



Fret  
durable

# Comment décarboner le fret français d'ici 2050?



 **TRANSPORT &  
ENVIRONMENT**

## **Transport & Environment**

Date de publication : mai 2020

Analyse interne de Transport & Environment

Auteur : Fedor Unterlohner

Modélisation : Thomas Earl

Groupe d'experts : Stef Cornelis, Pauline Fournols, Lucien Mathieu, James Nix, Carlos Calvo Ambel

Conception graphique : Sofia Alexandridou

Traduction : Claire Antoine-Gombeaud

Éditeur responsable : William Todts, Executive Director

© 2020 European Federation for Transport and Environment AISBL

En cas d'incohérence ou de discordance entre la version anglaise et française, seule la version en langue anglaise fait foi.

### **Pour citer cette étude**

Transport & Environment (2020). Comment décarboner le fret français d'ici 2050 ?

### **Informations complémentaires**

Pauline Fournols

Clean Freight Policy Officer

pauline.fournols@transportenvironment.org

+32 (0)4 92 40 76 87

Square de Meeûs, 18, 2<sup>e</sup> étage | B-1050 | Bruxelles | Belgique

[www.transportenvironment.org](http://www.transportenvironment.org) | [@transenv](https://twitter.com/transenv) | fb: Transport & Environment

### **Remerciements**

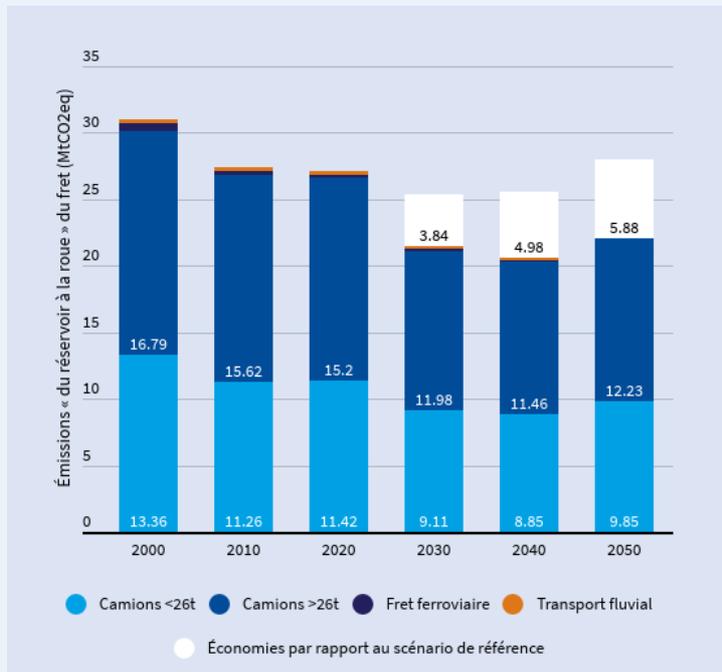
L'auteur souhaite remercier Florian Hacker (Öko-Institut e. V.), Martin Koning (Ifsttar, Université Gustave Eiffel) et Urs Maier (Agora Verkehrswende) pour leurs examens externes. Les conclusions et points de vue de la présente publication relèvent de la seule responsabilité des auteurs ci-dessus. Il en va de même pour toute erreur factuelle ou faille méthodologique potentielle.

## Résumé

La présente étude analyse les mesures et les technologies qui peuvent contribuer à la décarbonation du fret terrestre français. Elle contient un exercice de modélisation des émissions et une analyse de coût du coût total de possession (TCO) pour les camions longue distance. Elle parvient à la conclusion que, selon les hypothèses actuelles, les véhicules à batteries électriques (BEV) en général, et ceux utilisant une infrastructure de caténares suspendues (OC-BEV) en particulier, représentent les solutions les plus rentables pour atteindre un niveau zéro d'émissions de gaz à effet de serre (GES) « du puits à la roue » en France d'ici 2050.

Les *mesures d'efficacité* telles que l'intensification du transfert modal, l'amélioration du rendement énergétique des camions et l'optimisation de l'efficacité logistique peuvent contribuer à réduire les émissions du fret, mais ne sont pas suffisantes pour atteindre les objectifs de la France de 2030 dans le cadre de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) et le Règlement de répartition de l'effort (RRE), encore moins pour décarboner tout le secteur du fret français d'ici 2050.

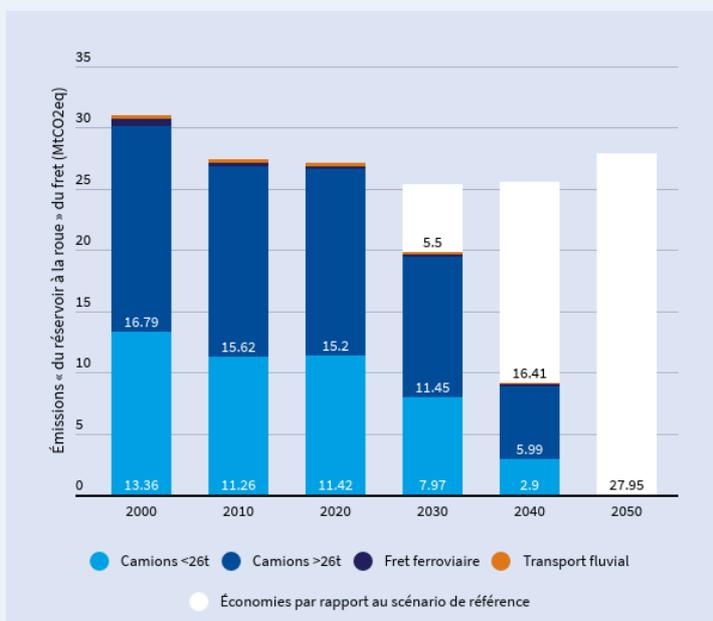
La combinaison de toutes les mesures d'efficacité entraînerait une réduction des émissions « du réservoir à la roue » de 18 % d'ici 2050 (par rapport à 2018). Aussi, il sera nécessaire de décarboner intégralement la flotte de poids-lourds (PL). Cette opération est techniquement possible, à condition que la transition commence dès le début des années 2020.



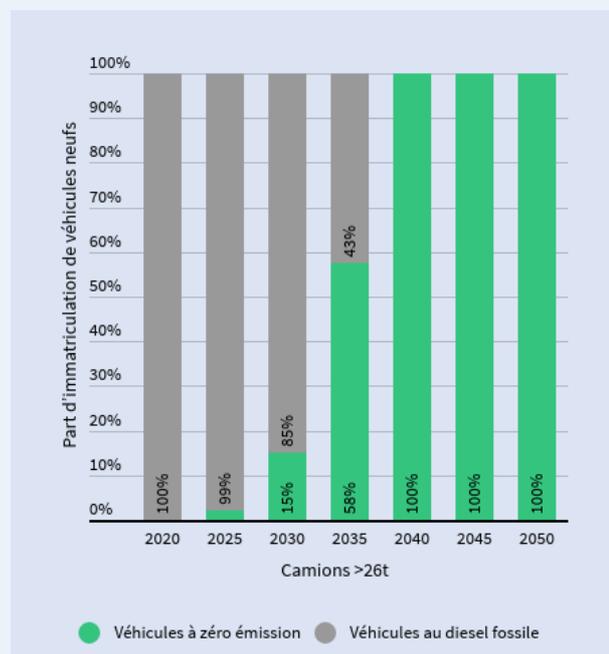
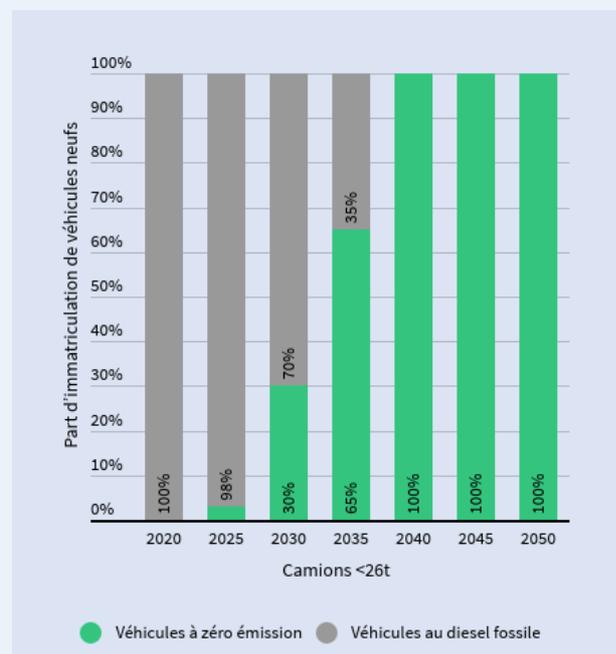
Scénario de référence vs. addition des mesures d'efficacité

En complément des mesures d'efficacité, un recours généralisé à la vente de véhicules à zéro émission (ZEV), une élimination progressive des ventes de camions roulant au carburant fossile d'ici 2040 et une interdiction de la flotte restante de ces mêmes camions entraîneraient un niveau zéro d'émissions « du puits à la roue » d'ici 2050.

En 2030, les ZEV devront représenter au moins 30 % (moins de 26 tonnes de poids total combiné (PTAC)) et 15 % (plus de 26 tonnes de PTAC) des ventes de PL neufs. La fin des ventes de véhicules au diesel fossile devra avoir lieu au plus tard en 2040. Et même ainsi, il sera nécessaire d'interdire la circulation des véhicules roulant au diesel fossile restants en 2050, si l'on veut atteindre une décarbonation totale.



Mesures d'efficacité, adoption des ZEV, interdiction du parc automobile restant



Taux nécessaire de nouvelles immatriculations de camions d'un PTAC inférieur et supérieur à 26 tonnes

Les options envisagées dans la section *objectif zéro*, sont les suivantes :

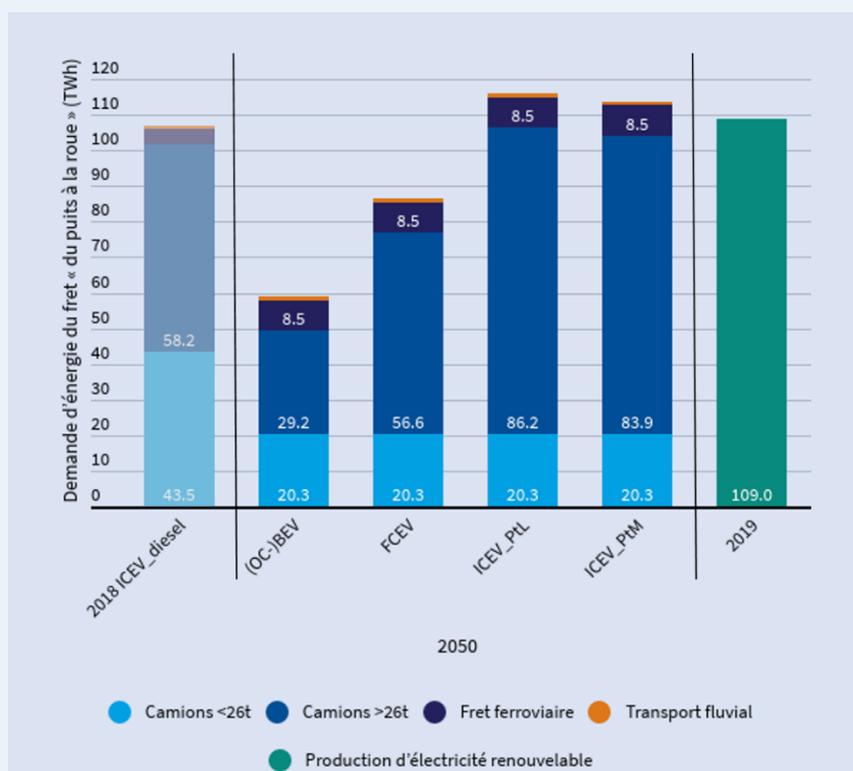
1. électrification directe sous forme de véhicules à batterie électrique ou à caténaires suspendues, c.-à-d. les (OC-)BEV

2. véhicules électriques à pile à combustible, c.-à-d. les FCEV
3. véhicules à moteur à combustion interne alimentés aux électrocarburants liquides ou gazeux, c.-à-d. les ICEV\_PtL ou \_PtM.

Toutes les solutions ci-dessus reposent sur l'électricité renouvelable produite par une capacité de production supplémentaire à la production actuelle et peuvent être considérées comme neutres en GES du point de vue des émissions « du puits à la roue ». Elles sont sujettes à différentes pertes d'efficacité de conversion et nécessitent donc des quantités variables d'électricité renouvelable.

Compte tenu des avancées technico-économiques et des signaux du marché provenant des fabricants de camions, on peut raisonnablement supposer que, pour le segment des véhicules commerciaux avec un PTAC inférieur à 26 tonnes, l'électrification des batteries se révèle la solution la plus rentable. Le modèle suppose donc que tous les camions de moins de 26 tonnes de PTAC seront des BEV dans toutes les solutions.

L'électrification directe sera toujours, de même qu'aujourd'hui, environ deux fois plus efficace que l'hydrogène, et environ trois fois plus efficace que les moteurs à combustion interne fonctionnant aux électrocarburants synthétiques. En 2050, la solution d'électrification directe nécessitera l'équivalent de 54 %, la solution à l'hydrogène 79 %, et les deux solutions hydrocarbures 106 % et 104 % de la production d'électricité renouvelable en France en 2019.

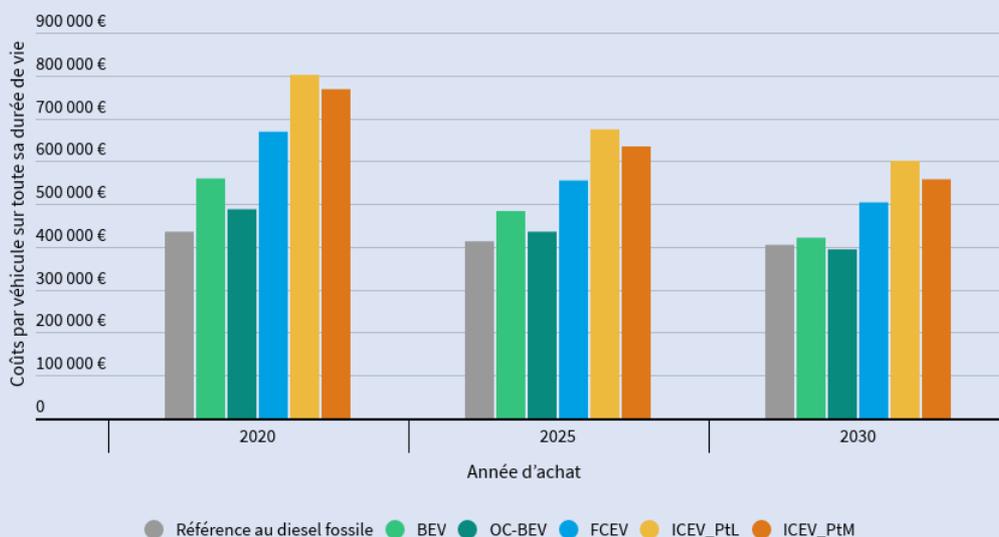


*Demande supplémentaire d'électricité renouvelable comparée à la production d'électricité renouvelable en France en 2019*

Les coûts liés à la demande en électricité renouvelable ne représentent qu'une partie des éléments qui doivent être pris en compte. En y ajoutant tous les coûts liés à l'achat, à l'exploitation et à l'infrastructure du véhicule, ainsi que les taxes, cotisations et redevances routières, les BEV et les OC-

BEV disposent des TCO les plus bas de toutes les solutions. Ils resteront également moins chers à posséder et à exploiter que les FCEV et les ICEV alimentés aux électrocarburants synthétiques dans le cas où ces carburants à base d'électricité seraient produits à l'étranger et expédiés en France (voir section 5).

### ■ Coûts total de possession des poids lourds longue distance en France - scénario de la mer du Nord



**Notes:** Prix nominaux à l'exclusion de la TVA. Supposant une première période d'utilisation de 5 ans. Incluant les coûts totaux de véhicule (prix au détail et valeur résiduelle, entretien et réparations, taxes sur le véhicule, à l'exclusion des coûts de financement), les coûts de carburant (y compris les frais de connexion au réseau, les coûts de transport et de distribution, et les taxes et cotisations), les coûts d'infrastructure (en pleine utilisation) et les redevances routières.

### Recommandations politiques

Une transition de chaîne de traction vers l'électrification directe sera indispensable si la France veut atteindre ses objectifs environnementaux contraignants de 2030 et 2050 à moindre coût pour le secteur public, les entrepreneurs et les consommateurs. Les mesures politiques adoptées à partir d'aujourd'hui, tant à l'échelle de la France qu'à celle de l'UE, entraîneront une baisse des émissions du fret mais de manière insuffisante pour atteindre des objectifs. Les conclusions de cette étude incitent donc les législateurs en France à prendre des mesures réglementaires rapides et décisives.

La France doit mettre au point une stratégie concernant le transport ferroviaire avant 2021. **Nous appelons le gouvernement français à élaborer et publier une stratégie sur le transport terrestre de marchandises** afin d'établir une trajectoire de décarbonation crédible, avec notamment des objectifs de réduction des émissions intermédiaires conformes à la SNBC et au RRE ainsi que des mesures politiques concrètes pour y arriver. Dans ce contexte, nous appelons le gouvernement français à mettre en place les politiques suivantes afin d'accélérer le passage à un transport routier zéro émission :

### Réforme fiscale

Actuellement, aucune réduction des taux d'imposition n'est prévue pour l'électricité utilisée dans le transport de marchandises routier. Un **taux de CSPE réduit** est actuellement accordé au transport de passagers par train, métro, tramway, bus électriques et au transport ferroviaire de marchandises. Cette

disposition **doit être étendue** au transport de marchandises par véhicules routiers directement alimentés à l'électricité, c.-à-d. **les BEV et les OC-BEV**.

La France applique actuellement un **droit d'accise extrêmement faible sur le méthane fossile** utilisé comme carburant. Cette imposition inadéquate n'est pas justifiée dès lorsqu'on considère les conséquences négatives sur le climat et la qualité de l'air. Au minimum, le taux complet de la TICGN pour le gaz fossile en consommation domestique devrait être également appliqué au méthane fossile comme carburant.

La **remise sur le carburant diesel doit être supprimée dès que possible**. Les prix pétroliers actuellement bas constituent une bonne occasion de progresser vers cet objectif. Comme une telle augmentation affecterait les transporteurs nationaux de manière disproportionnée par rapport à leurs concurrents étrangers à cause du tourisme à la pompe, une partie des revenus fiscaux supplémentaires pourrait servir à la création un nouveau fonds d'investissement afin de fournir des subventions à l'achat aux petites et aux moyennes entreprises de transports qui souhaitent investir dans des véhicules à zéro émission.

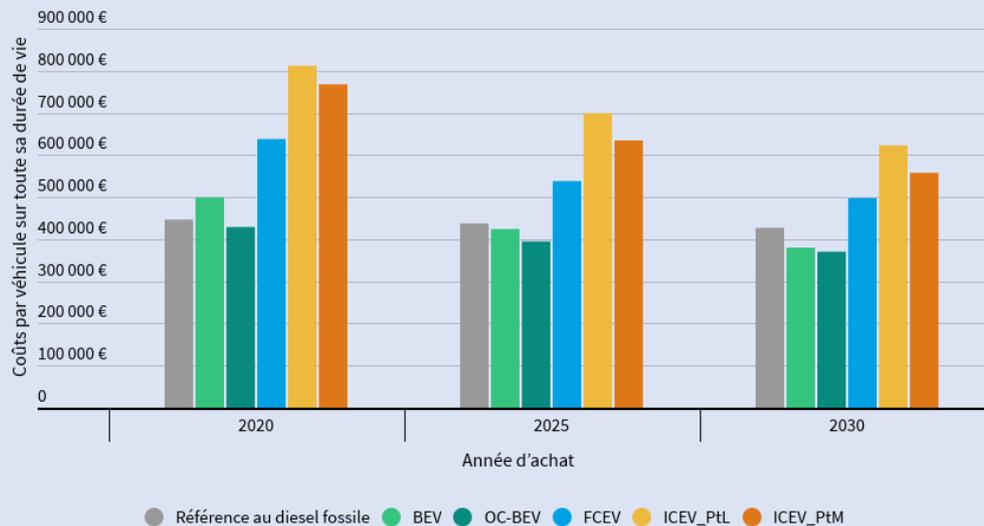
### **Mesures d'incitation à l'achat pour les véhicules à émissions nulles**

La France doit introduire une **subvention d'achat directe à durée limitée pour les camions à batterie électrique et alimentés à l'hydrogène**, comme l'a fait le ministère allemand des transports et en Californie. Cette subvention d'achat française être suffisamment intéressante pour maximiser l'effet incitatif. Tout mécanisme de financement doit se limiter aux ZEV et exclure les camions alimentés au gaz.

### **Réforme fiscale et mesures incitatives à l'achat : conséquences sur le TCO**

En combinant le taux d'imposition réduit de la CSPE pour les (OC-)BEV, la suppression de la remise sur le carburant après 2020 et une subvention à l'achat des ZEV basée sur le modèle allemand, le TCO des ZEV serait réduit jusqu'à 14 %, tout en augmentant le TCO des véhicules au diesel fossile jusqu'à 5 % (selon l'année). Ainsi, on avancerait la parité des prix avec le diesel fossile à 2020 pour les OC-BEV (par rapport à 2029) et à 2024 pour les BEV (par rapport à 2039).

## Coûts total de possession des poids lourds longue distance en France avec réforme fiscale et aide à l'achat des ZEV - scénario de la mer du Nord



**Notes:** Prix nominaux à l'exclusion de la TVA. Supposant une première période d'utilisation de 5 ans. Incluant les coûts totaux de véhicule (prix au détail, valeur résiduelle après déduction de l'aide à l'achat, entretien et réparations, taxes sur le véhicule, à l'exclusion des coûts de financement), les coûts de carburant (y compris les frais de connexion au réseau, les coûts de transport et de distribution, et les taxes et cotisations, dont le taux d'imposition réduit de la CSPE et la suppression de la remise sur le carburant après 2020), les coûts d'infrastructure (en pleine utilisation) et les redevances routières.

### Péage routier

Actuellement, les PL ne paient pas pour utiliser le réseau routier non concédé. Le gouvernement français devrait donc **mettre en place un système de péage basé sur la distance parcourue** pour tous les camions dont le PTAC est supérieur à 3,5 tonnes **sur les routes non concédées**. Ce système devra être conforme avec la réglementation de la directive Eurovignette actuellement à l'étude, et inclure une réduction importante des redevances d'infrastructure pour les ZEV. Il devra également mettre en place des frais de coûts externes pour la pollution de l'air et les nuisances sonores.

### Infrastructure de recharge

La France doit mettre fin aux mesures incitatives et diminuer les objectifs inclus dans son PNEC pour le développement d'infrastructure de recharge pour les véhicules au GNC et au GNL, et se concentrer sur le développement d'infrastructures pour les ZEV. Le gouvernement français doit présenter une stratégie formelle présentant ses intentions pour soutenir et lancer le déploiement d'infrastructures de charge privées et (semi-)publiques pour les camions de livraison urbaine, régionale et longues distances. Cela suppose la mise en place d'instruments de financement pour soutenir les sociétés de transport et le secteur logistique en installant des infrastructures privées et partagées pour le dépôt et le chargement destinées aux camions de livraison urbaine et régionale.

En ce qui concerne la mise en place d'infrastructures de ravitaillement en hydrogène pour les camions, des objectifs peuvent être établis pour les plus grands ports maritimes européens afin de tirer profit des effets de synergie avec le futur rôle de ce carburant dans le transport maritime et d'exploiter sa rentabilité avantageuse pour économiser sur les importants coûts de distribution.

## **Retrait progressif des ventes de camions à moteur à combustion interne d'ici 2035 et 2040**

La France doit interdire les ventes d'ICEV dont le PTAC inférieur à 26 tonnes d'ici 2035 et d'ICEV dont le PTAC est supérieur à 26 tonnes pour 2040. Pour cela, il faut que l'UE adopte des mesures législatives permettant aux États membres de mettre en œuvre cette interdiction avec l'approbation de l'Union et conformément aux règles internes du marché. L'alternative consisterait à interdire les nouvelles immatriculations directement au niveau de l'UE dans le cadre de la révision à venir des normes de CO<sub>2</sub> pour les PL.

## **Fret urbain zéro émission**

Malgré les preuves que **les camions au gaz ne présentent pas d'avantages importants sur la qualité de l'air** par rapport aux véhicules diesel (voir section 3.1.5), ils reçoivent le certificat Crit'Air 1, qui correspond à la catégorie la moins polluante, après les ZEV. Cette classification doit changer au plus vite.

Dans ce contexte, la mise en œuvre d'une **stratégie de logistique zéro émission en ville** pourrait être avantageuse. Les grandes villes françaises devraient aussi envisager de mettre en place des zones zéro émission pour les véhicules commerciaux (c.-à-d. les VUL et les camions) en vue d'atteindre les objectifs de 2025, tout en prenant des dispositions transitoires jusqu'en 2030 pour les véhicules déjà immatriculés.

# Table des matières

---

<b>Résumé</b>	3
<b>Acronymes et abréviations</b>	12
<b>Introduction</b>	13
Examen de la littérature existante	15
Mesures politiques adoptées à l'échelle nationale	15
Mesures politiques adoptées à l'échelle de l'UE	16
<b>Méthodologie</b>	16
Portée de l'analyse	17
Définition du scénario de référence	19
<b>Feuille de route vers un fret intérieur à émissions nulles</b>	22
Efficacité et autres mesures	22
Une meilleure efficacité énergétique des camions	23
Report vers le transport ferroviaire électrifié	24
Report vers le transport par voies navigables	25
Une meilleure efficacité logistique	27
Méthane fossile	29
Biométhane	31
Bilan et lacunes restantes	33
Objectif zéro : les voies possibles pour combler l'écart restant	34
Commercialisation et pénétration dans le parc automobile	35
Camions de livraison urbaine et régionale	36
Camions longue distance	37
Électrification directe	37
Électrification des batteries	37
Système de caténaires suspendues	38
Hydrogène	39
Power-to-Liquid	41
Power-to-Methane	42
<b>Demande supplémentaire d'électricité renouvelable</b>	43
<b>Analyse des coûts pour les camions longue distance</b>	45
Coûts de système	45
Coûts liés aux véhicules	46
Coûts de carburant	47
Coûts d'infrastructure	47
Résultats	48

Coût total de possession	49
Taxes, cotisations et redevances routières	49
Résultats	50
Conclusion : la solution optimale	51
<b>Recommandations politiques</b>	52
Réforme fiscale	52
Péage routier	53
Mesures d'incitation à l'achat pour les véhicules à émissions nulles	53
Infrastructure de recharge	55
Fourniture de camions zéro émissions	56
Transport urbain de marchandises zéro émission	57
<b>Annexe I : Hypothèses sur les efficacités de conversion</b>	58
<b>Annexe II : Hypothèses de coûts</b>	60
<b>Références</b>	70

---

## Acronymes et abréviations

BEV	Véhicule à batterie électrique
CCS	Captage et stockage du carbone
CCU	Captage et utilisation du carbone
CI	Allumage par compression
CIAS	Changement indirect dans l'affectation des sols
CMPC	Coût moyen pondéré du capital
CNG	Gaz naturel comprimé
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
CO <sub>2</sub> eq	Dioxyde de carbone équivalent
DAC	Captage direct par l'air (CO <sub>2</sub> )
ERS	Système de route électrique
EUTRM	Modèle européen de trajectoire des transports
FCEV	Véhicule électrique à pile à combustible
gCO <sub>2</sub> eq	Gramme d'équivalent en dioxyde de carbone
GES	Gaz à effet de serre
HPDI	Injection directe à haute pression
ICEV	Véhicule à moteur à combustion interne (aussi véhicule thermique)
ICEV_PtL	Véhicule à moteur à combustion interne fonctionnant avec des électrocarburants liquides (diesel)
ICEV_PtM	Véhicule à moteur à combustion interne fonctionnant avec des électrocarburants gazeux (méthane)
LCOE	Coût actualisé de l'électricité
LNG	Gaz naturel liquéfié
NECP	Plan national Énergie-Climat
OC-BEV	Véhicule électrique à batterie chargeant par caténaire
PI	Allumage commandé
PIB	Produit intérieur brut
PL	Poids lourds
PTAC	Poids total autorisé en charge
PtL	Power-to-liquid
PtM	Power-to-methane
PV	Énergie photovoltaïque
RRE	Règlement sur la répartition de l'effort
SEQE-UE	Système d'échange de quotas d'émission de l'Union européenne
SNBC	Stratégie Nationale Bas-Carbone
TCO	Coût total de possession
TEN-T	Réseau de transport transeuropéen
TICPE	Taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques
TICGN	Taxe Intérieure de Consommation sur le Gaz Naturel
tkm	Tonne-kilomètres
Transport fluvial	Transport par voies navigables
TTW	Émissions « de la pompe à la roue »
TURPE	Tarif d'utilisation du réseau public d'électricité
VECTO	Outil de calcul de la consommation d'énergie des véhicules
vkm	Vehicule-kilomètres
WTT	Émissions « du puits à la pompe »
WTW	Émissions « du puits à la roue »
ZLEV	Véhicule à zéro et faibles émissions

# 1. Introduction

Le secteur des transports est le premier secteur émetteur de CO<sub>2</sub> en France : au total, il émet l'équivalent de 134 mégatonnes de CO<sub>2</sub> par an (MtCO<sub>2</sub>eq) et représentait en 2017 plus de 30 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) – contre 22 % en 1990.<sup>1</sup> Le transport routier représente plus de 80 % de toutes les émissions liées aux transports, dont 20 % sont attribuables aux poids lourds (PL).<sup>2</sup>

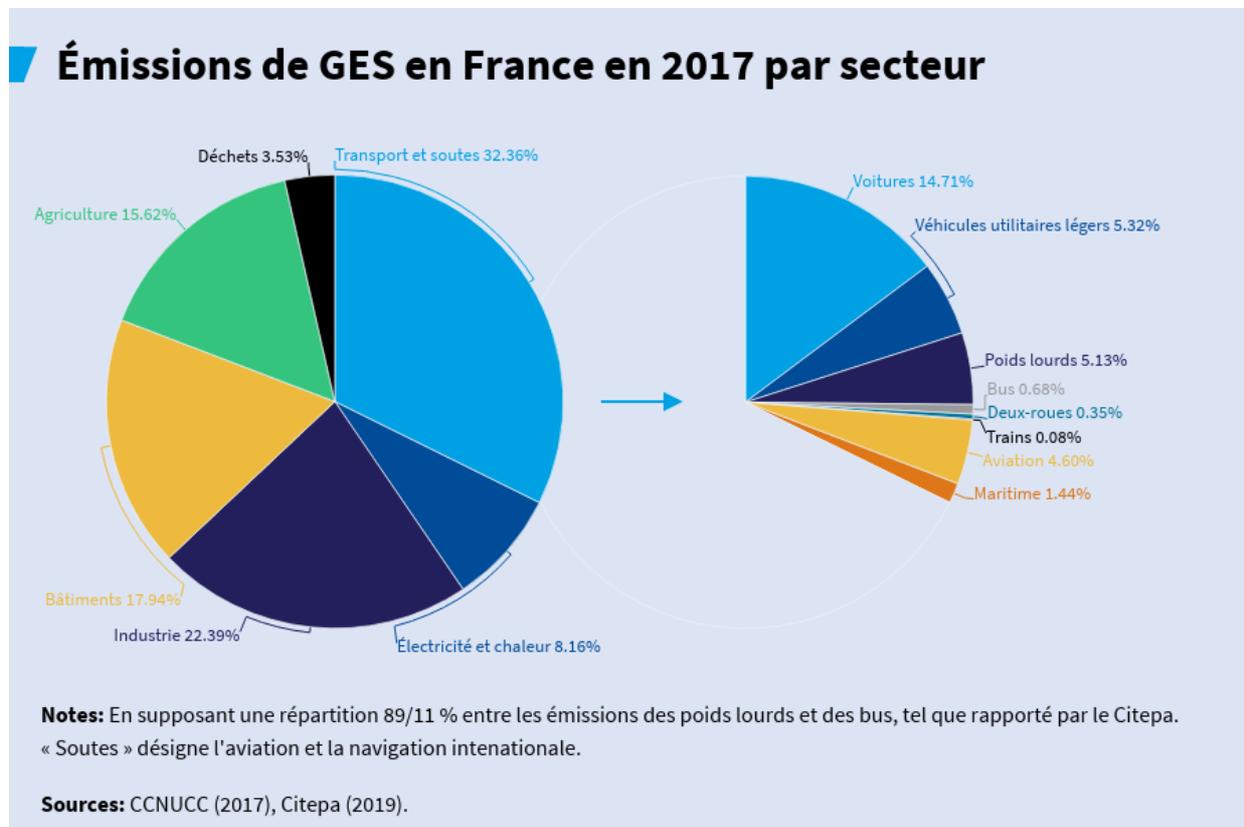


Schéma 1 : Émissions de GES en France en 2017 par secteur et par mode de transport

Dans le cadre du Règlement sur la répartition de l'effort (RRE), qui fixe des objectifs nationaux de réduction de GES pour les secteurs non couverts par le système d'échange de quotas d'émission de l'Union européenne (SEQE-UE) et notamment celui des transports, la France est tenue d'atteindre une réduction globale des GES de -37 % d'ici 2030 par rapport aux chiffres de 2005.<sup>3,i</sup> Pour ce faire, la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) a fixé un objectif de -32 % d'émissions pour le secteur des transports en France d'ici 2030 (par rapport à 2005).<sup>4</sup> On s'attend à ce que les objectifs de 2030 soient encore augmentés, ce qui aurait des conséquences pour les cibles établies par la SNBC et le RRE. Aussi, l'objectif français dudit Règlement de -37 % sert de référence pour le transport dans la présente étude. Après l'adoption de l'objectif d'une neutralité carbone pour 2050 (Loi énergie et climat)<sup>5</sup> et l'inclusion d'un objectif spécifique pour décarboner le transport routier d'ici 2050 dans la Loi sur l'orientation des mobilités (LOM),<sup>6</sup> le pays doit désormais réduire rapidement les émissions de tous les modes de transport à zéro avant le milieu du siècle. Concrètement, cela signifie que la France doit réduire les émissions liées au transport routier de 125,8 MtCO<sub>2</sub>eq aujourd'hui à 84,2 Mt d'ici 2030 et à zéro d'ici 2050.<sup>ii</sup> Sans une diminution importante des émissions du fret intérieur visant la neutralité, il serait à peu près impossible d'atteindre ces objectifs français et européens.<sup>iii</sup>

<sup>i</sup> Excluant les mécanismes de flexibilité.

<sup>ii</sup> D'après les inventaires de GES nationaux soumis à la CCNUCC et en supposant une répartition 89/11 % entre les émissions des PL et des bus, tel que rapporté par le Citepa.

<sup>iii</sup> Il est supposé que l'objectif du RRE pour 2030 est appliqué également parmi tous les modes de transports routiers.

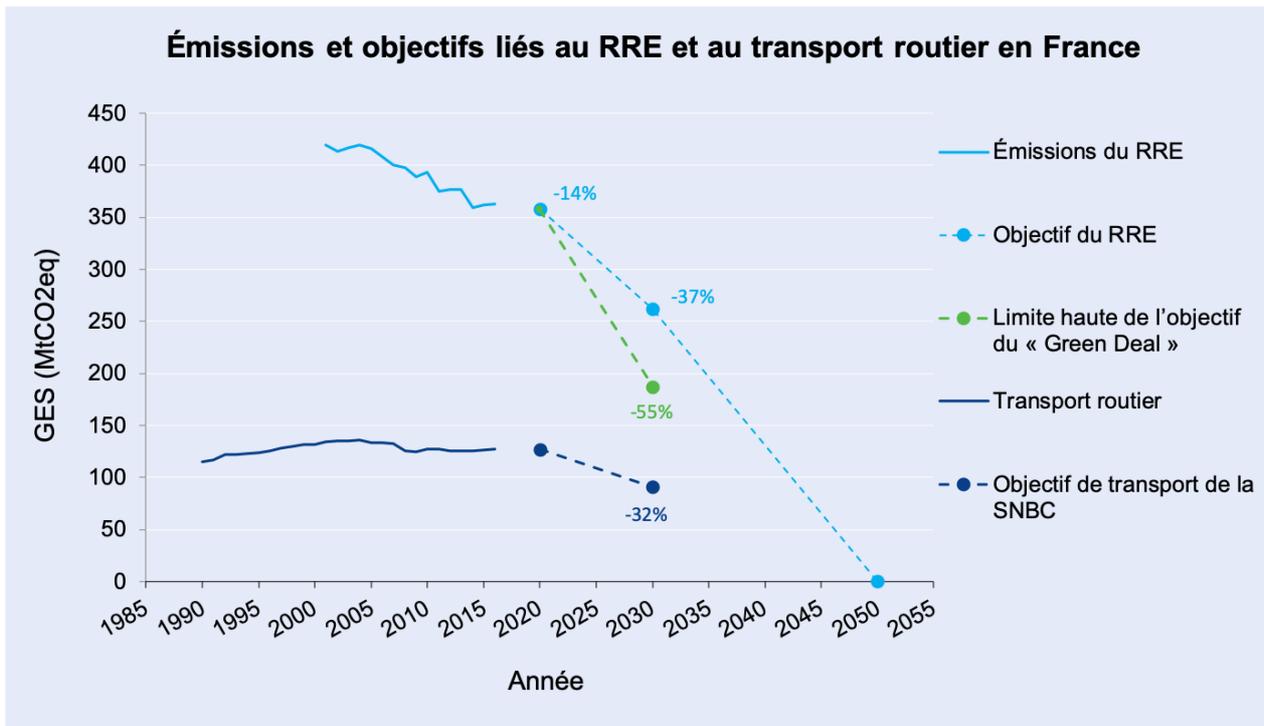


Schéma 2 : Trajectoires et objectifs liés aux émissions

Les émissions du secteur du fret intérieur, et particulièrement celles causées par les PL, constituent l'obstacle majeur à l'accomplissement de cet objectif. En 2019, 336 000 camions rigides et 211 000 tracteurs de plus de 3,5 tonnes étaient immatriculés en France.<sup>7</sup> Plus de 99 % de ces véhicules fonctionnent au carburant fossile traditionnel.<sup>8</sup> Ces véhicules immatriculés en France représentent 57 % du volume du transport routier national, le reste étant constitué de véhicules immatriculés à l'étranger.<sup>9</sup> Cette flotte, ainsi que les véhicules supplémentaires découlant de l'augmentation prévue du transport de marchandises, devront être remplacés par des alternatives neutres en GES.

Cette étude vise à analyser les outils et les technologies capables de contribuer considérablement à la décarbonation totale du fret en France. L'analyse se divise de la façon suivante :

1. Aperçu des mesures politiques en place à l'échelle de la France et de l'UE
2. Méthodologie et définition du scénario de référence
3. Efficacité et autres mesures : aperçu et analyse de leur potentiel de réduction des émissions
4. Objectif zéro : aperçu des technologies capables de combler les lacunes et d'aider la France à atteindre ses objectifs contraignants en 2030 et 2050
5. Demande supplémentaire d'électricité renouvelable et analyse des coûts appliquée aux différentes technologies
6. Recommandations politiques, à l'échelle française et européenne, pour une décarbonation du secteur

Comme l'illustrera la présente analyse, *l'efficacité et autres mesures*, telles que le transfert modal, l'amélioration du rendement énergétique et l'optimisation de la logistique peuvent contribuer à la décarbonation totale du secteur, mais ne suffiront pas pour l'atteindre. En effet, il sera nécessaire de passer des carburants fossiles à une technologie neutre en GES. Tant qu'il y aura des PL en circulation sur les routes françaises, ils devront rouler à l'électricité propre, de façon directe ou indirecte. Les technologies disponibles nécessitent différentes quantités d'électricité et entraînent différents coûts de système et d'utilisation. Les options envisagées pour décarboner totalement le fret routier, qu'on désigne par *objectif*

zéro, dépendent d'une électricité renouvelable générée par une capacité installée supplémentaire, produite dans le pays ou importée :

1. électrification directe sous forme de véhicules à batterie électrique ou à caténares suspendus
2. véhicules électriques à pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène
3. véhicules conventionnels à moteur à combustion interne fonctionnant au diesel synthétique (PtL) ou au méthane synthétique (PtM).

Ces options dessinent le cadre technico-économique dans lequel la France peut atteindre une réduction de -37 % des émissions de GES d'ici 2030 et de -100 % d'ici 2050.

## 1.1. Examen de la littérature existante

Plusieurs études récentes ont évalué les aspects technico-économiques de la décarbonation du fret en Europe en général, et en France en particulier. Si les technologies de chaîne de traction ont été étudiées en profondeur, ainsi que leurs potentiels respectifs de réduction des émissions et les coûts de systèmes et d'utilisation qui leur sont attribués, peu de publications ont pris en compte le rôle de la réglementation, qui sera nécessaire pour conduire la transition vers un fret à zéro émission.

Transport et Environnement a présenté de potentielles solutions pour une décarbonation du fret dans les pays de l'UE et les pays nordiques dans leur « feuille de route pour un fret terrestre et des bus favorables au climat en Europe » (*roadmap to climate-friendly land freight and buses in Europe*).<sup>10,11</sup> Earl et al. ont publié une « analyse des camions de transport longue distance à batterie électrique en UE » (*analysis of long haul battery electric trucks in EU*).<sup>12</sup> Koning et al. ont publié une évaluation socio-économique de « comment réduire les émissions de CO<sub>2</sub> liées au transport de marchandises en France » (*how to reduce CO<sub>2</sub> emissions from freight transport in France*).<sup>13</sup> Cambridge Econometrics a analysé les effets sur l'ensemble de l'économie dans « rouler vers un avenir plus vert : l'impact économique de la décarbonation des véhicules de marchandises en Europe » (*trucking into a greener future: the economic impact of decarbonizing goods vehicles in Europe*).<sup>14</sup> Schmidt et al. ont entrepris une étude sur le « carburant du futur pour le transport routier » (*future fuel for road freight*).<sup>15</sup> Mottschall et al. ont effectué une analyse de sensibilité des coûts liées à différentes options de carburants pour le transport longue distance en Allemagne.<sup>16</sup> Kühnel et al. ont procédé à une comparaison des transmissions des tracteurs longue distance incluant l'électrification par un système de caténaire suspendu en tant que source principale pour l'analyse des coûts dans cette étude.<sup>17</sup> Briand et al ont publié une étude des trajectoires de décarbonation profonde du transport de marchandises en France.<sup>18</sup>

## 1.2. Mesures politiques adoptées à l'échelle nationale

La France n'a pas encore instauré de politiques significatives pour décarboner son secteur de transport terrestre de marchandises. Si la Loi sur l'orientation des mobilités prévoit une diminution progressive des ventes des moteurs à combustion interne (ICE) pour les véhicules particuliers et utilitaires légers d'ici 2040, aucune date n'a été annoncée pour les PL.<sup>19</sup> Concernant le transport routier, la Loi prévoit une réduction de la remise sur le carburant diesel pour les PL (remboursement partiel de la TICPE) à hauteur de 0,02 €/litre,<sup>20</sup> ce qui réduit légèrement la moyenne actuelle de la remise (0,177 €/litre).<sup>21</sup> La recette fiscale supplémentaire qui en découle, de 140 millions d'euros, est affectée à l'Agence de financement des infrastructures de transport de France (AFITF).<sup>22</sup> Le budget 2020 de l'AFITF vient d'être augmenté de 500 millions d'euros et atteint un total de 3 milliards d'euros pour 2020.<sup>23</sup> La taxe carbone française (Contribution Climat-Énergie, CCE) reste gelée à son niveau de 2018, soit 44,6 €/tCO<sub>2</sub>. Il en va de même pour le droit d'accise sur le gazole de 0,59 €/litre (sans compter la remise).<sup>24</sup>

Le Plan national énergie-climat (PNEC) prévoit entre 800 et 2 000 PL à l'hydrogène et entre 400 et 1000 postes de ravitaillement en hydrogène. Par ailleurs, quelque 330 à 840 postes de ravitaillement pour les véhicules au gaz naturel devraient être mis en place d'ici 2028. La possibilité d'un amortissement spécial

pour les achats de véhicules au gaz naturel sera prolongée jusqu'à fin 2021, et étendue aux PL à batterie électrique et à l'hydrogène.<sup>25</sup> Fondamentalement, le cadre législatif manque de mesures concrètes qui pourraient réduire considérablement les émissions liées au transport des marchandises, renforcer le principe du pollueur-payeur, ou encourager l'adoption de technologie zéro émission.

### 1.3. Mesures politiques adoptées à l'échelle de l'UE

Au cours de la dernière période législative européenne, les législateurs ont adopté les dossiers suivants, qui aideront la France à réduire les émissions causées par son secteur de fret terrestre :

**Normes de performance en matière d'émissions de CO<sub>2</sub> pour les PL :** les premières normes d'efficacité énergétique pour les véhicules utilitaires lourds (PL) neufs fixent pour objectif à l'ensemble de la flotte une réduction moyenne de 15 % en 2025 et (d'au moins) 30 % en 2030<sup>iv</sup>. L'adoption de véhicules à zéro et faibles émissions (ZLEV) est encouragée par un système de super crédits plafonné à 3 % d'ici 2024, et par un système de crédit basé sur l'indice de référence, également plafonné à 3 % à partir de 2025. Par conséquent, si les fabricants déploient un nombre suffisant de ZLEV neufs, leur objectif de réduction de flotte peut être réduit d'un maximum de 3 points de pourcentage. Il existe quatre catégories régulées de camions qui recouvrent 65 à 75 % des émissions des PL<sup>26</sup>. Les autres catégories (à savoir, les camions plus légers et les bus) restent non réglementées jusqu'en 2022. La réglementation prévoit également une autorisation maximale de poids de deux tonnes supplémentaires pour les véhicules à zéro émission (ZEV)<sup>27</sup>. Cependant, cette réforme n'est pas applicable directement, et les États membres doivent la transposer à leurs propres systèmes juridiques.

**Directive sur les poids et dimensions :** cette directive accorde des dérogations sur la longueur maximale des véhicules afin de rendre les PL plus économes en carburant et plus sûrs. Après l'adoption récente de l'acte d'exécution, les nouvelles dimensions permettent d'améliorer l'aérodynamisme, la vision, la sécurité et le confort du conducteur. Ces nouvelles règles entreront directement en vigueur en septembre 2020<sup>28</sup>.

**Directive Eurovignette :** selon les dernières négociations sur la révision, les frais d'infrastructure pour les PL varieront selon leurs émissions de gaz d'échappement, et une remise obligatoire de 50 à 70 % pour les ZEV sera mise en place<sup>29</sup>. Puisque les contrats de concession autoroutiers actuellement en vigueur en France continueront d'être exemptés des nouvelles règles, la remise pour les ZEV n'aura que peu d'effet sur le réseau routier public jusqu'à ce que les concessions soient largement modifiées ou renouvelées.

**Directive sur les énergies renouvelables II :** la directive fixe un objectif majeur de 7 % de carburants avancés pour 2030. La moitié de cet objectif devra être atteint grâce aux biocarburants avancés (conformément à l'annexe IX de la directive), et les autres carburants avancés (comme l'électricité renouvelable ou les carburants synthétiques) assureront l'autre moitié. Il est difficile d'estimer quelle quantité de ces carburants sera utilisée par le transport routier.

Les mesures françaises et européennes dont il est question ici représentent le contexte politique. Elles nourrissent le scénario de référence, qui forme l'hypothèse de base de cette étude.

## 2. Méthodologie

La méthodologie intègre une approche mixte comprenant la modélisation des émissions et l'analyse des coûts. La quantification des émissions est entreprise avec le Modèle européen de trajectoires des transports (EUTRM).<sup>30</sup> Il est basé sur la feuille de route du transport mondial de l'ICCT (*Global Transportation Roadmap Model, GTRM*) et adapté, afin d'inclure les États membres de l'UE ainsi que le Royaume-Uni, la Norvège et la Suisse.

<sup>iv</sup> L'objectif à 2030 sera révisé en 2022.

L'EUTRM est un modèle fondé sur la demande qui calcule les émissions de GES à intervalles annuelles entre 2015 et 2030, puis à intervalles de 5 ans, jusqu'en 2050. La demande en matière de transports et de fret est basée sur le produit intérieur brut (PIB) ajusté pour tenir compte de la parité de pouvoir d'achat, qui est déterminé par le PIB historique et projeté, la population, et les coûts du carburant dans chaque pays. Toute la demande en matière de transport est alors satisfaite efficacement par des capacités de transport illimitées. Le lien entre le transport de marchandises et le PIB a été observé historiquement (voir section 2.2), et cette hypothèse est reportée dans le temps (la demande en transport de marchandises montre une légère dissociation avec le PIB). Aussi, une augmentation du PIB entraînera une augmentation de la demande en transport de marchandises. En l'absence de décisions politiques, cette nouvelle demande est alors satisfaite par l'augmentation de la taille de la flotte via des ventes de véhicules neufs supplémentaires. Dans ce modèle, la demande de transport de marchandises est prise dans son ensemble, et on n'y distingue pas les type de biens transportées ni les distances parcourues.

L'EUTRM se base sur des données historiques, et on prend en compte les PL, le stock de véhicules et le nombre de nouvelles ventes, le kilométrage, la consommation de carburant et le facteur de charge. Le renouvellement de flotte et l'achat de véhicules sont basés sur la courbe des retraits et la demande de transport de marchandises. Dans le cas d'un scénario de référence, et à l'exception des mesures politiques déjà adoptées, tous les paramètres susmentionnés sont supposés constants pour les années à venir. Les seules projections figurant dans le modèle concernent le PIB, la population, et la demande de fret. Les décisions politiques quantifiables changent les paramètres propres au mode. Dans le cas des PL, il peut s'agir des transferts modaux, du rendement énergétique, de l'efficacité de la logistique et de l'adoption de technologies de transmission dictés par les politiques. La force de l'EUTRM réside dans sa capacité à combiner plusieurs décisions politiques, à illustrer leurs effets sur le scénario de référence, et à quantifier l'importance relative des politiques en ce qui a trait à leur potentiel de réduction d'émission de GES « de la pompe à la roue » (TTW).

Les hypothèses formulées dans le cadre de scénarios qui se basent sur le potentiel inexploité ne doivent pas être comprises comme des positions politiques explicites mais plutôt comme des estimations hypothétiques formulées dans le meilleur des cas, qui pourraient ne pas se réaliser au même degré à l'avenir. Le même raisonnement s'applique à la sélection des mesures d'efficacité admissibles. Afin de ne pas sous-estimer le futur niveau de consommation d'énergie final des véhicules neutres en GES et de se référer correctement aux normes de rendement énergétiques de CO<sub>2</sub> pour les camions telles qu'elles sont actuellement réglementées, une réduction de 30 % à l'échelle de la flotte a été incluse dans la somme des mesures d'efficacité. Il est important de garder à l'esprit que le déploiement des ZEV réduira effectivement les objectifs de 2025 et de 2030, à la fois par les systèmes de crédits, et parce que leur décompte en tant que véhicules ne produisant aucun gaz d'échappement permettra aux fabricants de vendre des ICEV avec des émissions de référence plus élevée que 15 et 30 % sous le point de référence.

À des fins de simplification, la combinaison de différentes solutions technologiques n'est prise en compte ni dans la modélisation des émissions, ni dans l'analyse des coûts. À l'avenir, un mélange de différentes technologies de transmission pourrait se produire dans une certaine mesure. Cependant, il faut noter que cela pourrait avoir des implications négatives pour le taux d'utilisation et le rapport coût-efficacité des infrastructures de recharge et de ravitaillement ainsi qu'entraîner une baisse des économies d'échelle pour la production de véhicules et le développement technologique.

## **2.1. Portée de l'analyse**

Le fret routier, par voie ferroviaire et par voie navigable sont les trois modes de transport de marchandises pris en compte. Le déplacement des biens est mesuré en tonnes-kilomètres (tkm), et le déplacement des véhicules en véhicules-kilomètres (vkm). Le fret routier inclut les PL au-delà d'un poids total combiné de 3,5 tonnes. D'autres véhicules commerciaux tels que les bus, les vans et les véhicules utilitaires, sont exclus du champ d'étude parce qu'ils sont difficiles à comparer en ce qui concerne leur utilisation et leurs

caractéristiques technico-économiques. Le fret ferroviaire comprend à la fois le transport électrifié et au diesel. Le transport de marchandises par voie navigable fait référence aux marchandises transportées par barges sur les voies navigables intérieures. En raison de leur nature principalement internationale, les statistiques sur le fret international aérien et maritime posent des difficultés conceptuelles lorsqu'elles sont manipulées de la même manière que les modes de fret intérieur et ne sont donc pas comprises dans la présente étude. Transport et Environnement a précédemment publié des feuilles de route détaillées sur la décarbonation des secteurs de l'aviation et de la navigation en Europe.<sup>31,32</sup>

L'EUTRM ne prend en compte que les émissions de CO<sub>2</sub>eq « de la pompe à la roue ». Aussi, les émissions générées en amont pendant la production de carburant et d'électricité ne sont pas prises en compte dans la modélisation. Ce n'est cependant pas le cas pour l'analyse des coûts. Le point de départ de toutes les solutions étudiées est l'électricité renouvelable générée par des capacités de production supplémentaires, qu'il s'agisse du vent de terre dans la mer du Nord ou de l'énergie solaire photovoltaïque de l'Afrique du nord. Il n'y a donc pas de risque de distorsion méthodologique par le biais de potentielles différences dans les émissions « du puits au puits » entre les différentes technologies de transmission.

Les émissions dont il est question dans l'EUTRM sont issues des inventaires de GES nationaux soumis à la CCNUCC. Ces données sont dérivées des ventes nationales de carburant et de leur allocation à différentes classes de véhicules. Les camions immatriculés à l'étranger qui circulent sur le territoire français se ravitaillent souvent à l'étranger, et les émissions qui en découlent sont attribués à l'État membre concerné et non à la France. Ainsi, l'exercice de modélisation comprend un calibrage entre la consommation finale d'énergie actuelle et le nombre de PL immatriculés en France, reporté ensuite jusqu'à 2050.

Les émissions associées au cycle de vie de la production et d'élimination de véhicule ne sont pas prises en compte non plus. On s'attend à ce que les émissions liées à la fabrication des véhicules diminuent suivant la décarbonation progressive du secteur énergétique et des procédés de fabrication. La production d'éléments de batterie peut générer d'importantes émissions de CO<sub>2</sub> selon l'électricité utilisée. Les dernières données de recherche montrent que l'intensité de carbone actuelle des batteries est déjà beaucoup plus basse que précédemment estimé.<sup>33</sup> Certains fabricants ont récemment insisté sur le fait que la production de véhicules électriques et d'éléments de batteries en Europe n'entraîneront quasiment aucune émission de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie.<sup>34,35</sup> Il convient de noter que les PL sont généralement exploités au maximum afin de réduire le coût total de possession, avec un kilométrage final pouvant atteindre un million de kilomètres (ou plus) dans le cas de tracteurs longues distances. Par conséquent, l'intensité de carbone par tkm transportée attribuable à la production de batterie sera modeste. Il en va de même pour les émissions qui résultent du déploiement d'infrastructures de recharge et de ravitaillement. Par exemple, Wietschel et al. ont démontré que les émissions de cycle de vie émanant de la construction d'un système de caténaires suspendues sont pratiquement négligeables par rapport aux émissions « du puits à la roue » pendant l'exploitation d'un véhicule.<sup>36</sup>

Tôt ou tard, les émissions « du puits à la roue » (WTW) et celles liées au cycle de vie des véhicules neutres en GES dépendront de l'intensité de carbone du réseau électrique. Le scénario de référence de l'UE de 2016 prévoit que l'intensité de carbone de la production d'électricité française, déjà peu élevée, diminuera de 44 grammes en 2019 à 21 gCO<sub>2</sub>eq/kWh en 2050, à la suite de l'élimination progressive des capacités de production de combustibles fossiles encore en place.<sup>37,38</sup> Le mix électrique du pays est actuellement dominé par l'énergie nucléaire, qui représentait en 2017 71 % de la production brute d'électricité.<sup>39</sup> Le gouvernement français prévoit de réduire cette part à 50 % d'ici 2035 grâce au démantèlement de 14 des plus anciennes centrales nucléaires, et de remplacer la capacité perdue par de l'énergie exclusivement renouvelable.<sup>40</sup>

L'analyse des coûts du système et d'utilisation des camions longue distance étudie les coûts liés à la production des véhicules et du carburant, ainsi qu'au déploiement des infrastructures de recharge et de

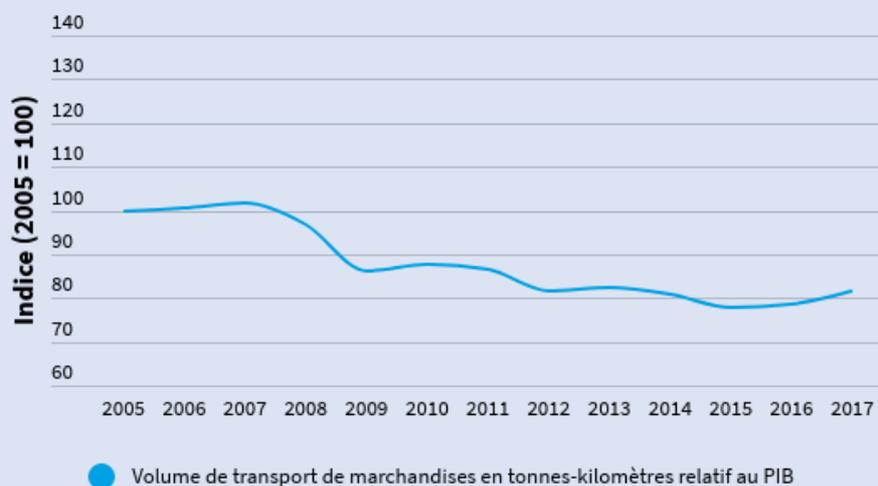
ravitaillement. Les coûts du système correspondent aux coûts de fabrication, d'assemblage et de vente du véhicule, de la production, du transport et de la distribution de l'électricité et du carburant, et à la construction et à l'entretien des infrastructures. À l'exception des frais de raccordement au réseau et du Tarif d'utilisation du réseau public d'électricité (TURPE), l'analyse exclut les taxes, les cotisations, les redevances routières et les subventions. C'est un choix délibéré afin de mieux évaluer, pour chaque solution technologique, le coût économique qui doit être assumé par la société (le fabricant, le transporteur, le consommateur et le secteur public). En revanche, les coûts d'utilisation, ou coût total de possession (TCO), comprennent les taxes et cotisations actuelles liées à la possession du véhicule et au carburant, ainsi que les redevances routières pour l'utilisation du réseau routier en France.

Il convient de formuler un avertissement concernant la liste des mesures d'efficacité éligibles. Celle-ci ne prend pas en compte les potentielles interactions intermodales dues aux fluctuations de la demande de transport de marchandises et des coûts de transport (c.-à-d. *ceteris paribus*). Ainsi, le potentiel de réduction des émissions ne tient pas compte, par exemple, du fait qu'un meilleur rendement énergétique entraînerait une baisse des coûts de transport, et donc un accroissement de la demande de fret routier, et de sa part modale. Pour simplifier, toute fluctuation de la demande de transport de marchandises due à l'élasticité des prix résultant du changement des coûts du carburant n'est pas répercutée dans la modélisation des émissions.

## 2.2. Définition du scénario de référence

Les hypothèses formulées dans le cadre du scénario de référence doivent être considérées avec prudence, puisqu'elles sont sujettes à différents facteurs d'incertitude. De façon générale, la demande de transport en termes de volume de fret est liée à la performance macroéconomique, à la production industrielle et à l'intensité des échanges, bien que cette corrélation varie selon les pays, et que son évolution à l'avenir n'est pas claire.<sup>41</sup> En France, l'intensité du transport de marchandises (c.-à-d. le volume de transport de marchandises relatif au PIB) est en légère baisse depuis 15 ans, mais le lien reste assez solide (voir schéma 3).<sup>42</sup> Même si le niveau actuel d'intensité du transport de marchandises ne perdurera pas nécessairement à l'avenir (par exemple, si les comportements de consommation changent), on part du principe qu'il restera constant aux fins de la modélisation de la demande de transport de la présente étude.

## Intensité du transport de marchandises terrestre



Source: Eurostat (2019).

Schéma 3 : Intensité du transport de marchandises terrestre

La « France » fait toujours référence à la France métropolitaine. Le prix du carburant est constant dans la modélisation, mais pas dans l'analyse des coûts. Dans l'EUTRM, les prévisions du PIB et de la population en France sont fondées sur les projections du scénario de référence de l'UE de 2016, les données l'OCDE et du FMI. Les prévisions de la demande de transport de marchandises ont été définies par rapport au scénario 1 présenté par l'IDDRI.<sup>43</sup> La légère différence d'environ 10 % résulte de la projection d'une autre référence historique et de l'exclusion des VUL. Ces données sont également comparables à la prévision de demande pour 2050 de 420 milliards de tkm citée dans la Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat, qui constitue le fondement de la SNBC.<sup>44</sup>

Les mesures visant à réduire la demande de transport de marchandises grâce à une modification des schémas de production et de consommation (comme la réduction des déchets, le recyclage, la réduction des distances de transport) ne sont pas prises en compte, afin d'assurer une estimation prudente de la demande future, mais pourraient effectivement contribuer à la décarbonation du secteur. Le tableau 1 résume les données saisies et les prévisions en matière de demande de transport de marchandises en lien avec le PIB et la croissance de la population.

Indicateur	2018	2030	2050
Population (millions)	63,9	67,0	70,7
PIB (milliards d'€ <sub>2018</sub> )	2,321	2,742	3,876
Demande de transport de marchandises (milliards de tkm)	317	345	405

Table 1: Hypothèses socio-économiques pour le EUTRM

La part modale relative du transport ferroviaire et par voies navigables intérieures a baissé au cours des trois dernières décennies, mais elle s'est stabilisée dans les dix dernières années. Nous partons du principe que la part actuelle restera constante dans les projections du scénario de référence. En ce qui concerne les émissions liées au transport ferroviaire, une diminution linéaire des kilomètres-trains opérés par des locomotives diesel, et leur remplacement progressif par des trains à batterie électrique et à l'hydrogène, sont supposés jusqu'à ce que ce mode de transport atteigne un seuil d'émission nul en 2050. De même pour le transport par voies navigables intérieures, nous partons du principe que l'ensemble de la flotte navale deviendra électrique, directement grâce à des batteries, ou indirectement par l'utilisation de piles à combustible et d'hydrogène d'ici 2050.

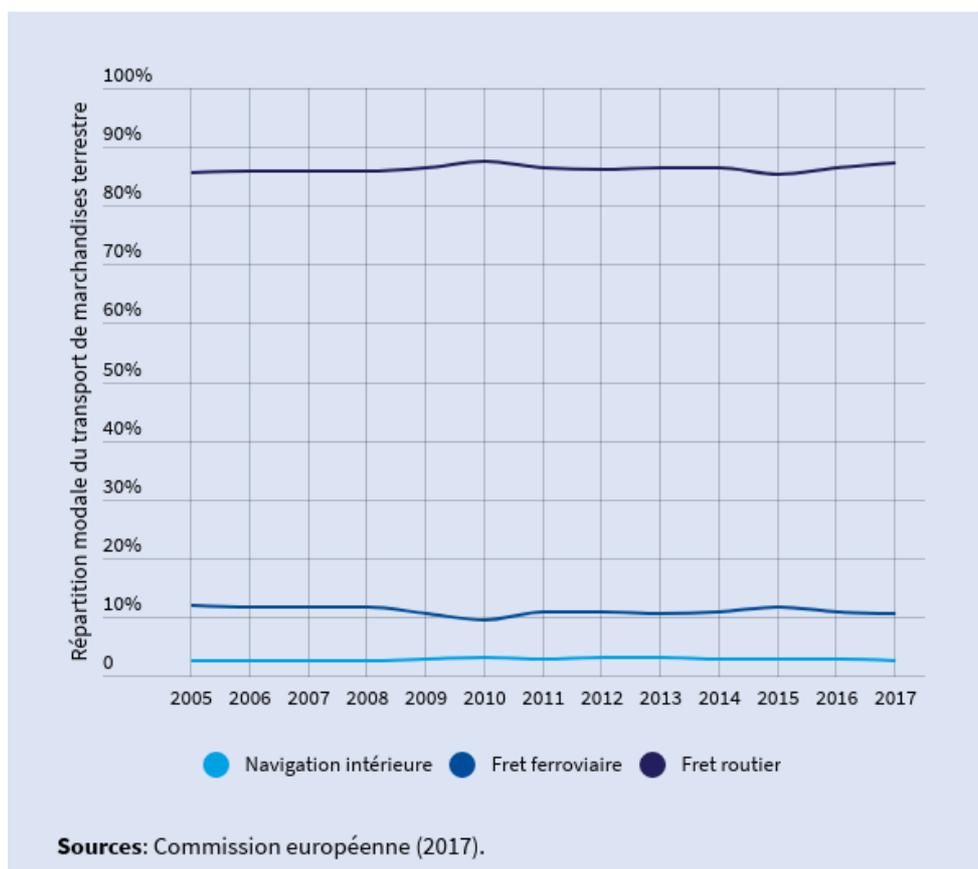


Schéma 4 : Répartition modale du transport de marchandises en France

Le scénario de référence prend en compte les tendances actuelles ainsi que toutes les mesures nationales et européennes adoptées et mises en œuvre à partir d'aujourd'hui. Cela inclut toutes les politiques listées aux sections 1.1 et 1.2 dans la mesure où elles constituent des instruments réglementaires concrets qui sont quantifiables en matière de réductions d'émissions. Le schéma 5 montre l'évolution des émissions « de la pompe à la roue » liées au transport de marchandises en France jusqu'en 2050 selon le scénario de référence. En l'absence d'autre mesure, le secteur du fret intérieur verra ses émissions augmenter légèrement de 27,0 en 2018 à 28,0 MtCO<sub>2</sub>eq d'ici le milieu du siècle. La demande de transport de marchandises entraînera un accroissement de 41 % en tkm, mais la consommation finale d'énergie n'augmentera que de 8 % d'ici 2050, par rapport à 2018. Sans les normes adoptées par l'UE en matière de CO<sub>2</sub>, les émissions augmenteraient davantage, parce que l'économie française, et donc la demande de transport de marchandises continueront de progresser. Par rapport à la référence de 2005 de l'objectif du Règlement sur la répartition de l'effort, le scénario de référence résulte en une réduction de 21 % d'ici 2030. En 2050, les émissions sont 4 % au-dessus de celles de 2018.

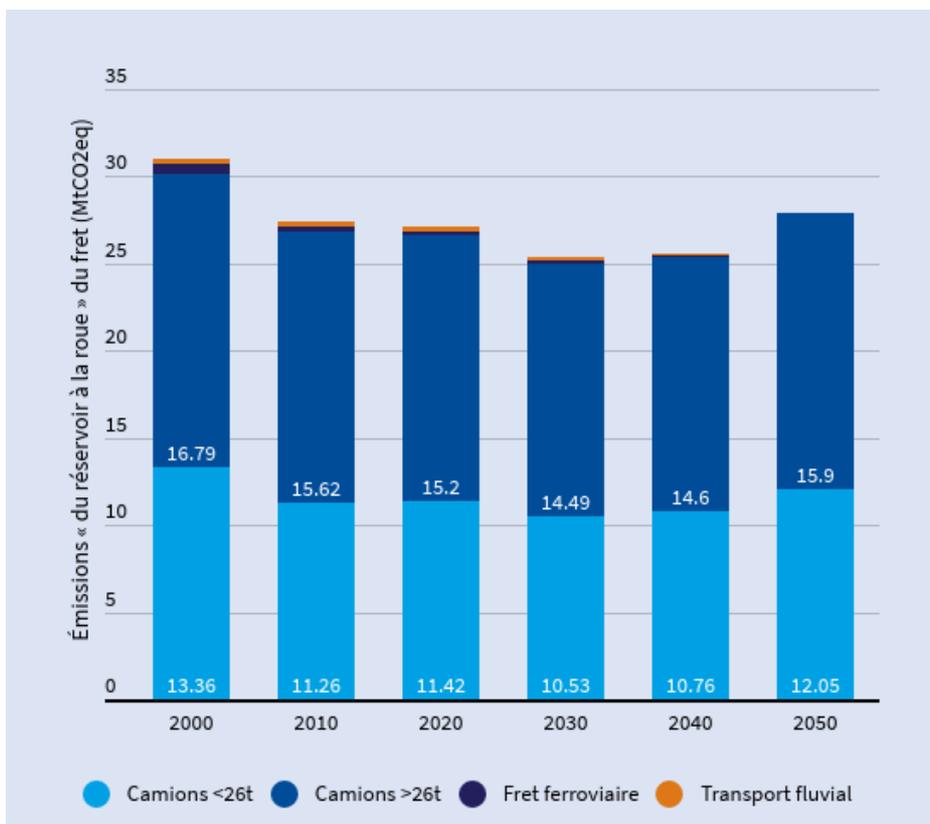


Schéma 5 : Émissions de CO<sub>2</sub>eq du secteur du fret intérieur français dans le cadre du scénario de référence

### 3. Feuille de route vers un fret intérieur à émissions nulles

Cette section énonce différentes mesures permettant à la France d'atteindre l'objectif du Règlement sur la répartition de l'effort de -37 % d'ici 2030 et -100 % d'ici 2050 pour le secteur du transport routier. La section 3.1 traite des méthodes de réduction qui se basent sur des technologies qui existent déjà ou qui seront mises en œuvre sous peu, *l'efficacité et autres mesures*. La section 3.2 décrit les différentes solutions technologiques capables de combler l'écart restant, *l'objectif zéro*.

#### 3.1. Efficacité et autres mesures

Il est possible de réduire les émissions liées au fret intérieur en optimisant les technologies existantes, à la fois en améliorant l'efficacité énergétique des véhicules de transport, et en améliorant celle du système de transport par le recours au transfert modal et à l'optimisation de l'efficacité logistique. L'efficacité et les autres mesures sont à cet égard mieux définies en tant que solutions basées sur des technologies conventionnelles, mais dont l'application réelle nécessiterait un investissement supplémentaire dans l'adoption technologique et le développement d'infrastructures à grande échelle. Dans les sections suivantes, nous présentons les principales hypothèses de chaque option possible dans le scénario de référence, et dans un scénario de potentiel inexploité. La réduction des émissions liées aux mesures admissibles est ensuite additionnée pour évaluer à quel point elles peuvent contribuer à l'atteinte de l'objectif par la France. L'écart restant est traité dans la section suivante, qui expose des solutions. Les mesures étudiées sont :

1. une meilleure efficacité énergétique des camions,
2. le transfert modal vers le transport ferroviaire électrifié,
3. le transfert modal vers le transport par voies navigables intérieures,
4. une meilleure efficacité logistique,
5. le méthane fossile,
6. le biométhane

### 3.1.1. Une meilleure efficacité énergétique des camions

Il existe de nombreux types et catégories de camions, et leurs utilisations sont variées : des livraisons urbaines à régionales au transport de longue distance. La consommation de carburant d'un véhicule donné dépend de multiples facteurs, notamment son cycle d'utilisation, l'accouplement de sa remorque, et sa charge utile respective. Au cours des 15 dernières années, l'adoption de mesures en faveur de l'efficacité énergétique des camions a été plutôt limitée.<sup>45</sup> La consommation de carburant moyenne d'un tracteur neuf moyen stagne depuis plus d'une décennie autour de 33 litres/100 km.<sup>46</sup>

Améliorer l'efficacité énergétique des camions neufs est l'une des manières les plus efficaces de diminuer les émissions. La consommation de carburant peut être réduite en optimisant l'efficacité du moteur et de la remorque, en réduisant la traînée aérodynamique et en généralisant les pneumatiques à faible résistance au roulement. En utilisant toutes les technologies disponibles et potentielles, mais pas encore largement commercialisées, qui seront prêtes dans les 10 prochaines années, il serait possible de rendre les camions jusqu'à 43 % plus économes en carburant d'ici 2030 (par rapport à 2015), ce qui signifierait une réduction annuelle autour de 3,6 %.<sup>47,48</sup> Parmi ces technologies, on compte celles des moteurs neufs avec un rendement thermique maximal de freinage de 55 % (la référence actuelle se situe autour de 45 %). La plupart de ces mesures d'efficacité – mais pas toutes – entraînent des économies de carburant qui excèdent l'investissement initial et les coûts d'exploitation, avec des délais d'amortissement de moins de deux ans, ce qui permettrait aux transporteurs de réaliser des économies nettes durant le cycle de vie du véhicule.<sup>49</sup>

Dans le cadre du règlement récemment adopté par l'UE, qui établissent des normes en matière d'émissions de gaz d'échappement, les fabricants de camion devront atteindre une réduction moyenne d'émission de leur flotte de 15 % d'ici 2025, et d'au moins 30 % d'ici 2030 (par rapport à l'année de référence 2019-2020).<sup>50</sup> Ces normes concernent certaines catégories de véhicules porteurs et de tracteurs, qui comptent pour 77 % des nouvelles immatriculations de véhicules et 65 à 75 % des émissions de CO<sub>2</sub> des PL.<sup>51,52</sup> Ces objectifs à l'échelle de toute la flotte peuvent être abaissés d'un maximum de 3 points de pourcentage par le biais de ce qu'on appelle le facteur zéro et faibles émissions (ZLEV), si les fabricants de camions déploient un nombre suffisant de ZLEV.<sup>v</sup> Les ZEV sont considérés comme des véhicules à zéro émission de gaz d'échappement. Ainsi, plus le nombre de ZEV déployés par le fabricant sera élevé, plus il pourra vendre d'ICEV avec des émissions de référence au-delà de 15 et 30 % au-dessus de la ligne de référence. Les valeurs de référence de CO<sub>2</sub> sont calculées à partir de l'outil de simulation VECTO (Outil de calcul de la consommation d'énergie des véhicules).

