

Rapport d'étude

N° 03 | 2021

Revue des pratiques
internationales pour décarboner
le transport des marchandises et
perspectives pour le contexte
québécois

Christian Yameogo



Revue des pratiques internationales pour décarboner le transport des marchandises et perspectives pour le contexte québécois

Christian Yameogo

Étudiant à la Maîtrise en management et développement durable, HEC Montréal

Projet d'intégration réalisé sous la supervision de Pierre-Olivier Pineau, professeur titulaire, Département de sciences de la décision, et titulaire de la Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal.

Note aux lecteurs : Les rapports d'étude de la Chaire de gestion du secteur de l'énergie sont des publications aux fins d'information et de discussion. Ils ont été réalisés par des étudiants sous la supervision d'un professeur. Ils ne devraient pas être reproduits sans l'autorisation écrite du (des) auteur(s). Les commentaires et suggestions sont bienvenus, et devraient être adressés à (aux) auteur(s).

À propos de la Chaire de gestion du secteur de l'énergie : La Chaire de gestion du secteur de l'énergie de HEC Montréal a pour mission d'augmenter les connaissances sur les enjeux liés à l'énergie, dans une perspective de développement durable, d'optimisation et d'adéquation entre les sources d'énergie et les besoins de la société. La création de cette chaire et de ce rapport est rendue possible grâce au soutien d'entreprises partenaires.

Chaire de gestion du secteur de l'énergie

HEC Montréal

3000, chemin de la Côte-Sainte-Catherine

Montréal (Québec) H3T 2A7 CANADA

energie.hec.ca

Juin 2021

©2021 HEC Montréal. Tous droits réservés. Les textes publiés dans la série des rapports d'étude n'engagent que la responsabilité de(s) auteur(s)

Table des matières

Résumé	5
Introduction	6
1 Contexte et enjeux du secteur des transports	7
1.1 Portrait global et émission de GES	7
1.2 Portrait du transport au Québec : consommation d'énergie et émission de GES	9
2 Méthodologie de recherche	13
3 Tarification et mesures incitatives du secteur des transports	14
3.1 Exonération des redevances d'usage routier pour les véhicules électriques lourds (Nouvelle-Zélande)	14
3.2 La tarification des poids lourds basée sur la distance (UE)	15
3.3 Tarifs de péage fondés sur la distance (Allemagne)	16
3.4 La taxe sur les véhicules basée sur les émissions de CO ₂ (Royaume-Uni)	17
3.5 Surveillance et déclaration des émissions de CO ₂ des véhicules lourds (UE)	18
3.6 Constats sur la tarification et les mesures incitatives.	19
4 Transfert modal et intermodalité	21
4.1 Le corridor multimodal de la Chine	22
4.2 Le transport multimodal en Belgique	22
4.3 Le projet multimodal Geodis (Espagne-Allemagne)	23
4.4 Le projet européen de transfert modal TRANS TRITIA	24
4.5 La Suisse met en place un « transfert route-rail des transports de marchandises à travers les Alpes inscrit dans la Constitution fédérale »	25
4.6 Constats sur le transfert modal et l'intermodalité	28
5 Les technologies réduisant les émissions de CO₂	30
5.1 Électrification des transports : corridors électriques et système de caténaires	30
5.1.1 Corridors électriques	30
5.1.2 Les systèmes de routes électriques (système de caténaire)	31
5.1.3 Constats sur l'électrification des transports	34
5.2 Les carburants alternatifs	35
5.2.1 Le projet Clean Energy Partnership (Allemagne)	36
5.2.2 Le réseau japonais de stations à hydrogène	37
5.2.3 La California Fuel Cell Partnership	37
5.2.4 Déploiement pilote d'un réseau GNC/GNL intelligent en Flandres (Belgique)	38
5.2.5 Le projet « Causeway » : un réseau public de GNC (Irlande)	39
5.2.6 Constats sur les carburants alternatifs	39
5.3 Efficacité énergétique et performance environnementale du transport routier : Les normes d'économie de carburants	41
5.3.1 Cas de l'Union européenne (UE 2019/1242)	42
5.3.2 Normes d'efficacité de la Chine	43
5.3.3 Normes d'efficacité de l'Inde pour les véhicules poids lourds	43

5.3.4	Normes d'émissions de GES pour les moteurs et véhicules à usages moyen et lourd (É.-U.)	45
5.3.5	Constats sur les normes d'efficacité.....	46
6	TIC et systèmes de transports intelligents (STI)	46
6.1	Le projet LOGICAL ou l'informatique en nuage au service de la coordination logistique (UE).....	47
6.2	Le programme « SmartWay » (États-Unis).....	47
6.3	Le projet « Mobilidata » (Belgique)	48
6.4	Constats sur les TIC et les STI.....	49
7	Synthèses de quelques politiques et instruments de transport durable.....	50
8	L'avenir du secteur des transports de marchandises au Québec : perspectives et pistes d'action	53
	Conclusion.....	59
	Annexes.....	61
	Annexe 1. Allemagne : Mesures et politiques en transport durable de marchandises.....	61
	Annexe 2. Belgique : Mesures et politiques en transport durable de marchandises	62
	Annexe 3. Californie : Mesures et politiques en transport durable de marchandises	63
	Annexe 4. Chine : Mesures et politiques en transport durable de marchandises.....	64
	Annexe 5. France : Mesures et politiques en transport durable de marchandises	65
	Annexe 6. Irlande : Mesures et politiques en transport durable de marchandises	66
	Annexe 7. Japon : Mesures et politiques en transport durable de marchandises	67
	Annexe 8. Royaume-Uni : Mesures et politiques en transport durable de marchandises....	68
	Annexe 9. Suède : Mesures et politiques en transport durable de marchandises.....	69
	Annexe 10. Suisse : Mesures et politiques en transport durable de marchandises.....	70
	Références bibliographiques	71

Résumé

Les projections de l'OCDE (2021) indiquent une hausse de la demande mondiale en transport de marchandises d'au moins 18% d'ici 2030 par rapport à 2020 et un doublement d'ici 2050. Ce secteur contribue grandement aux émissions de gaz à effet de serre (GES) et un contrôle de ces émissions est essentiel. Pour limiter les impacts du secteur de transports, plusieurs pays ont adoptés des politiques et des pratiques favorisant une transition vers des transports durables. Comment le Québec pourra-t-il répondre à la demande croissance du secteur des transports de marchandises tout en respectant ses engagements de réduction des émissions de GES ?

L'objet de ce rapport d'étude est de passer en revue les pratiques mise en œuvre à l'international dans des contextes pertinents ou assez similaires au Québec. Au regard de ces expériences, des pistes d'action pratiques pour le Québec peuvent être envisagées.

Partant d'une brève description de l'évolution des émissions de GES du secteur des transports au niveau mondiale et au Québec, le rapport aborde dans sa deuxième section les pratiques et politiques de transport tout en analysant les avantages, les inconvénients et les obstacles qui leurs sont associés. Ainsi, nous explorons dans cette section les pratiques tarifaires et incitatives mises en œuvre pour décarboner le secteur des transports de marchandises, les pratiques de transfert modal notamment du secteur routier vers le rail et les voies navigables. Nous abordons également les technologies réduisant les émissions de GES telles que l'électrification, les carburants alternatifs, les normes d'efficacité et les systèmes de transport intelligent (STI).

Une troisième section présente une synthèse des instruments politiques et tarifaires des transports de marchandises de quelques pays et leurs impacts sur les émissions de GES du transport lourd.

