – partie 2 : couche d'application pour les équipements de freinage et les organes roulant, en ligne : <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/iso1199222023-/vehicules-routiers-echange-dinformations-numeriques-sur-les-connexions-elec/xs343395/141415>

d'une hybridation et ainsi stimuler la demande du côté de l'offre de remorque.

5.4 Conditions de réussite d'un développement en France

Cette analyse de l'IMT apparaît dans un contexte où le constructeur allemand Krone a présenté un concept de remorque électrifiée, rechargeable cette fois, avec une capacité batterie supérieure à 300 kWh. Ce démonstrateur vise davantage à assurer une extension d'autonomie routière aux tracteurs électriques plutôt qu'une baisse de la consommation de tracteurs routiers thermiques. Toutefois, les briques technologiques en cours de développement outre-rhin laissent possible le développement d'une solution plus légère et moins onéreuse, semblable à celle présentée dans ce policy brief. Pour des questions de savoir-faire technologique comme industriel, il s'agit donc à l'échelle française de se doter d'un groupe d'acteurs intéressés pour développer une telle solution d'hybridation. Le prix de vente recherché (29k€) laisse peu de place pour le développement d'une solution basée sur des organes commercialisés par des distributeurs indépendants. Par conséquent, pour que le développement d'une telle solution puisse être un succès en France, il semble nécessaire du point de vue de l'IMT et de lan Motion :

- qu'un acteur unique soit en capacité d'intégrer verticalement le plus d'éléments possible du système ; ou bien ;
- qu'un projet d'intérêt commun soit développé par un groupement d'acteurs clés.

La solution envisagée constitue un réel projet industriel qui comporte nécessairement des phases de développement, mise au point, validation, homologation, production, service après-vente. Le déploiement de cette solution représente donc un réel défi technique, économique et organisationnel. Il conviendra donc, dans un cas comme dans l'autre, d'anticiper ces sujets au mieux en intelligence partagée au sein de la filière française des véhicules industriels et des carrossiers constructeurs. Une implication de l'État français en soutien et en coordination à un tel projet serait un élément d'assurance important.

CONCLUSION

La diffusion de déflecteurs aérodynamiques sur les remorques de poids lourds est un levier majeur de réduction des émissions de CO₂ pour le transport routier de marchandises à très court terme. Au regard du temps d'amortissement de cette solution, compris entre 2 et 3 ans, son déploiement peut s'opérer sur les immatriculations neuves mais également sur le parc roulant. Ce constat ne fait que démultiplier les réductions d'émissions potentielles. L'IMT estime qu'un travail de sensibilisation auprès des acteurs de la filière doit être mené pour la généralisation de ces systèmes tant d'un point de vue environnemental qu'au regard de l'opportunité importante procurée en termes de compétitivité pour les transporteurs routiers.

Parallèlement, le développement d'un système d'hybridation léger non rechargeable pour les remorques de poids lourds offre une opportunité concrète de développement industriel en France au profit de la filière dans son ensemble. Les temporalités mises en évidence dans l'étude, notamment une viabilité de la solution assurée à partir de 2030, appellent dès à présent à la mise sur pied d'un groupe d'intérêt commun pour le développement de cette solution en vue de sa commercialisation d'ici quelques années. Cette solution se positionne comme un complément additionnel et parallèle aux efforts en cours pour l'électrification du transport routier. La réussite du projet dépendra toutefois du maintien du cadre réglementaire sur les émissions de CO₂ des semi-remorques et d'une mobilisation coordonnée des acteurs publics et privés. En réunissant les conditions propices, la France pourrait se positionner aux avant-postes dans cette innovation technologique.

Geffray, L.-P., et Schaumann, R. (2025). Potentiel de décarbonation du TRM via l'hybridation et l'efficacité aérodynamique des semi-remorques en France. *Policy Brief* N°01/25, IMT.

CONTACT
louis pierre.geffray@sciencespo.fr

Institut des mobilités en transition
41, rue du Four – 75006 Paris – France

institut-mobilites-en-transition.org