**Scénario de référence :** le modèle suppose l'amélioration de l'efficacité énergétique selon les normes adoptées, sans prendre en compte le fait que le déploiement de ZLEV abaissera légèrement l'objectif de réduction de la flotte pour 2030. Les sous-groupes de véhicules actuellement non réglementés continuent d'être exclus. Après 2030, aucune norme subséquente n'est adoptée, et aucune amélioration supplémentaire de l'efficacité énergétique n'est supposée.

**Scénario de potentiel inexploité :** Pour libérer pleinement le potentiel de l'efficacité énergétique et aller au-delà des normes de 2030 en matière de CO<sub>2</sub>, les technologies doivent devenir compétitives au niveau des prix. Pour ce faire, il faut qu'elles soient facilement accessibles largement adoptées par le marché. Par ailleurs, le transport routier doit s'acquitter d'une part plus importante de ses coûts externes qu'à l'heure actuelle. Grâce au bon signal de prix et à des normes plus strictes en matière d'émissions, on pourrait atteindre une réduction de consommation de carburant de -43 % parmi tous les sous-groupes de véhicules, y compris ceux qui ne sont pas encore réglementés. À priori, il s'agit du potentiel technique maximal de l'amélioration de l'efficacité des moteurs thermiques, de l'aérodynamique et de la résistance au roulement, ainsi que de l'hybridation. Au-delà de 2030, aucune amélioration supplémentaire n'est attendue.

---

<sup>v</sup> Calculs de l'auteur.

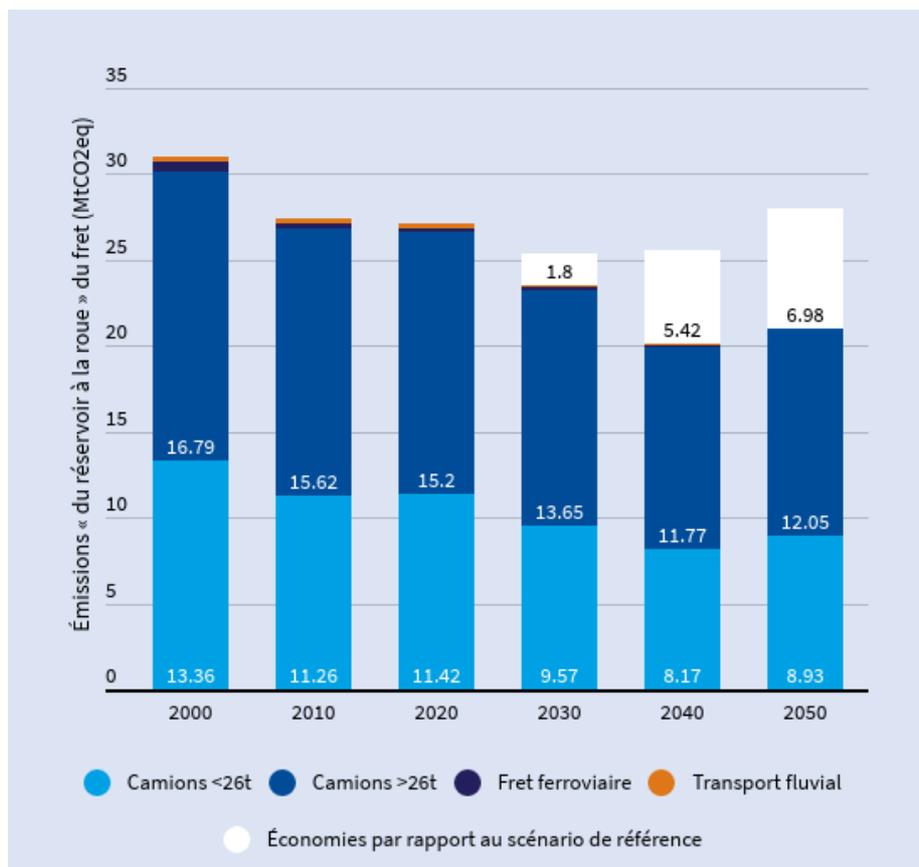


Schéma 6 : Amélioration de l'efficacité énergétique dans le scénario de référence et le scénario de potentiel inexploité

Le schéma 6 illustre les résultats d'une efficacité énergétique augmentée de 43 %. Cette hausse mènerait à une réduction de 22 % des émissions de CO<sub>2</sub>eq du fret d'ici 2050 par rapport à 2018, ou à une réduction de 25 % par rapport au scénario de référence en 2050.

### 3.1.2. Report vers le transport ferroviaire électrifié

Le transport ferroviaire représente actuellement 10,5 % de la répartition modale basée sur les tkm.<sup>53</sup> La quantité de biens transportés par voie ferrée en France a baissé de 57,7 en 2000 à 33,4 milliards de tkm en 2017, ce qui représente une réduction de volume de 42 % depuis le début du siècle.<sup>54</sup> Le transport ferroviaire est largement plus écoénergétique que le transport routier, en raison de son fort taux d'électrification. En effet, 67 % du réseau ferroviaire français adapté au transport de marchandises est déjà électrifié.<sup>55</sup> En 2016, 65 % de train-kilomètres et 76 % de tkm ont été effectués sur un réseau électrifié.<sup>56</sup> Les données de SNCF Réseau montrent qu'environ 80 % des trains-kilomètres opérés quotidiennement au diesel s'effectuent sur des voies ferrées déjà équipées de caténaires.<sup>57</sup> Ce phénomène est souvent inévitable en raison des derniers kilomètres non électrifiés.

Étant donné que la durée de vie d'une locomotive diesel est d'au moins 30 ans, le démantèlement du matériel roulant au diesel prendrait des décennies si on ne met pas en place un processus d'élimination accélérée.<sup>58</sup> Remplacer progressivement le matériel roulant au diesel au cours de leur démantèlement réduira l'intensité de carbone déjà basse du transport ferroviaire. Dans le cas des 33 % de voies ferrées non électrifiées qui sont adaptées au fret, les locomotives à batterie électrique et à l'hydrogène peuvent constituer une solution moins coûteuse que la construction de caténaires dans les endroits où la fréquence de service est trop basse pour que ces installations soient rentables.<sup>59</sup>

De multiples raisons expliquent la faible part occupée par le rail dans le transport de marchandises. Pour des distances allant jusqu'à 500 km, le transport routier reste plus intéressant du point de vue des coûts, du

temps, de la flexibilité et de l'adaptabilité.<sup>60</sup> De plus, le fret ferroviaire n'est pas adapté au transport de tous les types de marchandises : il convient mieux aux marchandises en vrac.<sup>61</sup> Le fret routier est quant à lui favorisé pour le transport d'unités de chargement et n'est confronté à quasiment aucun obstacle transfrontalier. À l'inverse, l'accès par rail doit souvent être accordé jusqu'à un an à l'avance ou au cas par cas, en raison des besoins de planification liés au réseau. Aussi, ce mode de transport n'est pas flexible pour la production à flux tendu ni pour la demande fluctuante des expéditeurs.<sup>62</sup>

**Scénario de référence :** La constitution du Réseau de transport transeuropéen (RTE-T) améliorera l'attractivité des services de fret ferroviaire internationaux et augmentera l'interopérabilité transfrontalière.<sup>vi</sup> Aucune mesure nationale supplémentaire n'est prise pour promouvoir le rail. Le modèle suppose ainsi un déclin linéaire des trains-kilomètres effectués par locomotives diesel jusqu'à une disparition totale d'ici 2050. Le fret ferroviaire devra également compenser un marché en berne de cargaison en vrac de carburants fossiles et de produits pétroliers raffinés, même si ces biens représentent déjà moins de 10 % des tkm parcourus en France aujourd'hui. Un virage substantiel de la route au rail n'a pas lieu, et on suppose donc que le rail conservera sa part modale actuelle de 10,5 % en France, ce qui mènera néanmoins à une augmentation de la capacité à 48,8 milliards de tkm, compte tenu de l'augmentation de la demande de fret.

**Scénario de potentiel inexploité :** Le potentiel de croissance ne sera pleinement utilisé que si l'infrastructure est améliorée et si le transport ferroviaire devient plus fiable et plus souple (par ex. en automatisant et en numérisant le matériel roulant, en augmentant la vitesse moyenne des trains ainsi que leur longueur, et en promouvant les transports combinés et intermodaux, notamment les « autoroutes ferroviaires »).<sup>63</sup> Les coûts du transport routier devront aussi s'accroître pour mieux s'acquitter de leurs externalités et ainsi rendre le transport ferroviaire plus concurrentiel.<sup>64</sup> La documentation prévoit qu'un virage considérable en faveur du rail est possible si des investissements stratégiques ainsi que l'inter et la multimodalité sont priorités. Briand et al. considèrent qu'une part modale augmentée à 13 % du fret ferroviaire d'ici 2050 est atteignable.<sup>65</sup> Le gouvernement français, lui, estime qu'il est possible que la part modale du fret ferroviaire d'ici 2050 s'élève à 12 %.<sup>66</sup> Ce chiffre est relativement équivalent à l'activité prévue par le scénario de référence. Le scénario de potentiel inexploité suppose que la capacité du fret ferroviaire peut être augmentée à 63,5 milliards de tkm d'ici 2050, ce qui équivaut à une part modale de 14 %. Cela revient à augmenter la capacité actuelle d'environ 84 %. Ce virage ne peut venir que des PL de plus de 26 t, parce qu'ils effectuent les plus longues distances. Dans ce cas de figure, le secteur ferroviaire dépasserait son record de 2000 en France, année où il avait atteint 57,7 milliards de tkm. Pourtant, en 2050, le fret ferroviaire transportera moins de marchandises en vrac (notamment en raison de l'élimination progressive du charbon et des produits pétroliers) par rapport à il y a 20 ans. En bref, il s'agit d'un scénario très ambitieux pour le report du fret routier au fret ferroviaire.

### 3.1.3. Report vers le transport par voies navigables

Le transport par voies navigables représente actuellement 2,4 % de la part modale basée sur les tkm parcourus en France.<sup>67</sup> La quantité de biens transportés a baissé de 9,20 en 2007 à 7,26 milliards de tkm en 2018, ce qui équivaut à une réduction de volume de 21 % au cours de la dernière décennie.<sup>68</sup> La France possède un vaste réseau de voies d'eau, dont 8 500 km sont navigables.<sup>69</sup> Cependant, environ 75 % de ce réseau est composé de rivières et de canaux peu profonds, ne pouvant accueillir que les bateaux contenant des charges légères, éliminant ainsi les avantages d'échelle en matière de volume de fret.<sup>70</sup> Selon Eurostat, la France n'utilise que 5 060 km de ses voies navigables.<sup>71</sup>

À l'instar du transport ferroviaire, le transport fluvial permet de décharger le volume du fret routier. Non seulement il émet moins de carbone, mais il engendre également moins de pollution atmosphérique, une

---

<sup>vi</sup> Le RTE-T, en association avec les corridors de fret ferroviaires intégrés, visent à supprimer les goulets d'étranglement transfrontaliers et à faciliter le transport longue distance en Europe.

meilleure sécurité, et des économies potentielles. Toutefois, il présente les mêmes inconvénients en matière de coûts, de temps, de flexibilité et d'adaptabilité que le fret ferroviaire. Pour que la navigation soit efficace et viable économiquement, un investissement continu dans l'infrastructure du réseau est nécessaire. Les voies navigables existantes doivent être constamment draguées et les installations utilisées et entretenues.<sup>72</sup> Le transport fluvial est également largement restreint aux marchandises en vrac et, dans une moindre mesure, au transport de conteneurs normalisés. Enfin, il est soumis à des contraintes géographiques encore plus importantes que le fret ferroviaire.

En Norvège et au Danemark, la technologie zéro émission a été mise en place pour la navigation, et les Pays-Bas ont mis au point des bateaux écologiques.<sup>73,74,75</sup> Pour mener à bien ce changement technologique, il sera nécessaire d'instaurer des normes opérationnelles rigoureuses en matière de CO<sub>2</sub> dans le contexte portuaire.

**Scénario de référence :** La France est dans l'obligation de mettre en place le réseau central du RTE-T d'ici 2030 et le réseau global d'ici 2050.<sup>76</sup> Le projet transfrontalier Seine-Escaut sur la mer du Nord, dont la réalisation est prévue pour 2030, fait partie de ce cadre.<sup>77</sup> Les flux entre la France et ses pays voisins que sont la Belgique et les Pays-Bas sont parmi les plus élevés du fret terrestre intra UE-28.<sup>78</sup> La Commission européenne estime que l'ouverture de ce goulet d'étranglement permettrait de prendre en charge jusqu'à 15 millions de tonnes de fret par an, et de réduire les coûts de transport.<sup>79</sup> En dehors de ça, aucune mesure nationale supplémentaire n'est annoncée pour stimuler le transport fluvial. Le volume de fret en vrac de carburants fossiles et de produits pétroliers raffinés comptait pour 10,4 % du total de tkm du transport fluvial en 2018, ce qui représente une baisse par rapport aux 18,8 % en 2007. Environ 50 % de cette baisse s'explique par le recul des carburants fossiles et des produits pétroliers.<sup>80</sup> À long terme, le volume restant de carburant fossile disparaîtra complètement, et devra être compensé par une autre demande. Le modèle suppose que le projet Seine-Escaut compensera cette baisse, et permettra une croissance suffisante pour maintenir la part modale actuelle du fret fluvial jusqu'à 2050. On s'attend à ce que tous les bateaux atteignent le niveau zéro d'émissions d'ici 2050.

**Scénario de potentiel inexploité :** Comme le transport ferroviaire, le transport fluvial ne sera exploité totalement que si les infrastructures sont systématiquement étendues et leur qualité améliorée. Les coûts du transport routier devront également s'accroître pour correspondre davantage à leurs externalités, et rendre le transport fluvial plus compétitif économiquement. Aux fins de cette étude, on suppose que la capacité actuelle du transport fluvial en France pourrait augmenter jusqu'à 15 milliards de tkm, débouchant sur une part modale de 3,3 % d'ici 2050 dans ce scénario.<sup>vii</sup> Ce virage ne peut venir que des PL de plus de 26 t, parce qu'ils effectuent les plus longues distances. Comme dans le cas du transport ferroviaire, cela signifie une augmentation considérable (+ 100 %) du volume de fret absolu du fret fluvial par rapport à aujourd'hui.

---

<sup>vii</sup> Depuis 1990, la Belgique a doublé sa capacité de transport fluvial sans étendre son réseau, et la Roumanie a multiplié sa capacité par six, également sans étendre son réseau. En ce qui concerne la longueur disponible de voies navigables et l'activité qui s'y effectue, la France a une utilisation faible (1,5 million de tkm de fret/km de voie navigable) par rapport à la Belgique (7,3 millions de tkm/km), l'Allemagne (7,2 millions de tkm/km), les Pays-Bas (7,8 millions de tkm/km), et l'Autriche (5,8 millions de tkm/km). Compte tenu du manque d'études à propos du potentiel maximal de transport fluvial en France, un doublement de la capacité est jugé réalisable.

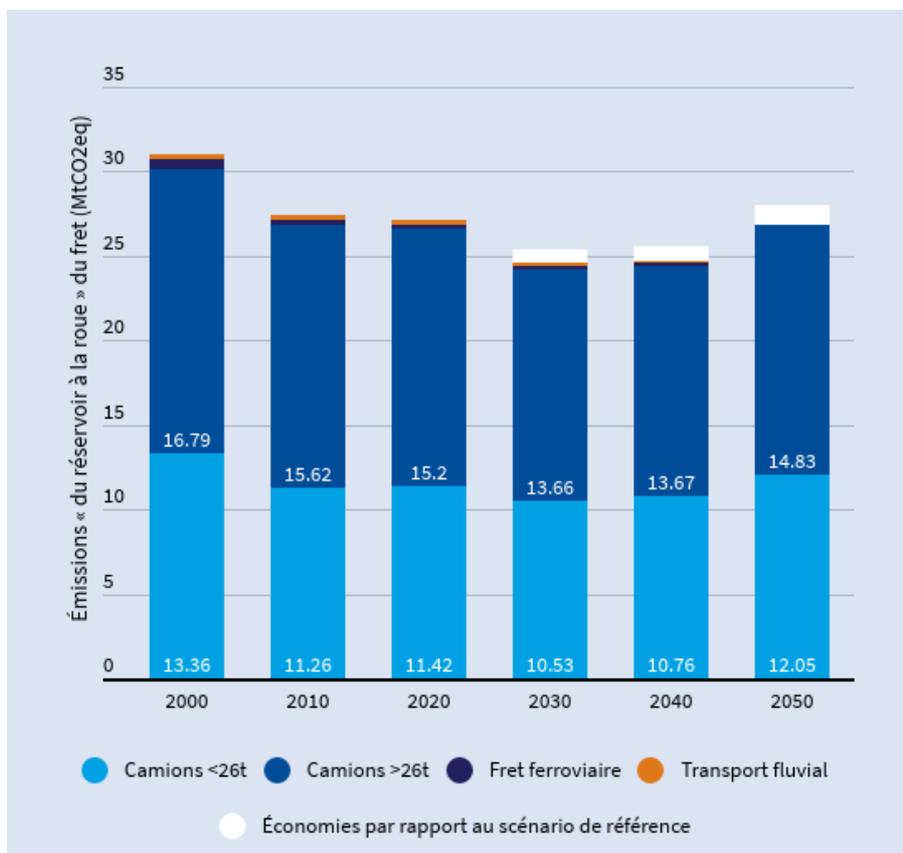


Schéma 7 : Illustration du virage vers le transport ferroviaire et fluvial dans le scénario de référence et le scénario de potentiel inexploité

Le schéma 7 illustre les résultats de l'ambitieux virage modal vers le rail et la navigation intérieure. Le changement en matière d'émissions est toutefois négligeable : les émissions de 2050 étant projetées comme équivalents à celles de 2018, ou avec une baisse de 4 % par rapport au scénario de potentiel inexploité en 2050.

### 3.1.4. Une meilleure efficacité logistique

La demande de transport de marchandises ainsi que la consommation finale d'énergie et les émissions qui en découlent peuvent être réduites grâce à une optimisation de la logistique du fret et à une meilleure utilisation de la capacité existante des véhicules. Si la part des trajets à vide en France a chuté de 25 % en 1999 à 18 % en 2017, près d'un cinquième des vkm est encore parcouru à vide sur le territoire national.<sup>81</sup> Et même si les éléments statistiques concrets manquent pour le prouver, il est probable que davantage de vkm soient effectués par des véhicules partiellement chargés.<sup>82</sup>

Dans certains cas, les trajets partiellement ou totalement à vide sont inévitables pour des raisons techniques ou opérationnelles.<sup>83</sup> En effet, les déséquilibres commerciaux et le trafic portuaire au niveau régional, ainsi que des limitations pratiques à la mutualisation des envois, entraîneront toujours une utilisation sous-optimale de la capacité de fret. Ce constat est encore plus vrai dans le contexte actuel de fabrication à flux tendus, qui favorise le recours à des unités de transport plus petites et exige une flexibilité de la part des transporteurs afin de répondre aux besoins à court terme des expéditeurs. La tendance actuelle est à la complexification des chaînes d'approvisionnement et à l'intensification des transports. En raison de l'internationalisation des procédés de production, on peut s'attendre à ce que ces phénomènes s'accroissent au cours des prochaines décennies.<sup>84</sup> Toutefois, il existe encore un grand potentiel de réduction du volume de fret par le biais, par exemple, de la mutualisation des cargaisons, de l'optimisation du chargement et de la charge de plancher.<sup>85</sup>

Comment se fait-il que les transporteurs puissent se permettre de faire circuler des camions partiellement ou totalement vides? Cela s'explique principalement par le coût actuellement bas du transport routier. En effet, ce secteur ne s'acquitte que partiellement de ses coûts externes, par le biais de taxes et de droits d'accise.<sup>viii</sup> Ces frais devraient être augmentés significativement pour refléter le principe du « pollueur-payeur » et couvrir les externalités causées par le fret intérieur bien plus qu'à l'heure actuelle.<sup>ix</sup> En France, les poids lourds occasionnent 3,70 € de coûts externes par 100 tkm, contre 1,50 € pour le transport ferroviaire et 2,11 € pour les voies navigables intérieures. Or, 90 % du total des coûts proviennent des PL.<sup>86,x</sup> Par ailleurs, les PL dont le PTAC est d'au moins 7,5 tonnes bénéficient d'une remise sur le carburant lorsqu'ils se ravitaillent en France.<sup>87</sup> Ce rabais équivaut à environ 0,177 €/litre, induisant ainsi une réduction d'un tiers des droits d'accise sur le gazole (sans compter la TVA).<sup>88,89,xi</sup> Une suppression ou une baisse importante de cette remise inciterait fortement les opérateurs à optimiser leur capacité de chargement, à mutualiser les envois et à opter pour le rail et les voies maritimes. Par ailleurs, une incitation financière qui rendrait plus rentable les investissements dans la numérisation des processus de la chaîne d'approvisionnement faciliterait la gestion en temps réel du trafic et des flux de marchandises, encouragerait la mutualisation et le partage de la capacité de chargement, et améliorerait l'intermodalité.

**Scénario de référence :** À l'exclusion de la réduction du rabais sur le carburant de 0,02 €/litre figurant dans la Loi budgétaire de 2020,<sup>90</sup> aucune augmentation importante des taxes, des droits d'accise ou des taxes routières pour les PL n'est prévue en France. Le transport routier continue de coûter peu, et aucune incitation financière supplémentaire n'est mise en place pour régler le problème de sous-utilisation des véhicules. Les chaînes d'approvisionnement et les réseaux de distribution seront, dans une faible mesure, davantage optimisés, ce qui devrait entraîner une légère diminution de la demande de transport de marchandises.

**Scénario de potentiel inexploité :** Pour harmoniser les coûts artificiellement bas à l'heure actuelle avec les coûts externes causés par le transport routier, les taxes sur les véhicules, les droits d'accise sur le carburant et les taxes de voirie doivent être augmentées. En 2018, le Trésor français a reçu environ 4,3 milliards d'euros en taxes sur le carburant de la part des PL (après le rabais)<sup>xii</sup>. Cette recette publique va probablement baisser à l'avenir en raison de la diminution de la consommation de carburant<sup>91</sup>. On pourrait imaginer compenser cette perte en augmentant les droits de péage, en les différenciant selon le rendement environnemental des véhicules, et en les étendant à tout le réseau routier. Si le fret routier reflète mieux ses coûts véritables et que les processus logistiques sont optimisés, on suppose que la quantité de vkm parcourus par des véhicules vide pourrait être réduite d'un quart, et la demande de transport de marchandises réduite d'un total de 5 % à partir de 2030.

---

<sup>viii</sup> L'« écotaxe », le projet d'introduire des taxes de voirie pour les transports de marchandises de plus de 3,5 tonnes sur le réseau routier non concédé, a finalement été abandonné en 2014.

<sup>ix</sup> Le niveau d'augmentation nécessaire dépend des coûts externes actuellement considérés comme internes. Mis à part la taxe sur le carbone aux taux de 44,60 €/tonne de CO<sub>2</sub>, incluse dans les droits d'accise sur le gazole, les PL ne subissent pas de frais explicites sur les externalités, que ce soit sur le réseau concédé ou non concédé. Le droit d'accise sur le carburant et les péages routiers peuvent être considérés comme des frais implicites

<sup>x</sup> Il convient de noter que les taux propres aux modes de transport comprennent également les coûts liés aux accidents, à la congestion et aux dommages causés à l'habitat, ce qui représente habituellement environ la moitié des coûts externes. Ces coûts partiels seront également causés par les ZEV à l'avenir. Les autres facteurs de coût incluent la pollution de l'air, le climat (WTT et TTW) ainsi que les nuisances sonores.

<sup>xi</sup> La remise sur le carburant mentionnée représente le taux moyen pondéré pour la France en 2019 ; le taux exact varie selon les régions. Les remboursements équivalent à une perte annuelle de recettes fiscales d'au moins 1,2 milliards d'euros, d'après les déclarations de recettes publiques.

<sup>xii</sup> Calculs de l'auteur.

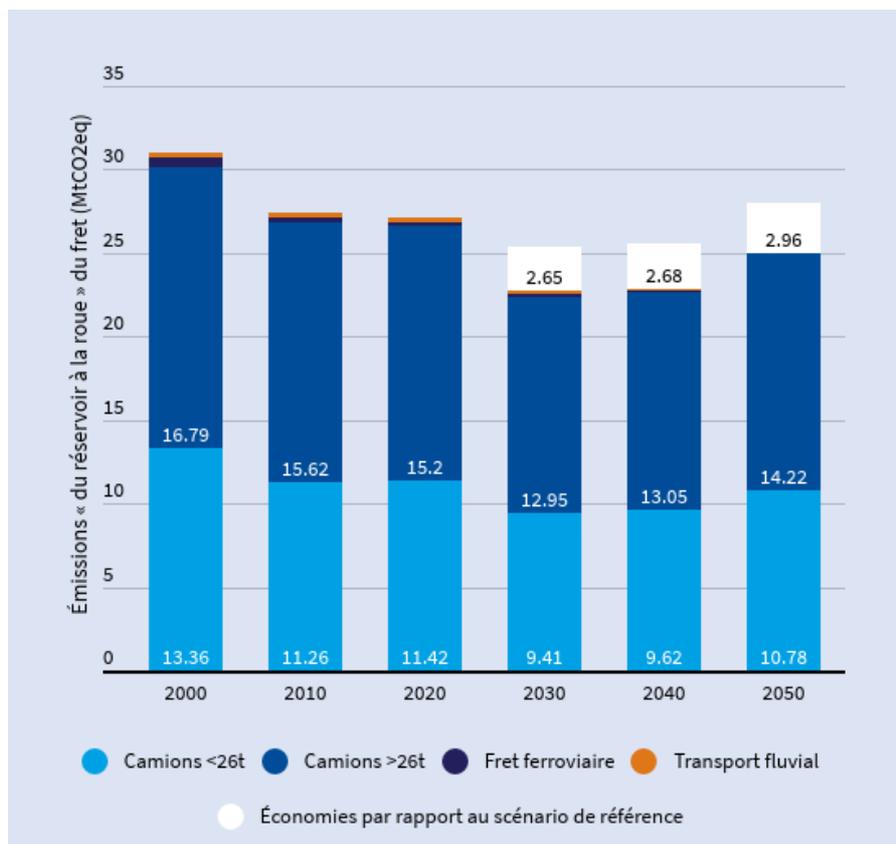


Schéma 8 : Illustration d'une meilleure efficacité logistique dans le scénario de référence et le scénario de potentiel inexploité

Les résultats sont illustrés dans le schéma 8. Une meilleure efficacité logistique entraîne une réduction de 7 % des émissions d'ici 2050 par rapport à celles de 2018, ou une réduction de 11 % si l'on considère le scénario de référence en 2050.

### 3.1.5. Méthane fossile

Certains acteurs de l'industrie et fabricants de camions considèrent le méthane fossile comme une solution prometteuse pour réduire les émissions des PL. Le méthane (CH<sub>4</sub>) est le composant principal du gaz naturel qu'on appelle le méthane fossile (ou gaz fossile) afin de faire la distinction entre les différentes formes de production du méthane fossile, du biométhane et du power-to-methane. Le carburant gazeux peut être comprimé ou liquéfié à des fins de stockage et brûlé dans un moteur thermique modifié pour propulser le véhicule.

Transport et Environnement a déjà plaidé contre l'utilisation de méthane fossile dans le secteur des poids lourds pour de multiples raisons. En effet, le méthane fossile n'offre qu'un potentiel limité en matière de réduction de GES sur la base des émissions « du puits à la roue » pour différentes raisons, notamment les fuites de méthane, les émanations de moteur et les émissions dues à l'évaporation. De plus, les camions au GNL n'engendrent pas de réduction significative des polluants atmosphériques, notamment en ce qui concerne les émissions d'oxyde d'azote (NOx) et du nombre de particules (NP) dans des conditions de conduite réelles, et peuvent même avoir des résultats pires que les véhicules diesel les plus performants pendant certains cycles de conduite, notamment la conduite urbaine.<sup>92,93</sup>

Les véhicules au gaz peuvent être équipés d'un allumage commandé (PI) stœchiométrique, un moteur bi-carburant à allumage par compression (CI) combiné à une technologie d'injection directe à haute pression (HPDI). Le moteur bi-carburant fonctionne essentiellement au méthane, et utilise le diesel comme carburant secondaire pour enflammer le mélange air-carburant.<sup>94</sup> Par rapport au diesel, le choix du gaz

comme carburant équivaut à une consommation supplémentaire de carburant d'environ 10 % (moteur CI) ou 15-20 % (moteur PI), tandis que l'utilisation de la technologie HPDI peut éliminer ces pertes d'efficacité.<sup>95,96,97</sup> Le carburant peut être comprimé à 200 bars (gaz naturel comprimé, GNC), ou refroidi jusqu'à liquéfaction à -161 °C (gaz naturel liquéfié, GNL) pour augmenter sa densité volumique.<sup>98,99</sup> Le stockage de méthane sous forme de GNL entraîne une consommation d'énergie plus importante en raison de la liquéfaction et de la distribution, ce qui augmente les coûts de production du carburant.<sup>100,101</sup>

Les caractéristiques techniques des véhicules à gaz dans la classe des PL ne diffèrent pas, que le carburant utilisé soit dérivé d'une production de méthane fossile, de biométhane ou de power-to-methane, à partir du moment où le méthane est purifié et amélioré pour être utilisé comme carburant. Dans les faits, cela signifie que les caractéristiques du carburant automobile et de la combustion sont identiques.<sup>102,103</sup>

En ce qui concerne le potentiel de réduction d'émission du méthane fossile, les constructeurs automobiles affirment qu'il représente entre 10 et 20 % en ce qui concerne les émissions « de la pompe à la roue » par rapport au diesel.<sup>104,105,106</sup> Des tests mandatés par le gouvernement néerlandais et réalisés par l'Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée (TNO) ont montré que les émissions TTW en conditions réelles de conduite des camions au GNL sont 3 à 10 % (moteurs PI) et 14 à 19 % (moteurs avec HDPI) plus basses, selon le véhicule diesel de référence.<sup>107,108,xiii</sup> Toutefois, l'accroissement des émissions de GES dues aux fuites et à l'évaporation de méthane de la chaîne d'approvisionnement du gaz annule ces gains d'après des conclusions de recherches récentes.<sup>109,110</sup> En tenant compte de toutes les émissions associées au cycle de vie du GNL, y compris celles qui se produisent pendant l'extraction, le traitement, la liquéfaction, le transport et la distribution, le gain total devient négligeable dans le cas de moteurs CI avec HPDI, et peut même devenir négatif dans le cas des moteurs PI.<sup>111</sup> En effet, les facteurs d'émissions WTT associés avec le GNL importé peuvent être autour de 35 % supérieurs à ceux associés au diesel fossile, principalement à cause de l'extraction et de la liquéfaction du gaz.<sup>112</sup> En UE, les émissions moyennes WTW de GNL peuvent être environ 26 % supérieures à celles du diesel fossile.<sup>113,xiv</sup>

En ce qui concerne les coûts du carburant, le méthane fossile est souvent considéré comme un carburant de transport abordable. Cela s'explique principalement par le traitement fiscal préférentiel que la France accorde au gaz fossile utilisé comme carburant.<sup>114</sup> Si le méthane était taxé au même titre que le diesel, et après déduction de la remise sur le diesel, le prix de revente du gaz naturel actuel ne serait pas de 1,04 €/kg<sub>GNL</sub> mais augmenterait à 1,57 €/kg<sub>GNL</sub> (en tenant compte des différences en densité d'énergie et sans compter la TVA).<sup>xv,115,116</sup> Étant donné que le total de GES émanant du gaz fossile n'est pas sensiblement plus bas que celui du diesel, il n'y a pas de justification concevable à l'allègement fiscal dont bénéficie le méthane en France.

Sur la base du raisonnement qui précède, le méthane fossile n'est pas considéré comme une mesure appropriée à cause de son potentiel de réduction négligeable d'émissions WTW. Il n'est ainsi plus considéré dans la suite de la présente étude.

---

<sup>xiii</sup> TNO inclut également les émissions occasionnées par les émanations de méthane du pot d'échappement, les émissions de N<sub>2</sub>O du pot d'échappement, l'évaporation de gaz du réservoir de carburant, la ventilation du carter moteur, les fuites et les explosions dans ses calculs TTW.

<sup>xiv</sup> Les facteurs d'émissions de GES WTT et WTW mesurés en gCO<sub>2</sub>eq/MJ-carburant sont fournis.

<sup>xv</sup> Il n'existe pas encore de prix de marché établi pour le GNL. Les stations de ravitaillement en France ne communiquent pas les prix, ou facturent un prix motivé par des fins politiques. En faisant abstraction des coûts supplémentaires découlant de la liquéfaction, du stockage et de la distribution, les auteurs supposent donc un prix au détail du GNL harmonisé avec celui du GNC de 1,25 €/kg<sub>GNC</sub>. La taxe intérieure de consommation sur le gaz naturel (TICGN) pour le gaz naturel comme carburant s'élève à 5,8 centimes d'euros/kg (5,23 €/MWh). Ensuite, 20 % de TVA est appliquée sur le prix déjà taxé. La TICPE française pour le diesel en tant que carburant s'élève à 49,4 centimes d'euros/litre (41,7 /litre après déduction de la remise moyenne sur le carburant).

	Niveau de GES élevé	Neutre en GES
<b>Gaz fossile</b>	<p><b>Gaz naturel</b> produit par des sources conventionnelles et non conventionnelles</p> <p><b>Hydrogène</b> produit par du gaz naturel via reformage du méthane à la vapeur sans CSC</p> <p><b>Hydrogène</b> ou <b>power-to-methane</b> produit par l'électricité entraînant des émissions en amont sans CSC</p>	<p><b>Hydrogène</b> produit par le gaz naturel au cours d'un procédé qui capture tous les GES de la chaîne d'approvisionnement et traite le CO<sub>2</sub> par le CSC</p>
<b>Gaz renouvelable</b>	<p><b>Biométhane</b> produit par des cultures spéciales avec des émissions élevées lié au changement direct ou indirect de l'affectation des sols</p>	<p><b>Hydrogène</b> ou <b>power-to-methane</b> produit par une électricité renouvelable supplémentaire avec zéro GES et CO<sub>2</sub> par le DAC</p> <p><b>Biométhane</b> produit par des matières premières durables et avancées qui évitent la compensation d'émissions de méthane ou excèdent la production et la combustion des GES</p>

Tableau 2 : Carburants gazeux et leurs définitions. D'après Searle et al. (2017)<sup>117</sup>

### 3.1.6. Biométhane

Comme le méthane fossile, le biométhane est souvent vu comme une solution pour réduire les émissions de GES des PL. Cette sous-section examine l'utilisation accrue du biométhane comme mesure d'efficacité et non comme voie potentielle unique, parce que son potentiel de production durable est trop limité. Cela s'explique par la disponibilité limitée de matières premières durables et par le coût non compétitif sans soutien politique important par rapport aux alternatives (y compris le diesel et le méthane fossile).

Les aspects techniques des ICEV au méthane, qui sont abordés dans la section 3.1.5 sur le méthane fossile, s'appliquent de la même manière au biométhane (rendement du moteur, stockage du carburant, émissions de polluants atmosphériques et adaptations nécessaires du moteur).

Si les matières premières dite de « première génération » basées sur les cultures ne doivent pas être prises en compte en raison de leurs émissions élevées découlant des changements directs et indirects d'affectation des terres et des effets environnementaux négatifs, le biométhane dit « avancé », basé sur les déchets et les résidus, produit par digestion anaérobie et gazéification de la biomasse, peut quant à lui engendrer de fortes réductions de GES si on applique certaines garanties de durabilité (voir tableau 2). L'enjeu, cependant, se situe au niveau des coûts de production élevés et du volume de production limité en raison de la disponibilité restreinte des matières premières.

La consommation d'énergie primaire de gaz fossile en France s'élevait à 426,8 TWh en 2018.<sup>118</sup> D'après Gaz Réseau Distribution France (GRDF), 122 sites de production de biométhane ont injecté environ 2,1 TWh dans le réseau de gaz français en 2019, et l'ajout de 1 000 centrales et de 21,4 TWh est prévu au registre des capacités.<sup>119</sup> Le gouvernement français vise 24 à 32 TWh de production de biométhane en 2028, selon sa

Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), parmi lesquels entre 14 et 22 TWh devraient être injectés dans le réseau.<sup>120</sup> En prenant une estimation moyenne, une production de biométhane de 28 TWh couvrirait moins de 7 % de la prévision totale de consommation primaire de gaz du gouvernement pour 2028 (420 TWh).<sup>121</sup> Une part importante du volume d'injection de biométhane de 2018 provient déjà des déchets et résidus.<sup>122</sup> Le potentiel d'augmentation de cette part de matières premières de manière durable doit ainsi être considéré comme plutôt limité.

Searle et al. ont estimé le potentiel maximal de biométhane durable à différents niveaux de coûts en France, et ont conclu que, contrairement à la cible établie par le gouvernement français, un niveau de production beaucoup plus bas permettrait de respecter les critères nécessaires de durabilité.<sup>123</sup> En tenant compte du total d'émissions associées au cycle de vie, ils considèrent le fumier, les boues d'épuration, les biodéchets gazéifiés et les résidus de culture comme des matières premières n'ayant pas d'émissions négatives de GES, ou seulement partiellement. D'après leur analyse, la France pourrait fournir un total de 2,9 TWh de biométhane durable en 2020, à un prix au détail de 8,10 €/kg<sub>GNC</sub>, ce qui est plus de six fois supérieur au prix au détail actuel de GNC fossile. En considérant le même prix au détail, ils ont estimé un potentiel de production de 4,2 TWh pour 2030 et de 15,9 TWh pour 2050.<sup>xvi</sup> En comparaison, la consommation finale d'énergie requise par une flotte de PL roulant de plus en plus au méthane équivaldrait à 98,4 TWh en 2020, et entre 75,2 et 95,3 TWh en 2050, selon le scénario choisi (voir schéma 9). Cela veut dire que si le potentiel de biométhane durable entier en France était exclusivement attribué aux PL, il pourrait fournir seulement 16,7 ou 21,1 % de la consommation finale d'énergie de la flotte attendue pour 2050.

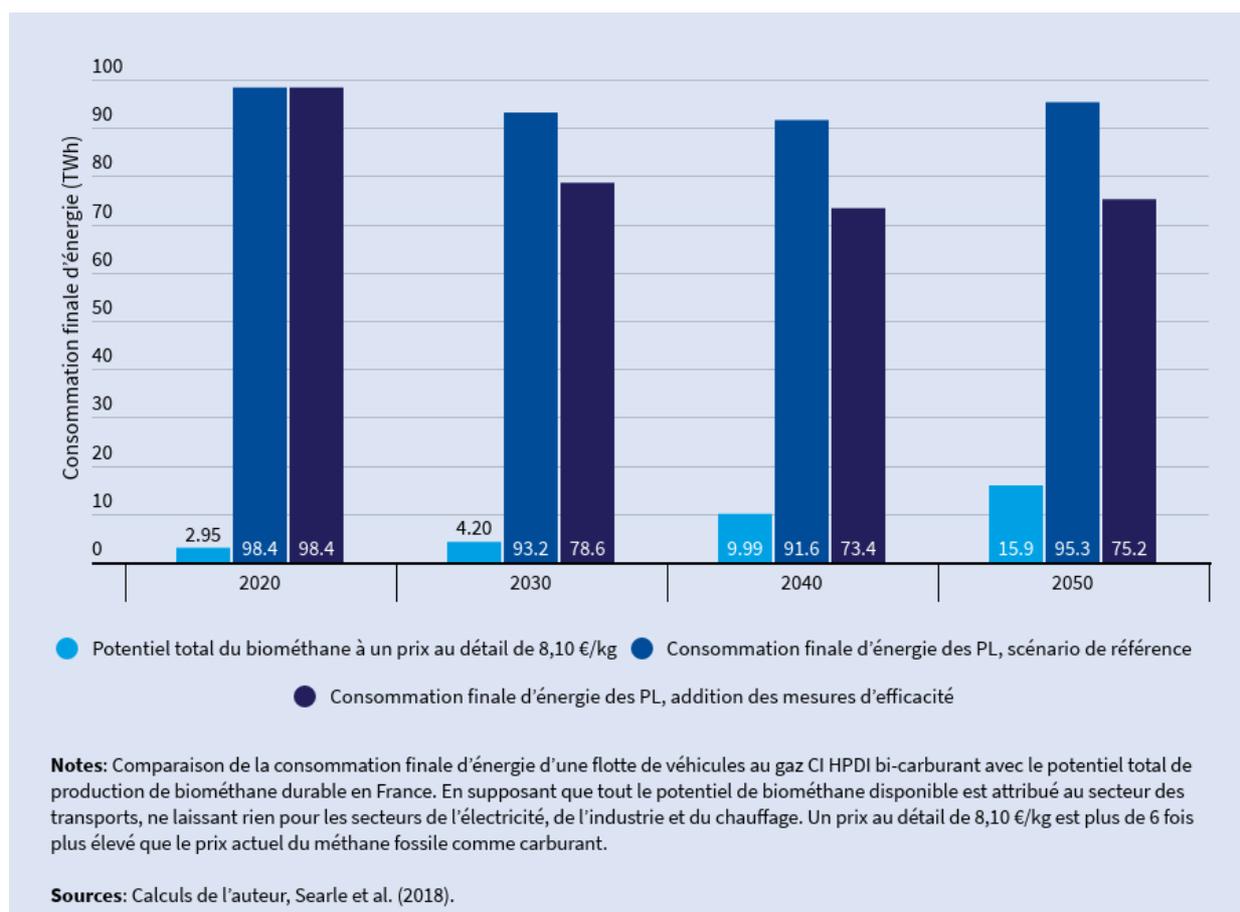


Schéma 9 : Potentiel de production de biométhane durable vs. consommation finale d'énergie de la solution PtM

<sup>xvi</sup> Les chiffres propres à la France concernant le potentiel du biométhane ont été obtenus par les auteurs de la présente étude.

Des coûts supplémentaires associés à la liquéfaction, à la distribution et au stockage du carburant ne sont pas encore inclus dans le prix au détail susmentionné. Le volume de production ne serait rentable qu'avec un niveau de subvention très élevé, afin d'atteindre un prix comparable au méthane fossile. Par ailleurs, les marges bénéficiaires dans l'industrie du transport sont basses, et les coûts du carburant constituent une part importante du total des frais opérationnels. Si tout ce potentiel était attribué au domaine des transports, il ne resterait pas de volume pour les secteurs de l'électricité, de l'industrie et du chauffage, ce qui implique en outre que les consommateurs actuels n'auraient plus le droit d'utiliser le gaz pour ces usages. Il convient de considérer comme peu probable l'idée qu'une part importante du potentiel du biométhane soit attribuée au transport routier, étant donné que de multiples secteurs seraient en compétition pour un même volume de production limité.

### **3.1.7. Bilan et lacunes restantes**

En combinant toutes les mesures d'efficacité, et en écartant les effets réciproques entre eux dus aux changements des coûts et de la demande (*ceteris paribus*, voir section 2.1), on parvient à une baisse importante des émissions dans le secteur français du fret terrestre intérieur. Afin de proposer une projection prudente, et de ne pas sous-estimer le niveau de consommation finale d'énergie à venir des véhicules neutres en GES, l'amélioration du rendement énergétique du scénario de référence de 30 % d'ici 2030 pour les sous-groupes de véhicules règlementés et non règlementés a été incorporée au modèle (voir la section 2 pour une explication plus détaillée). Les scénarios de potentiel inexploités concernant le passage au transport ferroviaire et à la navigation fluviale, ainsi qu'une meilleure efficacité logistique ont également été ajoutés à la liste des mesures d'efficacité. Comme mentionné précédemment, le méthane fossile et le biométhane ont été exclus en raison de leur potentiel minime de réduction d'émissions dans le premier cas, et de la compétition entre les secteurs et des coûts de production non compétitifs dans le deuxième cas.

Les résultats de l'addition des mesures d'efficacité sont illustrés dans le schéma 10. Ils débouchent sur une réduction de 18 % en 2050 par rapport aux émissions de 2018. En comparaison aux objectifs de la SNBC et du RRE, basés sur l'année 2005, les émissions totales du fret sont réduites de 33 % et équivalent à 21,5 MtCO<sub>2</sub>eq en 2030.

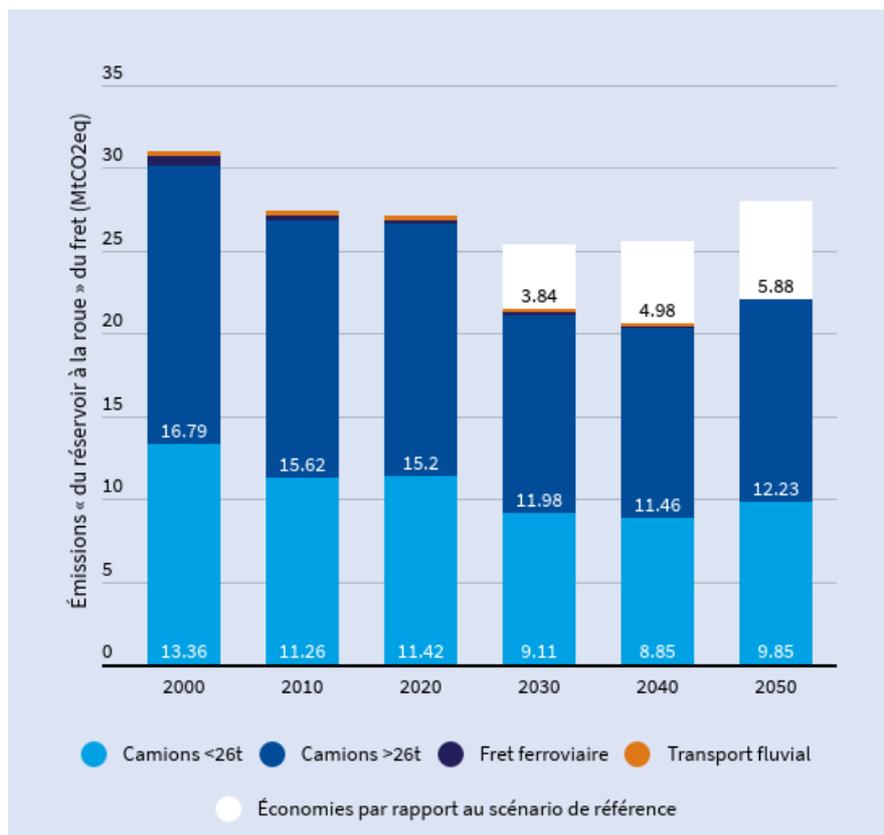


Schéma 10 : Illustration du scénario de référence vs. l'addition des mesures admissibles d'efficacité

Si cette réduction favorise fortement l'atteinte par la France de la cible du RRE pour 2030, la trajectoire montre que les mesures d'efficacité admissibles sont loin de suffire pour décarboner le secteur du transport intérieur de marchandises, puisqu'il subsiste un écart total de 22,07 MtCO<sub>2</sub>eq d'ici 2050. Il convient de noter que l'objectif du RRE devra probablement être relevé, en raison de l'augmentation escomptée des ambitions dans le cadre du « Green Deal » européen. Aussi, certaines de ces mesures d'efficacité, comme les scénarios du passage au transport ferroviaire et au transport fluvial nécessiteraient d'importants efforts et pourraient ne pas se matérialiser à ce point. La décarbonation du fret routier devient donc incontournable, et elle devra être obtenue grâce à une commercialisation généralisée des véhicules neutres en GES.

### 3.2. Objectif zéro : les voies possibles pour combler l'écart restant

Si l'ensemble des mesures admissibles d'efficacité énergétique étaient pleinement mises en œuvre, la France serait en-deçà de son objectif fixé par le RRE lui imposant une réduction de -37 % de ses émissions de GES de d'ici 2030. De toute évidence, une amélioration du rendement et un transfert modal ne sont pas suffisants, car il reste un important écart à combler pour atteindre -100 % d'ici 2050. Il faudra plutôt décarboner la flotte de PL, et cette transition doit commencer dès le début des années 2020. La prochaine section expose les différentes technologies permettant de décarboner le transport routier. Dans les sections suivantes, la demande énergétique ainsi que les coûts globaux de chaque système et le coût total de possession de ces technologies seront présentés et comparés.

Les voies qui permettent en principe d'aboutir à une décarbonation complète sont les suivantes :

1. l'électrification directe avec des véhicules électriques à caténaires aériennes et à batterie (OC-BEV et BEV)
2. les véhicules électriques à pile à combustible roulant à l'hydrogène (FCEV)
3. les véhicules à moteur à combustion interne alimentés aux électrocarburants liquides (ICEV\_PtL)
4. les véhicules à moteur à combustion interne alimentés aux électrocarburants gazeux (ICEV\_PtM)

Les deux premières options demandent un développement et une intensification rapides de la technologie de chaîne de traction. La troisième option ne nécessite pas de modification de cette technologie, étant donné que le carburant fossile serait remplacé par un carburant de substitution. La quatrième option nécessite certaines modifications de la chaîne de traction.

### 3.2.1. Commercialisation et pénétration dans le parc automobile

Le schéma 11 illustre le taux de pénétration dans le parc automobile des ventes de véhicules neufs. En 2040, une élimination progressive de la vente de véhicules neufs roulant au gazole fossile est imposée pour les deux catégories de PL (plus et moins de 26 t). Pour les années intermédiaires, la part de véhicules neutres en GES sur le total de ventes de véhicules neufs suit une augmentation linéaire. Pour la classe de véhicules d'un PTAC inférieur à 26 t, on suppose une adoption exclusive de BEV par le marché (voir section 3.2.2).

Il convient de noter que, à des fins de méthodologie, le mélange de carburant fossile et synthétique n'est pas pris en compte. Dans ce modèle, les ICEV roulant au carburant fossile continuent à fonctionner ainsi durant tout leur cycle de vie. Les ICEV\_PtL roulent exclusivement au diesel synthétique, tandis que les ICEV\_PtM roulent uniquement au méthane synthétique.



Schéma 11 : Répartition des immatriculations de véhicules neufs

On part du principe que les véhicules sont remplacés un pour un, c'est-à-dire que le facteur de charge et le kilométrage restent inchangés. Comme les taux de retrait des camions sont identiques d'une solution à l'autre, les émissions « de la pompe à la roue » qui en résultent sont aussi les mêmes, indépendamment de la technologie de chaîne de traction. Il convient également de noter que l'adoption de véhicules neutres en GES s'ajoute à la somme des mesures d'efficacité décrites dans la section 3.1. En réalité, une partie de l'objectif de réduction de flotte de 2030 imposé par le règlement sur les normes de performance d'émission de CO<sub>2</sub> pour les nouveaux PL sera atteinte par le déploiement de ZLEV (voir section 3.1.1).

Cependant, malgré l'arrêt progressif d'ici 2040 des ventes de véhicules roulant au carburant fossile, le schéma 12 montre que l'adoption de véhicules neutres en GES ne conduirait pas à une élimination totale des émissions de GES d'ici 2050 : il en resterait 2,3 MtCO<sub>2</sub>eq en raison des véhicules de l'ancien parc automobile encore en circulation à cette date. Il serait donc nécessaire d'imposer des limites de circulation

à ces véhicules et, à terme, de leur interdire la circulation (sauf pour l'option ICEV\_PtL, qui nécessiterait plutôt une élimination progressive du carburant fossile, c'est-à-dire un quota de mélange de 100 % pour le carburant synthétique). Cela entraînerait également une augmentation des ventes de véhicules neutres en GES afin de couvrir la demande de transport non satisfaite. Le choix d'une élimination progressive de la flotte restante en circulation permettrait d'atteindre des émissions de GES nulles en 2050 et une réduction totale de 28,0 MtCO<sub>2</sub>eq par rapport au scénario de référence. En ce qui concerne l'objectif du RRE pour 2030, la réduction des émissions atteindrait -38 % par rapport à 2005.

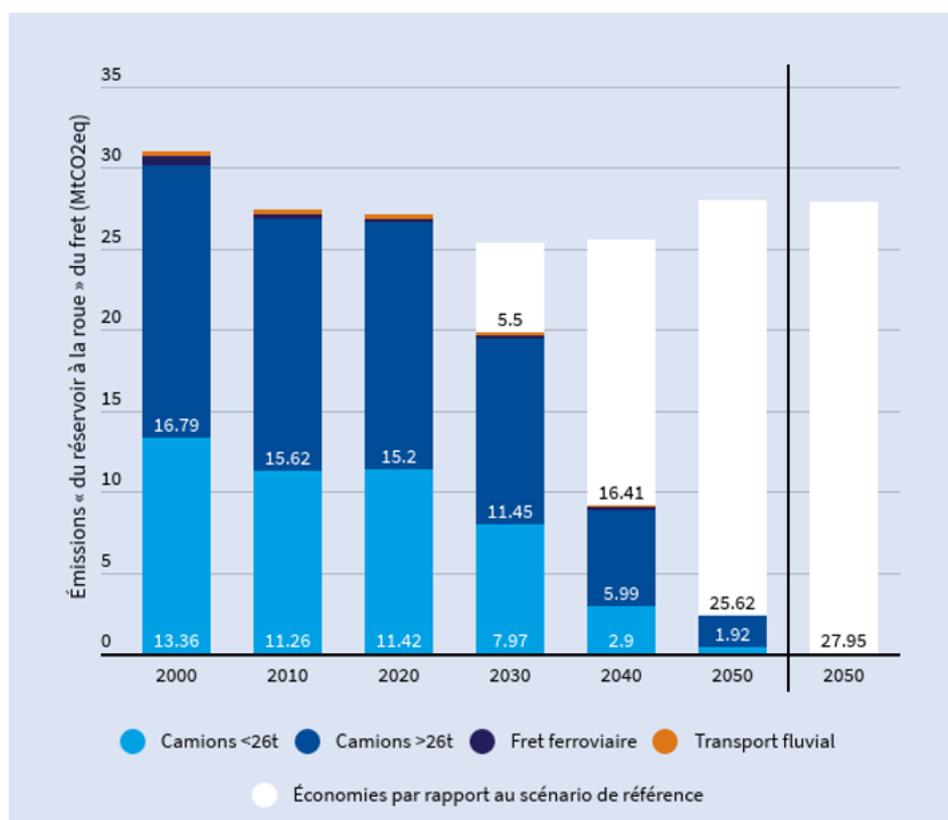


Schéma 12 : Le scénario de référence comparé à l'ensemble des mesures admissibles d'efficacité énergétique et le déploiement de véhicules neutres en GES, conformément au schéma 11. La colonne 2050 tout à droite inclut une élimination de la flotte restante.

En 2020, le parc de véhicules immatriculés dans le pays comprend un total de 263 000 camions et tracteurs de plus de 26 t (voir section 1). Compte tenu de l'évolution de la demande de fret routier et de sa réduction découlant de l'ensemble des mesures d'efficacité, y compris le transfert modal vers le transport ferroviaire et fluvial, le parc français de PL de plus de 26 t devrait se porter à environ 344 000 véhicules en 2050.<sup>xvii</sup>

### 3.2.2. Camions de livraison urbaine et régionale

Selon leur utilisation, les véhicules commerciaux diffèrent en matière de PTAC et de kilométrage journalier. Les PL plus légers (PTAC de 3,5 à 16 t) sont généralement utilisés pour les livraisons en zone urbaine. Les PL d'un PTAC de 16 à 26 t servent principalement au transport régional de marchandises. Des camions de livraison urbaine et régionale électrifiés jusqu'à 26 tonnes sont aujourd'hui disponibles sur le marché. Citons par exemple les modèles FUSO eCanter et eActros de Daimler, FL Electric de Volvo et D.Z.E. de Renault.<sup>124,125,126,127</sup>

<sup>xvii</sup> Il convient de noter que ce chiffre exclut tous les véhicules commerciaux immatriculés à l'étranger qui circulent sur le territoire français, soit environ 43 % des tkm parcourus. Cependant, l'EUTRM comprend un étalonnage entre la consommation finale d'énergie actuelle et le nombre de PL immatriculés en France, reporté ensuite jusqu'à 2050 (voir section 2.1).

Les camions utilisés pour les livraisons urbaines et régionales opèrent généralement au sein d'une seule région, ou effectuent des livraisons urbaines à partir de centres de distribution à proximité. Ils ont un rayon d'action journalier de 200 à 400 km. En France, 89 % des trajets de fret routier et 52 % des vkm sont inférieurs à 300 km.<sup>128</sup> L'électrification directe de ces véhicules par une batterie embarquée est non seulement techniquement réalisable mais, sous certaines conditions, elle est déjà moins chère aujourd'hui que le carburant fossile sur le plan du coût total de possession.<sup>129</sup>

Au regard des développements technico-économiques ainsi que des signaux du marché émanant des constructeurs de camions, on peut raisonnablement estimer que, pour le segment des véhicules commerciaux jusqu'à un PTAC de 26 t, l'électrification par batterie s'avère être la solution la plus concurrentielle sur le plan des coûts à moyen et à long terme. Le modèle suppose donc que d'ici 2030 et 2050, respectivement 30 % et 100 % des ventes de PL jusqu'à 26 tonnes seront des BEV.

### **3.2.3. Camions longue distance**

Il est moins facile de prédire quelle technologie de la chaîne de traction l'emportera dans le secteur des tracteurs longue distance (PTAC de 26 à 44 t). La section suivante présente les solutions capables de décarboner le fret routier. Chacune d'elles se trouve au tout début de la courbe d'apprentissage technico-économique et doit atteindre des économies d'échelle pour devenir rentable. À la suite de cette section, les coûts des véhicules, du carburant et des infrastructures liés aux différentes solutions seront comparés.

#### **3.2.3.1. Électrification directe**

L'électrification directe présente l'avantage essentiel d'avoir le meilleur rendement énergétique, ce qui permet de diminuer la consommation d'énergie primaire et finale, et donc les coûts de carburant. En ce qui concerne les véhicules particuliers et les VUL, une transition à grande échelle vers l'électrification par batterie est aujourd'hui largement considérée comme la voie la plus rentable et la plus rapide pour parvenir à une décarbonation totale. Un accroissement de la capacité de production de véhicules utilitaires légers (VUL) électriques est en cours, et leur adoption par le marché va continuer à s'accélérer. La parité de prix initiale des voitures électriques sera bientôt atteinte.<sup>130</sup>

En ce qui concerne les batteries, le développement de la technologie progresse et les coûts de fabrication sont en baisse. Les prix nets des batteries ont atteint une moyenne pondérée en fonction du volume de 143 €/kWh en 2019, soit une baisse de 87 % depuis 2010, et cette tendance se poursuivra, jusqu'à atteindre 56 €/kWh en 2030.<sup>131</sup> La composition chimique des éléments de batterie, c'est-à-dire les matériaux cathodique et anodique et la chimie post-lithium, devrait encore être optimisée, ce qui permettra d'améliorer la densité énergétique, le poids, la durée de vie et la résistance de ces éléments, ainsi que l'approvisionnement en matières premières durables et le recyclage.<sup>132</sup>

L'électrification directe des PL, qui peut prendre la forme de BEV ou d'OC-BEV, présente une efficacité énergétique supérieure grâce à des pertes de conversion « de la pompe à la roue » inférieures à 25 %. Les deux modèles utilisent une chaîne de traction électrique et une batterie (de taille différente) pour propulser le véhicule mais nécessitent des systèmes de charge différents. Les coûts d'achat plus élevés de ces véhicules, principalement dus à la batterie embarquée, sont compensés par des coûts d'exploitation moindres. Outre l'argument de l'efficacité énergétique, une chaîne de traction directement alimentée à l'électricité offre plusieurs avantages par rapport aux moteurs à combustion classiques. Le véhicule n'émet pas de gaz d'échappement, ce qui élimine les émissions de CO<sub>2</sub> et de polluants atmosphériques au niveau du tuyau d'échappement.<sup>133</sup> De plus, un moteur électrique est constitué de moins de composants et nécessite moins d'entretien et de réparations qu'un moteur à combustion thermique.

##### **3.2.3.1.1. Électrification des batteries**

Le marché des BEV est en cours de développement. Le modèle eCascadia de Daimler, d'un PTAC maximal de 36 tonnes et d'une autonomie de 400 km, et le modèle Semi de classe 8 de Tesla, d'un PTAC

probablement similaire mais non encore annoncé et d'une autonomie allant jusqu'à 800 km, devraient être produits en série pour le marché américain en 2020 et 2021, et peu après pour l'UE.<sup>134,135</sup> Le semi-remorque Tre de Nikola, d'un PTAC de 18 à 26 t et d'une autonomie maximale de 400 km, sera produit en série en Europe en 2021.<sup>136</sup>

La propulsion électrique par batterie sur le segment des longues distances présente plusieurs inconvénients, notamment les pertes de temps potentielles dues à des temps de charge plus longs, le déploiement des infrastructures nécessaires et, au niveau régional, une hausse de la demande d'énergie sur le réseau électrique de moyenne tension. Par rapport aux carburants liquides, la densité énergétique des batteries, inférieure en termes de volume et de masse, pose des difficultés et peut occasionner une capacité de chargement réduite ou une autonomie limitée.<sup>137</sup> Les tracteurs longue distance nécessitent une grande batterie embarquée pour l'autonomie journalière maximale requise de 800 km. Pour ce faire, le BEV inclus dans l'analyse des coûts possède une capacité de batterie de 1 200 kWh et une consommation de carburant « de la batterie à la roue » de 1,43 kWh/km (qui diminuera à 1,29 d'ici 2030). À l'avenir, la densité énergétique des blocs-piles devrait atteindre 318 Wh/kg en 2030 et 508 Wh/kg en 2050.<sup>138</sup> Cela se traduirait par un poids brut supplémentaire de véhicule de 6,6 tonnes en 2020, 3,8 t en 2030 et 2,4 t en 2050. En tenant compte des deux tonnes de poids supplémentaire maximal autorisé pour les ZEV et de l'économie de poids réalisée en remplaçant la chaîne de traction classique par une (chaîne de traction) électrique, on aboutit à un poids net supplémentaire de deux tonnes et, par conséquent, à une pénalité de charge utile pour le BEV en 2020. En augmentant la densité énergétique de la batterie, cette pénalité n'a plus lieu d'être à partir de 2030.<sup>xviii,139</sup>

En ce qui concerne les infrastructures de recharge, les tracteurs électriques longue distance à batterie, dont les trajets impliquent des déplacements interurbains de plusieurs jours, nécessitent une vaste infrastructure le long du réseau autoroutier. La recharge peut se faire soit pendant la nuit, soit par le biais de points de recharge à haute puissance. La recharge à haute puissance est conforme aux règles de l'UE relatives aux durées de conduite et de repos, qui prévoient une pause obligatoire de 45 minutes (pouvant être divisée en deux pauses de 30 et 15 minutes) toutes les quatre heures et demie.<sup>140</sup> Kühnel et al. envisagent des chargeurs de nuit d'une puissance de 150 kW pour une recharge complète de la batterie, et des méga-chargeurs d'une puissance de 1,2 MW pour une recharge permettant une autonomie de 400 km (entre deux pauses, un conducteur peut parcourir une distance maximale de 360 km à une vitesse moyenne de 80 km/h).<sup>141</sup> Il faut souligner que ces méga-chargeurs entraîneraient des demandes en électricité supplémentaire importantes, et nécessiteraient un raccordement au réseau et probablement le renforcement du réseau électrique de moyenne tension. CharIN, l'initiative de normalisation des constructeurs et de l'industrie automobile, a entamé un travail sur le développement d'une norme de chargement haute puissance pour les véhicules commerciaux (HPCCV), d'une puissance supérieure à 2 MW.<sup>142</sup>

### **3.2.3.1.2. Système de caténaires suspendues**

La réduction de la taille de la batterie embarquée et la recharge dynamique du véhicule en fonctionnement par l'intermédiaire d'un système de route électrique (ERS) installé sur certaines portions très fréquentées du réseau routier peuvent constituer une alternative à la charge statique, sans pour autant renoncer aux gains d'efficacité de l'électrification directe. Ces deux options peuvent être déployées dans une approche complémentaire, favorisant ainsi la commercialisation des BEV ainsi que des OC-BEV, dans la mesure où cela encouragerait également les économies d'échelle et entraînerait des effets de synergie dans le développement des technologies des véhicules et de charge, ainsi que pour le renforcement du réseau électrique.<sup>143</sup>

---

<sup>xviii</sup> Calculs de l'auteur.

Un ERS fournit l'alimentation électrique via des lignes caténares aériennes, un rail conducteur dans le sol ou une charge par induction du véhicule électrique, et peut constituer une solution complémentaire et rentable pour l'électrification du segment longue distance.<sup>xix</sup> Des essais pratiques européens sont actuellement en cours en Allemagne (lignes suspendues) et en Suède (pour les trois technologies).<sup>144,145</sup> Alstom a développé un ERS doté d'un rail conducteur.<sup>146</sup> De manière générale, les trois technologies ERS ont leurs avantages et inconvénients respectifs, même si le concept de ligne aérienne est considéré par certains comme l'option technologique la plus aboutie à l'heure actuelle.<sup>147</sup> La technologie de caténaire suspendue développée par Siemens, qui est en cours de test sur trois portions du réseau autoroutier allemand, a été choisie pour l'analyse des coûts de la section 5.<sup>148,xx</sup> L'étude de Kühnel et al. apporte des estimations de coûts basées entre autres sur les projets ENUBA financés par le ministère fédéral de l'Environnement allemand.<sup>149,150</sup> Le ministère de la Transition écologique et solidaire français a également entrepris une évaluation socio-économique d'un concept de route électrique en 2017.<sup>151</sup>

Les véhicules possèdent une batterie embarquée plus petite, qui peut être chargée pendant que le véhicule est alimenté par l'ERS, et permet une autonomie électrique lorsque le véhicule est déconnecté des lignes aériennes. L'OC-BEV inclus dans l'analyse des coûts a une capacité de batterie de 400 kWh, permettant une autonomie de 250 km. D'après Wietschel et al., plus de 95 % des trajets de semi-remorques sur les autoroutes allemandes sont inférieurs à 100 km.<sup>152</sup> Le réseau autoroutier français étant moins dense, une autonomie de 250 km devrait s'avérer largement suffisante pour couvrir des intervalles non-électrifiés plus ou moins longs ainsi que la distance entre l'autoroute et le site de (dé)chargement. Suivant Kühnel et al., un degré d'électrification de 90 % a été supposé, les 10 % restants étant dus à des lacunes au sein des parties électrifiées du réseau. En tenant compte de la proportion de kilomètres effectués sur le réseau électrifié (80 %), cela représente une répartition du kilométrage de 72 vs. 28 % entre l'électricité obtenue directement des lignes aériennes et celle obtenue de la batterie embarquée.<sup>153</sup>

Le principal obstacle commercial d'un système ERS est le développement des infrastructures et, initialement, des coûts de capitaux d'immobilisation élevés. La technologie doit être harmonisée dans les États membres de l'UE et son déploiement bien coordonné entre toutes les parties prenantes afin d'assurer une interopérabilité transfrontalière. À l'instar des infrastructures de charge des BEV, une demande en énergie supplémentaire importante va peser sur le réseau électrique de moyenne tension, ce qui nécessitera un renforcement de certaines parties du réseau.<sup>154</sup> Par exemple, Hacker et al. soulignent qu'en raison de la répartition inégale attendue de la future production d'électricité renouvelable dans les régions, certaines parties du pays pourraient être plus affectées que d'autres par un décalage entre l'excédent et le déficit de production d'électricité.<sup>155</sup>

### 3.2.3.2. Hydrogène

L'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique dont les applications potentielles à venir incluent le fret routier longue distance. Les véhicules électriques à pile à combustible (FCEV) constituent une alternative car ils sont neutres en GES si le carburant hydrogène requis est produit à partir d'électricité renouvelable supplémentaire. Nikola prévoit de produire le Tre également comme un modèle électrique à hydrogène avec un PTAC de 40 tonnes et une estimation d'autonomie pouvant aller jusqu'à 960 km, à partir de 2023.<sup>156,157</sup> Hyundai a annoncé la livraison des premiers véhicules du H<sub>2</sub> Xcient sur le marché suisse en 2020 ; ce modèle affiche un PTAC de 34 t et une autonomie de 400 km.<sup>158</sup> L'hydrogène est produit par un

---

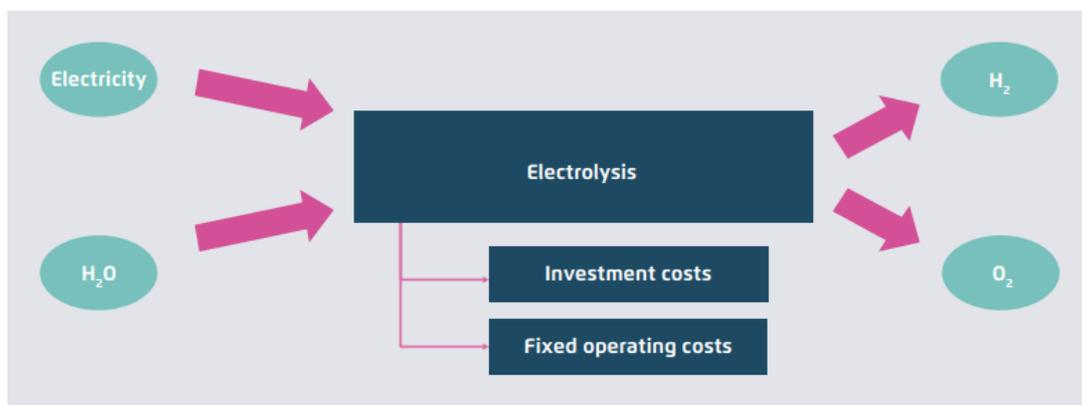
<sup>xix</sup> Les lignes suspendues peuvent également être utilisées par des véhicules à chaîne de traction électrique hybride (OC-HEV), comme c'est déjà le cas dans le cadre d'essais pratiques par ex. en Allemagne. Cette option n'est pas prise en compte dans cette étude, parce que les véhicules hybrides diesel utilisant les ERS seront vraisemblablement des exceptions après 2030. Cependant, les OC-HEV pourraient jouer un rôle important pendant la phase de début de commercialisation pour atteindre les taux d'utilisation élevés de l'infrastructure de caténares suspendues.

<sup>xx</sup> Le système de caténares suspendues a aussi été choisi pour des raisons pragmatiques : il dispose déjà d'une vaste documentation et de nombreuses estimations de coût, ce qui n'est pas tout à fait le cas du système à rails conducteurs.

électrolyseur qui sépare l'eau en hydrogène et oxygène grâce à l'énergie électrique. La conversion électrochimique dans la pile à combustible du véhicule génère ensuite l'électricité qui propulse un moteur électrique. Parmi les avantages de l'hydrogène, on compte un rendement « de la pompe à la roue » assez élevé, des temps de ravitaillement courts, des émissions de CO<sub>2</sub> et de polluants atmosphériques nulles et une grande autonomie possible. Mais il présente également un certain nombre de difficultés : les pertes de rendement lors de la conversion « de la pompe à la roue », les coûts élevés des technologies automobiles, la faible densité volumétrique de l'hydrogène au regard du stockage, la nécessité de développer les infrastructures de distribution et de ravitaillement requises et une probabilité plus élevée de devoir recourir à l'importation de carburant en provenance de pays non-Européens, en raison de la demande accrue en électricité renouvelable, comme expliqué dans la section 4.

Les FCEV sont équipés d'un système de pile à combustible, d'une batterie embarquée plus petite permettant de stocker l'énergie pour les pics de charge du moteur et d'un réservoir contenant de l'hydrogène comprimé ou liquéfié. La compression à 350 ou 700 bars est la solution de stockage la plus aboutie et éprouvée, mais elle présente des inconvénients concernant la densité énergétique et le volume.<sup>159</sup> La compression à 700 bars apporte une densité plus élevée que celle à 350 bars et occasionne des coûts de composants inférieurs à ceux de la liquéfaction. Liquéfier l'hydrogène augmenterait nettement la densité de stockage mais entraînerait également de 25 à 35 % de pertes énergétiques supplémentaires, et nécessiterait des réservoirs cryogéniques à paroi épaisse, plus onéreux.<sup>160,161</sup> Pour l'analyse des coûts, c'est un système de stockage de carburant comprimé à 700 bars, avec un poids de réservoir de stockage de 1,2 tonne, qui a été choisi.

Aujourd'hui, l'hydrogène est essentiellement produit à partir de gaz fossile par reformage du méthane à la vapeur. Il est possible de le produire à partir d'électricité conventionnelle par électrolyse. Les deux techniques, appelées « hydrogène gris », entraînent des émissions de GES en amont (voir aussi le tableau 2). Pour être neutre en GES et classifié comme « hydrogène bleu », il faut faire appel à la technologie encore immature et précommerciale du captage et stockage du carbone (CSC). La seule méthode de production viable est donc celle de l'« hydrogène vert », un hydrogène neutre en GES produit à partir d'électricité renouvelable.



Source : Frontier Economics (2018)

L'idée d'utiliser le surplus d'électricité renouvelable pour produire de l'hydrogène dans des situations où les énergies renouvelables doivent être limitées en raison d'engorgements du réseau ou de pics d'approvisionnement est contestable. Plusieurs sources affirment que cela ne permettrait pas d'obtenir le facteur de charge nécessaire pour exploiter les installations de production de manière rentable.<sup>162</sup> Plus le degré d'utilisation est bas, plus la part des dépenses d'investissement sera élevée par rapport aux coûts totaux. Pour une usine d'électrolyse à grande échelle de l'ordre du mégawatt, on estime réaliste que 2 800 heures à pleine charge fournissent un facteur de charge de 30 % et qu'on atteigne ainsi un coût d'hydrogène de l'ordre de 7 à 12 centimes d'euro/kWh (2,33 à 4,00 €/kg<sub>H2</sub>), hors coûts de transport et de distribution.<sup>163</sup>

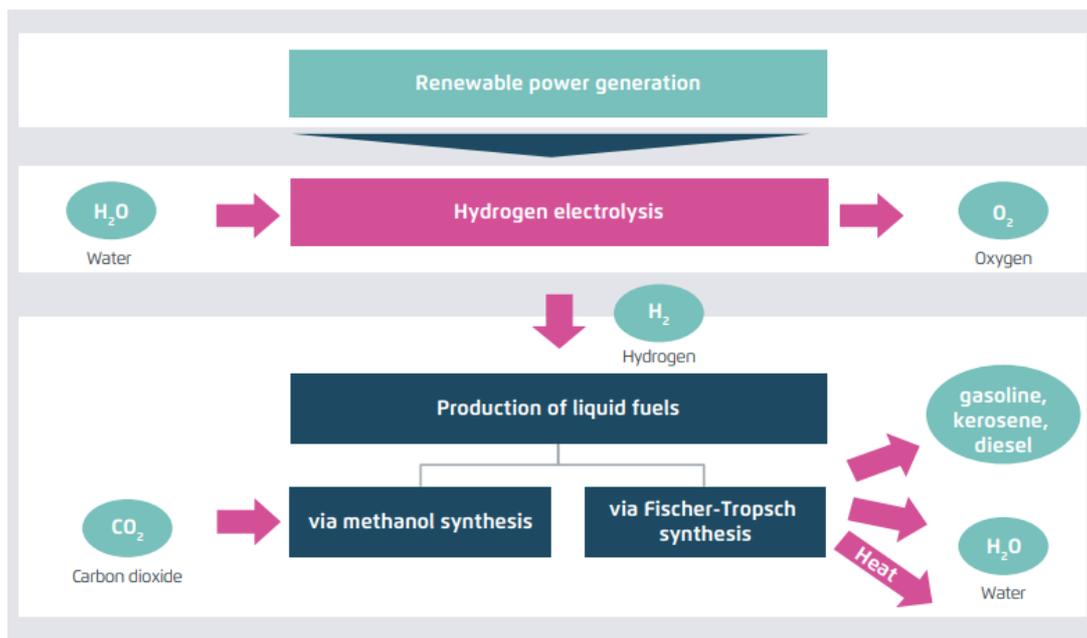
Aujourd'hui, les installations éoliennes offshore dans la mer du Nord sont capables d'atteindre plus de 3 600 heures à pleine charge en moyenne et conviendraient donc à la production de carburants à base d'électricité, si toute leur production d'électricité y était consacrée.<sup>164</sup>

Si l'hydrogène devait être produit en dehors de l'Europe, il devrait être liquéfié et transporté par camion-citerne vers la France, ce qui entraînerait des pertes d'énergie considérables.<sup>165</sup> Parmi les autres options de transport maritime, citons l'utilisation de transporteurs d'hydrogène tels que l'ammoniac ou les liquides organiques porteurs d'hydrogène (LOHC).<sup>166</sup> À moins qu'un réseau extensif de canalisations d'hydrogène soit rendu disponible, la distribution à partir d'un site de production ou d'un point d'entrée serait probablement prise en charge par des remorques porte-tubes haute pression qui livreraient l'hydrogène liquéfié directement à la station de ravitaillement, où il peut être utilisé sous forme liquide ou de nouveau gazéifié.<sup>167,168</sup> Un réseau d'infrastructures de ravitaillement devrait être déployé. Actuellement, il existe moins de 30 stations de ravitaillement en hydrogène en fonctionnement en France, dont six fournissent de l'hydrogène comprimé à 700 bars et aucune sous forme liquéfiée.<sup>169</sup>

### **3.2.3.3. Power-to-Liquid**

Le power-to-liquid (PtL), c'est-à-dire le diesel synthétique produit à partir d'hydrogène vert et de CO<sub>2</sub> par la synthèse de Fischer-Tropsch (FT), pourrait en théorie constituer une solution neutre en GES de décarbonation du fret routier longue distance. Les avantages du diesel FT liquide sont la technologie éprouvée et largement commercialisée des véhicules (ce qui rend inutile une transition de la chaîne de traction) ainsi que la densité de stockage volumétrique élevée du carburant et les infrastructures établies de distribution et de ravitaillement qui pourraient continuer à être utilisées. Ses principaux défis sont les pertes d'efficacité de conversion élevées au cours du processus de production de carburant, l'efficacité thermique relativement faible du moteur à combustion interne, les coûts de carburant élevés qui en résultent, l'absence de réduction significative des émissions de polluants atmosphériques et la probabilité fortement accrue de devoir recourir à l'importation de carburant venu de pays extérieurs à l'Europe en raison de la demande nettement plus élevée en électricité renouvelable.<sup>170</sup>

Le carburant liquide à base d'hydrocarbures est produit par la synthèse de Fischer-Tropsch. Ce procédé nécessite de l'hydrogène produit à partir d'électricité renouvelable supplémentaire et de CO<sub>2</sub> provenant du captage direct par l'air (DAC) comme matières premières. Le DAC du CO<sub>2</sub>, qui consiste à capter le gaz à effet de serre directement dans l'air ambiant, est la seule méthode viable pour assurer un cycle fermé du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Moins coûteux, le captage et l'utilisation du carbone (CUC) provenant d'une source ponctuelle industrielle ne peut pas garantir un cycle fermé du CO<sub>2</sub> et risque d'entraîner un double comptage. Comme c'est le cas pour l'hydrogène, les usines de production de PtL demandent des taux d'utilisation élevés pour pouvoir être rentables. En s'appuyant sur le calculateur PtG/PtL d'Agora Energiewende, l'analyse des coûts estime 4 000 heures à pleine charge.<sup>171</sup>



Source : Frontier Economics (2018)

### 3.2.3.4. Power-to-Methane

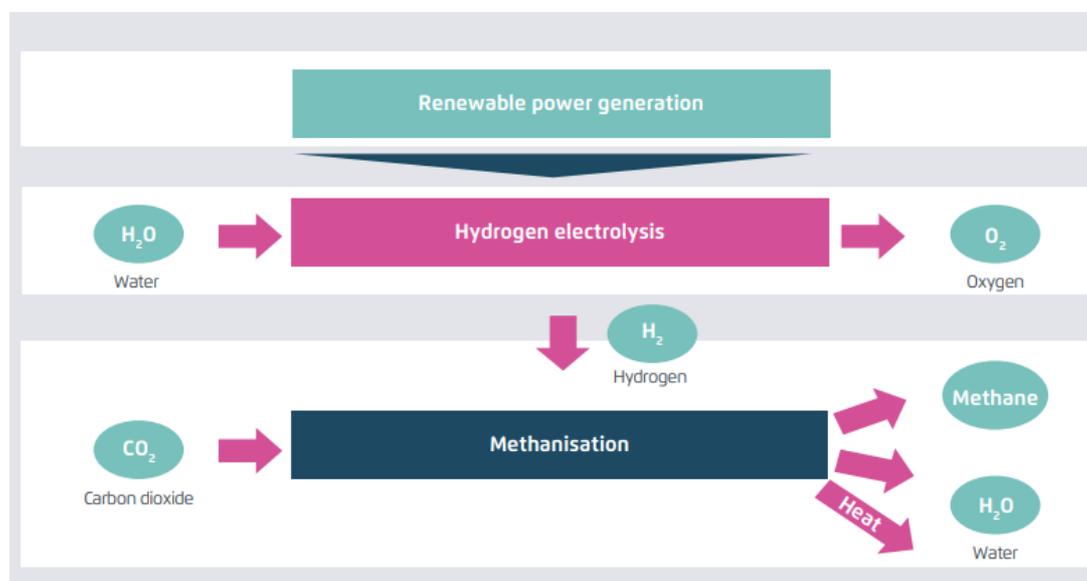
Le power-to-methane (PtM), c'est-à-dire le méthane synthétique produit à partir d'hydrogène vert et de CO<sub>2</sub> provenant du DAC, pourrait également, en théorie, constituer une solution neutre en GES de décarbonation du fret routier longue distance. Les avantages du PtM sont la technologie éprouvée de véhicule et de stockage et des adaptations nécessaires de moteur réalisables. À l'instar du power-to-liquid, ses principaux inconvénients sont les pertes d'efficacité de conversion élevées au cours du processus de production de carburant, l'efficacité thermique relativement faible du moteur à combustion interne, les coûts de carburant élevés qui en résultent, l'absence de réduction significative des émissions de polluants atmosphériques et la probabilité fortement accrue de devoir recourir à l'importation de carburant venu de pays extérieurs à l'Europe en raison de la demande nettement plus élevée en électricité renouvelable.<sup>172</sup> La faible densité volumétrique du carburant gazeux en termes de stockage pose également difficulté. Les ICEV\_PtM nécessiteraient aussi le déploiement d'une nouvelle infrastructure de distribution et de ravitaillement. À ce jour, il existe 55 stations de GNL opérationnelles en France.<sup>173</sup>

Les aspects techniques des ICEV au méthane, qui sont abordés dans la section 3.1.5 sur le méthane fossile, s'appliquent de la même manière au power-to-methane (rendement du moteur, stockage du carburant, émissions de polluants atmosphériques et adaptations nécessaires du véhicule). Dans la mesure où les PL longue distance requièrent une autonomie plus élevée, les camions roulant au gaz doivent stocker leur carburant à bord sous forme liquéfiée (GNL), ce qui a d'autres répercussions en termes d'efficacité. Ainsi que le rapporte Shell, 8 % du GNL produit est perdu à cause de l'apport énergétique nécessaire pendant la liquéfaction.<sup>174</sup>

Le carburant gazeux à base d'hydrocarbures est produit par méthanisation. Ce procédé nécessite de l'hydrogène produit à partir d'électricité renouvelable supplémentaire et de CO<sub>2</sub> provenant du DAC comme matières premières pour générer du méthane et de l'eau comme sous-produit.<sup>175</sup> De même que pour l'hydrogène et le PtL, des taux d'utilisation élevés sont nécessaires pour rentabiliser l'exploitation des installations de production. Comme pour le PtL, 4 000 heures à pleine charge ont été estimées pour l'analyse des coûts.<sup>176</sup>

Il convient également de souligner que le choix de la voie PtM comporte un risque important de blocage potentiel des infrastructures de carburants fossiles. S'ils investissaient massivement dans cette

technologie, les constructeurs automobiles, les transporteurs et les exploitants d'infrastructures auraient tout intérêt à éviter que cela ne devienne des actifs échoués. Dans ce scénario, la probabilité que les parties prenantes se tournent vers le méthane fossile pour combler le déficit d'approvisionnement en carburant augmente fortement.



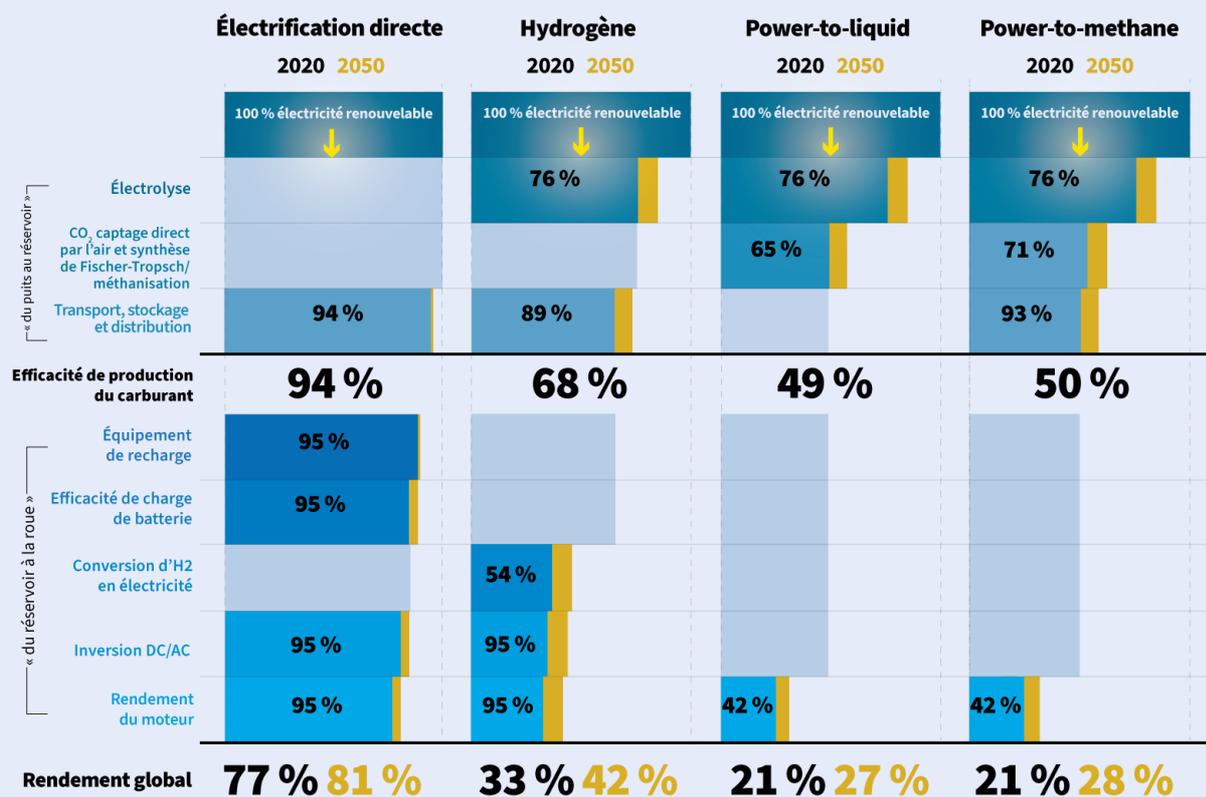
Source : Frontier Economics (2018)

#### 4. Demande supplémentaire d'électricité renouvelable

Les différentes solutions sont soumises à différentes pertes en matière de rendement de conversion et nécessitent ainsi des quantités différentes d'électricité renouvelable, que ce soit par électrification directe, ou sous forme de matières premières pour la production de carburants à base d'électricité. Le schéma 13 ci-dessous montre le taux de rendement de conversion moyen pour les différentes solutions, selon le potentiel technique actuel et le potentiel maximal pour 2050.<sup>xxi</sup> Les différences entre les solutions apparaissent ainsi de manière évidente. L'électrification directe sera toujours, de même qu'aujourd'hui, environ deux fois plus efficace que l'hydrogène, et environ trois fois plus efficace que les moteurs à combustion interne fonctionnant aux électrocarburants.

<sup>xxi</sup> Les taux de conversion de rendement dans le schéma 13 sont présentés à des fins illustratives et doivent être compris comme des valeurs moyennes prenant en compte différentes méthodes de production. Le calcul des coûts d'électricité et de carburant dans l'analyse des coûts (section 5) est basé sur les gains exacts de productivité du carburant du calculateur Agora PtG/PtL (du puits au réservoir) et les valeurs de consommation de carburants des véhicules (du réservoir à la roue). Ces deux éléments se trouvent à l'Annexe I.

# Camions : l'électrification directe, de loin la plus efficace



Notes: Taux de rendement des PL longue distance. Doivent être compris comme des valeurs moyennes approximatives qui prennent en compte différentes méthodes de production. L'électrification directe représente à la fois les BEV à batterie et/ou les caténaïres suspendus. L'hydrogène inclut la compression de carburant intégré, et le power-to-methane inclut la liquéfaction du carburant. Le même rendement de moteur est supposé pour les véhicules au diesel et les véhicules au gaz HPDI bi-carburant. Les pertes mécaniques sont exclues.

TRANSPORT & ENVIRONNEMENT | @transenv | @transenv | @transportenvironnement.org

Sources: Banque mondiale (2014), Apostolaki-Oosifidou et al. (2017), Peters et al. (2017), Larmanie et al. (2012), Wachsmuth et al. (2019), Conseil national de recherches (2013), Heinemann et al. (2018), Delgado et al. (2017).

Schéma 13 : Rendement de conversion des chaînes de traction du transport longue distance

Ces données influencent la quantité d'électricité renouvelable nécessaire aux différentes solutions. Le schéma 14 illustre la demande supplémentaire et compare cette quantité à la production d'électricité renouvelable en France en 2019. Pour atteindre une décarbonation totale, cette nouvelle électricité renouvelable devra venir d'une capacité de production supplémentaire. L'électrification des batteries pour tous les véhicules jusqu'à 26 t de PTAC est supposée dans toutes les solutions ; les différences en demande totale d'électricité renouvelable WTW sont donc dues aux PL de plus de 26 t. En 2050, la solution d'électrification directe nécessiterait l'équivalent de 54 %, la solution de l'hydrogène 79 %, et les deux solutions des hydrocarbures 106 % et 104 % de la production d'électricité renouvelable en France en 2019.<sup>xxii</sup>

<sup>xxii</sup> Dans ce contexte, on note à nouveau que les prévisions de la demande ne prennent pas en compte les potentielles interactions intermodales dues aux fluctuations de la demande de transport de marchandises et des coûts de transport (c.-à-d. *ceteris paribus*). Toute fluctuation de la demande de transport de marchandises due à l'élasticité des prix résultant du changement des coûts du carburant n'est pas répercutée dans la modélisation des émissions.

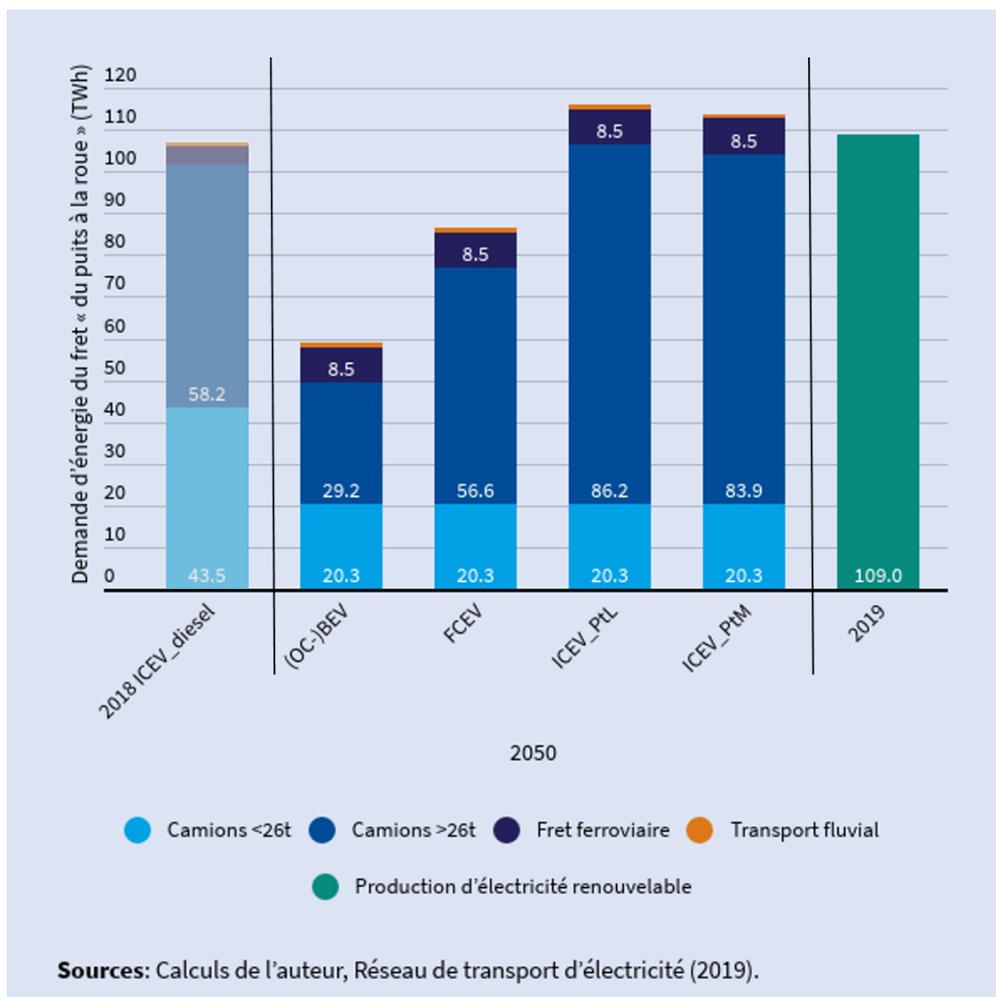


Schéma 14 : Demande supplémentaire d'électricité renouvelable comparée à la consommation finale d'énergie du secteur du fret en 2018 et de la production d'électricité renouvelable en France en 2019

Dans le contexte d'une transition énergétique plus généralisée, et de la nécessité de décarboner entièrement tous les secteurs énergétiques y compris ceux de l'électricité, de l'industrie et du chauffage, il sera nécessaire de mettre en place une importante capacité supplémentaire d'électricité renouvelable en France. Étant donné que la décarbonation des secteurs de l'aviation et du transport maritime reposera sur l'hydrogène et le kérosène synthétique, l'électrification directe doit prévaloir sur les carburants à base d'électricité dans le transport routier.

## 5. Analyse des coûts pour les camions longue distance

Les coûts liés à la demande en électricité renouvelable ne représentent qu'une partie des éléments de coûts qui doivent être pris en compte. Les coûts de système décrivent les coûts en capital et les coûts d'exploitation totaux pour chaque véhicule, compte tenu de son achat, de sa consommation de carburant et de ses besoins d'infrastructure de recharge ou de ravitaillement. Les coûts d'utilisation, ou coût total de possession (TCO), comprennent les coûts globaux de l'achat, de la possession et de l'exploitation, y compris toutes les taxes, cotisations, redevances routières et subventions.

### 5.1. Coûts de système

Contrairement au TCO, les coûts de système font référence aux coûts économiques qui sont imputés d'une manière ou d'une autre au fabricant, au transporteur, au consommateur et au secteur public. Ils excluent toutes taxes, cotisations et redevances routières, à l'exception des frais liés au raccordement au réseau électrique et à la distribution en réseau, afin d'obtenir une comparaison juste avec les carburants à base d'électricité, étant donné que leurs coûts de transport et de distribution sont également inclus.

### 5.1.1. Coûts liés aux véhicules

Les coûts liés aux véhicules sont principalement basés sur l'étude de Kühnel et al. et se trouvent dans l'Annexe II.<sup>177,xxiii</sup> Tous les véhicules, quelle que soit la solution examinée, sont soumis aux mêmes critères pour correspondre au profil d'application typique d'un tracteur longue distance (voir tableau 3). Le critère principal : atteindre une autonomie opérationnelle de 800 km par jour, soit le maximum qu'un conducteur seul peut conduire (voir section 3.2.3.1.1). Presque tous les tracteurs immatriculés en France ont un PTAC de 44 t.<sup>178</sup> Les coûts de tous les composants du véhicule restent constants après 2030 et jusqu'en 2050.

Kühnel et al. ont entrepris une estimation de coûts ascendante pour les différents composants de véhicule et ont inclus un facteur de majoration de 1,4 pour déterminer le prix de détail net après les coûts de fabrication et de distribution. Le prix de détail net total (excluant la taxe automobile et la TVA) inclut les coûts applicables dus au véhicule sans le moteur, à la chaîne de traction conventionnelle (y compris moteur à combustion interne et système de post-traitement des gaz d'échappements), au moteur électrique, au système de pile à combustible, au système de réservoir à carburant, à la batterie et au pantographe. Le prix de détail net pour les BEV prend également en compte les coûts d'opportunité dus au poids des véhicules et à la perte de charge utile supplémentaires jusqu'à 2030.

	ICEV_diesel	BEV	OC-BEV	FCEV	ICEV_PtL	ICEV_PtM
<b>Technologie de moteur</b>	Moteur diesel	Moteur électrique			Moteur diesel	CI HPDI bi-carburant
<b>Puissance du moteur</b>	350 kW					
<b>PTAC</b>	40/44 t					
<b>Kilométrage annuel</b>	120 000 km					
<b>Autonomie quotidienne maximale</b>	> 1 700 km	~ 800 km sur batterie	> 800 km (~ 250 km sur batterie)	~ 800 km	> 1 700 km	800 – 1 100 km
<b>Système de stockage de carburant</b>	Réservoir de diesel	Batterie		Réservoir d'H <sub>2</sub> comprimé (700 bars) et batterie	Réservoir de diesel	Réservoir de GNL cryogénique et réservoir de diesel
<b>Capacité du réservoir et de la batterie</b>	570 litres <sub>diesel</sub>	1 200 kWh	400 kWh	55 kg <sub>H2</sub> 70 kWh	570 litres <sub>diesel</sub>	205 kg <sub>GNL</sub> 170 litres <sub>diesel</sub>

Tableau 3 : Caractéristiques des tracteurs longue distance

<sup>xxiii</sup> Les hypothèses de coûts formulées par Kühnel et al. sont basées sur le niveau des coûts allemand. Puisque le niveau de prix et le pouvoir d'achat dans les deux pays sont similaires, les coûts devraient être comparables.

### 5.1.2. Coûts de carburant

Le calculateur PtG/PtL d'Agora a été utilisé pour calculer le coût actualisé de l'électricité (LCOE) et le coûts des électrocarburants synthétiques produits par une capacité supplémentaire d'électricité renouvelable.<sup>179</sup> En matière de performance climatique sur le cycle de vie de l'électricité renouvelable et des électrocarburants synthétiques, les émissions occasionnées par la construction de sites de production ne sont pas prises en compte.<sup>180</sup> De même, toute contrainte temporelle potentielle liée au déploiement de sites de production de carburant est écartée, et on suppose que la consommation finale d'énergie supplémentaire des PL sera comblée par une capacité croissante de production sans limite. Les éléments de coûts détaillés se trouvent à l'Annexe II.

Selon le scénario choisi, les sites de production d'électricité et de carburant sont basés soit dans la mer du Nord (MN) ou en Afrique du Nord (AN). Dans les deux scénarios, l'électricité liée à la solution d'électrification directe des BEV et des OC-BEV est produite par les installations éoliennes offshore dans la mer du Nord.

Les coûts de carburant sont basés sur le scénario de référence du calculateur PtG/PtL Agora. Que ce soit pour le scénario de la MN ou de l'AN, le coût moyen pondéré du capital (CMPC) choisi est 6 %, et la méthode d'extraction de CO<sub>2</sub> est le captage direct par l'air.<sup>181</sup> Dans le cas de la MN, le vent de terre est estimé à 4 000 heures à pleine charge par an. Il en va de même pour l'électrolyse à haute température de cellules à oxydes solides (SOEC).<sup>xxiv,182</sup> L'énergie photovoltaïque solaire dans le scénario de l'AN est estimée à 2 344 heures à pleine charge, comme c'est le cas pour l'électrolyse.<sup>xxv</sup> Dans les deux scénarios, les procédés de synthèse de Fischer-Tropsch et de méthanisation ont été estimés à 4 000 heures à pleine charge (ce qui nécessite un stockage d'hydrogène temporaire dans le scénario de l'AN).

Les frais de raccordement au réseau sont inclus dans le LCOE des deux scénarios, pour toutes les solutions. De plus, la solution à l'électricité inclut le tarif d'utilisation du réseau public d'électricité (TURPE) pour représenter les coûts de distribution du réseau en France. La solution aux carburants synthétiques tient compte des coûts liés à la liquéfaction, au transport par pétrolier de l'Afrique du Nord à la France (Marseille) et de la distribution intérieure jusqu'à l'arrivée à la station de ravitaillement. En dehors de cela, aucune autre taxe ou cotisation sur l'électricité et le carburant ne sont prises en compte afin de permettre une évaluation fiable des coûts réels du carburant.

En ce qui concerne la solution PtM, la technologie de moteur choisie est le moteur bi-carburant CI HPDI, pour lequel le même rendement énergétique que les moteurs diesel conventionnels est supposé. Aucune perte énergétique supplémentaire due à l'évaporation ou à la ventilation n'est prise en compte. Bien qu'on estime que 10 % de la consommation de carburant des véhicules est due au diesel qui enflamme le mélange air-carburant, la modélisation des émissions et l'analyse des coûts partent du principe que ces véhicules fonctionnent exclusivement au méthane à des fins de simplicité.

### 5.1.3. Coûts d'infrastructure

Les coûts d'infrastructure estimés sont également basés sur le travail de Kühnel et al. Ils tiennent compte de la taille et de la puissance des stations de ravitaillement et de recharge, de leur taux d'utilisation, de leur durée de vie, de leurs dépenses en capital, de leurs dépenses opérationnelles et du nombre de véhicules

---

<sup>xxiv</sup> Les cellules à oxydes solides conductrices de protons, qui montrent le niveau le plus bas de pertes de conversion, représentent la technologie d'électrolyse la moins développée, et sont actuellement à un stade précommercial. La technologie a été choisie pour l'analyse de coûts afin de tenir compte du potentiel technique maximal.

<sup>xxv</sup> Il est également possible de combiner les énergies photovoltaïque et éolienne dans le scénario de l'AN plutôt que de considérer l'énergie photovoltaïque seule, ce qui permettrait d'atteindre un nombre supérieur d'heures à pleine charge. Cependant, le LCOE de l'éolien est plus élevé que celui de l'énergie photovoltaïque, et une combinaison des deux entraînerait des coûts de carburants plus élevés que ceux de l'énergie photovoltaïque seule, d'après le calculateur Agora PtG/PtL.

fournis par station. Les coûts restent constants de 2020 à 2050. Les éléments de coûts détaillés se trouvent à l'Annexe II.

Les solutions au diesel fossile et au PtL peuvent utiliser les infrastructures de ravitaillement déjà établies. Par souci de simplicité, on estime que les coûts d'investissement de ces stations essence sont déjà absorbés, et que l'infrastructure n'a pas besoin d'être remplacée à la fin de sa vie opérationnelle.

### 5.1.4. Résultats

Les coûts de système de la durée de vie par véhicule neuf pour les scénarios de la MN et de l'AN sont illustrés dans les schémas 15 et 16, et incluent la solution de référence au diesel fossile comme point de comparaison. Les coûts de système de la durée de vie prennent en compte une période d'utilisation de véhicule de cinq ans ainsi que la valeur résiduelle restante dudit véhicule. Comme mentionné précédemment, l'approche des coûts de système permet de calculer les coûts technico-économiques réels des différentes solutions, et ne doit pas être confondue avec le TCO, qui sera présenté à la section suivante.

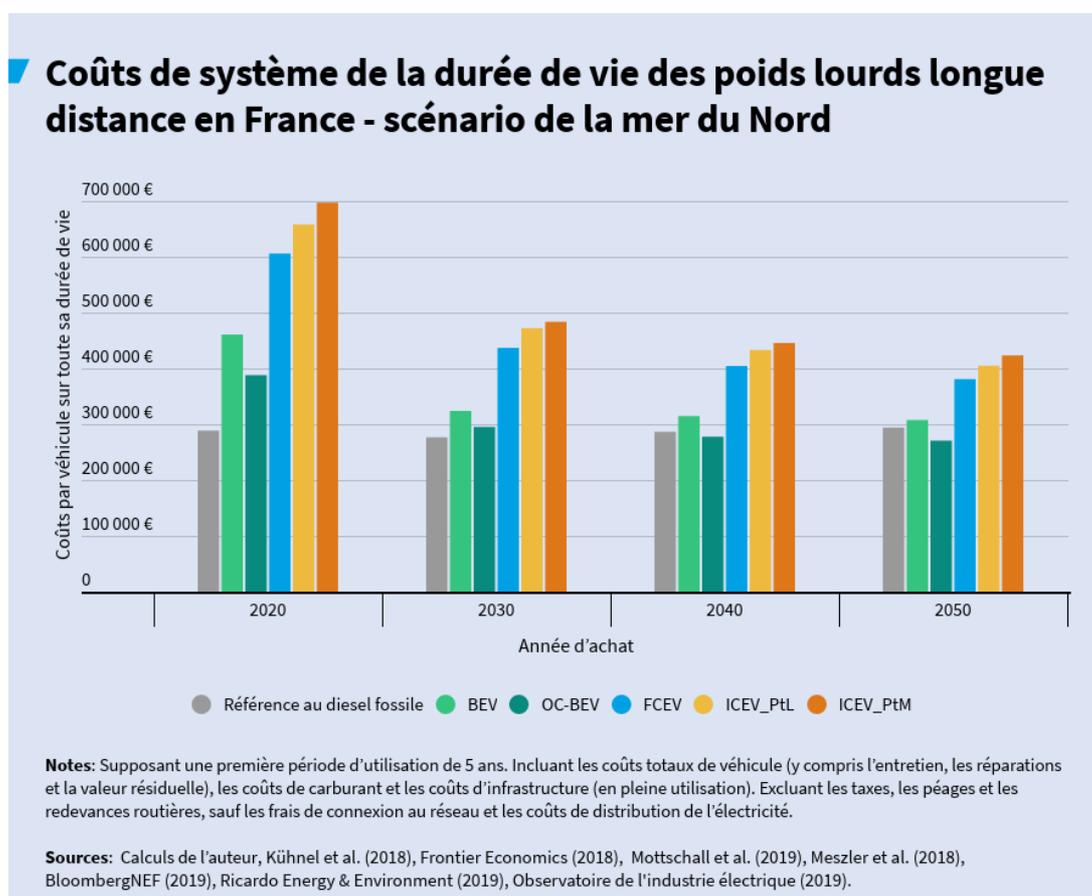
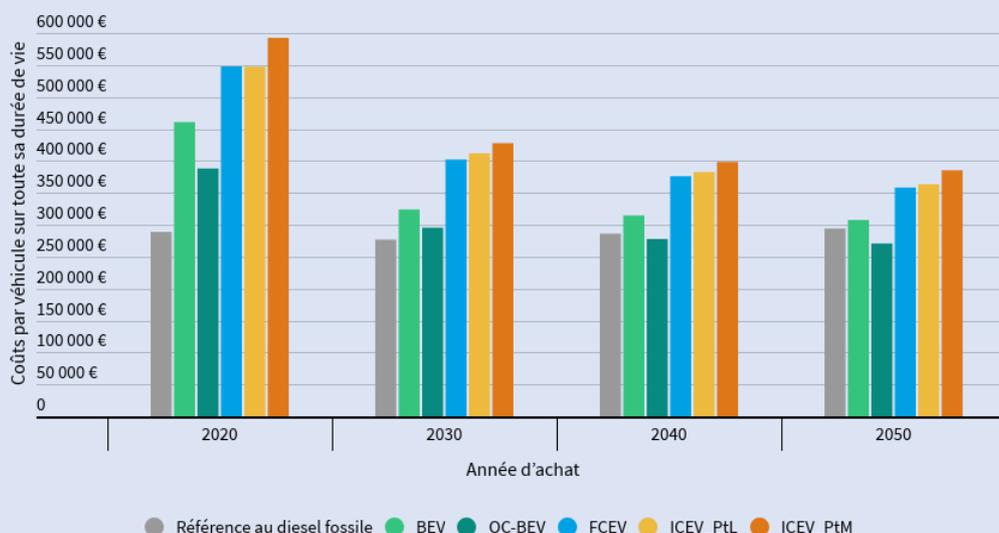


Schéma 15 : coûts de système de la durée de vie des PL longue distance – scénario de la mer du Nord

## Coûts de système de la durée de vie des poids lourds longue distance en France - scénario de l'Afrique du Nord



**Notes:** Supposant une première période d'utilisation de 5 ans. Incluant les coûts totaux de véhicule (y compris l'entretien, les réparations et la valeur résiduelle), les coûts de carburant et les coûts d'infrastructure (en pleine utilisation). Excluant les taxes, les péages et les redevances routières, sauf les frais de connexion au réseau et les coûts de distribution de l'électricité. Pour les (OC)-BEV, la production d'électricité renouvelable est tirée du scénario de la mer du Nord.

**Sources:** Calculs de l'auteur, Kühnel et al. (2018), Frontier Economics (2018), Mottschall et al. (2019), Meszler et al. (2018), BloombergNEF (2019), Ricardo Energy & Environment (2019), Pfennig et al. (2017), Observatoire de l'industrie électrique (2019).

Schéma 16 : coûts de système de la durée de vie des PL longue distance – scénario de L'Afrique du Nord

Les résultats montrent que les BEV et les OC-BEV représentent l'option la plus rentable parmi toutes les solutions capables d'atteindre le niveau zéro d'émissions WTW d'ici le milieu du siècle. Les OC-BEV atteindront la parité des coûts avec la solution de référence au diesel fossile dès 2037, sans tenir compte des taxes, cotisations et frais. Les BEV et les OC-BEV restent moins chers à posséder et à exploiter que les FCEV et les ICEV fonctionnant au diesel synthétique ou au méthane, si ces carburants à base d'électricité sont produits en Afrique du Nord et expédiés en France.

## 5.2. Coût total de possession

Le coût total de possession (TCO) comprend les coûts de système ainsi que toutes les taxes et cotisations liées à l'achat et à l'exploitation d'un véhicule, et les redevances routières. En ce sens, le TCO décrit les dépenses totales d'un transporteur.

### 5.2.1. Taxes, cotisations et redevances routières

Comme indiqué plus haut, les coûts de système incluent déjà les frais de raccordement au réseau pour les sites de production d'électricité renouvelable, ainsi que les coûts liés à l'infrastructure de transport et de distribution pour l'électricité et le carburant. Par ailleurs, le TCO inclut toutes les taxes et cotisations, à part la TVA sur l'achat et l'exploitation du véhicule et le produit final de carburant. Cela signifie que les carburants à base d'électricité ne sont taxés qu'une fois.

Les taxes sur l'achat et l'exploitation de véhicule incluent les taxes d'immatriculation uniques et les charges parafiscales supplémentaires, ainsi que la taxe annuelle spéciale sur certains véhicules à moteur.<sup>183</sup>

Pour la solution de référence au diesel fossile ainsi que le PTL, le droit d'accise actuel sur le gazole de 59,40 centimes d'euros/litre moins la remise sur le carburant de 15,71 centimes d'euros/litre est pris en compte et reste constant jusqu'en 2030. Pour la solution à l'électricité, la contribution tarifaire

d'acheminement (CTA), la contribution au service public d'électricité (CSPE) et les taxes sur la consommation finale d'électricité (TCFE) sont incluses. En ce qui concerne la solution à l'hydrogène, l'exemption de taxe actuelle est maintenue. Pour la solution PtM, la taxe intérieure de consommation sur le gaz naturel (TICGN) réduite, qui s'élève à 5,23 €/MWh pour l'utilisation en tant que carburant est appliquée.<sup>184</sup>

Conformément aux estimations de redevances routières de 2018 par le Comité national routier, un coût de péage moyen de 10,64 centimes d'euros/km pour un tracteur longue distance avec un kilométrage annuel de 120 000 km est supposé.<sup>185</sup> Ce chiffre est appliqué à toutes les solutions, parce que la majorité des autoroutes payantes en France sont gérées par des concessionnaires, et qu'une réduction importante de la redevance d'infrastructure pour les ZEV sur la base de la directive Eurovignette sera ainsi limitée aux concessions largement modifiées ou renouvelées, et à la partie non concédée du réseau routier (voir sections 1.3 et 7.1).

### 5.2.2. Résultats

Le TCO de la durée de vie par véhicule neuf pour les scénarios de la MN et de l'AN est illustré dans les schémas 17 et 18. Il tient compte d'une première période d'exploitation de véhicule de 5 ans et de sa valeur résiduelle restante.

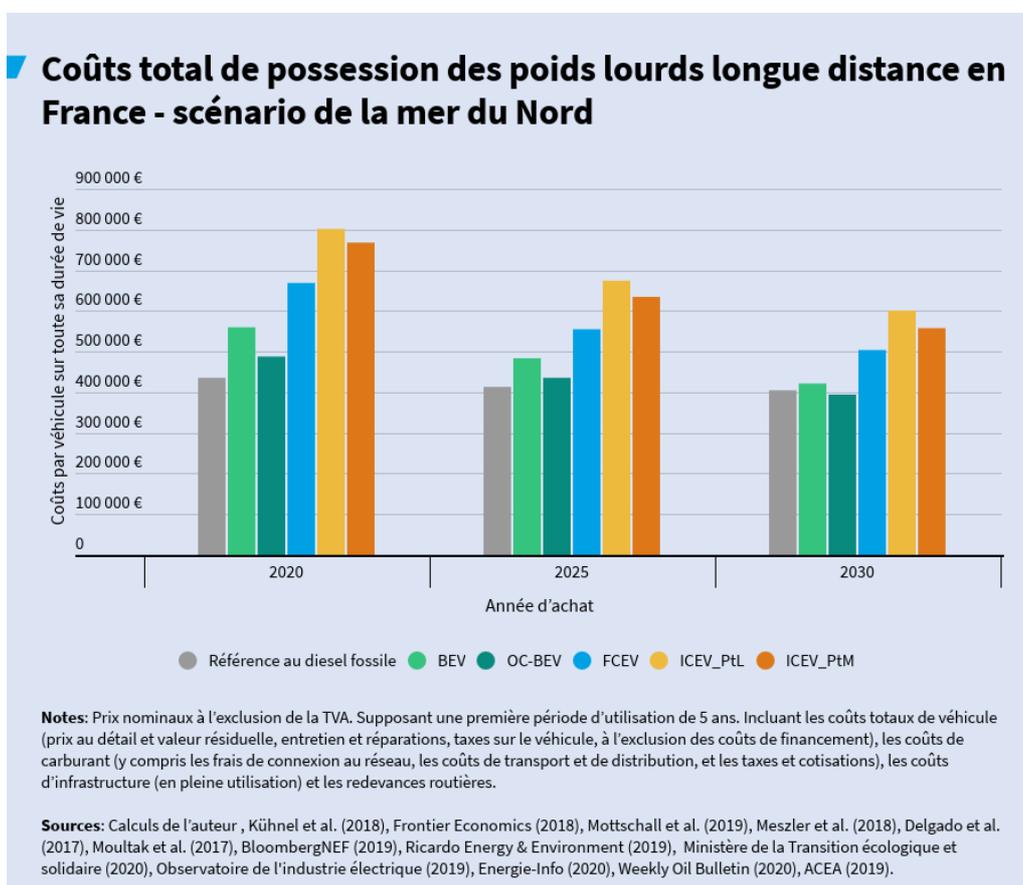


Schéma 17 : TCO des PL longue distance – scénario de la mer du Nord

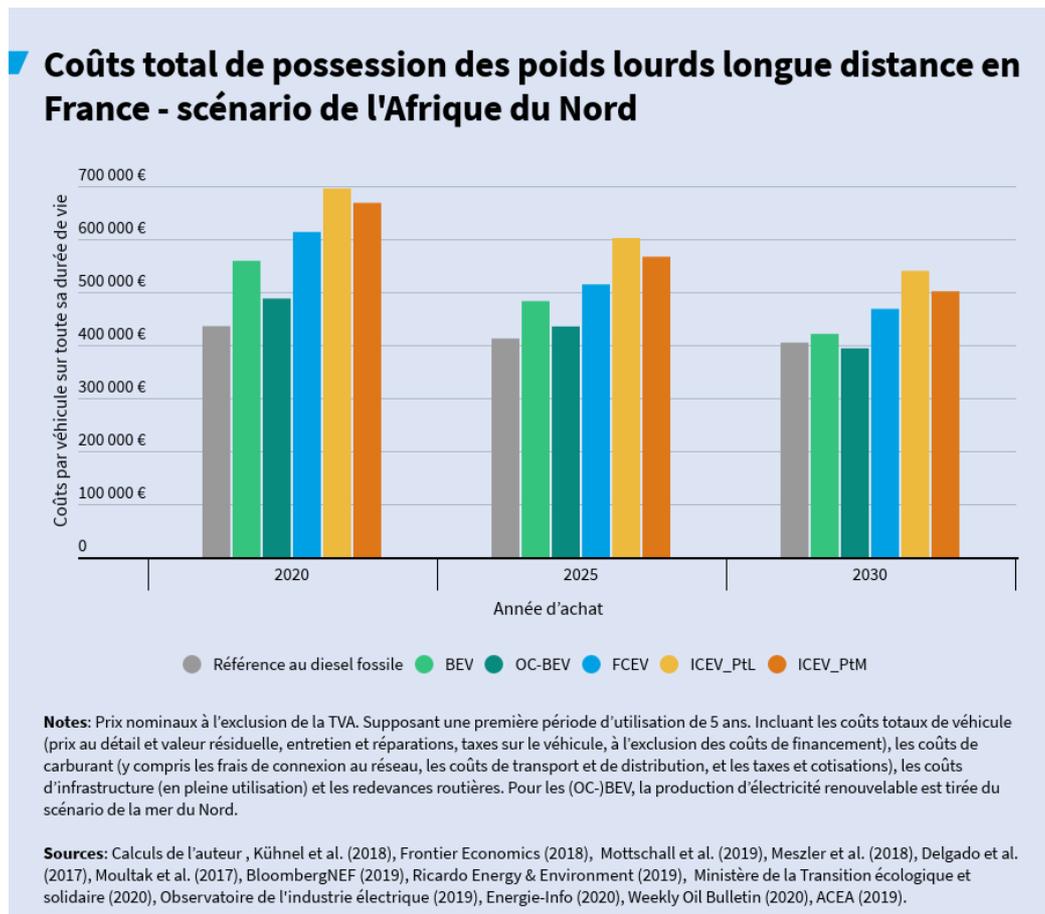


Schéma 18 : TCO des PL longue distance – scénario de l'Afrique du Nord

En tenant compte de toutes les taxes, cotisations et redevances routières, les BEV et les OC-BEV représentent l'option la plus rentable parmi toutes les solutions. En excluant les subventions potentielles pour les ZEV, les OC-BEV atteindront la parité de coût avec la solution de référence au diesel fossile en 2029 et les BEV en 2039. Et à nouveau, les chaînes de traction électriques sont moins coûteuses à posséder et à exploiter par rapport aux FCEV et aux ICEV au diesel synthétique ou au méthane, si ces carburants à base d'électricité sont produit dans des conditions optimales en Afrique du Nord et expédiés en France. Il convient également de noter que le TCO ci-dessus inclut une exemption de taxe pour l'hydrogène et une diminution importante de taxe pour le méthane, mais pas de subventions pour l'électricité utilisée comme carburant (voir section 7).

## 6. Conclusion : la solution optimale

Il s'ensuit que les véhicules à batterie électrique en général, et ceux qui utilisent une infrastructure de caténaires suspendues en particulier, constituent la solution la plus rentable pour remplacer le parc automobile actuel au diesel fossile et atteindre le niveau zéro des émissions du fret intérieur en France d'ici 2050. Un report modal de la route vers le transport ferroviaire et fluvial est possible, dans une certaine mesure. Cependant, ce potentiel limité ne doit pas être surestimé, étant donné que, dans le scénario de potentiel inexploité du modèle, les capacités de fret augmentent déjà de 84 % (rail) et de 100 % (navigation). À moyen terme, l'accumulation des mesures d'efficacité admissibles peuvent largement contribuer à diminuer les émissions du fret intérieur en France. Toutefois, ces mesures ne seront pas suffisantes pour atteindre l'objectif de 2030 et décarboner le secteur à long terme. Une transition de chaîne de traction vers l'électrification directe pour les livraisons urbaines et régionales ainsi que pour les camions longue distance sera indispensable si le pays veut atteindre ses objectifs environnementaux contraignants de 2030 et 2050 à moindre coût pour le secteur public, les entrepreneurs et les consommateurs.

## 7. Recommandations politiques

Les mesures politiques adoptées à partir d'aujourd'hui, tant à l'échelle de la France qu'à celle de l'UE, entraîneront une baisse des émissions du fret, mais pas de manière suffisante pour atteindre les objectifs de 2030 et de 2050. Les conclusions de cette étude devraient donc inciter les législateurs, en France comme au sein de l'UE, à prendre des mesures réglementaires rapides et décisives.

La Loi sur l'orientation des mobilités récemment adoptée impose à la France de mettre au point une stratégie concernant le transport ferroviaire avant 2021.<sup>186</sup> À cette occasion, Nous appelons le gouvernement français à élaborer et publier simultanément une stratégie sur le transport routier de marchandises t, afin d'établir une trajectoire de décarbonation crédible, avec notamment des objectifs de réduction des émissions intermédiaires conformes à la SNBC et au RRE ainsi que des mesures politiques concrètes pour y arriver.

### 7.1. Réforme fiscale

#### Taxation de l'électricité

Actuellement, aucune réduction des taux d'imposition n'est prévue pour l'électricité utilisée dans le transport de marchandises routier. Un taux de CSPE réduit de 0,50 €/MWh (au lieu de 22,50 €/MWh) est actuellement accordé au transport de passagers par train, métro, tramway, bus électriques et au transport ferroviaire de marchandises.<sup>187</sup> Cette provision devrait être étendue au transport de marchandises par véhicules routiers directement alimentés à l'électricité, ce qui comprend les BEV et les OC-BEV.

Une réduction du taux de la CSPE pour les (OC-)BEV réduirait à elle seule leur TCO d'un maximum de 5 % (selon l'année). Cette mesure incitative avancerait la parité des prix avec la solution de référence au diesel fossile à 2020 pour les OC-BEV (par rapport à 2029) et à 2024 pour les BEV (par rapport à 2039).

#### Taxation du méthane

La France applique actuellement un droit d'accise extrêmement faible sur le méthane fossile utilisé comme carburant (5,23 €/MWh), ce qui ne se justifie aucunement lorsqu'on considère ses effets négatifs sur le climat et la qualité de l'air (voir section 3.1.5). Le taux complet de la TICGN appliqué au gaz fossile en consommation domestique équivaut à 8,45 €/MWh. Au minimum, le taux complet de la TICGN pour le gaz fossile en consommation domestique devrait être également appliqué au méthane fossile comme carburant. Le biométhane est actuellement exempté de la TICGN, quelle que soit l'origine de ses matières premières et son potentiel d'économie d'émissions de GES. Cette exemption devrait disparaître, à moins qu'un véhicule ne roule exclusivement au biométhane à base de déchets et de résidus, qu'il soit rechargé dans des sites locaux de production de biométhane, et que l'opérateur du véhicule soit capable de vérifier la conformité du produit avec ces règles.

#### Remise sur le carburant diesel

La remise sur le carburant diesel doit être supprimée dès que possible. Les prix pétroliers actuellement bas constituent une bonne occasion de progresser vers cet objectif. Comme une telle augmentation affecterait les transporteurs nationaux de manière disproportionnée par rapport à leurs concurrents étrangers à cause du tourisme à la pompe, une partie des revenus fiscaux supplémentaires pourraient servir à un nouveau fond d'investissement, afin de fournir des subventions à l'achat aux petites et aux moyennes entreprises de transports qui souhaitent investir dans des véhicules à zéro émission (voir ci-dessous). En pratique, ce revenu supplémentaire serait réservé à l'AFITF et lui reviendrait directement afin de mettre en place un mécanisme de subvention à l'achat.

La **taxe carbone française**, actuellement gelée à son niveau de 2018 (44,6 €/tCO<sub>2</sub>), doit être à nouveau augmentée, comme initialement prévu. L'harmonisation successive des droits d'accise du pétrole et du diesel, également suspendue pour le moment, doit aussi être poursuivie.

Le gouvernement français doit mener ces réformes fiscales dans le cadre de la **Loi budgétaire de 2021** afin d'améliorer le TCO des camions à zéro émission et d'abolir les subventions nocives pour l'environnement.

### **Directive de l'UE sur la taxation de l'énergie**

La Directive définit un droit d'accise minimum pour le gaz naturel utilisé comme carburant. Cependant, en parallèle, elle donne aux États membres la possibilité d'appliquer des exemptions totales ou partielles à ce taux minimum, le rendant ainsi nul.<sup>188</sup> Cette provision doit être supprimée lors de la révision à venir.<sup>189</sup>

## **7.2. Péage routier**

Actuellement, les PL ne paient pas pour utiliser le réseau routier non concédé. En vue d'internaliser davantage de coûts externes, le gouvernement français devrait donc mettre en place un système de péage basé sur la distance parcourue pour tous les camions dont le PTAC est supérieur à 3,5 t sur les routes non concédées. Un système basé sur le temps (c.-à-d. une vignette) n'aurait pas l'effet incitatif désiré et serait contraire au principe de pollueur-payeur. Ce système devra être conforme avec la réglementation de la directive Eurovignette actuellement à l'étude, et inclure une réduction importante des redevances d'infrastructure pour les ZEV. Il devra également inclure les frais de coûts externes pour la pollution de l'air et les nuisances sonores. En ce qui concerne le réseau routier privé et les concessions autoroutières, les règles de la directive devront être appliquées dès que les contrats de concession seront largement modifiés ou renouvelés. Là aussi, la France devra opter pour une redevance des coûts externes à l'avenir.

## **7.3. Mesures d'incitation à l'achat pour les véhicules à émissions nulles**

À l'heure actuelle, les coûts d'achat initiaux plus élevés découragent les transporteurs d'investir dans les ZEV malgré des coûts d'exploitation plus bas qui compensent l'investissement durant le cycle de vie du véhicule. Afin de rendre l'achat des ZEV plus intéressant et d'accélérer leur adoption par le marché, la France devrait mettre en place des mesures d'incitation à l'achat significatives. Une fois que les ZEV auront atteint une certaine part du marché, les instruments de soutien pourront être à nouveau diminués. En règle générale, tous les véhicules à moteur à combustion interne, y compris les camions alimentés au gaz, ne doivent pas bénéficier de subventions, qu'elles soient directes ou indirectes.

Le système d'amortissement spécial en France pour les PL alimenté au gaz naturel a été étendu aux véhicules à batteries électriques et à hydrogène et, de plus, prolongé jusqu'à fin 2021. Dans ce cadre, les propriétaires de véhicules peuvent déprécier un total de 160 % (PTAC jusqu'à 16 t) ou de 140 % (PTAC supérieur à 16 t) de la valeur d'achat si le camion est alimenté au méthane fossile, au biométhane, à l'électricité ou à l'hydrogène.<sup>190</sup> Même si ce système peut, en principe, compenser de façon juste des coûts de véhicules augmentés, il ne peut avoir l'effet escompté que si les transporteurs génèrent des revenus suffisamment importants avant impôts, et ce, pendant la période complète de l'amortissement linéaire du véhicule. Or, le secteur du transport est connu pour avoir de faibles marges de profit. Et même si elles étaient suffisamment élevées pour permettre la déduction fiscale, il faudrait qu'elles le soient sur la totalité de la période d'utilisation du véhicule pour en bénéficier. Il faut donc s'attendre à ce que ce système ne suffise pas à encourager les opérateurs à assumer les coûts initiaux d'achat élevés des ZEV.

Aussi, la France doit introduire une subvention d'achat directe à durée limitée pour les camions à batterie électrique et alimentés à l'hydrogène, comme l'a fait le ministère allemand des transports. Dans le cadre de la réglementation de financement en vigueur en Allemagne, les opérateurs peuvent recevoir des primes allant jusqu'à 12 000 € (PTAC jusqu'à 12 t) et jusqu'à 40 000 € (PTAC supérieur à 12 t) par véhicule ; avec un maximum de 40 % des coûts d'investissements supplémentaires couverts. Le montant total de financements qu'une même entreprise peut recevoir est plafonné à 500 000 €. <sup>191</sup> L'Allemagne prévoit d'augmenter son taux de subvention à l'achat en 2020.<sup>192</sup> De son côté, le Land du Bade-Württemberg fournit une prime maximale de 100 000 € pour couvrir un maximum de 50 % des coûts d'investissements de véhicule supplémentaires.<sup>193</sup> En Californie, des taux de subvention à l'achat allant jusqu'à 150 000 \$ sont proposés pour les PL dont le PTAC est supérieur à 15 t.<sup>194</sup> La subvention d'achat française devra être

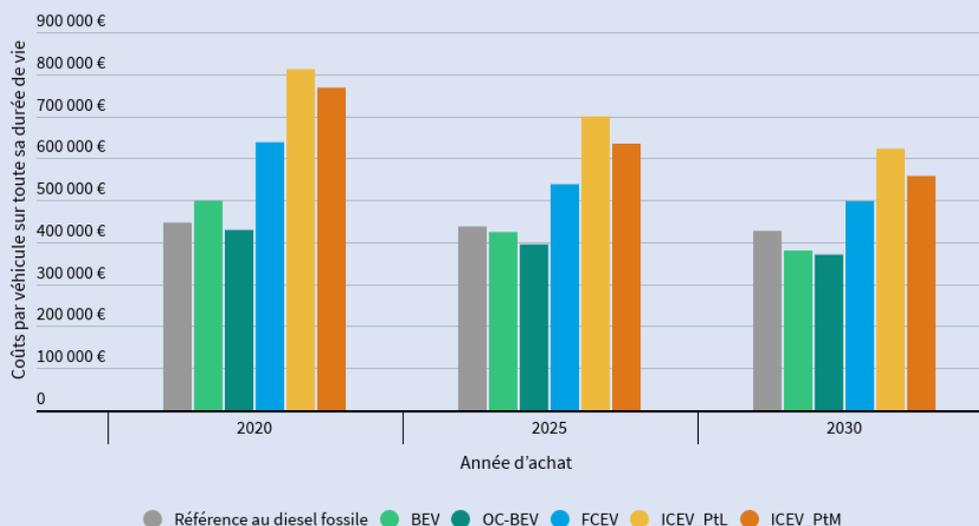
suffisamment intéressante pour maximiser l'effet incitatif. Tout mécanisme de financement doit se limiter aux ZEV et exclure les camions alimentés au gaz. Il en va de même pour les systèmes de financement régionaux déjà en place qui concernent l'achat de véhicules commerciaux alimentés au gaz.<sup>195</sup> Les villes et les régions françaises doivent mettre fin à ces mécanismes le plus vite possible.

Une subvention à l'achat des ZEV basée sur le modèle allemand réduirait à elle seule le TCO des (OC-)BEV d'un maximum de 9 % et des véhicules à moteur à combustion interne de jusqu'à 5 % (selon l'année). Ainsi, on avancerait la parité des prix avec le diesel fossile à 2027 pour les OC-BEV (par rapport à 2029) et à 2030 pour les BEV (par rapport à 2039).

## Réforme fiscale et mesures d'incitation à l'achat : conséquences sur le TCO

En combinant le taux d'imposition réduit de la CSPE pour les (OC-)BEV, la suppression de la remise sur le carburant après 2020 et une subvention à l'achat des ZEV, on accélérerait considérablement la transition vers les ZEV (voir schéma 18). Cette combinaison de réforme fiscale et de mesures incitatives réduirait leur TCO d'un maximum de 14 %, tout en augmentant le TCO des véhicules au diesel fossile de jusqu'à 5 % (selon l'année). Ainsi, on avancerait la parité des prix avec le diesel fossile à 2020 pour les OC-BEV (par rapport à 2029) et à 2024 pour les BEV (par rapport à 2039).

### Coûts total de possession des poids lourds longue distance en France avec réforme fiscale et aide à l'achat des ZEV - scénario de la mer du Nord



**Notes:** Prix nominaux à l'exclusion de la TVA. Supposant une première période d'utilisation de 5 ans. Incluant les coûts totaux de véhicule (prix au détail, valeur résiduelle après déduction de l'aide à l'achat, entretien et réparations, taxes sur le véhicule, à l'exclusion des coûts de financement), les coûts de carburant (y compris les frais de connexion au réseau, les coûts de transport et de distribution, et les taxes et cotisations, dont le taux d'imposition réduit de la CSPE et la suppression de la remise sur le carburant après 2020), les coûts d'infrastructure (en pleine utilisation) et les redevances routières.

**Sources:** Calculs de l'auteur, Kühnel et al. (2018), Frontier Economics (2018), Mottschall et al. (2019), Meszler et al. (2018), Delgado et al. (2017), Moultak et al. (2017), BloombergNEF (2019), Ricardo Energy & Environment (2019), Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020), Observatoire de l'industrie électrique (2019), Energie-Info (2020), Weekly Oil Bulletin (2020), ACEA (2019).

Schéma 19 : TCO des PL longues distances en tenant compte de la réforme fiscale et des mesures d'incitation à l'achat – scénario de la mer du Nord

## 7.4. Infrastructure de recharge

### Mécanismes de financement pour les entreprises privées

La France doit mettre fin aux mesures incitatives et diminuer les objectifs inclus dans son PNEC pour le développement d'infrastructure de recharge pour les véhicules au GNC et au GNL, et se concentrer sur le développement d'infrastructures pour les ZEV. Le gouvernement français doit avancer une stratégie formelle présentant ses intentions pour soutenir et accélérer le déploiement d'infrastructures de charge privées et (semi-)publiques pour les camions de livraison urbaine, régionale et longues distances, comme cela a été fait en Allemagne et en Californie.<sup>196,197</sup> Cela suppose la mise en place d'instruments de financement pour soutenir les sociétés de transport et le secteur logistique, en installant des infrastructures privées et partagées pour le dépôt et le chargement destinées aux camions de livraison urbaine et régionale.

De tels programmes doivent aussi impliquer les entreprises de services publics, et fournir des financements explicites afin d'améliorer le réseau de distribution électrique : en effet, les exploitants de parcs sont souvent incapables d'absorber les coûts d'investissement d'infrastructure supplémentaires. Par exemple, la Californie demande à ses fournisseurs de services publics d'entreprendre les améliorations nécessaires du réseau en ce qui concerne les activités d'électrification liées au transport, y compris la recharge de véhicules.<sup>198</sup> Par conséquent, les services publics offrent les améliorations d'infrastructure sans engendrer de frais supplémentaires pour les exploitants.<sup>199</sup>

### Partenariats privé-public

L'établissement de partenariats public-privé avec des constructeurs de camions et des entreprises logistiques, à l'instar du projet *Volvo LIGHTS* en Californie, peut contribuer à surmonter les contraintes liées aux financements initiaux, à faciliter le flux des connaissances entre les différents acteurs, et à faire avancer les approches systématiques pour électrifier les réseaux de chaînes d'approvisionnement intégrées.<sup>200</sup>

La France pourrait envisager de mettre en place un ou plusieurs partenariats public-privé avec des fabricants automobiles et des entreprises de services public en se concentrant particulièrement sur les infrastructures publiques de charge à haute puissance (HPCCV) pour les opérations régionales et longues distances le long des réseaux routiers très fréquentés. Le financement public national pourrait être combiné aux financements de l'UE par le biais du Connecting Europe Facility (CEF) et d'autres instruments de financements européens tels que Horizon Europe et InvestEU.<sup>201</sup>

### Systèmes de route électrique

En ce qui concerne les systèmes de route électrique (ERS), l'engagement pris par la France d'intensifier la coordination avec les États membres partageant la même vision qu'elle, comme l'Allemagne ou la Suède, est particulièrement bienvenu.<sup>202</sup> Il nécessite désormais des actions politiques concrètes ainsi qu'une collaboration plus étroite entre l'UE et ses États membres. Actuellement, le plus gros obstacle au déploiement des ERS concerne le manque d'harmonisation technologique. Par ailleurs, il faudrait analyser plus en profondeur les différences de coût entre les systèmes de chargement par caténaires suspendues, par conduction ou par induction. Il est de l'intérêt de tous les États membres concernés de garantir une compréhension mutuelle des étapes nécessaires en vue de l'harmonisation, afin d'assurer l'interopérabilité au-delà des frontières et une perspective de réussite à long terme pour la technologie. La France, aux côtés de l'Allemagne et de la Suède, les deux États membres les plus engagés dans cette voie, doivent sélectionner la technologie la plus compétitive et la plus éprouvée, et l'établir comme nouvelle norme européenne communément admise.

Une fois cette décision prise, les États membres concernés devront établir un mécanisme de coordination de concert avec les acteurs de l'industrie, afin pousser plus loin les développements technologiques et d'intensifier leur mise en œuvre au sein du réseau de transport transeuropéen central avec l'objectif de 2030 en vue. Comme première étape concrète, la France devrait bientôt initier un projet plus important d'essai de terrain transfrontalier avec l'Allemagne afin de tester les effets potentiels sur le réseau électrique et les

flux de circulation transfrontaliers. Cette étape aiderait aussi à dissiper les inquiétudes au sujet de l'interopérabilité de la technologie à l'échelle de l'UE.

### **Révision de la directive sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs**

La révision de la directive sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs (AFID) prévue pour le début 2021 devrait se concentrer uniquement sur les technologies zéro émission.<sup>203</sup> Les objectifs actuels en matière d'infrastructure pour le GNC et le GNL devraient être éliminés d'ici 2025.

En commençant par les 88 nœuds urbains du RTE-T, les objectifs nationaux contraignants pour l'électrification des centres de distribution et des plateformes logistiques devraient être introduits pour 2025 et 2030. Pour accélérer l'adoption par le marché de camions de livraison régionale, la révision doit également établir des objectifs obligatoires pour l'installation de stations publiques de chargement à haute puissance (HPCCV) dans l'ensemble de 88 nœuds urbains d'ici 2025, ainsi que dans les autres nœuds principaux et le réseau central vers la fin de la décennie. Il faut également imposer aux États membres de déployer et d'améliorer les infrastructures de réseau électrique le long du réseau central afin de connecter les stations de recharge en mégawatts pour les camions longues distances à batterie électrique. Les ERS doivent devenir une technologie reconnue dans la directive AFID révisée pour permettre aux États membres de l'utiliser, afin d'atteindre leurs objectifs en ce qui concerne le réseau central du RTE-T.

En ce qui concerne la mise en place d'infrastructures de recharge d'hydrogène pour les camions, des objectifs peuvent être établis pour les plus grands ports maritimes européens afin de tirer profit des effets de synergie avec le futur rôle de ce carburant dans le transport maritime et d'exploiter son avantageuse rentabilité pour économiser sur les importants coûts de distribution.

## **7.5. Fourniture de camions zéro émissions**

### **Fin des ventes nationales de camions à moteur à combustion interne d'ici 2035 et 2040**

La France doit interdire les ventes d'ICEV avec un PTAC inférieur à 26 t d'ici 2035 et supérieur à 26 t d'ici 2040. Daimler, le plus gros fabricant de camions du monde, a déjà annoncé son intention de mettre fin au développement des ICEV et a avancé que, à partir de 2039, tous les camions vendus sur les marchés de la Triade en Europe, au Japon et en Amérique du Nord seront des ZEV, c.-à-d. soit à batterie électrique soit à l'hydrogène.<sup>204</sup> La Commission nationale de l'infrastructure britannique a appelé à une interdiction des PL neufs alimentés au diesel d'ici 2040.<sup>205</sup>

Pour cela, il faut que l'UE adopte des mesures législatives permettant aux États membres de mettre en œuvre cette interdiction avec l'approbation de l'Union et conformément aux règles internes du marché.<sup>206</sup> L'alternative consisterait à interdire les nouvelles immatriculations directement au niveau de l'UE dans le cadre de la révision à venir des normes de CO<sub>2</sub> pour les PL (voir ci-dessous).

### **Normes en matière de CO<sub>2</sub> pour les PL**

L'UE a récemment adopté ses toutes premières normes de performance en matière d'émissions de CO<sub>2</sub> pour les camions. D'ici fin 2022, la Commission doit évaluer l'efficacité de cette réglementation en examinant le mécanisme d'incitation en faveur des ZLEV, l'extension aux types de véhicules actuellement non réglementés (y compris les caravanes et les bus) ainsi que les objectifs de réduction de 2030 et de potentiels nouveaux objectifs au-delà de cette date. Cette révision doit également prendre en compte les engagements de l'UE dans le cadre de l'accord de Paris.

Il a été démontré que la demande de camions zéro émission s'accroît rapidement, mais que les fabricants ont du mal à atteindre le volume de production nécessaire au marché pour les prochaines années. Pour combler cet écart, la France devrait défendre une révision ambitieuse pour 2022 au niveau de l'UE, envoyant ainsi un fort signal de marché aux fabricants dans le but d'accroître la production et les ventes de ZEV. Cette révision devrait couvrir plusieurs sujets :

- L'objectif moyen de réduction de flotte pour 2030 doit être considérablement augmenté par rapport aux 30 % actuels. Il a été prouvé que le potentiel d'augmentation du rendement énergétique des ICEV de façon rentable est plus élevé que l'objectif actuel (voir section 3.1.1). Plus important encore : une part notable de l'objectif de réduction de la flotte de 2030 sera atteinte grâce au déploiement croissant des ZLEV, une tendance qui continuera de s'intensifier dans les années à venir. Par conséquent, un objectif révisé pour 2030 ne nécessiterait pas d'améliorations d'économie de carburant dans la même mesure, mais serait atteint grâce à la combinaison d'un meilleur rendement énergétique et d'un déploiement accéléré des ZLEV.
- Les normes et le VECTO doivent être étendus pour couvrir les types de véhicules (caravanes et bus) et groupes de véhicules (autres que 4, 5, 9 et 10) actuellement non réglementés dans la plupart des cas, compte tenu du délai donné.
- Le mécanisme d'incitation des ZLEV doit être remplacé par un mandat de ventes obligatoire pour 2025 et 2030, ce qui obligerait les fabricants à vendre une certaine part de ZEV dans le total de leurs ventes de flotte. Cette part pourrait varier selon la catégorie des véhicules et la catégorie de poids. La Californie a proposé une réglementation de ce type, qui introduirait des objectifs obligatoires de ventes à partir de 2024 et permettrait d'atteindre une part de 40 % de ventes à zéro émission pour les tracteurs de classe 7 et 8 (PTAC supérieur à 12 t) d'ici 2030.<sup>207</sup>
- La révision doit également envisager la mise en place d'une élimination des ventes à l'échelle de l'UE pour les ICEV d'ici 2035 (inférieurs à 26 t) afin d'assurer une clarté légale en termes d'approbation de l'UE et de réglementation des marchés internes, tout en envoyant un fort signal selon lequel la transition de chaîne de traction est inévitable.

### Directive sur les poids et dimensions

Puisqu'elle n'est pas applicable directement, l'autorisation maximale de poids de deux tonnes supplémentaires pour les ZEV, qui a été introduite dans les normes de CO<sub>2</sub> au titre de modification de la directive, doit être transposée en droit français. Cela doit se faire le plus vite possible afin de compenser le poids actuellement toujours un peu plus élevé des véhicules à batterie électrique et à l'hydrogène comparés aux ICEV. La nouvelle disposition peut être insérée dans l'article R312-4 du Code de la route.<sup>208</sup>

## 7.6. Fret urbain zéro émission

En matière de pollution de l'air, les PL sont responsables d'importantes émissions polluantes dans les zones urbaines. D'après les données les plus récentes, 22 % du NOx et 5 % de PM2.5 des émissions du transport routier dans la zone du Grand Paris sont attribuables aux camions.<sup>209</sup> La France a établi un système d'étiquetage par autocollant (Crit'Air) pour les zones urbaines afin de permettre aux villes d'imposer des restrictions de circulation aux véhicules polluants.<sup>210</sup> Malgré les multiples preuves que les camions au gaz ne présentent pas plus d'avantages sur la qualité de l'air que les véhicules diesel (voir section 3.1.5), ils reçoivent le certificat Crit'Air 1, ce qui correspond à la catégorie la moins polluante après les ZEV.<sup>211</sup> Cette classification doit changer le plus vite possible compte tenu des mauvaises performances en matière d'émissions des camions au gaz en conditions de conduite réelles.

Dans ce contexte, la mise en œuvre d'une stratégie de logistique zéro émission en ville pourrait être avantageuse. Les grandes villes françaises devraient aussi envisager d'introduire des zones zéro émission pour les véhicules commerciaux (c.-à-d. les VUL et les camions) en vue d'atteindre les objectifs de 2025, tout en prenant des dispositions transitoires jusqu'en 2030 pour les véhicules déjà immatriculés. L'engagement du gouvernement néerlandais d'atteindre une logistique urbaine à zéro émission d'ici 2025 en collaboration avec les gouvernements locaux, les entreprises et les instituts de recherche peut servir de feuille de route dans ce contexte.<sup>212</sup>

## Annexe I : Hypothèses sur les efficacités de conversion

Chaîne de traction et véhicules	Étape du processus	Taux d'efficacité <sup>xxvi</sup>		Source
		2020	2050	
<b>Électrification directe</b> <b>BEV et OC-BEV</b>	Transport et distribution d'électricité	94 %	95 %	Banque mondiale (2014). Electric power transmission and distribution losses for the European Union. Extrait de <a href="https://data.worldbank.org/indicator/E.G.ELC.LOSS.ZS?l&amp;locations=EU">https://data.worldbank.org/indicator/E.G.ELC.LOSS.ZS?l&amp;locations=EU</a>
	Équipement de recharge	95 %	95 %	Apostolaki-Iosifidou et al. (2017), Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging, Energy, 127, page 737. Extrait de <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217303730">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217303730</a>
	Efficacité de recharge de la batterie	95 %	99 %	Peters et al. (2017). The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 67. Pages 494-495. Extrait de <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116304713">https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116304713</a>
	Inversion DC/AC	95 %	95 %	Larmanie et al. (2012). Electric vehicle technology explained. 2nd edition. Wiley. West Sussex/UK. Pages 4-6.
	Rendement du moteur	95 %	95 %	Larmanie et al. (2012).
<b>Hydrogène compressé</b> <b>FCEV</b>	Électrolyse <sup>xxvii</sup>	76 %	85 %	Wachsmuth et al. (2019). Roadmap Gas für die Energiewende – Nachhaltiger Klimabeitrag des Gassektors. Extrait de <a href="https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-15_cc_12-2019_roadmap-gas_2.pdf">https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-15_cc_12-2019_roadmap-gas_2.pdf</a> , pages 82 and 176.

<sup>xxvi</sup> Les taux d'efficacité mentionnés font référence aux semi-remorques longue distance. Pour les PL de catégories de poids inférieures, les taux restent largement les mêmes, à part un rendement thermique de freinage légèrement plus bas en moyenne pour les ICEV.

<sup>xxvii</sup> Les taux ci-dessus reflètent les valeurs de la documentation citée pour l'électrolyse à haute température. Il convient de noter que les estimations ci-dessus appartiennent à un scénario optimiste et élevé, et qu'elles reflètent un potentiel technique maximal de la technologie de cellules à oxydes solides à haute température.

	Transport, stockage et distribution y compris compression <sup>xxviii</sup>	89 %	89 %	Wachsmuth et al. (2019).
	Conversion d'H <sub>2</sub> en électricité	54 %	61 %	Conseil national de recherches (2013). Transitions to Alternative Vehicles and Fuels, The National Academies Press, Washington, DC/US, page 33. Extrait de <a href="https://www.nap.edu/catalog/18264/transitions-to-alternative-vehicles-and-fuels">https://www.nap.edu/catalog/18264/transitions-to-alternative-vehicles-and-fuels</a>
	Inversion DC/AC	95 %	95 %	Larmanie et al. (2012).
	Rendement du moteur	95 %	95 %	Larmanie et al. (2012).
<b>Référence au diesel fossile et power-to-liquid</b>  <b>ICEV_diesel et ICEV_PtL</b>	Électrolyse	76 %	85 %	Wachsmuth et al. (2019).
	Captage direct par l'air du CO <sub>2</sub> et synthèse de Fischer-Tropsch <sup>xxix</sup>	65 %	67 %	Heinemann et al. (2018). Die Bedeutung strombasierter Stoffe für den Klimaschutz in Deutschland. Extrait de <a href="https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/PtX-Hintergrundpapier.pdf">https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/PtX-Hintergrundpapier.pdf</a> , page 22.
	Rendement du moteur <sup>xxx</sup>	42 %	48 %	Delgado et al. (2017). Fuel efficiency technology in European heavy-duty vehicles: Baseline and potential for the 2020-2030 timeframe. Extrait de <a href="https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential_ICCT-white-paper_14072017_vF.pdf">https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential_ICCT-white-paper_14072017_vF.pdf</a> , page 2 and 12.
<b>power-to-methane liquéfié</b>	Électrolyse	76 %	85 %	Wachsmuth et al. (2019).
	Captage direct par	71 %	74 %	Wachsmuth et al. (2019).

<sup>xxviii</sup> Il s'agit du stockage intégré d'hydrogène compressé. Le carburant peut également être liquéfié et stocké à bord afin de réduire le volume. Cependant, cela entraînerait une hausse des coûts de stockage et une consommation supplémentaire d'énergie due aux pertes d'évaporation. Indépendamment de ces éléments, si l'hydrogène est importé depuis l'extérieur de l'Europe, il doit être liquéfié pour être transporté (pétrolier) et distribué (remorques porte-tubes haute pression).

<sup>xxix</sup> La documentation étudiée mentionne que 80 à 100 % de la demande de chaleur requise pour le DAC peuvent être fournis par l'excès de chaleur de la synthèse de Fischer-Tropsch. On suppose donc qu'aucun processus thermique supplémentaire ne sera nécessaire. La méthode de DAC choisie est l'adsorption à température alternée, également appelée DAC à basse température.

<sup>xxx</sup> Les valeurs indiquent le rendement thermique de freinage moyen sur la base d'un rendement thermique maximal de freinage de 45 % (2020) et de 51 % (2050).

ICEV_PtM <sup>xxx</sup>	l'air du CO <sub>2</sub> et méthanisation			
	Transport, stockage et distribution y compris liquéfaction	93 %	93 %	Wachsmuth et al. (2019).
	Rendement du moteur	42 %	48 %	Delgado et al. (2017).

## Annexe II : Hypothèses de coûts

### Coûts de véhicule

Coûts de véhicule (hors valeur résiduelle et TVA)						
Solution		2020	2025	2030	2040	2050
ICEV_diesel	Prix de détail	105 493 €	110 337 €	115 261 €	115 261 €	115 261 €
	Entretien et réparations	17 904 €/an	18 084 €/an	18 084 €/an	18 084 €/an	18 084 €/an
	Taxes sur les véhicules	610 €/an				
BEV	Prix de détail	319 818 €	241 403 €	171 174 €	171 174 €	171 174 €
	Entretien et réparations	12 600 €/an				
	Taxes sur les véhicules	573 €/an				
OC-BEV	Prix de détail	199 551 €	160 947 €	126 284 €	126 284 €	126 284 €
	Entretien et réparations	12 840 €/an				
	Taxes sur les véhicules	573 €/an				
FCEV	Prix de détail	182 179 €	152 966 €	131 050 €	131 050 €	131 050 €

<sup>xxx</sup> La présente étude suppose un rendement similaire pour la technologie bi-carburant CI HPDI pour les ICEV\_PtM à celui du diesel.

	Entretien et réparations	23 100 €/an	16 440 €/an	16 440 €/an	16 440 €/an	16 440 €/an
	Taxes sur les véhicules	573 €/an				
ICEV_PtL	Prix de détail	105 493 €	110 337 €	115 261 €	115 261 €	115 261 €
	Entretien et réparations	17 904 €/an	18 084 €/an	18 084 €/an	18 084 €/an	18 084 €/an
	Taxes sur les véhicules	610 €/an				
ICEV_PtM	Prix de détail	128 912 €	122 629 €	115 261 €	115 261 €	115 261 €
	Entretien et réparations	19 212 €/an	17 892 €/an	17 892 €/an	17 892 €/an	17 892 €/an
	Taxes sur les véhicules	573 €/an				

**Notes :** Prix nominaux pour 2015. Tous les coûts restent constants pour 2040 et 2050 puisqu'il n'est pas possible de formuler d'hypothèse raisonnable au-delà de 2030. Les prix de détail incluent les coûts de fabrication dus au châssis, à la chaîne de traction conventionnelle, au moteur électrique, au système de pile à combustible, à la batterie, au pantographe et système de réservoir à carburant et sont multipliés par un facteur de majoration de 1,4 pour déterminer le prix de détail net. L'entretien et les réparations incluent les coûts dus aux révisions générales, aux solutions d'urée pour le système de post-traitement des gaz d'échappement et le pantographe. Les taxes sur les véhicules incluent la taxe d'immatriculation, charges parafiscales supplémentaires et une taxe spéciale pour certains types de véhicules motorisés. Le prix de détail des BEV inclut les coûts d'opportunité dus au poids supplémentaire de batterie jusqu'en 2030. Les coûts de financement sont exclus.

**Sources :** Kühnel et al. (2018), Meszler et al. (2018), BloombergNEF (2019), Element Energy (2019), ACEA (2019).

## Coûts de batterie

	2020	2025	2030	2040	2050
Coût net par kWh	135 €	95 €	56 €	56 €	56 €
Prix de détail par kWh	188 €	133 €	78 €	78 €	78 €
Densité énergétique du bloc-batterie	183 Wh/kg	245 Wh/kg	318 Wh/kg	478 Wh/kg	508 Wh/kg

**Notes :** Prix nominaux pour 2019. Les coûts restent constants au-delà de 2030. Le prix de détail inclut le même facteur de majoration de 1,4 que pour les coûts de véhicule afin de déterminer le prix de détail net

après coûts de fabrication et de distribution. Les valeurs de densité du bloc-batterie sont les hypothèses basses fondées sur le potentiel d'amélioration future.

**Sources :** BloombergNEF (2019), Kühnel et al. (2018), Ricardo Energy & Environment (2019).

## Consommation de carburant

Solution PL (PTAC de 40/44 t)	En kWh/km					En litre <sup>diesel</sup> /100 km				
	2020	2025	2030	2040	2050	2020	2025	2030	2040	2050
ICEV_diesel	3,29	2,82	2,34	2,34	2,34	33,06	28,27	23,47	23,47	23,47
BEV (de la batterie à la roue)	1,43	1,36	1,29	1,29	1,29	14,36	13,65	12,95	12,95	12,95
BEV (pertes du réseau)	1,57	1,50	1,42	1,42	1,42	15,80	15,03	14,26	14,26	14,26
OC-BEV (de la batterie à la roue)	1,53	1,45	1,38	1,38	1,38	15,33	14,59	13,85	13,85	13,85
OC-BEV (pertes du réseau)	1,68	1,59	1,51	1,51	1,51	16,83	16,00	15,16	15,16	15,16
FCEV	2,51	2,30	2,09	2,09	2,09	25,20	23,09	20,98	20,98	20,98
ICEV_PtL	3,29	2,82	2,34	2,34	2,34	33,06	28,27	23,47	23,47	23,47
ICEV_PtM	3,29	2,82	2,34	2,34	2,34	33,06	28,27	23,47	23,47	23,47

**Notes :** Les valeurs décrivent la consommation énergétique finale du véhicule. Les valeurs au-delà de 2030 restent constantes. Les valeurs tiennent compte de l'amélioration du rendement énergétique des ICEV de 29 % d'ici 2030. Pour les OC-BEV, les valeurs ci-dessus représentent la consommation énergétique lorsque le véhicule est alimenté par les lignes suspendues ; lorsqu'il est alimenté par batterie, les valeurs des BEV s'appliquent.

**Sources :** Calculs de l'auteur, Kühnel et al. (2018), Delgado et al. (2017), Moultaq et al. (2017).

## Coûts de carburant

Scénario mer du Nord					
Solution	Centimes d'euros/kWh				
	2020	2025	2030	2040	2050

<b>Référence au diesel fossile</b>	Total <sup>xxxii</sup>	6,36	6,36	6,95	7,65	8,34
	Total y compris taxes et cotisations <sup>xxxiii</sup>	10,74	10,74	11,34	12,03	12,72
<b>Électricité</b>	LCOE	9,22	7,80	7,23	6,14	5,11
	Transport vers la FR	Aucun coût supplémentaire				
	Distribution en FR	4,40	4,40	4,40	4,40	4,20
	Total	13,62	12,20	11,63	10,54	9,51
	Total y compris taxes et cotisations	17,25	15,83	15,26	14,17	13,14
	À un taux de CSPE réduit	15,05	13,63	13,06	11,97	10,94
<b>Hydrogène</b>	Production	14,81	12,60	11,49	9,48	7,72
	Liquéfaction	6,10	5,65	5,20	4,70	4,10
	Transport vers la FR	Aucun coût supplémentaire				
	Distribution en FR	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40
	Total	23,31	20,65	19,09	16,58	14,22
	Total y compris taxes et cotisations <sup>xxxiv</sup>	23,31	20,65	19,09	16,58	14,22
<b>Power-to-liquid</b>	Production	26,11	23,07	20,62	17,76	15,25
	Liquéfaction	-				
	Transport vers la FR	Aucun coût supplémentaire				
	Distribution en FR	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Total	27,11	24,07	21,62	18,76	16,25
	Total y compris taxes et	31,50	28,46	26,00	23,15	20,64

<sup>xxxii</sup> Prix du diesel en février 2020.

<sup>xxxiii</sup> Les valeurs incluent la remise sur le carburant diesel.

<sup>xxxiv</sup> Il n'existe actuellement pas de droit d'accise sur l'hydrogène.

	cotisations <sup>xxxv</sup>					
<b>Power-to-methane</b>	Production	25,82	22,73	20,33	17,44	15,52
	Liquéfaction	0,69	0,68	0,67	0,64	0,61
	Transport vers la FR	Aucun coût supplémentaire				
	Distribution en FR	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
	Total	27,61	24,51	22,10	19,18	17,23
	Total y compris taxes et cotisations	28,13	25,03	22,62	19,70	17,75

**Notes :** Prix nominaux pour 2017 à l'exclusion de la TVA. Production d'énergie renouvelable du vent de terre dans la mer du Nord selon le scénario de référence du calculateur Agora PtG/PtL. Le LCOE inclut les frais de raccordement au réseau. Les coûts de distribution du réseau électrique en FR se réfèrent au TURPE. Le LCOE, l'électrolyse SOEC à haute température, la synthèse de Fischer-Tropsch et le procédé de Sabatier sont basés sur 4 000 heures à pleine charge. Les coûts de diesel fossile pour 2020 et 2025 sont basés sur les prix du marché de février 2020 en France et les projections pour les années suivantes du scénario de référence du calculateur Agora PtG/PtL. Les taxes et cotisations font référence à la TICPE, à la TICGN, aux coûts de commercialisation, à la CSPE, à la TCFE et à la CTA. Pour l'hydrogène, l'exemption de taxe actuelle est maintenue, ainsi que le droit d'accise extrêmement réduit sur le méthane utilisé comme carburant.

**Sources :** Calculs de l'auteur, Frontier Economics (2018), Kühnel et al. (2018), Mottschall et al. (2019), Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020), Observatoire de l'industrie électrique (2019), Energie-Info (2020), Commission européenne (2011), Weekly Oil Bulletin (2020).

<b>Scénario Afrique du Nord</b>						
<b>Solution</b>		<b>Centimes d'euros/kWh</b>				
		<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
<b>Référence au diesel fossile</b>	Total <sup>xxxvi</sup>	6,36	6,36	6,95	7,65	8,34
	Total y compris taxes et cotisations <sup>xxxvii</sup>	10,74	10,74	11,34	12,03	12,72

<sup>xxxv</sup> Les valeurs incluent la remise sur le carburant diesel.

<sup>xxxvi</sup> Prix du diesel en février 2020.

<sup>xxxvii</sup> Les valeurs incluent la remise sur le carburant diesel.

<b>Électricité</b>	LCOE <sup>xxxviii</sup>	9,22	7,80	7,23	6,14	5,11
	Transport vers la FR	Aucun coût supplémentaire				
	Distribution en FR	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40
	Total	13,62	12,20	11,63	10,54	9,51
	Total y compris taxes et cotisations	17,25	15,83	15,26	14,17	13,14
	À un taux de CSPE réduit	15,05	13,63	13,06	11,97	10,94
<b>Hydrogène</b>	Production	10,16	9,08	8,18	6,65	5,49
	Liquéfaction	6,10	5,65	5,20	4,70	4,10
	Transport vers la FR	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
	Distribution en FR	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40
	Total	19,07	17,54	16,19	14,16	12,40
	Total y compris taxes et cotisations <sup>xxxix</sup>	19,07	17,54	16,19	14,16	12,40
<b>Power-to-liquid</b>	Production	19,89	18,35	16,18	13,97	12,28
	Liquéfaction	-				
	Transport vers la FR	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Distribution en FR	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Total	20,89	19,36	17,18	14,97	13,28
	Total y compris taxes et cotisations <sup>xl</sup>	25,28	23,75	21,57	19,36	17,67
<b>Power-to-</b>	Production	19,93	18,30	16,18	13,91	12,78

<sup>xxxviii</sup> Dans le scénario de l'Afrique du Nord les coûts de l'électricité pour la solution de l'électricité sont les mêmes que pour le scénario de la mer du Nord.

<sup>xxxix</sup> Il n'existe actuellement pas de droit d'accise sur l'hydrogène.

<sup>xl</sup> Les valeurs incluent la remise sur le carburant diesel.

<b>methane</b>	Liquéfaction	0,69	0,68	0,67	0,64	0,61
	Transport vers la FR	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	Distribution en FR	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
	Total	21,74	20,10	17,97	15,67	14,51
	Total y compris taxes et cotisations	22,27	20,62	18,50	16,20	15,04

**Notes :** Prix nominaux pour 2017 à l'exclusion de la TVA. Production d'électricité renouvelable du vent de terre de la mer du Nord et de panneaux solaires photovoltaïques en Afrique du Nord pour les électrocarburants synthétiques selon le scénario de référence du calculateur Agora PtG/PtL. Le LCOE inclut les frais de raccordement au réseau. Les coûts de distribution du réseau électrique en FR se réfèrent au TURPE. Le LCOE et l'électrolyse SOEC à haute température sont basés sur 2 344 heures à pleine charge, la synthèse de Fischer-Tropsch et le procédé de Sabatier sont basés sur 4 000 heures à pleine charge. Les coûts de diesel fossile pour 2020 et 2025 sont basés sur les prix du marché de février 2020 en France et les projections pour les années suivantes du scénario de référence du calculateur Agora PtG/PtL. Les taxes et cotisations font référence à la TICPE, à la TICGN, aux coûts de commercialisation, à la CSPE, à la TCFE et à la CTA. Pour l'hydrogène, l'exemption de taxe actuelle est maintenue, ainsi que le droit d'accise extrêmement réduit sur le méthane utilisé comme carburant.

**Sources :** Calculs de l'auteur, Frontier Economics (2018), Kühnel et al. (2018), Mottschall et al. (2019), Pfennig et al. (2017), Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020), Observatoire de l'industrie électrique (2019), Energie-Info (2020), Weekly Oil Bulletin (2020).

## Coûts d'infrastructure

<b>Infrastructure de recharge pour les BEV</b>		
<b>Caractéristiques d'un mega-chargeur (1,2 MW)</b>	Nombre de chargeurs par véhicule	0,0075
	Temps de charge	30 minutes pour une autonomie de 400 km
	Véhicules fournis par jour	20
	Durée de vie	15 ans
	Dépenses en capital	420 000 €
	Dépenses opérationnelles par an	4 200 €/an
<b>Caractéristiques d'un chargeur</b>	Nombre de chargeurs par	1,1

<b>de nuit (150 kW)</b>	véhicule	
	Temps de charge	8 heures pour une autonomie de 800 km
	Véhicules fournis par jour	0,91
	Durée de vie	15 ans
	Dépenses en capital	80 000 €
	Dépenses opérationnelles par an	800 €/an
<b>Coûts d'infrastructure total par véhicule et par an</b>	Pleine utilisation	6 988 €/an
	Utilisation à moitié	13 976 €/an

<b>Infrastructure de recharge pour les OC-BEV</b>		
<b>Caractéristiques d'un système de caténaires suspendues</b>	Tension système	1 500 V <sub>DC</sub>
	Consommation électrique maximale par véhicule pour traction et recharge de batterie	240 kW
	Vitesse moyenne du véhicule	80 km/h
	Puissance installée permanente par direction	2 MW/km
	Puissance de sous-station installée permanente	4 MW/km
	Nombre de véhicules fournis par direction (à 240 kW)	8 véhicules/km
	Nombre de véhicules fournis par direction en capacité de surcharge (pour jusqu' à 2 h à 240 kW)	12 véhicules/km
	Intervalle de temps possible entre les véhicules	5,40 secondes
	Intervalle de temps possible en capacité de surcharge	4,05 secondes
	Durée de vie	20 ans

	Dépenses en capital par km (dans les deux directions)	3,05 millions €
	Dépenses en capital par MW (dans les deux directions)	762 500 €
	Dépenses opérationnelles par an	61 000 €/an
<b>Coûts d'infrastructure total par véhicule et par an</b>	Pleine utilisation	5 338 €/an
	Utilisation à moitié	10 675 €/an

<b>Infrastructure de ravitaillement pour les FCEV</b>		
<b>Caractéristiques d'une station de ravitaillement à l'hydrogène</b>	Capacité de ravitaillement totale	5 468 kg <sub>H2</sub>
	Quantité moyenne de ravitaillement par véhicule	33 kg <sub>H2</sub>
	Véhicules fournis par jour	110
	Durée de vie	15 ans
	Dépenses en capital	6,3 millions €
	Dépenses opérationnelles par an	63 000 €/an
<b>Coûts d'infrastructure total par véhicule et par an</b>	Pleine utilisation	€4 391 €/an
	Utilisation à moitié	8 782 €/an

<b>Infrastructure de ravitaillement pour les ICEVs_PtM</b>		
<b>Caractéristiques d'une station de ravitaillement au GNL</b>	Capacité de ravitaillement totale	17 000 kg <sub>GNL</sub>
	Quantité moyenne de ravitaillement par véhicule	103 kg <sub>GNL</sub>
	Véhicules fournis par jour	83
	Durée de vie	15 ans

	Dépenses en capital	1 034 millions €
	Dépenses opérationnelles par an	27 080 €/an
<b>Coûts d'infrastructure total par véhicule et par an</b>	Pleine utilisation	1 157 €/an
	Utilisation à moitié	2 314 €/an

**Notes :** Prix nominaux pour 2015. Les coûts d'infrastructure restent constant selon les années. Les ICEV\_diesel et les ICEV\_PtL peuvent utiliser les infrastructures de ravitaillement déjà établies. Par souci de simplicité, on estime que les coûts d'investissement de ces stations essence sont déjà absorbés, et que l'infrastructure n'a pas besoin d'être remplacée à la fin de sa vie opérationnelle.

**Sources :** Calculs de l'auteur, Kühnel et al. (2018).

# Références

- <sup>1</sup> Citepa (2019). Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2017. Extrait de [https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/secten/Citepa\\_Secten-2019\\_Rapport\\_Completv3.pdf](https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/secten/Citepa_Secten-2019_Rapport_Completv3.pdf), page 106.
- <sup>2</sup> Citepa (2019). Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2017. Émissions par secteur. Extrait de [https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/secten/Citepa\\_Secten-2019\\_25\\_Transports.pdf](https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/secten/Citepa_Secten-2019_25_Transports.pdf), plusieurs pages.
- <sup>3</sup> European Union (2018). Regulation (EU) 2018/842 of the European Parliament and of the Council. Extrait de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0842&from=EN>, page 39.
- <sup>4</sup> Ministère de la Transition écologique et solidaire (2019). Suivi de la Stratégie Nationale Bas-Carbone. Extrait de <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/suivi-strategie-nationale-bas-carbone>
- <sup>5</sup> Legifrance (2019). LOI n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat (1). Extrait de <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000039355955&dateTexte=&categorieLien=id>, Article 1, 2° a).
- <sup>6</sup> Legifrance (2019). LOI n° 2019-1428 du 24 décembre 2019 d'orientation des mobilités (1). Extrait de [https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=64DC2337D43E6F6969EC2BF22AF7A322.tplgfr41s\\_2?cidTexte=JORFTEXT000039666574&categorieLien=id](https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=64DC2337D43E6F6969EC2BF22AF7A322.tplgfr41s_2?cidTexte=JORFTEXT000039666574&categorieLien=id), Article 73, 1°.
- <sup>7</sup> Service des données et études statistiques (2019). Données sur le parc des véhicules au 1er janvier 2019. Extrait de <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-sur-le-parc-des-vehicules-au-1er-janvier-2019>
- <sup>8</sup> Eurostat (2017). 'Lorries, by type of motor energy' et 'Road tractors by type of motor energy'. Extrait de <https://ec.europa.eu/eurostat/web/transport/data/database>
- <sup>9</sup> Commissariat général au développement durable (2019). Chiffres clés du transport. Édition 2019. Extrait de <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-04/datalab-52-chiffres-cles-du-transport-avril2019.pdf>, page 34.
- <sup>10</sup> Transport & Environment (2017). Roadmap to climate-friendly land freight and buses in Europe. Extrait de [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Full\\_%20Roadmap%20freight%20buses%20Europe\\_2050\\_FINAL%20VERSION\\_corrected%20%282%29.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Full_%20Roadmap%20freight%20buses%20Europe_2050_FINAL%20VERSION_corrected%20%282%29.pdf)
- <sup>11</sup> Transport & Environment (2017). Electric trucks' contribution to freight decarbonisation. Extrait de [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2017\\_09\\_Update\\_Norway\\_study\\_final.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2017_09_Update_Norway_study_final.pdf)
- <sup>12</sup> Earl et al. (2018). Analysis of long haul battery electric trucks in EU. Marketplace and technology, economic, environmental, and policy perspectives. Document modifié originellement présenté au 8<sup>e</sup> Commercial Vehicle Workshop de Graz, 17-18 mai 2018. Extrait de [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/20180725\\_T%26E\\_Battery\\_Electric\\_Trucks\\_EU\\_FINAL.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/20180725_T%26E_Battery_Electric_Trucks_EU_FINAL.pdf)
- <sup>13</sup> Koning et al. (2018). Comment réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du transport de fret en France ? Evaluation socio-économique de trois politiques publiques.
- <sup>14</sup> Cambridge Econometrics (2018). Trucking into a Greener Future: the economic impact of decarbonizing goods vehicles in Europe. Extrait de <https://www.camecon.com/wp-content/uploads/2018/09/Trucking-into-a-green-future-Technical-Report.pdf>
- <sup>15</sup> Schmidt et al. (2019). Future fuel for road freight. Techno-economic & environmental performance comparison of GHG-neutral fuels & drivetrains for heavy-duty trucks. An expertise for Fondation Tuck in the context of 'The Future of Energy' call for proposals 2018. Extrait de [http://www.fondation-tuck.fr/upload/docs/application/pdf/2019-03/future-fuel-road-freight-report\\_lbst-hinico\\_2019-02-19.pdf](http://www.fondation-tuck.fr/upload/docs/application/pdf/2019-03/future-fuel-road-freight-report_lbst-hinico_2019-02-19.pdf)
- <sup>16</sup> Mottschall et al. (2019). Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Extrait de [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-19\\_texte\\_114-2019\\_energieversorgung-verkehr.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-19_texte_114-2019_energieversorgung-verkehr.pdf)
- <sup>17</sup> Kühnel et al. (2018). Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Ein Technologie- und Wirtschaftsvergleich. Extrait de <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf>

- <sup>18</sup> Briand et al. (2020). Trajectoires de décarbonation profonde du transport de marchandises en France. Extrait de [https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Rapport/202003-rapport%20fret%20FR\\_0.pdf](https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Rapport/202003-rapport%20fret%20FR_0.pdf)
- <sup>19</sup> Legifrance (2019). LOI n° 2019-1428 du 24 décembre 2019 d'orientation des mobilités (1). Extrait de [https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=64DC2337D43E6F6969EC2BF22AF7A322.tplgfr41s\\_2?cidTexte=JORFTEXT000039666574&categorieLien=id](https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=64DC2337D43E6F6969EC2BF22AF7A322.tplgfr41s_2?cidTexte=JORFTEXT000039666574&categorieLien=id), Article 73, 4°.
- <sup>20</sup> Legifrance (2019). LOI n° 2019-1479 du 28 décembre 2019 de finances pour 2020 (1). Extrait de <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000039683923&dateTexte=&categorieLien=id>, Article 71, I.
- <sup>21</sup> Direction générale des douanes et droits indirects (2020). Demander le remboursement partiel de la TICPE : entreprise de transport de marchandises établie en France. Extrait de <https://www.douane.gouv.fr/demarche/demander-le-remboursement-partiel-de-la-ticpe-entreprise-de-transport-de-marchandises-0>
- <sup>22</sup> Le Figaro (2019). Transport routier de marchandises : réduction de l'avantage fiscal sur le gasoil de 2 centimes par litre. Extrait de <https://www.lefigaro.fr/flash-eco/transport-routier-de-marchandises-reduction-de-l-avantage-fiscal-sur-le-gasoil-de-2-centimes-par-litre-20190710>
- <sup>23</sup> Agence de financement des infrastructures de transport de France (2020). Budget initial – 2020. Extrait de [http://www.afitf.net/IMG/pdf/bi\\_2020\\_internet.pdf](http://www.afitf.net/IMG/pdf/bi_2020_internet.pdf)
- <sup>24</sup> Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020). Fiscalité des énergies. Extrait de <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/fiscalite-des-energies>
- <sup>25</sup> European Commission (2020). Plan national intégré énergie-climat de la France. Extrait de [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/fr\\_final\\_necp\\_main\\_fr.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/fr_final_necp_main_fr.pdf), page 63 and 118.
- <sup>26</sup> European Commission (2019). Reducing CO<sub>2</sub> emissions from heavy-duty vehicles. Extrait de [https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy_en)
- <sup>27</sup> European Union (2019). Regulation (EU) 2019/1242 of the European Parliament and of the Council. Extrait de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242&from=EN>
- <sup>28</sup> European Union (2019). Regulation (EU) 2019/2144 of the European Parliament and of the Council. Extrait de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R2144&qid=1580740092487&from=EN>
- <sup>29</sup> General Secretariat of the Council (2019). Interinstitutional File: 2017/0114(COD). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 1999/62/EC on the charging of heavy goods vehicles for the use of certain infrastructures - General approach. Extrait de <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-14383-2019-INIT/en/pdf>
- <sup>30</sup> Transport & Environment (2017). Emissions modelling. Extrait de [www.transportenvironment.org/what-we-do/transport-climate-targets-and-paris-agreement/emissions-modelling](http://www.transportenvironment.org/what-we-do/transport-climate-targets-and-paris-agreement/emissions-modelling)
- <sup>31</sup> Transport & Environment (2018). Roadmap to decarbonising European aviation. Extrait de [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018\\_10\\_Aviation\\_decarbonisation\\_paper\\_final.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018_10_Aviation_decarbonisation_paper_final.pdf)
- <sup>32</sup> Transport & Environment (2018). Roadmap to decarbonising European shipping. Extrait de [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018\\_11\\_Roadmap\\_decarbonising\\_European\\_shipping.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018_11_Roadmap_decarbonising_European_shipping.pdf)
- <sup>33</sup> Emilsson et al. (2019). Lithium-Ion vehicle battery production. Status 2019 on energy use, CO<sub>2</sub> emissions, use of metals, products environmental footprint, and recycling. Extrait de <https://www.ivl.se/download/18.14d7b12e16e3c5c36271070/1574923989017/C444.pdf>, page 32.
- <sup>34</sup> Volkswagen (2019). How Volkswagen makes the ID.3 carbon neutral. Extrait de <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2019/11/how-volkswagen-makes-the-id-3-carbon-neutral.html>
- <sup>35</sup> Renault Trucks (2019). Switch to Electric. Extrait de <https://switch-to-electric.com/>
- <sup>36</sup> Wietschel et al. (2017). Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Extrait de [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2017/MKS\\_Machbarkeitsstudie\\_Hybrid-Oberleitungs\\_Lkw\\_Bericht\\_2017.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2017/MKS_Machbarkeitsstudie_Hybrid-Oberleitungs_Lkw_Bericht_2017.pdf), page 198-199.
- <sup>37</sup> Agora Energiewende and Sandbag (2020). The European Power Sector in 2019. Up-to-Date Analysis on the Electricity Transition. Extrait de [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Jahresauswertung\\_EU\\_2019/172\\_A-EW\\_EU-Annual-Report-2019\\_Web.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Jahresauswertung_EU_2019/172_A-EW_EU-Annual-Report-2019_Web.pdf), page 31
- <sup>38</sup> European Commission (2016). EU Reference Scenario 2016. Energy, transport and GHG emissions trends to 2050. Extrait de [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ref2016\\_report\\_final-web.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ref2016_report_final-web.pdf), page 161.

- <sup>39</sup> European Commission (2019). EU energy in figures. Statistical Pocketbook 2019. Extrait de <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/e0544b72-db53-11e9-9c4e-01aa75ed71a1/language-en>, page 93.
- <sup>40</sup> Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020). Stratégie française pour l'énergie et le climat. Programmation pluriannuelle de l'énergie. Extrait de <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27e%CC%81nergie.pdf>, page 159-160.
- <sup>41</sup> Rodrigue et al. (2013). The geography of transport systems, Routledge, New York/US, pages 226-228.
- <sup>42</sup> Eurostat (2017). 'Volume of freight transport relative to GDP'. Extrait de <https://ec.europa.eu/eurostat/web/transport/data/database>
- <sup>43</sup> Briand et al. (2020). Trajectoires de décarbonation profonde du transport de marchandises en France. Extrait de [https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20iddri/Rapport/202003-rapport%20fret%20FR\\_0.pdf](https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20iddri/Rapport/202003-rapport%20fret%20FR_0.pdf), page 22.
- <sup>44</sup> Direction générale de l'énergie et du climat (2020). Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat. Extrait de <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Synth%C3%A8se%20sc%C3%A9nario%20de%20r%C3%A9f%C3%A9rence%20S NBC-PPE.pdf>, page 15.
- <sup>45</sup> Muncrief (2017). Shell game? Debating real-world fuel consumption trends for heavy-duty vehicles in Europe. Extrait de <https://theicct.org/blogs/staff/debating-EU-HDV-real-world-fuel-consumption-trends>
- <sup>46</sup> Meszler et al. (2018). European heavy-duty vehicles: Cost-effectiveness of fuel-efficiency technologies for long-haul tractor-trailers in the 2025-2030 timeframe. Extrait de [https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_EU-HDV-tech-2025-30\\_20180424\\_updated.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU-HDV-tech-2025-30_20180424_updated.pdf), page 3.
- <sup>47</sup> Delgado et al. (2017). Fuel efficiency technology in European heavy-duty vehicles: Baseline and potential for the 2020-2030 timeframe. Extrait de [https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential\\_ICCT-white-paper\\_14072017\\_vF.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential_ICCT-white-paper_14072017_vF.pdf), page 3.
- <sup>48</sup> Delgado et al. (2017). Fuel efficiency technology in European heavy-duty vehicles: Baseline and potential for the 2020-2030 timeframe. Extrait de [https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential\\_ICCT-white-paper\\_14072017\\_vF.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential_ICCT-white-paper_14072017_vF.pdf), page 49.
- <sup>49</sup> Meszler et al. (2018). European heavy-duty vehicles: Cost-effectiveness of fuel-efficiency technologies for long-haul tractor-trailers in the 2025-2030 timeframe. Extrait de [https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_EU-HDV-tech-2025-30\\_20180424\\_updated.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU-HDV-tech-2025-30_20180424_updated.pdf), page 61.
- <sup>50</sup> European Union (2019). Regulation (EU) 2019/1242 of the European Parliament and of the Council. Extrait de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242&from=EN>
- <sup>51</sup> International Council on Clean Transportation (2019). European vehicle market statistics. Pocketbook 2019/20. Extrait de [http://eupocketbook.org/wp-content/uploads/2019/12/ICCT\\_Pocketbook\\_2019\\_Web.pdf](http://eupocketbook.org/wp-content/uploads/2019/12/ICCT_Pocketbook_2019_Web.pdf), page 21.
- <sup>52</sup> European Commission (2019). Reducing CO<sub>2</sub> emissions from heavy-duty vehicles. Extrait de [https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy_en)
- <sup>53</sup> Eurostat (2017). 'Modal split of freight transport'. Extrait de <https://ec.europa.eu/eurostat/web/transport/data/database>
- <sup>54</sup> Eurostat (2017). 'Goods transported by group of goods'. Extrait de <https://ec.europa.eu/eurostat/web/transport/data/database>
- <sup>55</sup> Eurostat (2017). 'Railway transport - length of lines, by nature of transport'. Extrait de <https://ec.europa.eu/eurostat/web/transport/data/database>
- <sup>56</sup> Assemblée Nationale (2018). Le verdissement des matériels roulants du transport ferroviaire en France. Extrait de [https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions\\_services/cge/Rapports/Rap2018/CGE\\_R2018-03MA\\_Verdissement\\_flotte\\_ferroviaire.pdf](https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/Rapports/Rap2018/CGE_R2018-03MA_Verdissement_flotte_ferroviaire.pdf), page 62-63.
- <sup>57</sup> Assemblée Nationale (2018). Le verdissement des matériels roulants du transport ferroviaire en France. Extrait de [https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions\\_services/cge/Rapports/Rap2018/CGE\\_R2018-03MA\\_Verdissement\\_flotte\\_ferroviaire.pdf](https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/Rapports/Rap2018/CGE_R2018-03MA_Verdissement_flotte_ferroviaire.pdf), page 62-63.
- <sup>58</sup> Egamberdiev et al. (2016). A study on life cycle cost on railway locomotive systems, *International Journal of Railway*, 9(1). Extrait de <https://pdfs.semanticscholar.org/f2f0/7030ad0c951814e61948c15215217e188289.pdf>, page 10.
- <sup>59</sup> Ruf et al. (2019). Study on the use of fuel cells and hydrogen in the railway environment. Extrait de [https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2019/05/Study-on-the-use-of-fuel-cells-and-hydrogen-in-the-railway-environment\\_final.pdf](https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2019/05/Study-on-the-use-of-fuel-cells-and-hydrogen-in-the-railway-environment_final.pdf), page 12.

- <sup>60</sup> Kille et al. (2008). Wirtschaftliche Rahmenbedingungen des Güterverkehrs. Studie zum Vergleich der Verkehrsträger im Rahmen des Logistikprozesses in Deutschland. Extrait de [https://www.scs.fraunhofer.de/content/dam/scs/de/dokumente/studien/Wirtschaftliche\\_Rahmenbedingungen\\_des\\_Gueterverkehrs.pdf](https://www.scs.fraunhofer.de/content/dam/scs/de/dokumente/studien/Wirtschaftliche_Rahmenbedingungen_des_Gueterverkehrs.pdf), page 29-30.
- <sup>61</sup> Rodrigue et al. (2013). The geography of transport systems, Routledge, New York/US, pages 106-107.
- <sup>62</sup> European Court of Auditors (2016). Rail freight transport in the EU: still not on the right track [https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR16\\_08/SR\\_RAIL\\_FREIGHT\\_EN.pdf](https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR16_08/SR_RAIL_FREIGHT_EN.pdf), page 37.
- <sup>63</sup> Commissariat général au développement durable (2017). Le potentiel de développement des autoroutes ferroviaires. Étude exploratoire. Extrait de [https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9matique%20Le%20potentiel%20de%20d%C3%A9veloppement%20des%20autoroutes%20ferroviaire\\_0.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9matique%20Le%20potentiel%20de%20d%C3%A9veloppement%20des%20autoroutes%20ferroviaire_0.pdf)
- <sup>64</sup> Policy Department for Structural and Cohesion Policies, European Parliament (2018). Research for TRAN Committee - Modal shift in European transport: a way forward. Extrait de [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/629182/IPOL\\_STU\(2018\)629182\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/629182/IPOL_STU(2018)629182_EN.pdf), page 123.
- <sup>65</sup> Briand et al. (2020). Trajectoires de décarbonation profonde du transport de marchandises en France. Extrait de [https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20iddri/Rapport/202003-rapport%20fret%20FR\\_0.pdf](https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20iddri/Rapport/202003-rapport%20fret%20FR_0.pdf), pages 7 et 26.
- <sup>66</sup> Direction générale de l'énergie et du climat (2020). Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat. Extrait de <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Synth%C3%A8se%20sc%C3%A9nario%20de%20r%C3%A9f%C3%A9rence%20S NBC-PPE.pdf>, page 15.
- <sup>67</sup> Eurostat (2017). 'Modal split of freight transport'. Extrait de <https://ec.europa.eu/eurostat/web/transport/data/database>
- <sup>68</sup> Eurostat (2017). 'Transport by type of good'. Extrait de <https://ec.europa.eu/eurostat/web/transport/data/database>
- <sup>69</sup> Ministère de la Transition écologique et solidaire (2019). Généralités sur le transport et le réseau fluvial en France. Extrait de <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/generalites-sur-transport-et-reseau-fluvial-en-france>
- <sup>70</sup> Wiegmans et al. (2016). Inland waterway transport: Challenges and prospects, Routledge, Abingdon/UK, page 7.
- <sup>71</sup> Commission européenne (2019.) Statistical pocketbook EU transport in figures. Extrait de <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f0f3e1b7-ee2b-11e9-a32c-01aa75ed71a1>, page 85.
- <sup>72</sup> Beyer (2018). Inland waterways, transport corridors and urban waterfronts. International Transport Forum Discussion Papers, OECD Publishing, Paris. Extrait de [https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/inland-waterways-transport-corridors-urban-waterfronts\\_1.pdf](https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/inland-waterways-transport-corridors-urban-waterfronts_1.pdf), page 4.
- <sup>73</sup> The Explorer (2019). The world's first electric car and passenger ferry. Extrait de <https://www.theexplorer.no/solutions/ampere--the-worlds-first-electric-car-and-passenger-ferry/>
- <sup>74</sup> Electrek (2019). World's largest all-electric ferry completes its maiden trip. Extrait de <https://electrek.co/2019/08/21/worlds-largest-electric-ferry/>
- <sup>75</sup> Clean Technica (2018). Dutch Company Introduces Autonomous Electric Barge In Europe. Extrait de <https://cleantechnica.com/2018/01/13/dutch-company-introduces-autonomous-electric-barge-europe/>
- <sup>76</sup> Cour des Comptes européenne (2015). Le transport fluvial en Europe : aucune amélioration significative de la part modale et des conditions de navigabilité depuis 2001. Extrait de [https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR15\\_01/SR15\\_01\\_FR.pdf](https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR15_01/SR15_01_FR.pdf), page 6.
- <sup>77</sup> Union européenne (2019). Commission Implementing Decision (EU) 2019/1118. Extrait de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019D1118&from=EN>, page 62-65.
- <sup>78</sup> Eurostat (2018). Energy, transport and environment indicators. 2018 Edition. Extrait de <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/9433240/KS-DK-18-001-EN-N.pdf>, page 106.
- <sup>79</sup> Commission européenne (sans date). Priority axis No 30 – Ongoing. Inland waterway Seine-Scheldt. Extrait de [https://ec.europa.eu/ten/transport/priority\\_projects\\_minisite/PP30EN.pdf](https://ec.europa.eu/ten/transport/priority_projects_minisite/PP30EN.pdf), page 70.
- <sup>80</sup> Eurostat (2017). 'Transport by type of good'. Extrait de <https://ec.europa.eu/eurostat/web/transport/data/database>
- <sup>81</sup> Eurostat (2017). 'Summary of annual road freight transport by type of operation and type of transport'. Extrait de <https://ec.europa.eu/eurostat/web/transport/data/database>

- <sup>82</sup> Commission européenne (2014). Rapport de la commission au parlement européen et au conseil sur l'état du marché du transport routier dans l'Union européenne Extrait de [https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/road/news/com%282014%29-222\\_fr.pdf](https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/road/news/com%282014%29-222_fr.pdf), page 7.
- <sup>83</sup> Commission européenne (2017). An overview of the EU road transport market in 2015. Extrait de <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/mobility-package-overview-of-the-eu-road-transport-market-in-2015.pdf>, page 17.
- <sup>84</sup> Jöhrens et al. (2017). Roadmap for an overhead catenary system for trucks: SWOT analysis. Extrait de [https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/201712\\_ifeu\\_M-Five\\_Roadmap-OH-Lkw\\_SWOT-analysis\\_EN.pdf](https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/201712_ifeu_M-Five_Roadmap-OH-Lkw_SWOT-analysis_EN.pdf), page 9.
- <sup>85</sup> Façanha et al. (2019). Toward greener supply chains. Extrait de [https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_Toward-Greener-Supply-Chains\\_201909.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Toward-Greener-Supply-Chains_201909.pdf), plusieurs pages.
- <sup>86</sup> Commission européenne (2019). Handbook on the external costs of Transport. Version 2019. Extrait de <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/studies/internalisation-handbook-isbn-978-92-79-96917-1.pdf>, page 137.
- <sup>87</sup> Legifrance (2019). Code des douanes - Article 265 septies. Extrait de <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006071570&idArticle=LEGIARTI000006615148>
- <sup>88</sup> Direction générale des douanes et droits indirects (2020). Demander le remboursement partiel de la TICPE : entreprise de transport de marchandises établie en France. Extrait de <https://www.douane.gouv.fr/demarche/demander-le-remboursement-partiel-de-la-ticpe-entreprise-de-transport-de-marchandises-0>
- <sup>89</sup> Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020). Fiscalité des énergies. Extrait de <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/fiscalite-des-energies>
- <sup>90</sup> Ministère de l'action et des comptes publics (2020). Remboursement d'une fraction de la taxe intérieure de consommation sur le gazole utilisé par les transporteurs routiers de marchandises. Taux de remboursement pour le premier semestre 2020. Extrait de [https://www.douane.gouv.fr/sites/default/files/bod/src/dana/da/Energie-environnement-loi%20de%20finances\\_20-009.pdf](https://www.douane.gouv.fr/sites/default/files/bod/src/dana/da/Energie-environnement-loi%20de%20finances_20-009.pdf)
- <sup>91</sup> L'Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (2019). Les scénarios technologiques permettant d'atteindre l'objectif d'un arrêt de la commercialisation des véhicules thermiques en 2040. Extrait de <http://www.assemblee-nationale.fr/15/pdf/rap-off/i1766.pdf>, pages 44-46.
- <sup>92</sup> Transport & Environment (2018). CNG and LNG for vehicles and ships - the facts. Extrait de [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018\\_10\\_TE\\_CNG\\_and\\_LNG\\_for\\_vehicles\\_and\\_ships\\_the\\_facts\\_EN.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2018_10_TE_CNG_and_LNG_for_vehicles_and_ships_the_facts_EN.pdf)
- <sup>93</sup> Transport & Environment (2019). Les camions au gaz réduisent-ils les émissions ? Extrait de [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2019\\_09\\_do\\_gas\\_trucks\\_reduce\\_emissions\\_paper\\_FR.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2019_09_do_gas_trucks_reduce_emissions_paper_FR.pdf)
- <sup>94</sup> Ministère américain de l'Énergie (sans date). Alternative Fuels Data Center. Natural gas vehicles. Extrait de [https://afdc.energy.gov/vehicles/natural\\_gas.html](https://afdc.energy.gov/vehicles/natural_gas.html)
- <sup>95</sup> Moultaq et al. (2017). Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles. Extrait de [https://theicct.org/sites/default/files/publications/Zero-emission-freight-trucks\\_ICCT-white-paper\\_26092017\\_vF.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/Zero-emission-freight-trucks_ICCT-white-paper_26092017_vF.pdf), page 16.
- <sup>96</sup> Büniger et al. (2016). Vergleich von CNG und LNG zum Einsatz in LKW im Fernverkehr. Extrait de [http://www.lbst.de/ressourcen/docs2016/1605\\_CNG\\_LNG\\_Endbericht\\_public.pdf](http://www.lbst.de/ressourcen/docs2016/1605_CNG_LNG_Endbericht_public.pdf), pages 26-27.
- <sup>97</sup> Kühnel et al. (2018). Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Ein Technologie- und Wirtschaftsvergleich. Extrait de <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf>, page 18.
- <sup>98</sup> Commission européenne (2017). Alternative Fuels. Expert group report. Extrait de <https://ec.europa.eu/transparency/regexpert/index.cfm?do=groupDetail.groupDetailDoc&id=34592&no=1>, page 22.
- <sup>99</sup> Adolf et al. (2019). Shell LNG study. Liquefied natural gas - new energy for ships and trucks? Extrait de [https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-lng-studie/\\_jcr\\_content/par/toptasks.stream/1570447648817/3cb7ff696a24326140f5b19765408059c494ca88/lng-study-uk-18092019-einzelseiten.pdf](https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-lng-studie/_jcr_content/par/toptasks.stream/1570447648817/3cb7ff696a24326140f5b19765408059c494ca88/lng-study-uk-18092019-einzelseiten.pdf), page 9.
- <sup>100</sup> Kampman et al. (2016). Optimal use of biogas from waste streams. An assessment of the potential of biogas from digestion in the EU beyond 2020. Extrait de

[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ce\\_delft\\_3g84\\_biogas\\_beyond\\_2020\\_final\\_report.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ce_delft_3g84_biogas_beyond_2020_final_report.pdf), page 63.

<sup>101</sup> Bauer et al. (2013), Biogas upgrading - Review of commercial technologies. Extrait de <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC270.pdf>

<sup>102</sup> Comité européen de normalisation (2017). Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection in the natural gas network - Part 2: Automotive fuels specification. Extrait de [https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP\\_PROJECT:41008&cs=1D7CD581175157FBF537040E3716A707E](https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP_PROJECT:41008&cs=1D7CD581175157FBF537040E3716A707E)

<sup>103</sup> Transport & Environment (2019). Les camions au gaz réduisent-ils les émissions ? Extrait de [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2019\\_09\\_do\\_gas\\_trucks\\_reduce\\_emissions\\_paper\\_FR.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2019_09_do_gas_trucks_reduce_emissions_paper_FR.pdf)

<sup>104</sup> Scania (2015). It's a liquefied gas! Extrait de <https://www.scania.com/group/en/its-a-liquefied-gas/>

<sup>105</sup> IVECO (2018). IVECO's LNG truck strategy backed by the European Commission's proposal to reduce CO<sub>2</sub> emissions for heavy duty vehicles. Extrait de <https://www.iveco.com/sea/press-room/release/pages/ivecos-lng-sustainable-strategy-endorsed.aspx>

<sup>106</sup> Volvo Trucks (2017). New trucks from Volvo running on LNG offer the same performance as diesel, but with 20-100% lower CO<sub>2</sub> emissions. Extrait de <https://www.volvotrucks.com/en-en/news/press-releases/2017/oct/pressrelease-171003.html>

<sup>107</sup> TNO (2017). Emissions testing of two Euro VI LNG heavy-duty vehicles in the Netherlands: tank-to-wheel emissions. Extrait de <https://publications.tno.nl/publication/34625802/QoDRSe/TNO-2017-R11336.pdf>;

<sup>108</sup> TNO. (2019). Emissions testing of a Euro VI LNG-diesel dual fuel truck in the Netherlands. Extrait de <http://publications.tno.nl/publication/34633965/pl7KqC/TNO-2019-R10193.pdf>

<sup>109</sup> Alvarez et al. (2018). Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain, in: *Science* 361(6398). Extrait de <https://science.sciencemag.org/content/sci/361/6398/186.full.pdf>, pages 186-188.

<sup>110</sup> Agence internationale de l'énergie (2019). Methane emissions from oil and gas. Extrait de <https://www.iea.org/reports/tracking-fuel-supply-2019/methane-emissions-from-oil-and-gas>

<sup>111</sup> Mottschall et al. (2020). Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective. Extrait de <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/LNG-in-trucks.pdf>, page 37.

<sup>112</sup> Langshaw et al. (2020). Environmental and economic analysis of liquefied natural gas (LNG) for heavy goods vehicles in the UK: A well-to-wheel and total cost of ownership evaluation. *Energy Policy*, 137(2020). Extrait de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421519307475>, pages 6-7.

<sup>113</sup> Centre commun de recherche (2014). JRC technical reports. Well-to-wheels appendix 1 - Version 4.a. Summary of WTW Energy and GHG balances. Extrait de [https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/wtw\\_app\\_1\\_v4a\\_march\\_2014\\_final.pdf](https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/wtw_app_1_v4a_march_2014_final.pdf), pages 5-6.

<sup>114</sup> Commission européenne (2019). Excise duty tables. Part II energy products and electricity. Extrait de [https://ec.europa.eu/taxation\\_customs/sites/taxation/files/resources/documents/taxation/excise\\_duties/energy\\_products/rates/excise\\_duties-part\\_ii\\_energy\\_products\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/taxation_customs/sites/taxation/files/resources/documents/taxation/excise_duties/energy_products/rates/excise_duties-part_ii_energy_products_en.pdf)

<sup>115</sup> Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020). Fiscalité des énergies. Extrait de <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/fiscalite-des-energies>

<sup>116</sup> CNG Europe (2020). France CNG prices. Extrait de <http://cngeurope.com/countries/france/>

<sup>117</sup> Searle et al. (2019). Gas definitions for the European Union. Extrait de [https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_eu\\_gas\\_def\\_20190529.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_eu_gas_def_20190529.pdf), pages 4-8.

<sup>118</sup> Commissariat général au développement durable (2019). Chiffres clés de l'énergie. Édition 2019. Extrait de <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-09/datalab-59-chiffres-cles-energie-edition-2019-septembre2019.pdf>, page 22.

<sup>119</sup> Gaz Réseau Distribution France (2019). Découvrir les unités d'injection. Extrait de <https://www.grdf.fr/institutionnel/actualite/dossiers/biomethane-biogaz/unites-injection-gaz-vert>

<sup>120</sup> Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020). Stratégie française pour l'énergie et le climat. Programmation pluriannuelle de l'énergie. Extrait de <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27e%CC%81nergie.pdf>, page 104.

<sup>121</sup> Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020). Stratégie française pour l'énergie et le climat. Programmation pluriannuelle de l'énergie. Extrait de <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27e%CC%81nergie.pdf>

[solidaire.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27e%CC%81nergie.pdf](https://solidaire.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27e%CC%81nergie.pdf), page 99.

<sup>122</sup> GRDF et al. (2018). Panorama du Gaz Renouvelable en 2018. Extrait de <http://www.grtgaz.com/fileadmin/plaquettes/fr/2019/Panorama-du-gaz-renouvelable-2018.pdf>, page 21.

<sup>123</sup> Searle et al. (2018). What is the role for renewable methane in European decarbonization? Extrait de [https://theicct.org/sites/default/files/publications/Role\\_Renewable\\_Methane\\_EU\\_20181016.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/Role_Renewable_Methane_EU_20181016.pdf)

<sup>124</sup> Daimler (2018). eActros goes into customer operation. Extrait de <https://www.daimler.com/products/trucks/mercedes-benz/eactros.html>

<sup>125</sup> Fuso (2020). eCanter. Sustainable success thanks to successful sustainability. Extrait de <https://www.fuso-trucks.de/content/eu/germany/en/models/ecanter.html>

<sup>126</sup> Volvo Trucks (2018). Premiere for Volvo Trucks' first all-electric truck. Extrait de <https://www.volvogroup.com/en-en/news/2018/apr/news-2879838.html>

<sup>127</sup> Renault Trucks (2018). Renault Trucks unveils its second generation of electric trucks. Extrait de <https://corporate.renault-trucks.com/en/press-releases/2018-06-26-renault-trucks-unveils-its-second-generation-of-electric-trucks.html>

<sup>128</sup> Transport & Environment (2017). European road freight transport by trip distance class. Extrait de [https://infogram.com/201912\\_eng\\_infra\\_truck-trips-by-distance-class\\_all-1hzj4o79759o6pw?live](https://infogram.com/201912_eng_infra_truck-trips-by-distance-class_all-1hzj4o79759o6pw?live)

<sup>129</sup> Heid et al. (2017). What's sparking electric-vehicle adoption in the truck industry? Extrait de <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/whats-sparking-electric-vehicle-adoption-in-the-truck-industry>

<sup>130</sup> Slowik et al. (2019). Funding the transition to all zero-emission vehicles. Extrait de [https://theicct.org/sites/default/files/publications/Funding\\_transition\\_ZEV\\_20191014.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/Funding_transition_ZEV_20191014.pdf), page 33.

<sup>131</sup> BloombergNEF (2019). Battery pack prices fall as market ramps up with market average at \$ 156/kWh in 2019. Extrait de <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/?sf113554299=1>

<sup>132</sup> Hill et al. (2019). Circular economy perspectives for the management of batteries used in electric vehicles. Final project report. Extrait de [https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC117790/jrc117790\\_jrc\\_circular\\_econ\\_for\\_ev\\_batterie\\_s\\_ricardo2019\\_final\\_report\\_pubsy\\_online.pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC117790/jrc117790_jrc_circular_econ_for_ev_batterie_s_ricardo2019_final_report_pubsy_online.pdf), page 50.

<sup>133</sup> Ministère américain de l'Énergie (sans date). How do all-electric cars work? Extrait de <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>

<sup>134</sup> Daimler (aucune date). Vehicle Data Sheet: Freightliner eCascadia. Extrait de <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/print/Vehicle-Data-Sheet-Freightliner-eCascadia.xhtml?oid=42179774>

<sup>135</sup> Tesla (aucune date). Tesla Semi. Extrait de <https://www.tesla.com/semi>

<sup>136</sup> Nikola (2019). IVECO, FPT Industrial and Nikola Corporation unveil the Nikola TRE. Extrait de [https://nikolamotor.com/press\\_releases/iveco-fpt-industrial-and-nikola-corporation-unveil-the-nikola-tre-71](https://nikolamotor.com/press_releases/iveco-fpt-industrial-and-nikola-corporation-unveil-the-nikola-tre-71)

<sup>137</sup> U.S. Energy Information Administration (2013). Few transportation fuels surpass the energy densities of gasoline and diesel. Extrait de <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=9991>

<sup>138</sup> Ricardo Energy & Environment (2019). Circular economy perspectives for the management of batteries used in electric vehicles. Extrait de [https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC117790/jrc117790\\_jrc\\_circular\\_econ\\_for\\_ev\\_batterie\\_s\\_ricardo2019\\_final\\_report\\_pubsy\\_online.pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC117790/jrc117790_jrc_circular_econ_for_ev_batterie_s_ricardo2019_final_report_pubsy_online.pdf), page 211.

<sup>139</sup> Hall et al. (2019). Estimating the infrastructure needs and costs for the launch of zero-emission trucks. Extrait de [https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_EV\\_HDVs\\_Infrastructure\\_20190809.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EV_HDVs_Infrastructure_20190809.pdf), page 13.

<sup>140</sup> European Union (2019). Regulation (EU) 561/2006 of the European Parliament and of the Council. Extrait de [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5cf5ebde-d494-40eb-86a7-2131294ccbd9.0005.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5cf5ebde-d494-40eb-86a7-2131294ccbd9.0005.02/DOC_1&format=PDF)

<sup>141</sup> Kühnel et al. (2018). Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Ein Technologie- und Wirtschaftsvergleich. Extrait de <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf>, pages 88-90.

<sup>142</sup> CharIN (2020). CharIN Steering Committee paves the way for the development of a CCS compliant plug for commercial vehicles with >2MW. Extrait de <https://www.charinev.org/news/news-detail-2018/news/charin-steering-committee-paves-the-way-for-the-development-of-a-ccs-compliant-plug-for-commercial-v/>

- <sup>143</sup> Transport & Environment (2020). Recharge EU trucks: Time to act. Extrait de [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020\\_02\\_RechargeEU\\_trucks\\_paper.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_02_RechargeEU_trucks_paper.pdf)
- <sup>144</sup> Umweltbundesministerium (sans date). Elektro-Lastwagen an der langen Leine. Extrait de <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/elektromobilitaet/elektro-lastwagen/>
- <sup>145</sup> Trafikverket (2020). Program Elvägar. Extrait de <https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/forskning-och-innovation/aktuell-forskning/transport-pa-vag/elvagar--ett-komplement-i-morgondagens-transportsystem/>
- <sup>146</sup> Alstom (2017). Alstom presents APS for road, its innovative electric road solution. Extrait de <https://www.alstom.com/press-releases-news/2017/11/alstom-presents-aps-for-road-its-innovative-electric-road-solution>
- <sup>147</sup> Gustavsson et al. (2019). Overview of ERS concepts and complementary technologies. Extrait de <http://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1301679/FULLTEXT01.pdf>, pages 16-17.
- <sup>148</sup> Siemens (2019). eHighway – solutions for electrified road freight transport. Extrait de <https://press.siemens.com/global/en/feature/ehighway-solutions-electrified-road-freight-transport>
- <sup>149</sup> BMU (2010). ENUBA. Elektromobilität bei Schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. Extrait de <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/enuba>
- <sup>150</sup> BMU (2012). ENUBA 2. Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. Extrait de <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/enuba-2>
- <sup>151</sup> Ministère de la Transition écologique et solidaire (2017). Concept d'autoroute électrique Évaluation socioéconomique. Extrait de <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Concept%20autoroute%20%C3%A9lectrique.pdf>
- <sup>152</sup> Wietschel et al. (2017). Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Ret Extrait de [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2017/MKS\\_Machbarkeitsstudie\\_Hybrid-Oberleitungs\\_Lkw\\_Bericht\\_2017.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2017/MKS_Machbarkeitsstudie_Hybrid-Oberleitungs_Lkw_Bericht_2017.pdf), pages 117-118.
- <sup>153</sup> Kühnel et al. (2018). Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Ein Technologie- und Wirtschaftsvergleich. Extrait de <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf>, page 79.
- <sup>154</sup> Jöhrens et al. (2018). Roadmap OH-Lkw: Hemmnisanalyse. Extrait de [https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw\\_Hemmnisanalyse.pdf](https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw_Hemmnisanalyse.pdf), page 11.
- <sup>155</sup> Hacker et al. (2020). StratON. Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Extrait de <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf>, pages 233-234.
- <sup>156</sup> Reuters (2019). CNH Industrial's Iveco unveils first electric truck in partnership with Nikola. Extrait de <https://www.reuters.com/article/us-cnh-industrial-nikola/cnh-industrials-iveco-joins-the-electric-truck-race-with-nikola-partnership-idUSKBN1Y62FR>
- <sup>157</sup> Auteur inconnu (2016). Nikola launches Tre hydrogen-electric truck for European market, *Fuel Cells Bulletin*, 2018(12). Extrait de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464285918304449>
- <sup>158</sup> Hyundai (2019). Hyundai and Hydros spider to build industrial hydrogen ecosystem. Extrait de <https://www.hyundai.news/eu/brand/hyundai-and-hydros-spider-to-build-industrial-hydrogen-ecosystem/>
- <sup>159</sup> Gnann et al. (2017). Teilstudie „Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential“. Extrait de [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/teilstudie-brennstoffzellen-lkw.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/teilstudie-brennstoffzellen-lkw.pdf?__blob=publicationFile), pages 86-88.
- <sup>160</sup> Shell (2017). Shell hydrogen study. Energy of the future? Sustainable mobility through fuel cells and H<sub>2</sub>. Extrait de [https://www.shell.com/energy-and-innovation/new-energies/hydrogen/\\_jcr\\_content/par/keybenefits\\_150847174/link.stream/1496312627865/6a3564d61b9aff43e087972db5212be68d1fb2e8/shell-h2-study-new.pdf](https://www.shell.com/energy-and-innovation/new-energies/hydrogen/_jcr_content/par/keybenefits_150847174/link.stream/1496312627865/6a3564d61b9aff43e087972db5212be68d1fb2e8/shell-h2-study-new.pdf), page 24.
- <sup>161</sup> Agence internationale de l'énergie (2019). The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Extrait de <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>, page 74.
- <sup>162</sup> Boston Consulting Group (2019). The real promise of hydrogen. Extrait de [http://image-src.bcg.com/Images/BCG-The-Real-Promise-of-Hydrogen-July-2019\\_tcm9-225426.pdf](http://image-src.bcg.com/Images/BCG-The-Real-Promise-of-Hydrogen-July-2019_tcm9-225426.pdf), page 4.
- <sup>163</sup> Ajanovic et al. (2018). Economic prospects and policy framework for hydrogen as fuel in the transport sector, *Energy Policy*, 123(2018). Extrait de [https://publik.tuwien.ac.at/files/publik\\_272019.pdf](https://publik.tuwien.ac.at/files/publik_272019.pdf), pages 283-284.
- <sup>164</sup> Fraunhofer ISE (2019). Percentage of full load of offshore wind power plants in Germany in 2019. Extrait de [https://www.energy-charts.de/percent\\_full\\_load.htm?source=wind-offshore&year=2019](https://www.energy-charts.de/percent_full_load.htm?source=wind-offshore&year=2019)
- <sup>165</sup> Staffell et al. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system, *Energy & Environmental Science*, 2019(12). Extrait de <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2019/ee/c8ee01157e>, page 477.

- <sup>166</sup> International Energy Agency (2019). The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Extrait de <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>, page 75.
- <sup>167</sup> National Renewable Energy Laboratory (2014). Hydrogen Station Compression, Storage, and Dispensing Technical Status and Costs. Extrait de <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/58564.pdf>, plusieurs pages.
- <sup>168</sup> Hydrogen Council (2020). Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective. Extrait de [https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness\\_Full-Study-1.pdf](https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf), page 28.
- <sup>169</sup> H2-Mobile (2020). HRS Availability Map. Extrait de <https://www.h2-mobile.fr/stations-hydrogene/>
- <sup>170</sup> Plötz et al. (2018). Alternative drive trains and fuels in road freight transport – recommendations for action in Germany. Extrait de <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Climate-friendly-road-freight-transport.pdf>, page 5.
- <sup>171</sup> Agora Energiewende (2018). PtG/PtL calculator. Extrait de <https://www.agora-energiawende.de/en/publications/ptgptl-calculator/>
- <sup>172</sup> Plötz et al. (2018). Alternative drive trains and fuels in road freight transport – recommendations for action in Germany. Extrait de <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Climate-friendly-road-freight-transport.pdf>, page 5.
- <sup>173</sup> Association Française du Gaz Naturel Véhicule (2020). Nombre de points d'avitaillement. Extrait de [https://gnv-grtgaz.opendatasoft.com/pages/dashboard\\_v3/#en-service](https://gnv-grtgaz.opendatasoft.com/pages/dashboard_v3/#en-service)
- <sup>174</sup> Adolf et al. (2019). Shell LNG study. Liquefied natural gas - new energy for ships and trucks? Extrait de [https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-lng-studie/\\_jcr\\_content/par/toptasks.stream/1570447648817/3cb7ff696a24326140f5b19765408059c494ca88/Lng-study-uk-18092019-einzelseiten.pdf](https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-lng-studie/_jcr_content/par/toptasks.stream/1570447648817/3cb7ff696a24326140f5b19765408059c494ca88/Lng-study-uk-18092019-einzelseiten.pdf), page 9.
- <sup>175</sup> Frontier Economics (2018). The future cost of electricity-based synthetic fuels. Extrait de [https://www.agora-energiawende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost\\_2050/Agora\\_SynKost\\_Study\\_EN\\_WEB.pdf](https://www.agora-energiawende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynKost_Study_EN_WEB.pdf), page 64.
- <sup>176</sup> Agora Energiewende (2018). PtG/PtL calculator. Extrait de <https://www.agora-energiawende.de/en/publications/ptgptl-calculator/>.
- <sup>177</sup> Kühnel et al. (2018). Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Ein Technologie- und Wirtschaftsvergleich. Extrait de <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf>
- <sup>178</sup> Service des données et études statistiques (2019). Données sur le parc des véhicules au 1er janvier 2019. Extrait de <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-sur-le-parc-des-vehicules-au-1er-janvier-2019>
- <sup>179</sup> Agora Energiewende (2018). PtG/PtL calculator. Extrait de <https://www.agora-energiawende.de/en/publications/ptgptl-calculator/>
- <sup>180</sup> Searle et al. (2018). Decarbonization potential of electrofuels in the European Union. Extrait de [https://theicct.org/sites/default/files/publications/Electrofuels\\_Decarbonization\\_EU\\_20180920.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/Electrofuels_Decarbonization_EU_20180920.pdf), pages 15-16.
- <sup>181</sup> Frontier Economics (2018). The future cost of electricity-based synthetic fuels. Extrait de [https://www.agora-energiawende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost\\_2050/Agora\\_SynKost\\_Study\\_EN\\_WEB.pdf](https://www.agora-energiawende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynKost_Study_EN_WEB.pdf)
- <sup>182</sup> Agence internationale de l'énergie (2019). The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Extrait de <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>, pages 43-45.
- <sup>183</sup> ACEA (2019). ACEA tax guide 2019 edition. Extrait de [https://www.acea.be/uploads/news\\_documents/ACEA\\_Tax\\_Guide\\_2019.pdf](https://www.acea.be/uploads/news_documents/ACEA_Tax_Guide_2019.pdf), pages 86-97.
- <sup>184</sup> Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020). Fiscalité des énergies. Extrait de <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/fiscalite-des-energies>
- <sup>185</sup> Comité national routier (2019). Enquête CNR longue Distance. Extrait de <http://www.cnr.fr/fr/Publications-CNR/Enquete-CNR-longue-Distance-2018>, page 11.
- <sup>186</sup> Legifrance (2019). LOI n° 2019-1428 du 24 décembre 2019 d'orientation des mobilités (1). Retrieved from [https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=64DC2337D43E6F6969EC2BF22AF7A322.tplgfr41s\\_?cidTexte=JORFTEXT000039666574&categorieLien=id](https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=64DC2337D43E6F6969EC2BF22AF7A322.tplgfr41s_?cidTexte=JORFTEXT000039666574&categorieLien=id), Article 178.
- <sup>187</sup> Legifrance (2019). Code des douanes. Titre X: Taxes diverses perçues par la douane. Chapitre 1er : Taxes intérieures. Article 266 quinquies C. Extrait de <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000037988902&cidTexte=LEGITEXT000006071570&dateTexte=20190101>, 2° c.
- <sup>188</sup> European Union (2003). Council Directive 2003/96/EC. Extrait de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003L0096&from=EN>, Article 15(1)(i).
- <sup>189</sup> Transport & Environment (2020). The Energy Taxation Directive. T&E's feedback on the Inception Impact Assessment. Extrait de

---

[https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020\\_04\\_TransportEnvironment-feedback-EnergyTaxationDirective-IIA-2020.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_04_TransportEnvironment-feedback-EnergyTaxationDirective-IIA-2020.pdf), page 9.

<sup>190</sup> Legifrance (2019). LOI n° 2018-1317 du 28 décembre 2018 de finances pour 2019 (1). Extrait de <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000037882341&categorieLien=id#JORFARTI000037882421>, Article 70.

<sup>191</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018). Richtlinie über die Förderung von energieeffizienten und/oder CO<sub>2</sub>-armen schweren Nutzfahrzeugen in Unternehmen des Güterkraftverkehrs. Extrait de [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/richtlinie-foerderung-von-energieeffizienten-nutzfahrzeugen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/richtlinie-foerderung-von-energieeffizienten-nutzfahrzeugen.pdf?__blob=publicationFile)

<sup>192</sup> Bundesregierung (2019). Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Extrait de <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1>, page 80-81.

<sup>193</sup> Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg (aucune date). Wir fördern Ihren E-LKW. Extrait de <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/politik-zukunft/elektromobilitaet/foerderung-elektromobilitaet/e-lkw/>

<sup>194</sup> California Air Resources Board (2017). Proposed fiscal year 2017-18 funding plan for clean transportation incentives. Extrait de [https://ww3.arb.ca.gov/msprog/aqip/fundplan/proposed\\_1718\\_funding\\_plan\\_final.pdf](https://ww3.arb.ca.gov/msprog/aqip/fundplan/proposed_1718_funding_plan_final.pdf), page 93.

<sup>195</sup> Gaz-mobilite.fr (aucune date). Véhicules GNV : aides à l'achat locales et régionales en France. Extrait de <https://www.gaz-mobilite.fr/dossiers/aides-vehicules-gnv-regions-collectivites-france/>

<sup>196</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2020). Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung. Ziele und Maßnahmen für den Ladeinfrastrukturaufbau bis 2030. Extrait de [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur.pdf?__blob=publicationFile), page 13.

<sup>197</sup> California Air Resources Board (2017). Proposed fiscal year 2017-18 funding plan for clean transportation incentives. Extrait de [https://ww3.arb.ca.gov/msprog/aqip/fundplan/proposed\\_1718\\_funding\\_plan\\_final.pdf](https://ww3.arb.ca.gov/msprog/aqip/fundplan/proposed_1718_funding_plan_final.pdf), page 34 and 72-76.

<sup>198</sup> California Air Resources Board (aucune date). Accessible clean transportation options SB 350. Extrait de <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/accessible-clean-transportation-options-sb-350>

<sup>199</sup> Southern California Edison Company (aucune date). Charge Ready Transport Program. Extrait de <https://www.sce.com/business/electric-cars/charge-ready-transport>

<sup>200</sup> Volvo Trucks et al. (2020). Volvo LIGHTS. Extrait de <https://www.lightsproject.com/>

<sup>201</sup> Innovation and Networks Executive Agency (2019). The Connecting Europe Facility. Five years supporting European infrastructure. Extrait de [https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/cefpub/cef\\_implementation\\_brochure\\_web\\_final.pdf](https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/cefpub/cef_implementation_brochure_web_final.pdf)

<sup>202</sup> Présidence de la République (2019). Déclaration sur la coopération entre la France et la Suède dans le domaine des affaires Européennes et modernisant le partenariat Franco-Suédois sur l'innovation et les solutions vertes. Extrait de <https://www.elysee.fr/front/pdf/elysee-module-3388-fr.pdf>, page 8.

<sup>203</sup> Transport & Environment (2020). Recharge EU trucks: Time to act. Extrait de [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020\\_02\\_RechargeEU\\_trucks\\_paper.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_02_RechargeEU_trucks_paper.pdf)

<sup>204</sup> Daimler (2019). Daimler Trucks & Buses targets completely CO<sub>2</sub>-neutral fleet of new vehicles by 2039 in key regions. Extrait de <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Daimler-Trucks--Buses-targets-completely-CO2-neutral-fleet-of-new-vehicles-by-2039-in-key-regions.xhtml?oid=44764260>

<sup>205</sup> National Infrastructure Commission (2019). Better delivery: The challenge for freight. Freight study final report. Extrait de <https://www.nic.org.uk/wp-content/uploads/Better-Delivery-April-2019.pdf>, page 36.

<sup>206</sup> Milieu (2020). Phasing-out sales of internal combustion engine vehicles. Scoping study by Milieu for Transport & Environment. Extrait de [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020\\_03\\_ICE\\_phase-out\\_legal\\_feasibility\\_study.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_03_ICE_phase-out_legal_feasibility_study.pdf), page 26.

<sup>207</sup> California Air Resources Board (2020). Proposed advanced clean truck regulation. Appendix A - proposed regulation order. Extrait de <https://ww3.arb.ca.gov/regact/2019/act2019/30dayatta.pdf>, page 5-6.

<sup>208</sup> Legifrance (2016). Code de la route. Extrait de <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000032401242&cidTexte=LEGITEXT000006074228&dateTexte=20160415>, Article R312-4.

<sup>209</sup> Airparif (2019). Émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre. Métropole du Grand Paris (MGP) - Année 2015. Extrait de [https://www.airparif.asso.fr/\\_pdf/publications/emissions\\_ges\\_mgp\\_donnees2015\\_30012020.pdf](https://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/emissions_ges_mgp_donnees2015_30012020.pdf), page 36.

---

<sup>210</sup> Ministère de la Transition écologique et solidaire (2019). Certificats qualité de l'air : Crit'Air. Extrait de <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/certificats-qualite-lair-critair>

<sup>211</sup> Ministère de la Transition écologique et solidaire (aucune date). Classement certificat qualité de l'air poids lourds, autobus et autocar. Extrait de <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Tableau%20de%20classification%20-%20poids%20lourds.pdf>

<sup>212</sup> Otten et al. (2019). Charging infrastructure for electric vehicles in city logistics. Extrait de <https://www.cedelft.eu/en/publications/2356/charging-infrastructure-for-electric-vehicles-in-city-logistics>, page 24-30.