Enfin, la dernière section propose six grandes familles de pistes d'action pour les acteurs du transport lourd au Québec. **1. Tarification et mesures incitatives** : développer les signaux de prix pour accompagner la transition. **2. Transfert modal** : optimiser les modes de transport moins énergivores (trains et bateaux). **3. Électrification** : soutenir le déploiement d'électrotechnologies. **4. Carburants alternatifs** : soutenir les carburants émergents. **5. Efficacité énergétique** : réaliser des progrès sur les véhicules. **6. TIC et STI** : développer une meilleure efficacité logistique par les technologies de l'information et les systèmes de transport intelligents.

Introduction

Le réchauffement climatique résultant des émissions de gaz à effet de serre (GES) n'aura jamais autant été au cœur des préoccupations socio-économiques et environnementales. Les objectifs de développement durable des Nations unies, l'Accord de Paris et plusieurs autres ententes internationales reflètent un certain engagement de la communauté internationale pour parvenir à un développement moins problématique pour les écosystèmes terrestres.

Le Canada, à l'instar de plusieurs pays signataires de l'Accord de Paris (COP21), s'est engagé avec les gouvernements provinciaux dans une quête d'alternatives pour contenir le réchauffement climatique par la réduction de leurs émissions de GES. C'est ainsi qu'en 2016 le Québec présentait sa politique énergétique 2030 avec pour ambition de réaliser une transition énergétique (Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles, 2016). Selon Transition Énergétique Québec (2018), une telle transition correspond à l'abandon progressif des combustibles fossiles en faveur des diverses formes d'énergies renouvelables. Elle correspond également à des changements dans les comportements, dans le but d'éliminer la surconsommation et le gaspillage d'énergie, et à l'émergence d'une culture de sobriété et d'efficacité énergétique.

S'engager dans la décarbonation de l'économie signifie s'attaquer en priorité à la situation qui prévaut dans le secteur des transports où vont 8 2% des produits pétroliers consommés au Québec (TEQ, 2018). En 2018, le secteur des transports comptait à lui seul pour 44,78 % des émissions de GES du Québec (MELCC 2020), faisant de lui le premier secteur pollueur.

Les émissions de GES du sous-secteur des transports de marchandises sont en forte croissance depuis plusieurs années et cela à cause de l'augmentation du commerce intérieur, interprovincial et international. Ce sous-secteur génère à lui seul environ 40 % des émissions de GES de l'ensemble du secteur des transports au Québec et pourrait d'ailleurs dépasser les émissions du transport des passagers d'ici 2030. Les contributeurs aux émissions du transport de marchandises sont le transport routier par camion avec 79 % des émissions totales du secteur, suivi du transport maritime (14 %), ferroviaire (6 %) et aérien (0,7 %) (CPQ, 2017).

Cet état de fait et l'attention déjà portée sur le transport des personnes et le transport urbain justifient le choix porté sur le transport des marchandises dans le cadre de ce travail de recherche. Nous exposerons dans un premier temps un bref portrait global des émissions de GES ainsi que

les émissions du secteur du transport au Québec, afin de saisir son importance dans la crise climatique. Nous explorerons ensuite les pratiques internationales de transports durables qui pourront faciliter la transition vers la carboneutralité afin de faire des suggestions qui pourraient s'appliquer au contexte québécois.

1 Contexte et enjeux du secteur des transports

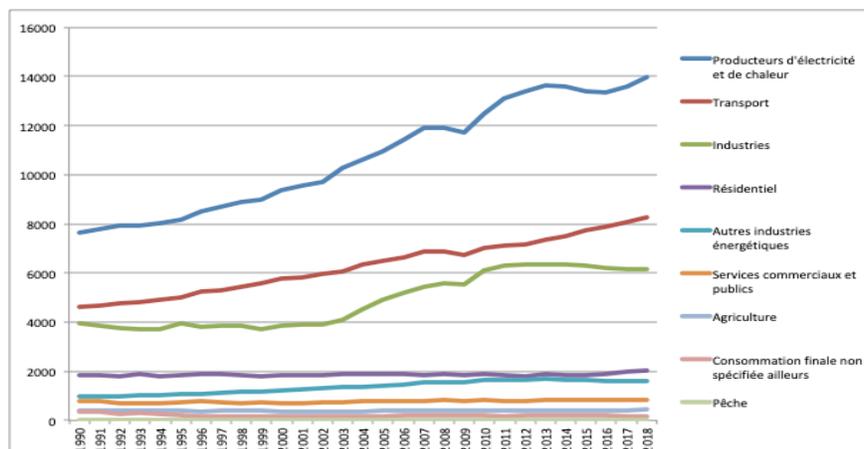
1.1 Portrait global et émission de GES

Il n'y a aucun doute que le transport joue un rôle essentiel dans le système économique, social et environnemental. C'est aussi un secteur qui est très dépendant des énergies fossiles et impose un fort coût pour la société, du point de vue de la santé, de la pollution atmosphérique, des nuisances sonores et des accidents, de la congestion et plus généralement, des dommages causés à l'environnement. Environ 90% de ces effets néfastes du secteur sont habituellement attribués au mode routier, dont un quart au transport routier de marchandises (Commission des communautés européennes, 2008). Ainsi les émissions de GES du secteur des transports restent encore problématiques et probablement le plus grand enjeu en matière de durabilité.

Selon les données de l'IEA, les émissions globales de CO₂ après une relative stabilité entre 2014 et 2016, ont renoué avec la croissance en 2017 atteignant le niveau de 32,8Gt éq.CO₂¹ (IEA, 2021). Le transport, l'industrie, ainsi que la production d'électricité et de chaleur, constituent à eux seuls près de 85% des émissions totales (IEA, 2021 ; figure 1). Au niveau mondial, les émissions de GES provenant du secteur des transports ont augmenté en moyenne de 2% par an sur la période 2000-2018, passant de 5,77 Gt éq.CO₂ à 8,25 Gt éq.CO₂ (IEA, 2021). La part du secteur des transports représentait près du quart des émissions mondiales en 2018 (IEA, 2021).

¹ Gt éq.CO₂ : Gigatonne équivalent CO₂

Figure 1 : Émission mondiale de CO₂ par secteur, période de 1990-2018 (Mt éq.CO₂²)



Source : IEA, Données et statistiques 2021

Quant au transport spécifique de marchandises, la demande mondiale de fret a atteint 108 000 milliards de tonnes-kilomètres en 2015, dont 70 % sont effectuées par voies maritimes, 18% par route, 9 % par rail, 2 % par voies navigables intérieures et 0,25 % par voies aériennes (OCDE 2019). Selon les projections de l'OCDE, le transport de marchandises connaîtra une croissance annuelle de 3,4% entre 2015 et 2050 (ce qui équivaut à plus que tripler le niveau de transport de marchandise de 2015 en 2050), entraînant ainsi une forte demande en énergie et donc une hausse des émissions de GES, si rien n'est fait. Le volume du transport de marchandises par voies intérieures (routes, rail, voies navigables intérieures) connaîtra ainsi une hausse de 182 % sur cette même période (OCDE, 2019).

Une analyse sommaire de l'évolution des émissions de GES des camions lourds et autobus de quelques pays (figure 2) pour la période 1990-2018 laisse entrevoir des divergences extrêmes. Par exemple des pays comme le Japon (-16 %), le Royaume-Uni (-7 %), et la Suède (-7 %) ont réussi à faire baisser leurs émissions. D'autres pays comme la France (1 %), la Suisse (19 %), et la Belgique (30 %) ont connu des hausses plus ou moins modérées alors que des pays comme l'Irlande (144 %) ou le Canada (228 %) ont littéralement vu leurs émissions de GES s'envoler (UNCC, 2021).

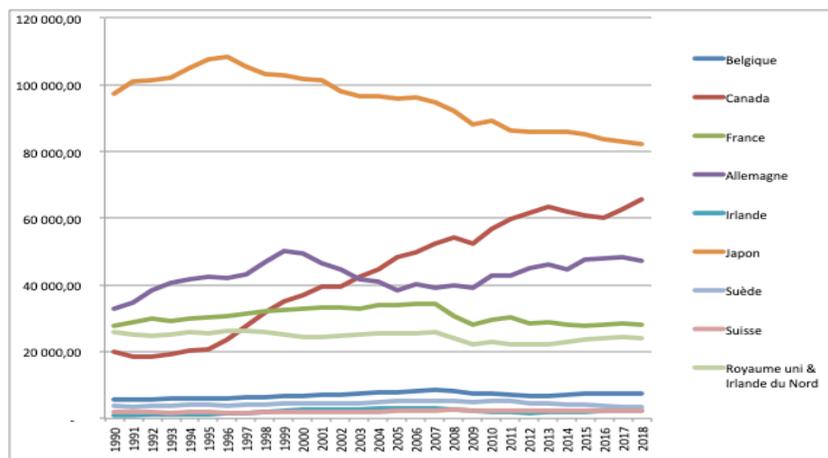
Au regard de cette situation, les politiques publiques et les actions visant la décarbonation de l'économie ne sauraient faire fi du secteur des transports notamment du transport de

² Mt éq.CO₂ : Mégatonne équivalent CO₂

marchandises. D'ailleurs les actions prioritaires de plusieurs pays sont alignées suivant les secteurs les plus énergivores comme le transport, et donc les plus polluants également.

Selon les projections de l'agence internationale de l'énergie dans le scénario de développement durable (SDD), les émissions du secteur devraient passer de 8,2 Gt éq.CO₂ en 2020 à 7,5 Gt éq.CO₂ en 2030 soit une baisse moyenne de 3,2% par an pour remettre les transports sur la voie du SDD (IEA, 2020³). Cependant, les mesures existantes pour accroître l'efficacité et réduire la demande en énergie du secteur des transports demeurent insuffisantes pour l'atteinte de cet objectif.

Figure 2 : Émission de GES des camions lourds et autobus de quelques pays, période de 1990-2018 (Kt éq.CO₂⁴)



Source : Base de données de la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques

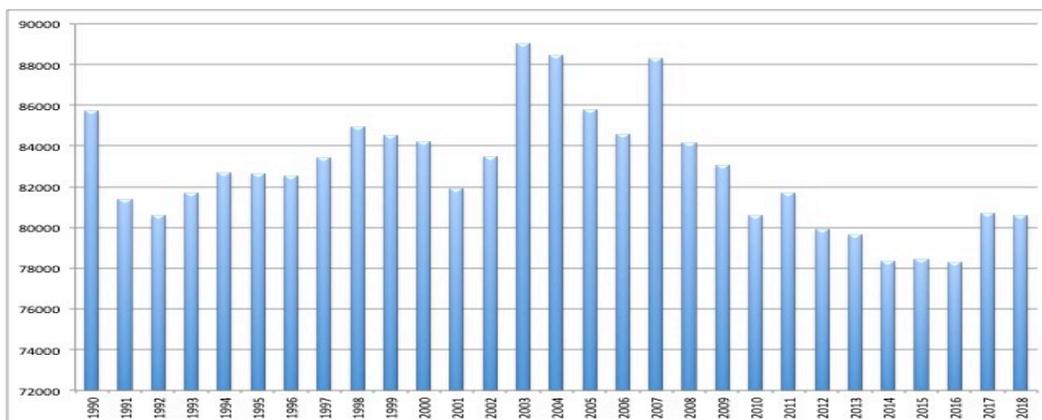
1.2 Portrait du transport au Québec : consommation d'énergie et émission de GES

En 2019, la consommation finale d'énergie du secteur des transports représentait 30 % de la consommation mondiale et 23 % des émissions directes de CO₂ du secteur de l'énergie (IEA, 2020). Au Canada et au Québec, la situation n'est guère plus reluisante malgré les engagements sur l'Accord de Paris et les différents outils mis en place pour réduire les émissions de GES. Si dans l'ensemble le Québec a réussi à réduire ses émissions pour la période de 1990 à 2018 (figure 3), un regard sur les émissions annuelles laisse entrevoir que cette diminution connaît un plateau depuis 2014 et que pour le secteur des transports, les émissions de GES ont malheureusement connu des hausses inquiétantes durant la même période.

³ IEA 2020, *Tracking transport*, <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020>

⁴ Kt éq.CO₂ : kilotonne équivalent CO₂

Figure 3 : Évolution des émissions annuelles de GES de 1990 à 2018

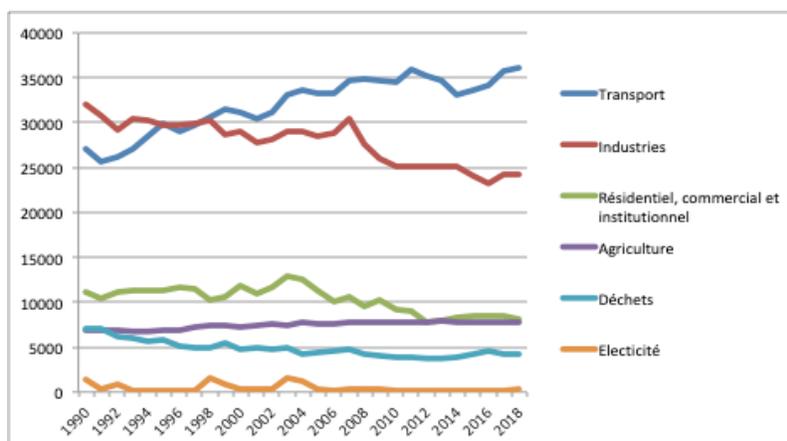


Source : IQÉA⁵, Direction générale de la réglementation carbone et des données d'émission, 2020

De façon globale, les émissions totales ont connu une baisse de 6 % sur la période 1990-2018, passant de 85,7 Mt eq.CO₂ à 80,6 Mt eq.CO₂ (MELCC 2020). Cependant, malgré cette tendance à la baisse observée sur les émissions totales, les émissions du secteur des transports ont continué à croître de manière significative sur la période. Selon l'inventaire québécois des émissions de GES, le secteur des transports représente le plus gros poste des émissions de GES avec des émissions annuelles estimées à 36,09 Mt eq.CO₂ en 2018 contre 27,07 Mt eq.CO₂ en 1990 (MELCC, 2020), soit une hausse de 33 % sur la période. La contribution du secteur en 2018 aux émissions totales du Québec était de 44,78 % confirmant ainsi sa première place d'émetteur de GES. En termes d'évolution, c'est également le secteur qui a le plus connu une évolution marquée comme nous le montre la figure 4. Outre le secteur de l'agriculture qui accompagne les transports avec une légère hausse, tous les autres secteurs ont connu une baisse de leurs émissions de GES pour la période 1990-2018 (figure 4).

⁵ IQÉA : Inventaire québécois des émissions atmosphériques

Figure 4 : Évolution des émissions de GES au Québec par secteur d'activité entre 1990-2018 (Kt éq.CO₂)



Source : IQÉA, Direction générale de la réglementation carbone et des données d'émission, 2020

Si la situation est alarmante pour le sous-secteur routier, elle l'est moins avec les autres sous-secteurs tels que les transports aérien, maritime, ferroviaire et autres. En effet, comme nous le montre le tableau 1, ces sous-secteurs mis ensemble ne représentent qu'environ 20 % des émissions du secteur des transports et 9,13 % des émissions totales en 2018.

Bien qu'il soit difficile de mesurer et de quantifier l'activité de camionnage au Québec de façon précise, les acteurs s'accordent sur le fait que le camionnage occupe une place de premier plan dans le transport de marchandises. Selon les données de la direction générale et de la sécurité du camionnage et en tenant compte uniquement des déplacements interurbains, les camions parcourent chaque semaine 102,6 millions de kilomètres chargés de 2,8 millions de tonnes de marchandises (DGSC, 2018).

Tableau 1 : Émission de GES du secteur des transports au Québec entre 1990 et 2018

Secteur d'activité	Émissions (Kt éq.CO ₂)		Variation des émissions de 1990 à 2018		Part du secteur en %
	1990	2018	Kt éq.CO ₂	%	
Transport routier	18 116	28 734	10 618	58,6	35,65
Autres transports	6 802	4 906	-1 896	-27,9	6,09
Transport aérien	820	839	19	2,3	1,04
Transport ferroviaire	567	696	129	22,8	0,86
Transport maritime	768	919	151	19,7	1,14

Source : IQÉA, Direction générale de la réglementation carbone et des données d'émission, 2020

Ainsi, pour agir dans le but de limiter le réchauffement climatique au Québec, il devient évident que les actions prioritaires doivent porter sur les secteurs ayant une contribution importante aux

effets des changements climatiques. Le secteur des transports devient alors le secteur d'intervention prioritaire pour amorcer une transition durable. C'est ainsi que dans le plan directeur de transition énergétique Québec, le gouvernement s'est fixé comme objectif la réduction de 5 % de la consommation des produits pétroliers pour la période 2018-2023, ainsi que l'amélioration de l'efficacité énergétique de 1 % annuellement sur la même période (TEQ, 2018).

2 Méthodologie de recherche

Bien que le secteur des transports suscite plusieurs problématiques en matière d'environnement et de durabilité dont entre autres la pollution, les nuisances sonores, la congestion, etc., le domaine problématique auquel nous nous intéressons dans le cadre de ce travail concerne les émissions de GES et les options pour une décarbonation du sous-secteur des transports de marchandises au Québec. L'objectif de ce projet est de faire une revue et une analyse des principales mesures, options ou pratiques de transports durables afin de mieux comprendre les options ou combinaisons d'options de politiques, pratiques, technologies, etc., qui sont envisageables pour éviter, réduire et éliminer les émissions de GES de ce secteur au Québec. Pour ce faire, nous avons choisi d'orienter nos recherches vers les pays de l'Union européenne et de l'OCDE, ainsi qu'en Chine, en Inde, au Japon et en Californie. Même si ce choix peut représenter une limite et un biais dans cette étude, il se justifie non seulement par les similitudes de niveau de développement et d'enjeux entre le Québec et certains de ces pays, mais aussi par l'importance (économique et démographique) d'autres pays comme la Chine et l'Inde.

Dans les sections suivantes, nous analyserons les instruments de tarification, de réglementations (normes d'efficacité) et d'incitatifs financiers ainsi que des pratiques pour promouvoir le transfert modal. Nous explorerons également les options de carburants alternatifs (biocarburant, GNC/GNL, hydrogène) et quelques technologies telles que l'électrification et les systèmes de transport intelligent, qui permettent de réduire les émissions à travers les gains d'efficacité énergétique. Cela consistera principalement à présenter les meilleures pratiques mises en œuvre à l'internationale pour mitiger les impacts du transport de marchandises et à faire une analyse des avantages et des limites de ces options. Nous présenterons enfin une analyse synthèse de quelques pratiques internationales pour ensuite identifier des pistes d'action pour une décarbonation du transport de marchandises dans le contexte québécois.

3 Tarification et mesures incitatives du secteur des transports

Au regard de l'importance du prix dans les décisions des acteurs économiques, la tarification est un moyen assez efficace pour induire un changement dans l'offre et la demande de transport. La hausse du prix du transport routier par exemple, aura l'avantage de mener à une baisse de la demande (toute chose étant égal par ailleurs) et de « *promouvoir les modes de transports ferroviaires et fluviaux plus économes en énergie et donc plus durables* » (Institute for Transport Studies, 2010). Dans cette section nous examinerons quelques exemples de tarification et de mesures incitatives pour encourager l'utilisation de modes de transports durables.

3.1 Exonération des redevances d'usage routier pour les véhicules électriques lourds (Nouvelle-Zélande)

La Nouvelle-Zélande à travers son « programme véhicule électrique » mis en place en 2016, vise à atteindre 64 000 nouvelles voitures électriques d'ici la fin de 2021. Dans la même perspective, elle compte rehausser à 2 % la proportion des véhicules électriques dans son parc de véhicules lourds. Pour y parvenir, la Nouvelle-Zélande a mis en place des incitatifs tels que l'exemption de la taxe kilométrique (appelée « Road User Charge », RUC) pour les véhicules électriques lourds, ainsi que l'accès des véhicules électriques aux voies réservées aux véhicules spéciaux⁶. Cette taxe s'applique aux véhicules dont le poids est supérieur à 3,5 tonnes et varie entre 7,2 et 41,3 cents NZD⁷ par km (soit de 6,4 à 37 cents Canadiens), selon le poids et le type de véhicule. À partir du 1^{er} juillet 2020, cette taxe a connu une hausse et oscille désormais entre 7,6 et 43,5 cent NZD (New Zealand Transport Agency, 2021). Grâce à cette augmentation, le ministère des Transports prévoit que les recettes supplémentaires de la RUC seront de 89 millions en 2020 (79 million Can\$) et pourront atteindre 158 millions en 2025 (141 millions Can\$) (New Zealand Ministry of Transport 2019), ce qui permettra de compenser les pertes liées à la mesure d'exemption.

Ces mesures sont issues de la loi de 2017 portant modification de la loi sur l'innovation énergétique (véhicule électrique et autres questions) qui a modifié la loi de 1998 sur les transports terrestres (Nouvelle-Zélande, 2017). Si la Nouvelle-Zélande a mis l'accent sur les incitatifs pour l'utilisation de véhicules électriques, c'est en partie à cause que 80% de son électricité est issue

⁶ Ministry of transport (New Zealand), *Electric vehicles program*, <https://www.transport.govt.nz/area-of-interest/environment-and-climate-change/electric-vehicles-programme/#stageaccordionitem-307>

⁷ NZD : New Zealand Dollar

de sources renouvelables et qu'elle dispose d'un bon approvisionnement pour alimenter les véhicules électriques de manière durable⁸. Cette exonération de taxe routière est entrée en vigueur depuis le 1er septembre 2017 et court jusqu'au 31 décembre 2021, date à laquelle, une évaluation devrait permettre de mesurer son efficacité à atteindre les objectifs fixés.

3.2 La tarification des poids lourds basée sur la distance (UE)

La commission des communautés européennes soutient dans sa proposition de directive relative à la taxation des poids lourds pour l'utilisation de certaines infrastructures, que les péages sont les meilleurs instruments de tarification pour imputer aux utilisateurs de manière équitable et efficace, les coûts externes d'utilisation des infrastructures (COM 2008, 436). Selon toujours la commission, les péages, à la différence des taxes sur le carburant, peuvent varier en fonction des normes d'émission des véhicules et, à la différence des taxes sur les véhicules ou des redevances d'utilisation fondées sur la durée (vignettes), ils peuvent varier en fonction de l'intensité de l'utilisation du réseau, du lieu ou du moment d'utilisation. L'existence de méthodes permettant de traduire en valeur monétaire les externalités telles que la pollution, la congestion, etc., permet de faire recours à des redevances d'infrastructures différenciées qui intègrent les coûts externes. La cible de l'Union européenne en matière de réduction des émissions des transports est claire : « d'ici au milieu du siècle, les émissions de gaz à effet de serre dues aux transports devront être inférieures d'au moins 60 % à leur niveau de 1990 et tendre résolument vers un taux zéro » (COM 2011, 144). La directive 1999/62/CE entérine alors le principe de « l'utilisateur-payeur » en autorisant les États membres à prélever des redevances fondées sur la distance parcourue (péages) pour couvrir les coûts de construction, d'entretien et d'exploitation des infrastructures (COM 2008, 436). Selon la directive, les taux de péage peuvent varier en fonction des normes d'émission des véhicules ou des niveaux de congestion, à condition que cette variation n'ait pas d'incidences sur les recettes sur une période de deux ans. Cette solution n'a toutefois pratiquement pas été appliquée, à part en Allemagne et en République tchèque. L'une des raisons est qu'il est très compliqué, pour les exploitants, d'adapter les tarifs en fonction de la réaction du côté de la demande tout en conservant des recettes constantes. L'analyse d'impact effectuée par la Commission donne à penser qu'une différenciation même légère des péages calculés en fonction du coût de la pollution atmosphérique et sonore due au trafic et du coût de la congestion subie par les autres véhicules entraînerait des avantages sociaux considérables : gain de temps, réduction de

⁸ TOYOTA New Zealand, *Government Electric Vehicles Targets* <https://www.toyota.co.nz/our-range/the-toyota-difference/hybrid/hybrid-electric-government-incentives/>

la pollution, amélioration de la sécurité routière et optimisation de l'utilisation des infrastructures et du système de transport en général. La diminution du volume de carburant gaspillé dans les embouteillages permettrait en outre de réduire les émissions de CO₂ résultant du transport routier. (COM 2008, 436).

3.3 Tarifs de péage fondés sur la distance (Allemagne)

Les tarifs de péage fondés sur la distance en Allemagne ont été introduits en 2005 sur les autoroutes allemandes pour les camions dont le poids brut du véhicule est égal ou supérieur à 12 tonnes. Cette tarification découle de la directive 1999/62/CE de l'Union européenne autorisant les États membres à appliquer le principe de l'utilisateur-payeur sur les infrastructures routières. Comme mentionné plus haut, cette directive qui ne prenait en compte que les coûts de construction et d'entretien a été amendée en 2011 (Directive 2011/76/CE) pour permettre l'internalisation des autres coûts tels que la pollution atmosphérique et sonore.

En tant que pays de transit le plus important d'Europe, les routes allemandes sont utilisées par un grand nombre de camions qui, dans la mesure permise par leurs itinéraires, font le plein de carburant à l'étranger pour des raisons de coût. Ces soi-disant « importations grises » conduisent à la conclusion que le péage poids lourds est le seul moyen fiable de forcer les camions opérants à l'international à participer au financement des infrastructures routières allemandes et à partager la charge des autres coûts qu'ils encourent (par ex. en raison de la pollution atmosphérique, sonore, GES, etc.). Cette forme de tarification (péage) est actuellement en vigueur sur à peu près 40 000 km de routes fédérales et 2 300 km d'autoroutes fédérales. La limite maximale de poids sans frais pour les véhicules est passée de 12 à 7,5 tonnes depuis le 1er octobre 2015 (Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI) 2018). En 2017, le rapport sur les coûts d'infrastructure du gouvernement fédéral fixait le niveau de péage entre 9,3 et 26,1 cents d'Euro par kilomètre poids lourds sur les autoroutes fédérales. Avec l'extension du système de péage poids lourds à toutes les routes nationales fédérales et l'ajustement des tarifs de péage au 1er janvier 2019, les revenus moyens annuels attendus sur la période 2019-2022 sont de 7,2 milliards d'euros. En 2020, le dispositif a généré environ 7,4 milliards d'euros (Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI) 2021). Une partie de ces recettes sert de fonds de subvention pour les entreprises de transport allemandes, afin de permettre le renouvellement de leur flotte de camions avec des véhicules à faibles émissions. (Frey et al. 2015).

Comme nous l'avons mentionné plus haut l'Allemagne est l'un des États membres de l'Union européenne ou la tarification des poids lourds fondée sur la distance et qui combine le financement des utilisateurs avec le principe de pollueur-payeur, est la plus réussie et socialement acceptée.

3.4 La taxe sur les véhicules basée sur les émissions de CO₂ (Royaume-Uni)

Le changement opéré dans le régime de taxation des véhicules au Royaume-Uni est considéré comme un succès. Dans le nouveau système, les véhicules ne sont plus taxés en fonction de la cylindrée du moteur, mais uniquement sur la base des émissions de CO₂ par kilomètre. La taxe annuelle sur les véhicules basée sur les émissions de CO₂ au Royaume-Uni est rentrée en vigueur le 1^{er} avril 2017 et concerne tous les types de véhicules. En effet le paiement de la taxe se fait lors de la première immatriculation du véhicule et cela devrait couvrir les douze premiers mois d'utilisation. La taxe est aussi tributaire du niveau d'émission d'oxyde d'azote (NO_x). Lorsque le véhicule ne répond pas à la norme « *Real Driving Emission 2 (RDE2⁹)* », un taux plus élevé s'applique au paiement annuel. La norme RED2 stipule que les émissions d'oxyde d'azote des nouveaux véhicules au Royaume-Uni et en Europe ne doivent pas dépasser 0,080g/km (BVRLA, 2018). Le tableau 2 présente les informations du coût de la taxe annuelle (£) en fonction du niveau d'émission de CO₂ et de RDE2.

Tableau 2 : Taux de la taxe annuelle en £ en fonction du niveau de CO₂ et de NO_x.

Niveau d'émission CO ₂ (g/km)	0	1-50	51-70	71-90	91-100	101-110	111-130	131-150	151-170	171-190	191-225	226-255	> 255
Véhicules à carburant alternatif	0	0	15	100	125	145	165	205	530	860	1 295	1 840	2 165
Véhicules diesel conformes à la norme RDE2	0	10	25	110	135	155	175	215	540	870	1 305	1 850	2 175
Autres véhicules diesel	0	25	110	135	155	175	215	540	870	1.305	1 850	2 175	2 175

Source: GOV.UK, Vehicle tax rates

Ainsi, plus le niveau d'émission de CO₂ augmente, plus le taux de taxe est élevé. Les paiements à partir de la deuxième année sont basés sur le type de carburant utilisé. Pour les véhicules électriques, les paiements annuels restent nuls sur la durée de vie du véhicule. Pour les véhicules à carburants alternatifs notamment les hybrides, le bioéthanol et le gaz liquéfié, le taux annuel moyen est de £147 à partir de la deuxième année. Quant aux véhicules diesel ou à essence, le

⁹ BVRLA, <https://www.bvrla.co.uk/resource/what-is-an-rde2-vehicle.html>

taux annuel est de £157,5 (IEA, 2017). Lorsque le prix catalogue d'un véhicule dépasse £40 000, alors le taux de taxe est basé sur les émissions de CO₂ la première année comme l'indique le tableau 2. Cependant, après la première année, le tarif dépend du type de carburant et d'un tarif supplémentaire de £340 pour les cinq prochaines années. Après ces 5 ans, le véhicule sera alors taxé à l'un des taux standards (0£, 147£, ou 157,5£, selon le type de véhicule) (IEA, 2017). La taxe basée sur les émissions de CO₂ et de NO_x ne tient pas compte de la taxe sur les carburants. Cette approche vise à encourager le renouvellement de la flotte par des véhicules à émission nulle et réduire les émissions des camions de 15% en 2025 par rapport au niveau de 2015 comme stipulé dans la stratégie « The Road to Zero » (UK. Department of Transport, 2018). Cette taxation différenciée basée sur les émissions de CO₂ est également mise en œuvre dans plusieurs autres pays comme la Croatie, l'Allemagne, l'Espagne, etc. Par exemple en Espagne, la taxe d'immatriculation appliquée depuis 2017 est de 0 % pour les véhicules dont les émissions sont moins de 120g/km, 4,75 % pour la tranche 120-160g/km, de 9,75 % pour la tranche 160-200g/km et de 14,75 % pour des émissions de plus de 200g/km (IEA, 2019).

3.5 Surveillance et déclaration des émissions de CO₂ des véhicules lourds (UE)

Cette mesure est née de la volonté de l'Union européenne d'acquérir une connaissance complète de la configuration du parc de véhicules lourds dans l'union, de son évolution dans le temps et de son impact potentiel sur les émissions de CO₂. Elle devrait également permettre la promotion des véhicules à faibles émissions en favorisant la concurrence entre les constructeurs à travers la diffusion transparente des spécifications techniques et des performances associées (Règlement UE 2018/956). C'est suite au règlement UE 2017/2400 qui oblige les constructeurs de véhicules lourds à surveiller et à communiquer à la Commission, les émissions de CO₂ et sur la base de l'expérience similaire avec les véhicules utilitaires légers à travers le règlement (UE) n°510/2011, que ce règlement est bâti. Entrée en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2019, ce règlement oblige chaque État membre à collecter auprès des constructeurs de véhicules lourds, les données requises puis à les transmettre à la commission. Ils sont également chargés à travers les autorités compétentes de surveiller et de vérifier les résultats des essais sur route pour la consommation de carburant et les émissions de CO₂. La commission dispose également d'un pouvoir coercitif pour infliger des amendes aux constructeurs qui ne soumettent pas leurs données dans les délais ou qui fournissent des données divergentes ou erronées. Ces amendes qui peuvent atteindre un

maximum de 30.000 euros par véhicules pourraient s'avérer assez dissuasives et permettre l'atteinte de l'objectif du présent règlement.

3.6 Constats sur la tarification et les mesures incitatives.

Les mesures incitatives et de tarification sont des instruments politiques essentiels de l'efficacité énergétique. Elles ont généralement pour objectif d'accélérer l'adoption de technologies à faible émission de carbone ou de faciliter le transfert vers d'autres modes de transports moins polluants et cela dans le but de réduire les émissions de GES liées au transport. La collecte de taxe ou de péage permet aussi de financer entre autres les infrastructures qui seraient requises par les technologies énergétiques alternatives à faible et à zéro émission (électrification, carburants alternatifs).

Si ces mesures ont largement fait leurs preuves avec les véhicules légers qui sortent des chaînes de production en grand nombre, ce n'est pas toujours le cas avec les véhicules utilitaires lourds qui eux sont conçus selon les besoins des transporteurs. Chaque véhicule peut s'avérer différent, ce qui rend difficile la mesure des émissions. Même si les constructeurs disposent de certaines données, elles ne sont pas comparables, et il est donc actuellement impossible de connaître le niveau exact d'émissions de CO₂ des véhicules utilitaires lourds¹⁰.

Une autre critique adressée aux mesures de tarification concerne les coûts de mise en œuvre et de fonctionnement des péages et la difficulté à internaliser tous les coûts liés à l'utilisation des infrastructures routières. Plusieurs instruments de tarification ne permettent pas encore la prise en compte de tous les effets négatifs de l'utilisation des infrastructures routières. C'est le cas des coûts d'utilisation des terres ou de la perte de biodiversité lors de la construction de routes. Si par exemple le coût du péage n'est pas déterminé de façon adéquate, il peut se révéler coûteux pour les gouvernements qui doivent déployer des infrastructures logistiques et informatiques pour le contrôle et la collecte du péage. Dans le cas contraire, il pourrait induire des changements d'itinéraires ou des transferts modaux, de sorte que les infrastructures soient sous-utilisées et donc difficiles à entretenir et à reconstruire.

Avec les multiples instruments tarifaires et les incitatifs pour promouvoir des véhicules moins polluants, la tendance des émissions ne semble pas avoir connu de répit. Cette situation est en

¹⁰ Commission européenne, Réduire les émissions de CO₂ des véhicules utilitaires lourds https://ec.europa.eu/environment/efc/news/cutting-co2-emissions-heavy-duty-vehicles-2014-08-07_fr

partie due aux émissions issues de la croissance de la demande de transport induisant ainsi l'augmentation rapide des véhicules lourds sur les routes. Dans une étude menée par Teusch et Braathen (2019) sur les bénéfices des mesures tarifaires et incitatives en France, les auteurs arrivent à la conclusion que ces mesures peuvent très souvent être plus coûteuses que les bénéfices environnementaux qu'elles génèrent.

Malgré ces défis, des mesures complémentaires pourraient permettre de lever certains obstacles liés à l'adoption de véhicules lourds à émissions faibles. Selon le rapport de l'agence internationale de l'énergie sur l'avenir des véhicules lourds, cela pourrait se faire par la mise en place d'instruments politiques technologiques favorisant l'adoption par le marché de technologies qui ne sont pas encore compétitives en termes de coûts (IEA, 2017, *The future of trucks*. p.131). Il s'agit par exemple d'un soutien à la recherche et développement à des taux d'intérêt faibles ou d'un financement vert de prêts pour l'acquisition de camions à faible émission. Quant à la disponibilité des données sur les émissions de CO₂ et la consommation de carburant des véhicules lourds, l'exemple du règlement (UE) 2017/2400 de l'Union européenne peut servir de modèle. En effet selon ce règlement, les constructeurs de véhicules lourds ont l'obligation de surveiller et de communiquer à la Commission, les émissions de CO₂ et les valeurs de consommation de carburant déterminées pour chaque nouveau véhicule lourd. Cette obligation permet d'avoir l'heure juste sur le parc de véhicules lourds ainsi que sur les émissions de CO₂.

4 Transfert modal et intermodalité

L'efficacité et le faible impact des transports ferroviaires et maritimes ne sont plus à démontrer (IEA, 2020). L'utilisation de ces deux moyens de transport permettra certainement une réduction de l'utilisation des énergies dans le transport de marchandises. L'Union européenne dans sa Directive 92/106/CEE, définit le transport intermodal ou transport combiné comme étant « le transport de marchandises pour lesquels le camion, la remorque, la semi-remorque, etc., utilise la route pour la partie initiale ou terminale du trajet et, pour l'autre partie, le chemin de fer ou une voie navigable, ou un parcours maritime... » (Article 1). Quant au transfert modal, il désigne la modification des parts de marché entre différents modes de transports, généralement du transport routier vers le ferroviaire et les voies navigables et maritimes. Woodburn et al. (2010) affirmaient d'ailleurs que le transfert de fret routier vers le rail est l'une des stratégies les plus efficaces pour réduire les émissions de CO₂ du secteur des transports de marchandises. L'intermodalité qui n'est pas en soi une source de réduction des émissions est une façon d'accroître l'efficacité de la chaîne logistique et de faciliter le transfert modal (MT, 2013). Elle permet au fret d'être transféré relativement aisément entre les modes, grâce à des unités de chargement standards telles que les conteneurs (Institute for Transport Studies 2010, p. 23). Avec les avantages d'un faible coût, d'une efficacité élevée, d'un processus simple et d'une forte accessibilité, il a été vigoureusement développé dans de nombreux pays à travers le monde et a joué un rôle important dans le transport ces dernières années.

Dans les pays européens, la renaissance du chemin de fer a été largement débattue ces dernières années. Bien que le transport ferroviaire de marchandises ait rapidement décliné au cours du dernier demi-siècle face à la concurrence du transport routier et de l'aviation, les avantages de promouvoir un transfert modal de la route et de l'air vers le rail ont été démontrés en faveur de la priorité à des modes de transport plus respectueux de l'environnement. En termes de réduction de la pollution et de la congestion causées par le transport routier et le transport aérien de marchandises sur de longues distances, le transport ferroviaire de marchandises présente des avantages potentiels significatifs par rapport aux modes routiers et aériens plus énergivores (Armstrong et Preston, 2011).

Bien qu'ils se soient toujours avérés complexes et compliqués, l'intermodalité et le transfert modal représentent des opportunités réelles pour la réduction des émissions de GES dans le secteur des transports de marchandises.

4.1 Le corridor multimodal de la Chine

La construction de ce corridor a été motivée par la forte demande en transport dû aux multiples relocalisations dans cette partie de l'Asie, des usines de fabrication de plusieurs firmes occidentales au début des années 2000. C'est ainsi qu'en 2013, le gouvernement central chinois a proposé l'initiative Belt and Road (B&R) en collaboration avec les pays de l'Association des Nations d'Asie du Sud-Est (ANASE). Tout en favorisant grandement le développement économique et social des pays de la région, le corridor présente également d'énormes défis en matière de consommation d'énergie et d'émissions de CO₂. Ce corridor commercial international terre-mer a été construit conjointement par les provinces de la Chine occidentale et les pays de l'ANASE (Jiang et al. 2019), afin de développer les échanges entre la Chine et ses voisins du Sud-Est. Ce projet devrait également permettre de connecter cet axe d'échanges avec le China Railway Express, assurant ainsi le transport de marchandises jusqu'en Europe. Cette idée a été officiellement lancée en 2017 sous le nom de New International Land-Sea Trade Corridor (ILSTC), par les gouvernements locaux de la Chine occidentale et de Singapour. L'ILSTC relie Chongqing au golfe de Beibu dans la province du Guangxi au sud par chemin de fer et à Singapour et au-delà par voie maritime, améliorant ainsi la connectivité entre la Chine occidentale, l'Asie du Sud-Est et le reste du monde. Ainsi, l'objectif assigné à l'ILSTC est de faire passer le fret intermodal de 0,1 million EVP (équivalent vingt pieds) à 0,5 million EVP pour la période 2020 à 2025.

Bien que son objectif premier n'était pas la réduction des émissions de GES du transport de marchandises, ce corridor se révèle être une opportunité de relever les défis de pollution et de congestion.

4.2 Le transport multimodal en Belgique

Aussi petite soit-elle, la Belgique figure toujours parmi les pays ayant la part la plus élevée de transport intermodal de marchandises en Europe. Le transport routier y est prédominant, avec une part de marché de 66,3% (contre 77,4% en 2000) en tonne/km. On note cependant une augmentation des parts de marché du rail (15,2% en 2011 contre 11,6% en 2000) et des voies

navigables intérieures (18,5% en 2011 contre 10,9% en 2000) (Pekin et al. 2008). Ces augmentations de parts modales du rail et des voies navigables intérieures sont la conséquence de l'adoption de certaines politiques pour impulser le développement du transport intermodal de marchandises. La première mesure belge concerne les subventions pour stimuler le transport intermodal. Ainsi en 2006-2007, le gouvernement belge a accordé environ 30 millions d'euros en subvention aux opérateurs intermodaux, qui offrent des services de transport en Belgique sur une distance minimale de 51 km (Pekin et al. 2008). Ce soutien a été progressivement réduit pour atteindre 15 millions d'euros en 2014 (Santos et al. 2015). Une deuxième mesure concerne la réduction des coûts de transport fluvial notamment les droits de canal. C'est ainsi qu'une subvention de 20 euros par conteneur est accordée en 2007 (Pekin et al. 2008). La subvention est composée d'une partie fixe (20 euros) et d'une partie variable (maximum 0,40 euro/km). Une autre mesure concernait le développement de partenariat public-privé avec les gouvernements régionaux pour favoriser les investissements dans les infrastructures intermodaux. C'est par exemple le cas du gouvernement flamand dont le programme de partenariat public-privé a permis le cofinancement de la construction de quai à 80 % par le gouvernement flamand et à 20 % par le secteur privé. Les quais restent la propriété du gouvernement flamand et les investisseurs privés garantissent qu'un tonnage fixe de fret serait transporté par voie navigable dans les dix années à venir (Pekin et al. 2008). Il faudra noter que toutes ces mesures qui ont été approuvées et autorisées par l'Union européenne ont été utilisées pour aider le transport intermodal à concurrencer les tarifs inférieurs du transport routier. Les études réalisées par Santos et al. (2015) ont démontré que les subventions accordées par le gouvernement belge étaient essentielles au succès du transfert intermodal du transport de marchandises en Belgique. Sans ces mesures, les flux dans les terminaux intermodaux belges seraient réduits de près de 40 %. Malgré une amélioration manifeste en Belgique, il reste une capacité de réserve suffisante pour des modes de transport alternatifs (Santos et al. 2015).

4.3 Le projet multimodal Geodis (Espagne-Allemagne)

Ce projet initié par Geodis a été lancé en février 2018 avec un service rail-route entre la frontière franco-espagnole, à Hendaye, et la frontière franco-allemande, à Metz. Destiné aux entreprises qui importent ou exportent des marchandises entre la péninsule ibérique et le nord de la France, l'Allemagne, le Benelux ou encore l'Europe de l'Est, il est associé à une desserte locale porte à porte et est utilisé chaque semaine depuis l'été 2018 avec 5 à 6 trains par semaine.

Le service porte-à-porte opéré par Geodis inclut du cross-docking dans ses entrepôts, situés à chaque extrémité de la ligne, ainsi que le transport des marchandises jusqu'aux destinations finales via sa flotte de camions. Les chargeurs peuvent en outre localiser leurs marchandises via un système de suivi des wagons¹¹. Cette offre logistique de bout en bout offre un parcours ferroviaire de 1 100 km entre Hendaye et Metz et une desserte locale par la route pour les derniers kilomètres. Associée à une desserte locale « porte-à-porte », cette alternative permet de désengorger les routes européennes et de réduire l’empreinte carbone du transport de marchandises sur cet axe en retirant des routes plus de 11 500 camions par an. Selon le directeur général de Geodis, Olivier Royer, cette solution multimodale permet de réaliser des flux avec un temps de transit similaire à celui de la route, tout en garantissant des coûts raisonnables. (Geodis, 2018).

Cependant, bien que ce projet soit ambitieux en termes de réduction des émissions, les goulots d’étranglement des transports ferroviaires (retards de livraisons) font en sorte que le transporteur Geodis pour assurer la livraison à temps à ses clients propose une alternative routière avec une flotte de plus de 3 800 véhicules poids lourds. Cet état de fait témoigne des difficultés encore inhérentes au transport multimodal et le peu de confiance que les transporteurs lui accordent.

4.4 Le projet européen de transfert modal TRANS TRITIA

Trans Tritia est un projet international couvrant le territoire de trois régions distinctes dans trois États membres de l'Union européenne à savoir Moravie Silésien (République tchèque), Voïvodie silésienne (Pologne) et la région autonome de Žilina (Slovaquie). Le projet est axé sur la coopération transfrontalière et interrégionale qui entraînera une augmentation de la cohésion économique et sociale afin d'atteindre les objectifs définis dans la stratégie Europe 2020 du livre blanc de l'Union européenne sur les transports (Trnka et al. 2021). Il vise également à améliorer la coordination entre les acteurs du transport de marchandises dans le but d'augmenter les solutions de fret multimodales respectueuses de l'environnement afin d'atteindre les objectifs du livre blanc qui sont de transférer 30% du transport routier longue distance (plus de 300 km) vers des modes plus efficaces d'ici 2030 et 50% d'ici 2050.

¹¹Supply chain magazine, *Geodis parie sur le multimodal entre l'Espagne et l'Allemagne*, <file:///Users/user/Desktop/Doc%20Etudes%20HEC/Projet%20d'int%C3%A9gration/Inter%20et%20multimodalit%C3%A9/Geodis%20parie%20sur%20le%20multimodal%20entre%20l'Espagne%20et%20l'Allemagne%20-%20Supply%20Chain%20Magazine.html>, consulté le 08 mars 2021.

La zone de Tertia qui couvre une superficie d'environ 24 000 km² et une population de 6,5 millions d'habitants est traversée par deux corridors d'importance européenne. Il s'agit en premier lieu du corridor Baltique-Adriatique reliant la partie nord de l'Europe (ports en Pologne) avec les ports méditerranéens et les ports de la Slovénie et du nord de l'Italie et en deuxième lieu du corridor du Rhin-Danube, qui relie les principaux ports de l'Allemagne de l'Ouest aux ports de mer Noire, en passant par la Slovaquie pour se rendre sur la frontière orientale avec l'Ukraine.

Selon les études de modélisation du transfert du fret routier vers d'autres modes de transports, réalisées par Trnka et al (2021), la redistribution de la charge de la circulation, montrent que d'un volume total du transport de marchandises routières de 12 546 256 conteneurs-kilomètres par an (potentiel total), près de la moitié de cette charge se déplacera vers le chemin de fer et environ 4% vers la voie navigable intérieure à l'horizon 2050. Ces résultats démontrent selon eux, la possibilité que d'ici 2030, il soit possible de transférer plus de 30 % du transport routier de plus de 300 km vers d'autres modes de transport plus efficaces et durables, ce qui faciliterait l'atteinte des objectifs du livre blanc européen.

4.5 La Suisse met en place un « transfert route-rail des transports de marchandises à travers les Alpes inscrit dans la Constitution fédérale »

Avec près d'un tiers des émissions de CO₂ (32 %), le secteur des transports suisses est le premier émetteur domestique de GES devant les secteurs résidentiel (26 %) et industriel (22 %). Le transport de marchandises représente 18 % des émissions du secteur, dont les deux tiers proviennent du transport routier de marchandises (OFT 2017).

Ces dernières années, la Suisse s'est fixé divers objectifs de politique climatique au niveau national et international. C'est ainsi que dans le cas des émissions de GES, l'objectif inscrit dans la législation suisse propose de réduire les gaz à effet de serre de 50 % d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 1990 (OFT 2017). Pour y arriver, le gouvernement a mis en place un certain nombre de mesures réglementaires. Le tableau 3 récapitule les mesures importantes existant pour faciliter le transfert modal et réduire les émissions de CO₂, tandis que le tableau 4 présente de potentielles mesures envisageables dans le même but.

Tableau 3: Mesures importantes dans le cadre réglementaire existant

Mesures	Contributions/Relation avec la protection du climat
Taxes et frais	
Taxe sur les poids lourds, basée sur la performance	Augmentation du rail et de l'efficacité, soutien technique.
Taxe sur les huiles minérales	Augmentation du rail et de l'efficacité, soutien technique.
Incitatifs et accompagnement	
Compensation	Augmentation du rail, délocalisation au sens de Protection alpine
Contributions d'investissement (KV, AGL)	Augmentation du rail, délocalisation au sens de Protection alpine
Formation des conducteurs	Augmentation de l'efficacité
Infrastructures et offres	
Expansion du rail (STEP, NEAT, 4 m, etc.)	Augmentation du rail, délocalisation au sens de Protection alpine
Expansion de la gestion routière / trafic	Augmentation de l'efficacité (vitesses, flux de trafic)
Autorisations / interdictions	
Interdiction de conduire la nuit	Augmentation du rail
Organisation et agrément du marché	
Interdiction de cabotage	Augmentation du rail
Limite de poids	Augmentation du rail (TC), augmentation de l'efficacité (optimisation des trajets)
Réglementation sur les émissions	Augmentation de l'efficacité, promotion des mesures techniques
Réforme ferroviaire (libéralisation du marché)	Augmentation du rail, délocalisation au sens de Protection alpine
Technologie	
Optimisation	Réduction de la consommation
Information et système de communication	Augmentation de l'efficacité (optimisation des trajets), consommation réduite

Source : Office Fédéral des Transports, 2017

Tableau 4: Mesures envisageables susceptibles de réduire les émissions de CO₂

Mesures	Contributions/Relation avec la protection du climat
Taxes et frais	
Taxe CO ₂ sur les carburants	Augmentation du rail, augmentation de l'efficacité, promotion des mesures techniques
Prise en compte des émissions de CO ₂ dans la taxe sur les poids lourds, basée sur la performance	Augmentation du rail, augmentation de l'efficacité, promotion des mesures techniques
Taxe sur les poids lourds, basée sur l'occupation	Augmentation de l'efficacité (grâce à l'optimisation des trajets)
Taxe sur les poids lourds, basée sur la distance	Augmentation du rail (sur les itinéraires longue distance)
Taxe sur les véhicules utilitaires légers, basée sur la performance	Augmentation de l'efficacité (optimisation des voyages), promotion des mesures techniques.
Incitatifs et accompagnement	

Coût des corridors ferroviaires en fonction de la distance	Augmentation du rail (réduction sur les trajets long-courriers ou navettes CT)
Promotion des techniques de manutention	Augmentation du rail (avantage-coût, long terme: expansion des services)
Achat des récompenses pour des lecteurs alternatifs	Promotion des mesures techniques (pour la conversion des lecteurs)
Formation de commis au transport	Augmentation du rail (planification des transports)
Contrats de bonus / malus	Augmentation du rail, augmentation de l'efficacité, promotion des mesures techniques
Infrastructures et offres	
Expansion du réseau ferroviaire	Augmentation du rail et mesure complémentaire
Extension des plans sectoriels	Promotion d'infrastructures alternatives bas carbone
Autorisations / interdictions	
Zones environnementales / prix / limites de voyage	Augmentation de l'efficacité (optimisation des voyages), promotion des mesures techniques.
Respect des limites de vitesse	Consommation réduite (conduite efficace. