



HAL
open science

Comment réduire les émissions de CO₂ du transport de fret en France ?

Martin Koning, Cécilia Cruz, Christophe Rizet

► **To cite this version:**

Martin Koning, Cécilia Cruz, Christophe Rizet. Comment réduire les émissions de CO₂ du transport de fret en France ?. *Les Cahiers Scientifiques du Transport / Scientific Papers in Transportation*, 2018, 73 | 2018, pp.45-76. 10.46298/cst.12172 . hal-04153732

HAL Id: hal-04153732

<https://hal.science/hal-04153732v1>

Submitted on 6 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

**COMMENT RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE CO₂
DU TRANSPORT DE FRET EN FRANCE ?
ÉVALUATION SOCIO-ÉCONOMIQUE
DE TROIS POLITIQUES PUBLIQUES**

MARTIN KONING
IFSTTAR-SPLOTT
UNIVERSITÉ PARIS EST

CÉCILIA CRUZ
UMR 6049 THÉMA
UNIV. BOURGOGNE
FRANCHE-COMTÉ

CHRISTOPHE RIZET
IFSTTAR-DEST
UNIVERSITÉ PARIS EST

1. INTRODUCTION¹

Afin de contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique et respecter ses engagements internationaux, la France souhaite diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2050 par rapport au niveau de 1990. Dans cette optique, la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) a fixé

¹ Cet article prolonge un contrat de recherche réalisé pour le MEEM (RIZET et alii, 2017). Nous tenons donc à remercier O. GAVAUD et son équipe à la DGITM pour leur soutien. Par ailleurs, H.T. TU-THI, J. NG YUK SHING et M.C. MORENO SERNA ont apporté leur aide pour certains pans de cette analyse. Qu'ils en soient remerciés. Nous tenons également à saluer l'éditeur des Cahiers Scientifiques des Transports ainsi que les deux rapporteurs anonymes pour leurs remarques pertinentes.

un objectif de réduction des GES à différents horizons, avec une répartition indicative par grands secteurs d'activité. Le transport de voyageurs et de marchandises représentait en 2013 près de 28 % des émissions nationales². L'objectif énoncé dans la SNBC pour ce secteur est donc très ambitieux puisqu'il vise à réduire les émissions de GES des transports (136 MtCO₂ en 2013) de 35 MtCO₂ à l'horizon du troisième « budget carbone » (2024-2028), soit une baisse d'un peu plus de 25 % par rapport à 2013 (MEDDE, 2016). A plus long terme, la cible est encore supérieure et nécessite d'obtenir une réduction des émissions de 62 Mt en 2050, soit -70 % par rapport à 2013.

Il est notable que ces objectifs de réduction de GES ne sont pas clairement répartis entre transport de voyageurs et transport de marchandises. De plus, la SNBC ne détaille pas les mesures à prendre, ni leurs impacts respectifs, tout au plus des indications sur les mesures envisagées sont-elles indiquées. Pour le transport routier de marchandises (TRM), la baisse des émissions de GES proviendrait ainsi d'une hausse du taux de chargement des poids lourds (PL), du « découplage » entre croissance économique et transport de fret, d'une efficacité énergétique des véhicules accrue, de la réduction de l'intensité carbone des énergies (biocarburants, hydrogène, gaz naturel..) ou encore du report modal (promotion de l'intermodalité notamment)³.

Malgré ces pistes d'améliorations, les projections tendanciennes de long terme sur la demande de transport récemment réalisées par le MEEDD (POCHEZ et alii, 2016) ne permettent pas d'atteindre pleinement les objectifs affichés. Il apparaît donc nécessaire de mettre en œuvre des politiques publiques volontaristes pour parvenir à des résultats plus probants. Dans un contexte de raréfaction des fonds publics, il semble par ailleurs primordial d'évaluer l'efficacité réelle des différentes options envisagées, ainsi que leurs coûts pour les acteurs privés, l'État ou la collectivité.

Cet article présente une évaluation socio-économique de trois politiques publiques visant à réduire les émissions de CO₂ du TRM en France :

- . Le déploiement d'un système de caténaires sur les autoroutes concédées afin que des PL hybrides puissent s'y fournir en électricité (mesure PLH) ;
- . La construction sur le réseau routier national de stations d'avitaille-

² Les émissions de GES du transport proviennent majoritairement de la route (92 %). Si les émissions du secteur des transports ont augmenté de 20 % entre 1990 et 2004, elles ont ensuite baissé pour atteindre, en 2013, un niveau 12 % supérieur à celui de 1990.

³ Les politiques de transfert modal menées depuis trente ans n'ont pas permis de freiner la croissance du TRM, puisque la part du ferroviaire et du fluvial reste très minoritaire (respectivement 2 % et 11 % en 2016). Le scénario de référence de la SNBC suppose une diminution de la part du routier domestique de l'ordre de 7 % pour les transports de marchandises au profit des autres modes, notamment du ferroviaire entre 2013 et le 3^{ème} budget carbone (2024-2028).

ment pour alimenter les PL en gaz naturel (mesure PLG) ;
· Une augmentation du poids total roulant autorisé (PTRA) des PL de 40 t à 60 t et des investissements sur le réseau structurant pour accueillir ces véhicules (mesure PL60).

Dans la suite de cet article, nous synthétisons tout d'abord les grandes caractéristiques de ces trois scénarios et nous délimitons les marchés fret potentiellement concernés à l'horizon 2030 (Section 2). Nos trois politiques sont étudiées alternativement : la possibilité d'introduire simultanément deux ou trois de ces mesures n'est pas considérée. En comparant les coûts des nouveaux PL par rapport à une situation de référence, « sans projet », nous estimons ensuite la variation du surplus économique des chargeurs-transporteurs⁴ (Section 3), le solde des finances publiques (Section 4) et les changements d'externalités émises par le TRM (Section 5). Tous ces calculs sont dupliqués selon que la demande de fret routier est supposée fixe ou variable (en raison d'un report modal depuis les trains ou les voies d'eau notamment). Après avoir actualisé ces différents agrégats monétaires, nous les rapportons aux économies de CO₂ que chaque scénario permettrait de réaliser entre 2030 et 2050 (Section 6). Tout ceci nous permet de calculer le coût d'abattement actualisé d'une tonne de CO₂ pour chacune des trois politiques et ainsi de déterminer celle qui présente le meilleur bilan socio-économique.

Par rapport aux études qui se concentrent sur une seule option technologique (AKERMAN, 2016 ; FRAGNOL, 2017 ; CARBONE 4, 2017 ; SIA PARTNERS, 2014 ; CHANDON, 2015 ; DOLL et alii, 2009 ; KNIGHT et alii, 2008 ; ORTEGA et alii, 2014 ; PÉREZ-MARTINEZ, MIRANDA, 2016), il est évident que ce travail comprend de nombreuses simplifications⁵. Nous sommes toutefois convaincus que le fait d'adopter une même méthode de calcul pour les trois scénarios améliore grandement la comparaison des résultats⁶. Surtout, les tests de sensibilité proposés dans la Section 6 permettent d'apprécier la robustesse de nos conclusions, et d'en préciser les limites.

2. PRÉSENTATION DES SCÉNARIOS ET DES MARCHÉS POTENTIELS

Cette première section décrit les principales caractéristiques technologiques et politiques de nos scénarios, avant de délimiter les marchés fret potentiel-

⁴ Dans cet article, nous ne distinguons pas les chargeurs qui ont recours au compte propre ou au compte d'autrui, d'où l'appellation de « chargeurs-transporteurs ». Nous supposons que la baisse des coûts de transport se traduit par une baisse du prix facturé aux chargeurs s'ils utilisent des opérateurs spécialisés.

⁵ Cet article s'appuie sur un rapport réalisé pour le MEEM dans lequel on trouvera une description plus poussée des scénarios et des hypothèses sur les coûts (RIZET et alii, 2017).

⁶ A contrario, il n'est pas évident de comparer les résultats de ce travail avec ceux issus d'autres études, car nous ne mobilisons pas nécessairement les mêmes méthodes de calculs ni des paramètres équivalents.

lement concernés à l'horizon 2030.

2.1. CARACTÉRISTIQUES DES VÉHICULES ET DES POLITIQUES PUBLIQUES

L'utilisation de PL 100 % électriques n'est pas envisageable sur de longues distances, même à moyen terme, en raison du poids et du volume des batteries qui seraient nécessaires. Nous analysons donc l'option hybride, où des PLH de 40 t fonctionneraient avec des moteurs électriques sur des infrastructures dédiées et au diesel pour les trajets amont et aval. Différentes technologies existent pour alimenter les PLH en électricité. Le recours à des caténaires est préférable aux options par induction ou par contact au sol, tant pour des raisons financières, que de sécurité routière ou d'efficacité énergétique⁷ (AKERMAN, 2016 ; NG YUK SHING, 2015 ; CARBONE 4, 2017 ; FRAGNOL, 2017). L'alimentation électrique se fait par des caténaires suspendues au dessus des routes et reliés aux PLH à l'aide d'un pantographe (Figure 1). L'utilisation de moteurs hybrides permet de ne pas dégrader les vitesses des PL et les autorise à doubler d'autres véhicules. Quand le pantographe n'est pas en contact avec le câble électrique, le moteur à combustion se met ainsi en marche et, le temps que ce dernier démarre, l'énergie est fournie par une batterie. L'infrastructure électrique comprend également des sous-stations pour abaisser la tension et convertir le courant alternatif en courant continu, ce qui évite d'avoir de lourds transformateurs sur les PL et de réduire leur charge utile.

Figure 1 : Alimentation d'un PLH par un système de caténaires



Source : AKERMAN (2016)

⁷ Contrairement aux autres modes d'alimentation qui nécessitent des travaux sur la voirie, la construction des caténaires n'affecte pas trop l'opérabilité des routes. Ce système d'alimentation est aujourd'hui testé sur des autoroutes en Allemagne et en Suède, ainsi que dans les ports de Long Beach ou de Los Angeles (FRAGNOL, 2017 ; AKERMAN, 2016).

Notre scénario PLH suppose que seuls les 9 500 km d'autoroutes concédées seront équipés de caténaires à l'horizon 2030, les PL y réalisant près de la moitié de leur kilométrage annuel (POCHEZ et alii, 2016). Dans ce cadre, les sociétés autoroutières concessionnaires (SAC) procureront l'électricité aux PLH en échange d'un « sur-péage » ayant pour but de couvrir les dépenses énergétiques ainsi que les coûts des infrastructures. Nous supposons que l'État régule ce sur-péage d'accès aux caténaires afin de garantir l'attractivité financière des PLH aux yeux des chargeurs-transporteurs. En contrepartie, la puissance publique fournira en 2029 une subvention aux SAC afin de « neutraliser » l'impact des investissements initiaux sur leur bilan financier.

Notre second scénario porte sur les PLG. Diverses études (ARTECONI et alii, 2010 ; BEER et alii, 2002) font en effet état d'une réduction significative des émissions de GES lorsque les véhicules sont alimentés au gaz naturel⁸, composé à plus de 84 % de méthane, entre 2 et 8 % d'éthane et en très faible quantité de propane ou de butane (ADEME, 2013). Cette source d'énergie se décline en deux types : le gaz naturel liquéfié (GNL) et le gaz naturel comprimé (GNC). Si le GNL est stocké sous forme liquide (à une température de -160°C), le GNC est quant à lui stocké sous forme gazeuse (comprimé à 200 bars). Nous nous focalisons dans cette étude sur des PL circulant au GNL, ce carburant étant plus approprié pour les véhicules qui réalisent de longues distances. Il est important de préciser que, contrairement aux PLH, cette option technologique est dès à présent « mature » et disponible sur le marché. Les PLG offrent ainsi les mêmes performances que les PL conventionnels, en termes de vitesse de circulation ou de charge utile.

Afin que les PLG se diffusent en France, les chargeurs-transporteurs doivent avoir la possibilité de se réapprovisionner en gaz naturel sans trop de contraintes. D'après la directive européenne 2014/94 sur les carburants alternatifs, l'objectif est ainsi d'arriver à une station publique de GNL tous les 400 km d'ici 2020 sur le réseau principal européen (RTE-T⁹). Comme illustré sur la Figure 2, seules 49 stations publiques d'avitaillement en GNL ou GNC (ou les deux, GNLC) sur les 75 existantes en mars 2018¹⁰ sont aujourd'hui accessibles aux PL. Par conséquent, notre scénario PLG suppose que l'État financera en 2029 la création de 100 nouveaux points d'avitaillement pour les PL¹¹. La puissance publique n'ayant pas vocation à exploiter ces stations, nous faisons par ailleurs l'hypothèse qu'elles seront mises en

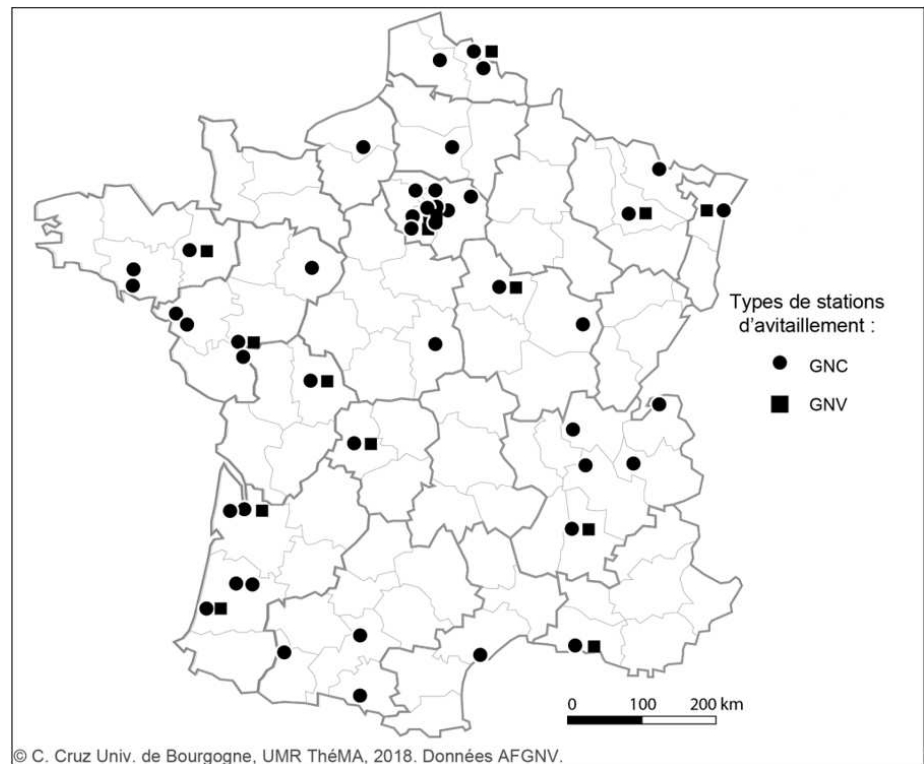
⁸ L'AFGNV (2016) estime des économies de CO₂ comprises entre 12 et 14 %, l'intérêt principal étant cependant au niveau des oxydes d'azote (entre -30 et -74 %).

⁹ Réseau Transeuropéen de Transport.

¹⁰ En 2016, l'AFGNV recense plus de 120 stations privées d'avitaillement en GNL, ces dernières n'accueillant pas toutes les PL. Même si les entreprises de transport disposent de stations privées, leur concentration spatiale pourrait limiter l'utilisation des PLG : si, à l'aller, le véhicule peut s'approvisionner à la station privée, il lui faudra trouver une station publique sur le retour.

concession auprès d'entreprises privées évoluant dans un environnement concurrentiel.

Figure 2 : Stations d'avitaillement en GNV pour les PL (2018)



Source : Données AFGNV

Notre troisième et dernier scénario (PL60) considère que les limites légales de poids et de dimensions des PL seront augmentées d'ici 2030 pour faire bénéficier le TRM d'économies d'échelles. C'est aujourd'hui la directive européenne 1996/53 qui régit ces caractéristiques : la longueur maxi-

¹¹ La longueur totale du réseau routier structurant en France étant proche de 21 000 km (2012), il faudrait au moins 53 stations pour respecter l'objectif d'un point d'approvisionnement tous les 400 km. Notre hypothèse de créer 100 nouvelles stations est donc délibérément volontariste. Un nombre inférieur de stations aurait en effet pu suffire pour respecter les directives européennes, certaines stations autoroutières étant accessibles aux deux sens de circulation. Au regard du faible montant des investissements initiaux nécessaires (Cf. Sous-section 4.1), nous avons toutefois préféré opter pour un scénario très favorable aux PLG car assurant un maillage fin du territoire national. Une solution alternative aurait consisté à rendre publiques les stations privées déjà existantes, par le biais d'un rachat des infrastructures par l'État et/ou au travers d'un changement réglementaire autorisant l'ensemble des transporteurs à y accéder en contrepartie d'un péage. Néanmoins, cette alternative n'est pas prise en compte car les stations privées sont dimensionnées pour l'utilisation d'une ou plusieurs entreprises et ne pourraient pas nécessairement répondre à une demande plus élevée.

male est fixée à 12 m pour un PL, à 16,50 m pour un ensemble tracteur plus semi-remorque et à 18,75 m pour un train routier (PL plus remorque). Le PTRA est quant à lui limité à 32 t pour un PL, à 40 t pour les trains routiers et ensembles articulés, avec une dérogation à 44 t pour le transport combiné. Plusieurs pays acceptent des limites supérieures à celles fixées par l'Europe (Suède, Finlande) et d'autres pays effectuent des essais de PL plus longs et plus lourds pour évaluer les conditions de mise en œuvre d'une nouvelle réglementation (exigences sur les conducteurs, chargements et itinéraires autorisés... ; STEER DAVIES GLEAVE, 2013). En France, une dérogation à 44 t fut également accordée pour le transport de certains produits agricoles¹², en sus de celle pour les parcours terminaux du transport combiné.

Dans notre scénario PL60, la limite de PTRA est portée à 60 t et la longueur des véhicules à 25,25 m. A l'instar des PLG, cette technologie de PL est aujourd'hui disponible pour les chargeurs-transporteurs. Comme illustré dans le Tableau 1, le gain de capacité d'un PL60 comparé aux 40 t est conséquent, que l'on raisonne en tonnes, en volume, en longueur de chargement ou en nombre de palettes. En supposant que le taux moyen de chargement (poids du chargement/charge utile) des véhicules reste inchangé, on comprend aisément que le recours à des PL60 pourrait générer une forte réduction du nombre de véhicule*kilomètre (vkm) réalisé avec des PL en France.

Tableau 1 : Comparaison de la capacité d'un PL60 avec les PL actuels

Caractéristiques	(1) Camion + remorque (18,75 m, 40 t)	(2) Tracteur + semi-remorque (16,5 m, 40 t)	(3) PL60 (25,25 m, 60 t)	Gain de capacité (%)	
				(3)/(1)	(3)/(2)
Longueur de chargement (m)	15,65	13,6	21,4	+37	+57
Charge utile (t)	25	25	40,5	+62	+62
Capacité (m ³)	112	97	156	+39	+61
Capacité (euro-palettes)	38	33	53	+39	+61

Source : DEBAUCHE, DECOCK (2007)

Même si nous supposons que le nombre d'essieux par véhicule sera augmenté proportionnellement à la longueur des véhicules (passant de 5 à 8)¹³, notre scénario PL60 fait l'hypothèse que l'État va massivement investir pour « mettre à niveau » le réseau structurant national en 2029. En effet, des études réalisées en Allemagne ou en Autriche (STEER DAVIES GLEAVE, 2013 ; UIC-CER-UNIFE, 2014) ont montré que la hausse du PTRA à 60 t nécessite un renforcement conséquent des ouvrages d'art, des ponts notamment, pour permettre le passage de ces véhicules. Par ailleurs, différents aménagements de la voirie sont nécessaires afin de ne pas trop dégrader la sécurité routière

¹² L'impact de ces dérogations a été évalué par la Commission des Comptes Transports de la Nation (CGDD, 2013), avec un bilan positif de l'ordre de 15 M € en 2009 (+/- 5 M €). Ces gains tiennent compte des économies d'émissions de CO₂ de l'ordre de 15 000 t/an.

¹³ Afin que le poids par essieu reste inchangé, limitant par là même la détérioration des routes.

ou fournir des places de stationnement appropriées. Le soutien politique aux PL60 transite donc, dans cette étude, au travers de la prise en charge intégrale par l'État de ces dépenses d'investissement.

2.2. LES MARCHÉS FRET CONCERNÉS

Ces scénarios ciblent différents segments du marché de fret, qu'il convient à présent de délimiter. Afin de garantir la comparabilité des résultats, nous partons d'hypothèses homogènes sur les trafics en 2030 en mobilisant l'étude prospective sur le transport de marchandises en France du MEEDD (POCHEZ et alii, 2016). Bien que les politiques étudiées puissent être menées au niveau européen, notamment celles portant sur les PLG ou sur les PL60, nous supposons qu'elles visent en priorité le TRM national et nous écartons les flux liés au commerce international et ceux de transit¹⁴. Rappelons par ailleurs que nos calculs seront proposés pour deux cas de figure : une demande de fret routier fixe et une demande élastique, avec un report modal depuis les modes non routiers suite à la variation du coût unitaire du TRM. Il est donc également nécessaire de chiffrer les marchés de fret ferroviaire et fluvial concernés par nos scénarios.

Nous postulons que les options PLH et PLG seront essentiellement pertinentes pour le fret interrégional¹⁵. En mobilisant l'étude de GENEVOIS et GILLE (2010) -ces auteurs proposant une exploitation fine des différentes statistiques disponibles sur le fret en France- nous estimons que ce type de mouvements représente 39,7 % des tonnes*kilomètres (tkm) annuellement transportées sur le territoire national. Sachant que l'ensemble du TRM en France atteindra 382,7 Mds de tkm en 2030 (POCHEZ et alii, 2016), le marché des PLH et des PLG sera donc de 151,9 Mds de tkm à cette date. De plus, il est possible de borner le report modal depuis les trains et les voies d'eau vers les PLH/PLG à 26,4 Mds de tkm et 6.5 Mds de tkm respectivement (Tableau 2), le fret interrégional correspondant à 55,9 % des tkm transportées par les modes non routiers (GENEVOIS, GILLE, 2010).

A contrario, il est raisonnable de penser que les PL60 seront surtout utilisés pour les envois massifiés. Conformément aux « modèles gravitaires », ces flux de marchandises sont majoritairement locaux et portent sur de courtes

¹⁴ Le choix de ne s'intéresser qu'aux flux domestiques revient à occulter les transporteurs étrangers. D'après les Comptes Transports de la Nation (CGDD, 2017), si les PL sous pavillon étranger représentent 39 % des tonnes*kilomètres (tkm) transportées en France, ils réalisent près de 93 % de leur activité avec les flux de transit et internationaux. A contrario, les transporteurs français sont très peu présents sur ces liaisons (4 % de leur activité). Par conséquent, les effets économiques estimés pour chaque politique dans les sections suivantes ne concernent, en première approximation, que les PL sous pavillon national.

¹⁵ Pour les PLH, nous supposons que seules les autoroutes concédées seront équipées de caténaires, ces infrastructures étant d'autant plus utilisées par les PL qu'ils parcourent de longues distances.

distances (GENEVOIS, GILLE, 2010)¹⁶. Les envois lourds et massifiés sont conséquents et représentent 32,4 % de l'ensemble du TRM en France (et 45,9 % du total des modes non routiers). Pour des raisons logistiques d'une part, et d'accessibilité limitée aux infrastructures adéquates d'autre part, il est toutefois probable que l'intégralité de ces envois ne pourra pas migrer vers les PL60. D'une manière quelque peu arbitraire, nous supposons donc que seuls 50 % des « gros » envois sont concernés par le scénario PL60, soit 16 % des tkm du TRM en France à l'horizon 2030 (62 Mds de tkm)¹⁷. D'une manière similaire, nous faisons l'hypothèse que seule la moitié des tkm transportées hors des routes pourront potentiellement migrer vers les PL60.

Tableau 2 : Marchés potentiels de fret en 2030

Fret en 2030	Ensemble (1)	Domestique (2) (en % de (1))	Interrégional (3) (en % de (1))	Massifié (4) (en % de (1))	PLG et PLH (5)=(1)x(3)	PL60 (6)=0,5x(1)x(4)
Routier (Mds tkm)	382,7	58,2 %	39,7 %	32,4 %	151,9	62,0
Ferroviaire (Mds tkm)	47,2	59,0 %	55,9 %	45,9 %	26,4	10,8
Fluvial (Mds tkm)	11,6	59,0 %	55,9 %	45,9 %	6,5	2,7

Source : calculs des auteurs à partir de GENEVOIS, GILLE (2010) et POCHÉZ et alii (2016)

Au final, on comprend que si les marchés PLH et PLG étaient en concurrence et donc substituables, pour le transport de fret interrégional, ces deux nouveaux véhicules sont en partie complémentaires avec les PL60.

3. LE SURPLUS DES CHARGEURS-TRANSPORTEURS

Afin d'étudier l'attractivité des nouvelles technologies de PL pour les chargeurs-transporteurs, ainsi que les gains de surplus économique associés, nous adoptons la méthodologie des « *total costs of ownership* » (TCO, voir DEN BOER et alii, 2013 ; FRAGNOL, 2017).

3.1. LES « COÛTS TOTAUX DE POSSESSION »

Cette approche consiste à comparer, pour différentes technologies k concurrentes, l'ensemble des coûts ($TCO^k < 0$) supportés par les opérateurs sur la durée de vie (T) des véhicules. Le chargeur-transporteur optera pour la technologie qui présente le plus faible TCO^k . Comme les coûts (nets de la

¹⁶ D'après GENEVOIS et GILLE (2010), les envois routiers massifiés sur de courtes distances représentent un volume de tkm 4,2 fois plus important que les envois massifiés sur de longues distances.

¹⁷ Cette part de marché des PL60 de 16 % est cohérente avec l'étude allemande de DOLL et alii (2009) qui aboutit au chiffre de 20 %. KNIGHT et alii (2008) avancent une part de marché plus faible au Royaume-Uni, 10 % au maximum. Pour la France, il convient de mentionner une étude sur la généralisation des 44 t, avec un marché potentiel atteignant 13 % du TRM (DGITM, 2011). Finalement, nous avons filtré dans la base ECHO les envois routiers « lourds et fréquents », i.e. supérieurs à 24 t et concernant un chargeur et un destinataire qui échangent plus de 1 250 t/an. Ces envois représentent 17 % du total des tkm des estimées avec ECHO.

valeur résiduelle) sont supportés durant plusieurs années, le taux d'actualisation (r) permet d'exprimer en valeur présente des flux financiers futurs :

$$TCO^k = -I_0^k + \frac{I_0^k \cdot (1-a)^T}{(1+r)^{T+1}} - \sum_{t=1}^T \frac{CF_t^k + CV_t^k}{(1+r)^t} \quad (1)$$

où I_0^k représente la valeur d'achat du véhicule k , a le taux de dépréciation du capital, CF_t^k les coûts annuels fixes (assurances, taxes à l'essieu...) et CV_t^k les coûts annuels variables (salaires, énergies, entretiens...). Le second terme de l'équation (1) est positif et représente la valeur résiduelle du véhicule en fin de vie¹⁸.

Comme indiqué précédemment, les PLH et les PLG seront essentiellement utilisés pour le fret interrégional. Ils sont donc comparés avec des PL 40 t parcourant de longues distances (PL40_LD). Pour les PL60, les véhicules de référence sont les PL 40 t utilisés sur de courtes distances (PL40_CD). Les paramètres techniques et financiers à l'horizon 2030 (Tableau 3) ont été déterminés à partir de plusieurs sources : FRAGNOL (2017) ou DEN BOER et alii (2013) pour les PLH, CHANDON (2015) et SIA PARTNERS (2014) pour les PLH, KNIGHT et alii (2008) et RIZET et alii (2017) pour les PL60. Les données pour les PL40_LD et les PL40_CD proviennent en partie des « indicateurs prix de revient » du Comité National Routier (CNR).

Plutôt que de détailler tous les paramètres du Tableau 3, nous préférons centrer nos propos sur les caractéristiques qui diffèrent réellement entre les PL. Conformément à nos postulats sur les types de liaisons réalisées par les véhicules, les PLH et les PLG parcourent chaque année des distances 30 % supérieures aux PL60 et ils utilisent plus fréquemment les autoroutes concédées (80 % des kilomètres contre 50%). Les PLG et les PLH ont le même taux de chargement que les PL40_LD, avec en moyenne 18 t transportées par déplacement. A contrario, les PL60 sont supposés recevoir un chargement de 40 t, soit un poids 60 % supérieur aux PL40_CD (dont le taux de chargement est de 100 %, conformément à l'hypothèse d'envois massifiés).

Concernant les coûts d'achat des véhicules, on constate que les PLH et les PLG sont 24 % plus chers que les PL40_LD, ce qui implique une valeur résiduelle et des frais d'assurance plus importants. Les PL60 seront quant à eux 33 % plus onéreux que les PL40_CD. On remarque que les dépenses d'entretien varient grandement. Ainsi, les PLH impliquent moins de frais car les moteurs électriques sont moins agressifs pour les composants des véhicules que les moteurs à combustion. A contrario, les PLG requièrent plus de contrôles et de réparations de matériels. En ce qui concerne les PL60, l'ajout

¹⁸ L'existence d'une valeur résiduelle suppose que des acheteurs acceptent d'utiliser des PL ayant déjà circulé 10 ans. Pour les PL français ce marché de l'occasion se situe en grande partie à l'étranger, notamment en Afrique et en Europe de l'Est, où la main-d'œuvre pour l'entretien est moins coûteuse.

d'essieux et de pneumatiques se traduit par des dépenses en hausse. Par ailleurs, les dépenses salariales sont supérieures pour les chauffeurs de PL60, ces véhicules étant utilisés avec une intensité similaire (en termes de jours et d'heures d'exploitation) mais circulant 10 % moins vite que les PL40_CD. Nous supposons finalement que les SAC créeront une nouvelle classe de péage afin de couvrir des dépenses d'entretien supérieures (le péage des PL60 étant estimé à 0,247 €/km¹⁹).

Tableau 3 : Caractéristiques opérationnelles et financières des PL en 2030

		PL40_LD	PLH	PLG	PL40_CD	PL60
Kilométrage	km/an	113 000	113 000	113 000	90 000	87 480
Tonnage transporté	tonnes/PL	18	18	18	25	40
Vitesse moyenne	km/h	70	70	70	60	54
Part utilisation autoroutes	%	80	80	80	50	50
Durée de possession	années	10	10	10	10	10
Taux d'actualisation	%	8	8	8	8	8
Taux de dépréciation	%	4	4	4	4	4
Prix d'achat TTC	€	103 000	128 000	128 000	103 000	136 990
Valeur résiduelle	€	29 369	36 497	36 497	29 369	39 061
Assurance véhicule	€/an	2 060	2 560	2 560	2 060	2 740
Assurance marchandises	€/an	410	410	410	497	796
Taxe essieux	€/an	516	516	516	516	774
Charges administratives	€/an	18 387	18 387	18 387	19 945	19 945
Entretien	€/km	0,110	0,088	0,165	0,115	0,173
Salaire chauffeur	€/heure	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4
Durée travail	heures/jour	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Jours activités	jours/an	216	216	216	216	216
Dépenses salariales	€/km	0,321	0,321	0,321	0,403	0,415
Consommation	énergie/km	0,300	1,500	0,250	0,300	0,405
Prix énergie HTT	€/énergie	1,070	0,078	1,100	1,070	1,070
Taxes énergie	€/énergie	0,680	0,051	0,250	0,680	0,680
Prix énergie TTC	€/énergie	1,750	0,128	1,350	1,750	1,750
Coût énergie TTC	€/km	0,525	0,192	0,338	0,525	0,709
Coûts taxes énergie	€/km	0,204	0,076	0,063	0,204	0,275
Péage autoroutes	€/km	0,190	0,190	0,190	0,190	0,247
Sur-péage accès caténares	€/km	0,000	0,388	0,000	0,000	0,000
Immobilisation et stockage	€/km	0,777	0,777	0,777	0,919	1,314
TCO	1000 €/PL	-1 646,7	-1 568,2	-1 567,6	-1 470,8	-1 865,8
Coût unitaire (1)	€/km	1,457	1,388	1,387	1,634	2,133
Coût unitaire (2)	€/tkm	0,081	0,077	0,077	0,065	0,053
Variation coût unitaire (2)	%	-	- 4,77	- 4,80	-	-18,43

Sources : calculs des auteurs à partir des « indicateurs prix de revient » du CNR, FRAGNOL (2017), DEN BOER et alii (2013), CHANDON (2015), SIA PARTNERS (2014), KNIGHT et alii (2008) et RIZET et alii (2017)

¹⁹ Le montant du péage pour les PL60 a été estimé sur la base d'une analyse des tarifs des péages des principales relations autoroutières françaises pour l'année 2016, qui nous donne une valeur moyenne selon la classe de véhicules (poids maximum du véhicule de la classe), extrapolée ensuite aux PL60.

Une autre différence entre les PL provient de leurs sources d'alimentation énergétique. Si les PL60 circulent au diesel, comme les PL40_CD, leur consommation kilométrique est 35 % supérieure en raison d'un PTRa accru²⁰. A contrario, les performances énergétiques des PLG, tout comme le faible poids des taxes dans le coût TTC, impliquent des dépenses énergétiques modérées par rapport au PL40_LD. Étant donné le faible prix TTC de l'électricité en France, on constate finalement que les dépenses des PLH alimentés par caténaire sur les autoroutes sont minimales. Concernant ces dernières dépenses, rappelons que les utilisateurs des PLH ne supportent pas directement le montant de 0,192 €/km. En effet, les dépenses d'électricité sont comprises dans le sur-péage d'accès aux caténaires fixé par les SAC.

Comme explicité dans l'Annexe 1, nous faisons l'hypothèse que ce sur-péage d'accès fait l'objet d'une régulation publique. Ainsi, nous supposons que l'État et les SAC sont capables de déterminer le sur-péage « limite », à partir duquel les chargeurs-transporteurs n'auront plus intérêt à opter pour les PLH. Comme l'État souhaite qu'ils utilisent la nouvelle technologie de PL, il contraint alors les SAC à ne pas dépasser 75 % du montant maximal. Comme le tarif régulé de 0,388 €/km -qui vient s'ajouter au péage standard de 0,190 €/km- ne permet pas de couvrir les investissements dans les caténaires ou les dépenses annuelles d'énergie et d'entretien des infrastructures, les SAC bénéficient d'une subvention publique (Cf. Section 5) visant à neutraliser l'opération financière et garantissant que les 9 500 km d'auto-roues concédées soient bien équipées de caténaires.

En ce qui concerne les PL60, nous avons souhaité estimer deux surcoûts spécifiques (Annexe 2) : l'immobilisation accrue des marchandises durant les voyages (car les PL60 circulent moins vite que les PL40_CD) et les dépenses supplémentaires d'entrepôt (car les délais d'attente pour remplir un véhicule de 60 t sont plus longs). Pour calculer ces derniers surcoûts, nous avons utilisé l'étude « benchmarking » de l'ASLOG (DROMIGNY, 2009) dont on peut déduire que les coûts de stockage correspondent à 48 % des coûts de transport. Pour passer d'un chargement de 25 t à 40 t, nous supposons alors que le stockage est 30 % plus long et nous majorons le coût de stockage trouvé pour le PL40_CD de ce ratio. En suivant ce procédé, les dépenses liées à une plus grande immobilisation des marchandises et à un stockage plus onéreux par rapport aux PL40_CD sont importantes, près de 0,395 €/km, soit 34 500 €/an en considérant le kilométrage annuel des PL60.

A l'aide de ces paramètres techniques et financiers, nous pouvons finalement calculer les TCO des différentes technologies de PL (en supposant une durée de vie des véhicules de 10 ans, un taux de dépréciation de 4 % et un taux

²⁰ Nous faisons l'hypothèse implicite que les transporteurs achètent l'intégralité des carburants en France. Même si très peu de statistiques existent à ce sujet, il est donc probable que nous surestimions l'influence des taxes sur le coût de transport routier.

d'actualisation privé de 8 %). Il ressort des estimations que les PLH et les PLG présentent des coûts unitaires de transport (en €/km ou en €/tkm) 4,8 % plus faibles par rapport aux PL40_LD. Pour les PL60, on remarque que les dépenses engagées sur 10 ans sont supérieures à celles des PL40_CD, tout comme le coût unitaire kilométrique. Néanmoins, si on considère le tonnage transporté, on constate que le coût unitaire est bien réduit (-18,4 %), impliquant une productivité accrue avec ces nouveaux PL²¹.

3.2. TRAFICS AVEC ET SANS REPORT MODAL

Ces calculs montrent donc que les chargeurs-transporteurs auront un intérêt économique à opter pour les nouvelles technologies de PL. Il convient, à présent, de chiffrer le fret national concerné par ces changements, notamment le report modal depuis le fer ou le fluvial (Tableau 4).

Partant des chiffres du Tableau 2, nous considérons dans un premier temps (demande de TRM fixe) que 151,9 Mds de tkm seront transportées en France à l'aide de PLH ou de PLG en 2030 et 62 Mds de tkm avec des PL60. Par souci de simplification, nous supposons que l'intégralité de la flotte de PL sera changée dès la première année et que, par la suite, les opérateurs s'équiperont avec les nouvelles technologies de PL. Comme nous allons estimer les gains de CO₂ et les effets socio-économiques sur 20 ans, nous supposons également que le trafic initial augmente de 1,3 % chaque année (POCHEZ et alii, 2016). Puisque les PLH et les PLG ont la même capacité de chargement que les PL40_LD, ces évolutions ne sont pas accompagnées par une réduction du nombre de vkm. A contrario, le trafic se contractera de 37,5 % dans le scénario PL60, chaque PL transportant plus de marchandises.

Dans un second cas de figure (demande de fret variable), nous considérons que la baisse du coût unitaire du TRM engendre un report modal et une induction de trafic. Pour ce faire, nous utilisons les élasticités prix-demande de long terme proposées par POCHEZ et alii (2016) : -0,18 pour le fret routier, 1,51 pour le fret ferroviaire et 1,13 pour le fret fluvial. Autrement dit, si le prix du TRM baisse de 1 %, la demande de fret ferroviaire baissera de 1,51 %. En croisant ces élasticités avec les marchés de fret du Tableau 2, nous estimons désormais le trafic PLH à 155,4 Mds tkm en 2030, le trafic PLG à 155,5 Mds tkm et le trafic PL60 à 67,6 Mds tkm. Le report modal

²¹ En augmentant la productivité des chauffeurs de PL, une telle politique en réduirait le nombre. A partir des éléments de productivité indiqués dans le Tableau 3, on peut estimer que la réduction du nombre de chauffeurs routiers serait de 16 400 emplois si l'on considère une demande fixe et de 15 400 si l'on considère une demande élastique (avec dans ce dernier cas quelques emplois également supprimés pour les conducteurs de trains et de bateaux fluviaux). Au-delà de l'impact sur cette profession des chauffeurs, la réduction des coûts de transport d'une politique PL60 profiterait vraisemblablement aux chargeurs. La demande induite de transport qu'elle provoquerait correspondrait à une augmentation de l'activité économique susceptible de favoriser l'emploi (dans des proportions difficiles à chiffrer).

depuis les trains explique une grande part du changement. Par ailleurs, cette demande variable engendre une légère croissance du nombre de vkm circulés pour les scénarios PLH et PLG (+2,3 %) tandis que la contraction du trafic est légèrement moindre pour les PL60 (-31,8 %).

Tableau 4 : Trafics et reports modaux en 2030

Fret routier en 2030	PLH		PLG		PL60	
	Fixe	Var.	Fixe	Var.	Fixe	Var.
Depuis route (Mds tkm)	151,9	153,2	151,9	153,2	62,0	64,1
Depuis fer (Mds tkm)	-	1,9	-	1,9	-	3,0
Depuis fleuve (Mds tkm)	-	0,3	-	0,4	-	0,6
Total (Mds tkm)	151,9	155,4	151,9	155,5	62,0	67,6
Evolution vkm (%)	-	+2,3	-	+2,4	-37,5	-31,8

Sources : calculs des auteurs à partir de POCHEZ et alii (2016)

Précisons que les trafics des trois scénarios se « chevauchent » partiellement : une partie du fret interrégional (PLH et PLG) correspond en effet à des envois massifiés qui pourraient tout autant être transportés en PL60, et vice-versa. Les résultats de ces trois scénarios ne peuvent donc pas être considérés comme étant rigoureusement complémentaires, que la demande de TRM soit supposée fixe ou variable.

3.3. GAINS ÉCONOMIQUES POUR LES CHARGEURS-TRANSPORTEURS

Nous disposons désormais de toutes les informations pour estimer les gains de surplus économique des chargeurs-transporteurs (ΔST) :

$$\Delta ST = \Delta p \cdot TKM_0 + 0,5 \cdot \Delta p \cdot (TKM_1 - TKM_0) \quad (2)$$

où Δp représente la baisse du coût unitaire du TRM (en €/tkm), TKM_0 décrit le trafic initial et $(TKM_1 - TKM_0)$ correspond au report modal et au trafic induit, en supposant que la fonction de demande inverse du TRM est linéaire.

En croisant les données des Tableaux 3 et 4, nous obtenons des gains annuels conséquents pour les chargeurs-transporteurs (Tableau 5). Si la demande de TRM est fixe ($TKM_1 - TKM_0 = 0$), les bénéfices s'élèvent à 586 M € en 2030 pour les PLH, à 591 M € pour les PLG et à 747 M € pour le scénario PL60. Fort logiquement, les gains de bien-être économique des chargeurs-transporteurs sont plus importants lorsque l'on considère une demande variable, notamment pour les PL60 (781 M €/an).

Comme ces bénéfices évoluent avec la croissance du trafic et sont considérés sur la période 2030-2050, nous devons prendre en compte leur valeur actualisée nette (VAN) en utilisant le taux d'actualisation social de 4,5 % préconisé par les travaux de la Commission QUINET (CGSP, 2013). En procédant de la sorte, nous obtenons des gains actualisés d'environ 9 Mds € pour les scénarios PLH et PLG, et de plus de 11 Mds € avec les PL60. Ces montants

doivent être comparés aux émissions de CO₂ économisées dans chaque scénario ainsi qu'aux autres effets socio-économiques, grandeurs que nous quantifions dans la suite de cet article.

Tableau 5 : Gains pour les chargeurs-transporteurs

Gains de surplus	PLH		PLG		PL60	
	Fixe	Var	Fixe	Var	Fixe	Var
En 2030 (M €)	586,2	593,0	590,5	597,5	746,9	780,7
VAN 2030-2050 (M €)	8785,2	8887,8	8849,7	8953,9	11193,0	11700,8

Source : calculs des auteurs

4. EFFETS SUR LES FINANCES PUBLIQUES

Nos différents scénarios sont non neutres pour les finances publiques, au regard des investissements initiaux nécessaires ou des dépenses et recettes annuelles.

4.1. LES INVESTISSEMENTS INITIAUX

Afin que ces politiques puissent être mises en œuvre, nous avons fait l'hypothèse que l'État investit, directement ou indirectement, dans divers équipements facilitant l'adoption des nouvelles technologies de PL. Conformément aux recommandations officielles (CGSP, 2013), nous appliquons au solde budgétaire de l'État le coût d'opportunité des fonds publics (COFP) de 20 %.

Pour le scénario PLH, nous avons supposé que la puissance publique subventionne les SAC afin que l'intégralité du réseau autoroutier privé soit équipée de caténaires en 2030, en échange d'une régulation du sur-péage d'accès aux infrastructures électriques. En effet, les entreprises privées pourraient être tentées de capter l'intégralité des gains pour les chargeurs-transporteurs si elles étaient libres de fixer la tarification. Puisque le sur-péage régulé de 0,388 €/km ne permet pas de couvrir les différentes dépenses supportées par les SAC, l'État verse une subvention qui vise à annuler la VAN des investissements initiaux. Comme détaillé dans l'Annexe 1, ce transfert est conséquent : 10,3 Mds € (COFP compris) si la demande de TRM est fixe ; 9,7 Mds € lorsque l'utilisation des autoroutes est plus importante en raison du report modal ou de la demande induite.

Concernant le scénario PLG, nous faisons l'hypothèse que l'État investira dans 100 nouvelles stations d'avitaillement accessibles aux PL, afin de garantir un maillage fin du territoire national et d'éviter les contraintes d'autonomie des véhicules. L'Ademe (2013) chiffre le coût des grandes infrastructures existantes à 1 M € par station. En considérant le COFP, l'investissement public est relativement modéré, de l'ordre de 120 M €²².

²² Par souci de simplification, nous écartons de l'analyse les gains des entreprises qui exploitent les stations d'avitaillement.

Estimer les dépenses publiques initiales du scénario PL60 est un exercice plus complexe. Si nous avons supposé que l'État va massivement investir pour mettre à niveau le réseau routier structurant en 2030, il n'existe pas, à notre connaissance, d'étude spécifique sur le montant des travaux à entreprendre en France. Pour combler ce manque, nous nous inspirons de deux études européennes mentionnées dans UIC-CER-UNIFE (2014) et nous considérons qu'il faudrait dépenser, en moyenne, près de 500 000 €/km pour rendre accessibles les infrastructures routières aux PL60²³. En appliquant ces coûts kilométriques aux 21 000 km de routes composant le réseau structurant national (autoroutes et routes nationales), les investissements publics initiaux atteignent 10,8 Mds € (COFP compris). A l'instar du scénario PLG, ce montant ne dépend pas des hypothèses faites sur la nature de la demande de TRM²⁴.

4.2. COÛTS ET RECETTES ANNUELS

Outre ces investissements initiaux, chaque scénario va modifier les coûts et recettes annuels pour l'État. Puisque les pouvoirs publics limitent la taxation des énergies « vertes » afin de stimuler leur utilisation, l'arrivée des PLH et des PLG impliquera des variations des recettes fiscales (TICPE notamment), comme illustré dans les Tableaux 6 et 3. Par rapport aux PL gazole de référence (qui permettront à l'État de récolter 0,204 €/km en 2030), les recettes

²³ La première étude citée dans UIC-CER-UNIFE (2014) provient d'Allemagne et estime qu'il faudrait près de 8 Mds € pour y rendre accessibles les 12 500 km d'autoroutes aux PL60 (soit 640 000 €/km). La seconde étude porte sur le réseau d'autoroutes et de routes nationales en Autriche, avec un coût estimé à 5 Mds € pour 2 500 km environ (soit 2 M €/km). Nous retenons une valeur basse de 500 000 €/km en France. Cette estimation est grossière puisqu'elle devrait reposer, non pas sur le linéaire de routes, mais plutôt sur le nombre d'aménagements routiers. Dans la mesure où le poids par essieu des PL60 n'est pas plus important que celui des PL40 traditionnels, le supplément de coût d'infrastructure est surtout lié au renforcement des ouvrages d'art, principalement les ponts. En Autriche, ce coût de renforcement et d'entretien supplémentaire est très élevé par kilomètre d'autoroute, en raison du relief alpin qui implique un nombre important d'ouvrages d'art par kilomètre, comparativement à un pays moins montagneux comme l'Allemagne. Par ailleurs, il est possible que le moindre coût en Allemagne provienne du fait qu'historiquement les autoroutes ont été construites pour supporter le passage de chars dont le tonnage est proche de celui des PL60. Bien que ce ne soit pas le cas en France, nous retenons pour ce dernier pays une hypothèse de coût légèrement moins important qu'en Allemagne en raison du bon état général du réseau routier et autoroutier, meilleur qu'outre-Rhin.

²⁴ Dans une optique socio-économique, les investissements publics doivent être nets de leur valeur résiduelle. Pour les scénarios PLH et PLG, nous supposons que l'État transfère les droits de propriété aux SAC ou aux entreprises qui gèrent les stations. Il n'y a donc pas de valeur résiduelle publique. Si la valeur résiduelle des caténaires est prise en compte dans la VAN des SAC (Annexe 1), nous écartons celle des stations d'avitaillement. Pour les PL60, le montant de 10,8 Mds € intègre une valeur résiduelle uniquement pour les 11 500 km de routes publiques (calculée avec un taux de dépréciation de 2 % et un taux d'actualisation de 4,5 %), les droits de propriété des investissements sur les autoroutes privées étant transférés aux SAC (et occultés de cette analyse).

liées à la fiscalité énergétique sont moindres pour les PLH (0,076 €/km) et encore plus pour les PLG (0,063 €/km). Si les taxes kilométriques des PL60 sont supérieures (0,275 euro/km) à celles de PL40_CD, il ne faut pas oublier que ce scénario est associé avec un fort recul du trafic exprimé en vkm (Cf. Tableau 4). Finalement, il faut également prendre en compte les recettes fiscales « perdues » en raison d'une utilisation en recul des trains et des voies d'eau²⁵.

Au-delà des changements de recettes fiscales, les reports modaux pourraient aussi modifier les dépenses publiques d'entretien des routes (pour les autoroutes, les frais sont couverts par les péages). Afin d'estimer ces coûts sur le réseau gratuit, nous avons repris les valeurs indiquées dans l'« *European Handbook on External Costs of Transport* » (RICARDO-AEA, 2014). Ce rapport propose également une valeur pour les PL60. Même si le nombre d'essieux augmente, on constate que les dépenses d'entretien sont 33 % plus importantes que pour les PL 40 t (0,106 €/vkm contre 0,080 €/vkm), ce qui conforte les résultats d'études sur l'« agressivité » supérieure de ces véhicules pour les chaussées (PÉREZ-MARTINEZ, MIRANDA, 2016 ; KNIGHT et alii, 2008, DGITM, 2011). En raison d'un manque de données concernant l'entretien des voies navigables et des voies ferrées, nous ne prenons pas en compte la baisse des coûts sur ces réseaux.

Tableau 6 : Coûts et recettes publics en 2030

	PLH	PLG	PL60
Taxes (€/vkm)	0,076	0,063	0,275
Entretien des routes (€/vkm)	0,08	0,08	0,106
Taxes PL de référence (€/vkm)	0,204		
Taxes trains (€/vkm)	1,350		
Taxes voies d'eau (€/vkm)	7,344		

Sources : calculs des auteurs à partir de FRAGNOL (2017), de l'ADEME, du CGDD (2016) et de RICARDO-AEA (2014)

4.3. SYNTHÈSE DES FINANCES PUBLIQUES

En examinant le solde annuel des finances publiques (Tableau 7), on constate que le scénario PLG s'avère le moins intéressant pour l'État. En effet, la faible taxation du GNL engendre de fortes pertes annuelles (-1,2 Mds € en 2030, hors COFP), plus importantes encore que pour les PLH (-0,9 Mds €) qui utilisent du gazole durant 20 % de leurs parcours. A

²⁵ Pour estimer les pertes de recettes fiscales liées aux reports modaux, nous avons considéré plusieurs paramètres, issus du CGDD (2016) et de l'éco-calculateur de l'ADEME. Nous supposons que les trains transportent 546 t en moyenne, que 20 % d'entre eux sont alimentés au gazole non routier (4,705 litres/vkm) et que les 80 % restant circulent à l'électricité (17,581 kWh/vkm). Les barges et les péniches alimentées au gazole non routier transportent 604 t en moyenne et consomment 10,8 litres/vkm. Nous considérons les mêmes taxes énergétiques que pour les PL (Cf. Tableau 3).

l'inverse, le scénario PL60 affecte modérément les finances publiques, que la demande de TRM soit fixe (-45 M € en 2030) ou variable (-35 M €). Rappelons que deux effets de composition s'opposent pour ce dernier scénario : si les PL60 rapportent plus de taxes et engendrent plus de coûts d'entretien par kilomètre parcouru, la hausse de la charge utile des PL implique une forte contraction du trafic.

Tableau 7 : Solde des finances publiques

Solde des finances publiques	PLH		PLG		PL60	
	Fixe	Var.	Fixe	Var.	Fixe	Var.
Investissement, avec COFP (M €)	-10 319	-9 708	-120		-10 772	
Solde en 2030, hors COFP (M €)	-866	-858	-1 193	-1 193	-45	-35
VAN 2030-2050, avec COFP (M €)	-25 894	-25 140	-21 582	-21 578	-11 581	-11 407

Source : calculs des auteurs

Si on additionne les investissements initiaux et la chronique des soldes annuels (actualisés entre 2030 et 2050 à l'aide du taux officiel de 4,5 %), on constate que la VAN du solde des finances publiques est plus dégradée pour le scénario PLH, d'un montant proche de 25-26 Mds € (en intégrant le COFP). Par rapport au scénario PLG, également très onéreux pour les deniers publics (22 Mds €), l'importance de la subvention publique accordée aux SAC explique la moitié de ce résultat. Finalement, le scénario PL60 est le plus favorable pour les finances de l'État. Malgré d'importantes dépenses initiales pour renforcer le réseau structurant, les faibles pertes annuelles aboutissent à un coût global de 11,5 Mds € pour les contribuables. Il est notable que cet ordre de grandeur est similaire aux gains économiques des chargeurs-transporteurs.

5. EXTERNALITÉS

Chaque scénario affecte le volume des externalités émises par le TRM en France, en modifiant les sources énergétiques des PL et en engendrant des reports modaux. Cette section quantifie et valorise ces effets externes.

5.1. ÉMISSIONS DE CO₂

Comme explicité en Introduction, l'objectif prioritaire de cet article est d'estimer les émissions de CO₂ du TRM économisées entre 2030 et 2050 grâce aux nouvelles technologies de PL.

Concernant les véhicules de référence (les PL40_LD et les PL40_CD), nous utilisons le facteur d'émission du gazole de 3,09 kgCO₂/litre qui correspond aux phases « combustion plus amont » (MEDDE, 2012), supposé stable jusqu'en 2050. En considérant la consommation moyenne de 0,3 litre/km (Cf. Tableau 3), les PL gazole émettent donc 0,921 kgCO₂/vkm. Bien évidemment, le bilan environnemental des PL60 est négatif si on raisonne dans cette unité de mesure, la consommation unitaire supérieure de 35 % engen-

drant des émissions de 1,243 kgCO₂/vkm. En raison du fort recul du trafic, on comprend néanmoins que cette technologie peut faire économiser du CO₂.

En croisant le facteur d'émission de l'électricité (de 0,053 kgCO₂/kWh en France ; MEDDE, 2012) avec la consommation unitaire de 1,5 kWh/km, on trouve des émissions de 0,080 kgCO₂/vkm pour les PLH qui, rappelons-le, réalisent 80 % de leurs distances annuelles sur les autoroutes (en mode électrique). Pour les 20 % restants, nous considérons le facteur de 0,921 kgCO₂/vkm lié aux PL traditionnels. En ce qui concerne les PLG, ces véhicules consomment 0,25 kg de GNV/km (Cf. Tableau 3). Sachant que le facteur d'émission « du puits à la roue » de cette énergie est de 2,13kgCO₂/kg (MEDDE, 2012), ces PL émettent donc 0,533 kgCO₂/vkm, près de deux fois moins que les PL40_LD.

Finalement, il faut considérer les émissions de CO₂ liées au trafic détourné des trains et des voies d'eau. A l'instar des calculs sur les variations de recettes fiscales (Cf. Note 26), nous supposons que 20 % du trafic ferroviaire circule au diesel et 80 % à l'électricité, ce qui donne un facteur d'émission de 3,634 kgCO₂/vkm. Pour les barges et les péniches, nous trouvons 33,156 kgCO₂/vkm.

Comme l'illustre le Tableau 8, les PLH constituent de loin la « meilleure » technologie de véhicules pour réduire les émissions de CO₂. Si tout le TRM interrégional était réalisé avec des PLH au lieu de PL gazole, le bilan carbone de la France s'améliorerait de 5,7 M tonnes de CO₂ en 2030, soit 136 M tonnes économisées sur 20 ans. Ce changement est loin d'être négligeable puisque qu'il représenterait une baisse des émissions du TRM interrégional de 73 % à l'horizon 2050. Les PLG représentent également une grande source d'économies, près de 3,2 M tCO₂/an²⁶. Finalement, tandis que les PL60 sont les plus bénéfiques pour les chargeurs-transporteurs et les finances publiques, leurs performances environnementales sont moindres (0,3 M t/an en 2030), même si bien réelles : sur 20 ans, ces nouveaux PL permettraient de réduire les émissions de CO₂ du fret routier massifié de 15 à 10 %. On constate pour ce dernier scénario que le report modal des trains et de la voie d'eau vers des PL circulant (toujours) au gazole atténue le potentiel d'économies de CO₂.

²⁶ Si les émissions de CO₂ sont calculées avec des facteurs « du puits à la roue », les économies proposées dans cet article sont vraisemblablement surestimées pour les scénarios PLH et PLG. Une réelle analyse de « cycle de vie » nécessiterait en effet d'intégrer aux calculs les émissions de CO₂ liées à la production/fin de vie des nouveaux véhicules, notamment les batteries, mais également celles générées durant la construction des caténaires et des stations d'avitaillement.

Tableau 8 : Facteurs d'émissions et économies de CO₂

Gains de CO ₂	PLH		PLG		PL60	
	Fixe	Var.	Fixe	Var.	Fixe	Var.
Emissions (kgCO ₂ /vkm)	0,080		0,533		1,243	
Gains en 2030 (M t)	5,68	5,67	3,28	3,21	0,36	0,23
Gains 2030-2050 (M t)	136,20 (-73,1%)	135,79 (-72,8%)	78,60 (-42,2%)	76,83 (-41,2%)	8,55 (-15,6%)	5,57 (-10,2%)

Sources : calculs des auteurs à partir du MEDDE (2012) et de l'ADEME

5.2. LES AUTRES EXTERNALITÉS

Les nouvelles technologies de PL et les reports modaux ne modifient pas uniquement le volume des émissions de CO₂. Ainsi, chaque scénario affecte également les nuisances environnementales liées aux polluants locaux et aux émissions sonores. Par ailleurs, le trafic induit ou déporté du fer et des voies d'eau accroît les externalités de congestion routière ou celles d'accidentologie. A contrario des émissions de CO₂, les coûts marginaux de ces effets externes dépendent des zones géographiques au sein desquelles sont réalisés les trafics routiers. Pour les scénarios PLH et PLG, nous supposons ainsi que 80 % des distances sont parcourues dans des espaces « interurbains », avec de faibles densités de populations exposées (les 20 % restants ayant lieu dans « l'urbain diffus »). Pour le scénario PL60, qui correspond au fret routier massifié sur de plus courtes distances, nous considérons une égale répartition entre ces deux types d'espaces.

Nous mobilisons le rapport QUINET (CGSP, 2013) pour valoriser les dommages sanitaires causés par les polluants locaux. En suivant les règles d'évolution préconisées, le coût des pollutions locales émises par les PL40_LD est de 0,056 €/vkm en 2030. La production d'électricité en France étant en majeure partie assurée par des centrales nucléaires, avec d'infimes émissions de polluants locaux, nous négligeons cet impact des PLH lorsqu'ils circulent sur les autoroutes. Concernant les PLG, diverses études (SIA PARTNERS, 2014 ; CHANDON, 2015) ont montré que les émissions (de PM ou NOx notamment) diminuent de 70 à 90 % par rapport à un PL gazole Euro 6. Nous diminuons donc le coût marginal des PL40_LD de 80 %. Finalement, puisque les PL60 consomment plus de gazole que leur véhicule de référence, nous majorons le coût externe des PL40_CD de 35 %²⁷.

Le rapport QUINET (CGSP, 2013) est également utilisé pour valoriser les nuisances sonores liées au TRM. Comme illustré dans le Tableau 9, ces coûts marginaux sont minimes par rapport aux polluants locaux. La principale différence entre les véhicules concerne les PLG. Ainsi, des tests menés par IVECO (CHANDON, 2015) montrent que ces véhicules sont 50 % moins

²⁷ Les valeurs tutélaires des trains et des barges sont également issues du rapport QUINET (CGSP, 2013).

bruyants que ceux équipés de moteurs à combustion. Concernant les PL60, des études acoustiques présentées dans KNIGHT et alii (2008) concluent qu'ils émettent autant de bruit que les PL conventionnels. Faute de connaissances sur le sujet, nous supposons finalement que les frottements entre les pantographes des PLH et les caténares causent autant de nuisances sonores que les moteurs à combustion.

Tableau 9 : Coûts externes en 2030

Coûts externes	PLH	PLG	PL60	PL40_LD	PL40_CD	Trains	Eau
Polluants locaux (€/vkm)	-	0,011	0,085	0,056	0,063	0,022	1,120
Bruit (€/vkm)	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,097	-
Accidents (€/vkm)	0,006	0,006	0,008	0,006	0,007	-	-
Congestion (€/vkm)	0,304	0,304	0,849	0,304	0,607	-	-

Sources : calculs des auteurs à partir de CGSP (2013), RICARDO-AEA (2014), CHANDON (2015) et SIA PARTNERS (2014)

Comme expliqué précédemment, la croissance du TRM liée au report modal pourrait engendrer une hausse des accidents causés par les PL. Le rapport QUINET (CGSP, 2013) ne fournissant pas de valeur tutélaire pour cette externalité, nous mobilisons la version actualisée du « *Handbook on External Costs of Transport* » (RICARDO-AEA, 2014). En considérant une croissance du revenu par tête de 2 % entre 2010 et 2030, le coût externe des accidents peut être estimé à 0,006 €/vkm et à 0,007 €/vkm pour les PL40_LD et les PL40_CD respectivement. Nous supposons que les PLH et les PLG génèrent autant de risques d'accidents que les PL gazole. Même si la littérature est caractérisée par des résultats ambivalents (PÉREZ-MARTINEZ, MIRANDA, 2016 ; STEER DAVIES GLEAVE, 2013), certaines études ont par ailleurs montré que les PL60 pouvaient générer un surcroît de dangerosité, les autres usagers des routes mettant plus de temps pour doubler ces véhicules plus longs. Par conséquent, nous majorons le coût externe d'accidentologie des PL40_CD de 50 % du surcroît de longueur des PL60 (+35 %, Cf. Tableau 1) et nous trouvons 0,008 €/vkm.

La dernière externalité présentée dans le Tableau 9 concerne la congestion routière. Ici encore, nous avons recours aux valeurs tutélaire issues de RICARDO-AEA (2014). Outre la distribution des distances parcourues sur les différents type de routes, nous supposons que les infrastructures sont à 80 % du temps dans leur « régime fluide », i.e. lorsque la congestion est faible, et à 20 % dans un régime proche de la « contrainte de capacité ». De plus, il est raisonnable de postuler que les PLH et les PLG n'impliquent pas de surcoût de congestion par rapport aux PL40_LD. A l'inverse, les PL60 occupent plus la voirie, car ils sont plus longs que les PL conventionnels mais également parce qu'ils circulent 10 % moins vite. Afin de prendre en compte ce double effet, le coût marginal de congestion des PL40_CD est majoré de 40 %. Conformément aux diverses études en économie des transports, on constate

que l'externalité de congestion est de loin la plus coûteuse²⁸.

5.3. LES GAINS EXTERNES ACTUALISÉS

En considérant ces coûts externes et les trafics PL concernés, avec ou sans report modal, il est possible d'estimer les variations de bien-être collectif impulsées par chaque scénario. Le Tableau 10 synthétise les résultats.

Tableau 10 : Bilan des effets externes

Externalités	PLH		PLG		PL60	
	Fixe	Var.	Fixe	Var.	Fixe	Var.
Solde en 2030 (M €)	346	283	381	318	218	86
VAN 2030-2050 (M €)	5 184	4 235	5 703	4 760	3 267	1 296

Source : calculs des auteurs

On constate que le remplacement des PL40_LD par des PLG constitue la meilleure option du point de vue des externalités. Ainsi, les gains collectifs se chiffrent entre 320 et 380 M € en 2030. Bien que d'une ampleur légèrement moindre, les externalités économisées avec les PLH ont un équivalent monétaire compris entre 280 et 340 M €/an. Finalement, l'impact des PL60 est certes positif, mais plus incertain. Lorsqu'on prend en compte l'induction de trafic et le report modal, on constate ainsi que les gains externes se chiffrent à 90 M € en 2030 (contre 220 M € si la demande de TRM massifié est fixe). Ce dernier résultat est en grande partie imputable à l'externalité de congestion routière et aux risques accrus d'accidents.

Pour prendre en compte le flux des bénéfices collectifs entre 2030 et 2050, nous utilisons à nouveau le taux d'actualisation social de 4,5 %. Il ressort alors que la VAN des gains externes se chiffre à 5,7 Mds € dans le meilleur des cas (PLG avec demande de TRM fixe) et à 1,3 Mds € dans la pire situation (PL60 avec demande de TRM variable). Autrement dit, ces bénéfices collectifs doivent être pleinement intégrés à notre analyse.

6. RÉSULTATS

A l'aide de ces résultats, nous pouvons désormais questionner la désirabilité socio-économique de chaque scénario. Les paramètres mobilisés dans cette étude étant parfois incertains, divers tests de sensibilité sont également proposés.

²⁸ Même si le trafic PL60 est marginal par rapport à l'ensemble des vkm circulés sur les routes françaises, une étude fine de la congestion routière nécessiterait de recourir à une fonction « débit-vitesse » prenant en compte les différentes classes de véhicules, avec un « coefficient d'équivalence » spécifique pour les PL60.

6.1. LES COÛTS D'ABATTEMENT

Afin d'identifier la politique présentant le meilleur bilan pour la société, nous estimons le coût d'abattement d'une tonne de CO₂ ($CACO_2$) :

$$CACO_2 = \frac{\Delta SP + \Delta FP + \Delta X}{\Delta CO_2}$$

Nous rapportons donc, pour chaque scénario, les émissions de CO₂ économisées entre 2030 et 2050 (ΔCO_2) aux effets économiques actualisés pour les chargeurs-transporteurs (ΔSP), pour les finances publiques (ΔFP) et pour le reste de la collectivité (ΔX). Le Tableau 11 synthétise les résultats.

Tableau 11 : Les coûts d'abattement actualisés de la tonne de CO₂

Synthèse	PLH		PLG		PL60	
	Fixe	Var.	Fixe	Var.	Fixe	Var.
VAN transporteurs (M €)	8 785	8 888	8 850	8 954	11 193	11 701
VAN finances publiques (M €)	-25 894	-25 140	-21 582	-21 578	-11 581	-11 407
VAN externalités (M €)	5 184	4 235	5 703	4 760	3 267	1 296
CO ₂ économisé (M t)	136,20	135,79	78,60	76,83	8,55	5,57
Coût d'abattement (€/t CO ₂)	87,6	88,5	89,4	102,3	-336,6	-285,2

Source : calculs des auteurs

Il ressort de ces calculs que les PL60 présentent, de loin, le plus faible coût d'abattement. L'appellation même de « coût » est ici trompeuse et on pourrait lui substituer celle de « bénéfice d'abattement ». En effet, si l'État devrait engager d'importantes dépenses pour adapter le réseau structurant au passage de ces nouveaux PL, les gains des chargeurs-transporteurs et la baisse des externalités du TRM feraient plus que compenser ces pertes pour les finances publiques. Autrement dit, le scénario PL60 semble caractérisé par un « double dividende » : avec des limites légales de tailles et de poids des véhicules revues à la hausse d'ici 2030, la société dans son ensemble gagnerait entre 337 € et 285 € pour chaque tonne de CO₂ qui ne serait plus rejetée dans l'atmosphère.

Le scénario PLH arrive en seconde position, avec un coût d'abattement de 88 €/t de CO₂. La collectivité devrait donc dépenser un montant proche de 90 € afin de réduire les émissions de GES d'une tonne. Comme pour les PL60, seule la puissance publique supporte les coûts des mesures, surtout au travers de la subvention accordée aux SAC afin que tout le réseau autoroutier soit équipé de caténaires. Finalement, les PLG présentent un coût d'abattement du CO₂ assez proche, entre 89 € et 102 €/t. Rappelons que ce scénario est caractérisé par un très faible investissement initial dans les stations d'avitaillement mais par de fortes pertes de recettes fiscales chaque année, le gaz

naturel étant relativement peu taxé²⁹. Par ailleurs, il est notable que cette technologie est aujourd'hui mature et la seule existante en l'état en France.

Précisons que ces coûts d'abattement doivent théoriquement être comparés à la valeur « officielle » du CO₂. Si le premier indicateur représente le montant des ressources collectives à engager pour réduire « à la marge » les émissions de CO₂, la valeur tutélaire décrit quant à elle les coûts sociaux futurs liés à l'émission dans l'atmosphère d'une tonne additionnelle et au réchauffement climatique, pour la France et le reste du monde. Le rapport QUINET (CGSP, 2013) fixe la valeur du CO₂ à 32 €/t pour 2010 et préconise de l'augmenter de 5,8 %/an ensuite, soit 98,8 €/t en 2030 (date à laquelle la puissance publique devrait choisir quelle action mettre en œuvre). Nos trois scénarios seraient donc jugés favorablement à l'aune de ce second critère.

Finalement, les décideurs publics pourraient être intéressés, non pas par le coût d'abattement d'une tonne de CO₂, mais par le volume total des émissions de GES évitées. Comme nous l'avons déjà mentionné, l'installation de caténaires sur le réseau autoroutier constitue à cet égard la meilleure solution, avec une diminution totale des émissions de 5,7 M t en 2030 et de 135 M t d'ici 2050. Par rapport aux objectifs affichés par la SNBC, la mise en œuvre de cette mesure permettrait donc d'assurer 23 % de la réduction annuelle des émissions visée pour le secteur des transports (voyageurs et marchandises confondus). A contrario, ce dernier critère de décision questionnerait la pertinence des PL60, les gains de CO₂ étant alors 17 fois moins importants.

6.2. TESTS DE SENSIBILITÉ

Bien qu'indicatifs sur les mesures à entreprendre, il est légitime d'interroger la robustesse de ces résultats. En effet, nous avons été contraints tout au long de cet article d'adopter plusieurs hypothèses simplificatrices, dont nous questionnons désormais l'influence.

Nous testons tout d'abord la sensibilité des coûts d'abattement et des émissions de CO₂ évitées en 2030 à l'étendue des marchés de fret concernés, en ajustant les chiffres du Tableau 2 de +/- 20 %. Les autres tests font varier dans les mêmes proportions le prix HT du gazole à l'horizon 2030, les élasticités prix-demande retenues pour estimer le report modal et l'induction de trafic, les coûts financiers des véhicules et des investissements initiaux

²⁹ Ces résultats laissent penser que l'État supporte seul les coûts des mesures. Un tel constat est intimement lié aux hypothèses sous-jacentes aux analyses coûts-avantages, méthodologie guidant nos calculs. Ainsi, les gains des transporteurs doivent théoriquement se répercuter par une baisse de coûts pour les chargeurs et pour les consommateurs, l'État prélevant des taxes à chaque étape. Par ailleurs, la baisse des externalités équivaut en partie à des économies pour la sécurité sociale. Autrement dit, les pertes pour le citoyen-contribuable sont partiellement compensées par des gains pour le citoyen-consommateur ou pour le citoyen-entrepreneur.

véhicules et des infrastructures. Ces derniers paramètres semblent d'autant plus critiques que les investissements publics sont ici majorés de 20 %, comme illustré par le test qui limite le sur-péage d'accès aux caténaires à 50 % du montant maximum : si les chargeurs-transporteurs voient leurs bénéfices augmenter, la plus forte subvention accordée aux SAC dégrade alors le bilan collectif, via le COFP. Par ailleurs, il apparaît primordial de valoriser convenablement les externalités de congestion routière et d'accidentologie imputables aux PL60, les deux tests associés correspondant ici aux valeurs « extrêmes ». Finalement, on constate que la pertinence de l'option PLG dépendra fortement de l'évolution du prix du gaz naturel à l'horizon 2030, sujet à de forts enjeux technologiques et/ou géopolitiques.

La dernière grande conclusion concerne le volume des émissions de CO₂ économisées en 2030, la Figure 3 démontrant à cet égard une grande stabilité des résultats. Certes, la taille des marchés fret concernés ou les consommations kilométriques des PL pourraient influencer le niveau des émissions. Mais les changements liés aux modifications des élasticités-prix ou des taux de chargement des véhicules sont relativement modestes. Surtout, la supériorité du scénario PLH par rapport aux options PLG, et encore plus PL60, ne souffre d'aucune contestation si l'objectif prioritaire des politiques publiques est de réduire le volume des émissions de CO₂, indépendamment du coût collectif des mesures à entreprendre.

6.3. DISCUSSION

Cet article n'a pas la prétention de dresser un panorama final des « bonnes pratiques » à suivre pour réduire les émissions de GES imputables au TRM en France. En effet, nous nous sommes limités à l'étude de 3 politiques publiques et notre méthodologie pourrait être transposée à l'analyse d'autres options, comme les centres de distribution urbaine, les autoroutes ferroviaires ou une hausse de la taxation du gazole. Suivant la même logique, il serait pertinent de questionner les effets cumulatifs des mesures -que nous avons ici considérées isolément- et donc de mieux prendre en compte les interdépendances entre les différents segments du marché de fret. Une autre piste de recherche future consistera à intégrer aux calculs les flux de fret internationaux ou de transit et à différencier les effets des différentes mesures selon la nationalité des entreprises de transport. Il serait également pertinent de moduler nos scénarios en ajustant, par exemple, la taxation de l'électricité ou du gaz naturel afin que les pertes et les gains des différentes politiques soient plus équitablement répartis entre les transporteurs-chargeurs et la puissance publique.

Nous avons par ailleurs souligné que certains paramètres mobilisés durant nos calculs nécessitent de futures recherches, à l'instar des dépenses à engager pour autoriser la circulation des PL60 en France ou des impacts de ces nouveaux véhicules sur la congestion et l'insécurité routière. Une autre

limite de cette étude concerne la nature et la forme des interactions entre sphères publique et privée, délibérément simplifiées. Comme souligné dans le scénario PLH au travers du sur-péage d'accès aux caténaires sur les autoroutes concédées, on comprend pourtant que l'adoption de nouvelles technologies de PL devra s'accompagner d'une régulation adéquate des pratiques commerciales des gestionnaires d'infrastructures ainsi que d'une bonne répartition des coûts et des bénéfices entre les acteurs. Les modalités d'une telle régulation doivent encore être inventées, ce qui ouvre un riche champ d'investigations.

Finalement, nous n'avons pas abordé les effets de ces politiques publiques sur le fonctionnement des réseaux de transports non routiers. Il est toutefois probable que certains scénarios, au premier rang desquels celui sur les PL60, perturbent significativement la gestion et l'entretien du réseau ferroviaire. Si les nouvelles technologies de PL mettent à mal la viabilité d'un pan entier du secteur des transports, il conviendrait donc d'en analyser plus précisément les effets indirects et les transferts de coûts.

En résumé, si cette étude a permis de quantifier les bénéfices socio-économiques attendus de trois politiques publiques visant à « moderniser » le TRM et à en améliorer le bilan environnemental, elle soulève également plusieurs interrogations majeures dont doivent s'emparer décideurs publics, entreprises et chercheurs.

BIBLIOGRAPHIE

ADEME (2013) **Aide à la décision pour le renouvellement des flottes de véhicules des entreprises et des collectivités**. Fiches de synthèse et recommandations par filière, 123 p.

AFGNV (2016) **Infrastructure GNV France 2020-2025**. AFGNV, 33 p.

AKERMAN P. (2016) eHighway: Electrified heavy duty road transport. **Workshop “The future role of trucks for energy and environment”**, International Environment Agency, Novembre.

ARTECONI A., BRANDONI C., EVANGELISTA D., POLONARA F. (2010) Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe. **Applied Energy**, Vol. 87, n° 6, pp. 2005-2013.

BEER T., GRANT T., WILLIAMS D., WATSON H. (2002) Fuel-cycle greenhouse gas emissions from alternative fuels in Australian heavy vehicles. **Atmospheric Environment**, Vol. 36, n° 4, pp. 753-763.

CARBONE 4 (2017) **L'autoroute électrique : Une innovation pour réduire les émissions de CO₂ du transport de marchandises**. Étude pour le compte d'Engie, EDF, Geodis, Vinci autoroutes, ATMB.

CGDD (2013) **Évaluation socio-économique rétrospective des dérogations au PTR maximum du transport routier de marchandises depuis 2002.** In **Les comptes des transports en 2011-Tome 2-Dossiers d'analyse économique des politiques publiques de transport.** 180 p.

CGDD (2016) **Le transport ferroviaire de marchandises en 2015.** Essentiel Datalab, 4 p.

CGDD (2017) **Les comptes transports de la Nation en 2016-Tome 1.** CGDD, 196 p.

CGSP (2013) **Évaluation socio-économique des investissements publics.** Commission présidée par E. QUINET, Commissariat Général à la stratégie et à la prospective, 351 p.

CHANDON C. (2015) **Natural Power-Véhicules Utilitaires et Poids Lourds GNV Iveco.** Présentation IVECO disponible en ligne, 34 p.

DEBAUCHE W., DECOCK D. (2007) **Groupe de travail véhicules plus longs et plus lourds: Une approche multidisciplinaire de la question.**

DEN BOER E., AARNINK S., KLEINER F., PAGENKOPF J. (2013) **Zero emission trucks: An overview of state-of-the-art technologies and their potential.** Delft, CE Delft et al., 151 p.

DGITM (2011) **Rapport au Parlement sur les enjeux et les impacts relatifs à la généralisation de l'autorisation de circulation des poids lourds de 44 tonnes.** MEDDE, 58 p.

DOLL C., FIORELLO D., PASTORI E., REYNAUD C., KLAUS P., LÜCKMANN P., HESSE K., KOCHSIEK, J. (2009) **Long-Term Climate Impacts of the Introduction of Mega-Trucks.** Fraunhofer, Study for the Community of European Railway and Infrastructure Companies (CER), 144 p.

DROMIGNY T. (2009) **L'état de l'art de la logistique globale des entreprises en France.** Etudes benchmarking de l'ASLOG, 108 p.

FRAGNOL L. (2017) **Concept d'autoroute électrique-Évaluation socio-économique.** Analyse THEMA, CGDD, 70 p.

GENEVOIS R., GILLE A. (2010) **Evolution du Fret terrestre à l'horizon de 10 ans.** CGDD, MEDDE, 121 p.

KNIGHT I., NEWTON W., MCKINNON A., PALMER A., BARLOW T., MCCRAE I., DODD M., COUPER G., DAVIES H., DALY A., MCMAHON W., COOK E., RAMDAS V., TAYLOR N. (2008) **Longer and/or Longer and Heavier Goods Vehicles (LHVs)-a Study of the Likely Effects if Permitted in the UK : Final Report.** TRL Limited PPR 285, 332 p.

MEDDE (2012) **Information CO₂ des prestations de transport-Application de l'article L. 1431-3 du code du transport. Guide méthodologique.** MEDDE, 236 p.

MEDDE (2015) **Stratégie Nationale Bas carbone (SNBC)**. 208 p. (http://www.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf).

NG YUK SHING J. (2015) **Électrification d'autoroutes par système de caténaire**. Rapport de stage à l'IFSTTAR-AME-DEST (dir. C. Rizet), 28 p.

ORTEGA A., VASSALO J.M., GUZMAN A.F., PÉREZ-MARTINEZ P.J. (2014) Are Longer and heavier Vehicles (LHVs) Beneficial for Society? A Cost Benefit Analysis to Evaluate their Potential Implementation in Spain. **Transport Reviews**, Vol. 34, n° 2, pp. 150-168.

PÉREZ-MARTINEZ P.J., MIRANDA R.M. (2016) Sensitivity analysis of impact model for road freight by the increase in the use of larger trucks in Spain. **European Journal of Transport and Infrastructure Research**, Vol. 16, n° 1, pp. 53-75.

POCHET R., WAGNER N., CABANNE I. (2016) **Projection de la demande de transport sur le long terme**, Analyse THEMA, CGDD, 170 p.

RICARDO-AEA (2014) **Update of the Handbook on External Costs of Transport. Final Report**. Report for the European Commission, 124 p.

RIZET C., CRUZ C., KONING M., TU-THI H.T. (2017) **Scénarios de réduction des émissions de CO₂ du transport routier de fret**. Rapport Ifsttar pour le MEDDE, 112 p.

SIA PARTNERS (2014) **Le GNL carburant, une solution face au durcissement des réglementations environnementales du secteur du transport**. Document de travail en collaboration avec Energy Lab.

STEER DAVIES GLEAVE (2013) **A Review of Megatrucks-Major studies and case studies**. Report for the European Parliaments' Committee on Transport and Tourism, 138 p.

UIC-CER-UNIFE (2014) **Megatrucks versus Rail Freight**. Présentation disponible en ligne, 32 p.

ANNEXES

ANNEXE 1. SUR-PÉAGE ET SUBVENTION PUBLIQUE

L'attractivité des PLH par rapport aux PL40_LD dépend de paramètres connus ainsi que d'une part inconnue des « coûts totaux de possession », i.e. les dépenses annuelles d'utilisation des PLH sur les autoroutes concédées :

$$TCO^{PL40_LD} < TCO_{connue}^{PLH} + TCO_{inconnue}^{PLH}(X, S)$$

$TCO_{inconnue}^{PLH}$ est ainsi fonction de la part du linéaire d'autoroutes équipées de caténaires (X) et du sur-péage (S) pratiqué par les SAC. Si le choix d'équipement peut être modélisé en fonction de ces deux dimensions (FRAGNOL, 2017 ; RIZET et alii, 2017), nous supposons que le soutien public garantira que l'intégralité du réseau d'autoroutes privées est équipée de caténaires en 2030 ($X = 1$). A l'aide des paramètres du Tableau 3, nous calculons par itération le sur-péage d'accès maximal et nous trouvons $S_{max} = 0,518$ euro/vkm.

Comme l'État souhaite que les opérateurs optent pour les PLH, les SAC doivent pratiquer un sur-péage d'accès inférieur à S_{max} . D'une manière arbitraire, nous faisons l'hypothèse que la cible visée par la puissance publique correspond à 75 % de ce seuil, soit 0,388 euro/vkm. Afin de s'assurer que les SAC ne dépassent pas ce montant, l'État fournit en contrepartie une subvention visant à annuler la VAN des investissements dans les caténaires sur 2030-2050 :

$$VAN_j = -I_0^{AE} \cdot L_j + \frac{I_0^{AE} \cdot L_j \cdot (1-a)^{20}}{(1+r)^{21}} + \sum_{t=1}^{20} \frac{(S-En) \cdot VKM_{t,j}^{PLH} - L_j \cdot E_t^{AE}}{(1+r)^t} + Sub = 0$$

où I_0^{AE} correspond aux coûts initiaux des caténaires sur le réseau j d'une longueur L_j , a décrit le taux de dépréciation du capital et r le taux d'actualisation, En représente les dépenses en électricité, $VKM_{t,j}^{PLH}$ décrit le trafic PLH annuel et E_t^{AE} les dépenses d'entretien des caténaires.

S'il est possible de calculer la VAN des investissements pour les différents réseaux autoroutiers (RIZET et alii, 2017), nous considérons ici une infrastructure agrégée de 9 500 km ($= L_j$). En supposant que $I_0^{AE} = 2$ M €/km (FRAGNOL, 2017), $E_t^{AE} = 0,1$ M €/km/an (FRAGNOL, 2017), $En = 0,192$ €/vkm (Cf. Tableau 3), $S = 0,388$ euro/vkm, nous pouvons déterminer la subvention publique nécessaire, selon que la demande de TRM soit fixe ou variable. Cette dernière hypothèse affecte en effet la variable $VKM_{t,j}^{PLH}$ et donc le montant de la subvention publique. Les résultats du Tableau 12 ont été obtenus en considérant un taux d'actualisation de 4,5 % et un taux de dépréciation de 2 %.

Tableau A1.1 : Trafic PLH sur les autoroutes concédées en 2030
et subvention publique

	VKM ₂₀₃₀ ^{PLH} (Mds vkm)	VAN (Mds €)	Sub (Mds €, COFP inclus)
Demande TRM fixe	6,75	-8,60	10,32
Demande TRM variable	6,91	-8,09	9,71

Source : calculs des auteurs

ANNEXE 2. COÛTS D'IMMOBILISATION ET DE STOCKAGE

Afin d'appréhender certains facteurs qui pourraient freiner l'attractivité des PL60, nous avons souhaité dépasser le cadre des seuls coûts de transport et mobiliser celui des « coûts logistiques totaux » (DROMIGNY, 2009). Le recours à ces PL pourrait en effet engendrer deux postes de dépenses additionnelles.

Comme illustré dans le Tableau 3, les PL60 circulent 10 % moins vite que les PL40_CD. Chaque tonne transportée est par conséquent « immobilisée » plus longtemps, ce qui représente un coût d'opportunité pour les chargeurs-transporteurs. Afin de valoriser cette perte, nous mobilisons la valeur du temps des marchandises de 0,60 €/heure/t (CGSP, 2013), la vitesse des véhicules ainsi que leurs chargements. Par rapport aux PL40_CD, les surcoûts d'immobilisation des marchandises transportées avec des PL60 sont de 0,194 €/vkm (=0,444 – 0,250).

Un second effet des PL60 pourrait concerner les coûts (fonciers et d'immobilisation) liés au stockage des marchandises dans les entrepôts. Les chargeurs-transporteurs qui rationalisent aujourd'hui leurs chaînes logistiques devront ainsi attendre plus longtemps avant de constituer un chargement de 40 t (contre 25 t avec les PL40_CD). S'il est difficile d'obtenir des informations sur ces coûts de stockage, il est possible de les approximer grâce aux ratios issus des études « benchmarking » de l'ASLOG (DROMIGNY, 2009). On peut déduire de ces ratios que les coûts de stockage correspondent à 48 % des dépenses de transport.

Pour estimer ces surcoûts liés à l'utilisation de PL60, nous partons donc des dépenses kilométriques annuelles des PL40_CD que nous estimons à 1,394 €/vkm. En appliquant ensuite le ratio de 48 % à ce montant, nous approximations les dépenses de stockage des PL40_CD à 0,669 €/vkm. Finalement, nous majorons ces coûts de stockage kilométriques de 50 % du surcroît de tonnes transportées avec un PL60 (30 % = 0,5*60 %), considérant donc que les chargeurs-transporteurs pourront adapter leur organisation logistique. En suivant ce procédé, nous trouvons des coûts de stockage/entreposage de 0,870 €/vkm pour les PL60. En additionnant les deux types de surcoûts, on remarque que les PL60 représentent des dépenses additionnelles de 0,395 €/vkm, soit 35 000 €/an en considérant leur kilométrage annuel.

ANNEXE 3. TESTS DE SENSIBILITÉ

Tableau A3.1 : Coûts d'abattement actualisés / économies de CO₂ en 2030

	PLH	PLG	PL60
Benchmark	88,5/5,7	102,3/3,2	-285,2/0,2
Marchés fret potentiels : + 20%	46,7/6,8	102,1/3,8	-607,3/0,3
Marchés fret potentiels : - 20%	151,3/4,5	102,7/2,6	198,1/0,2
Prix HT du diesel : +20%	36,3/5,7	36,5/3,2	-359,3/0,2
Prix HT du diesel: -20%	140,5/5,6	164,9/3,2	-210,7/0,2
Elasticité prix-demande : +20%	88,8/5,7	105,0/3,2	-267,5/0,2
Elasticité prix-demande : -20%	88,2/5,7	99,7/3,2	-299,4/0,3
Coûts matériels et infrastructures : +20%	144,4/5,7	108,1/3,2	79,2/0,2
Coûts matériels et infrastructures : -20%	32,6/5,7	96,6/3,2	-650,5/0,2
Consommation PL : +20%	22,5/6,8	99,7/3,8	-309,2/0,3
Consommation PL : -20%	188,4/4,5	105,5/2,6	-248,0/0,2
Chargement véhicules : -10%	64,6/5,4	104,8/2,7	-498,9/0,3
Chargement véhicules : -20%	40,4/5,1	107,2/2,1	-720,8/0,3
Péage caténaire = 0.9*Péage maximal	56,7/5,7	102,3/3,2	-285,2/0,2
Péage caténaire = 0.5*Péage maximal	144,9/5,6	102,3/3,2	-285,2/0,2
Congestion et accidents PL60 : +20%	88,5/5,7	102,3/3,2	494,2/0,2
Congestion et accidents PL60 : -20%	88,5/5,7	102,3/3,2	-1064,6/0,2
Prix HT du gaz naturel : +20%	88,5/5,7	155,8/3,2	-285,2/0,2
Prix HT du gaz naturel : -20%	88,5/5,7	46,8/3,2	-285,2/0,2

Source : calculs des auteurs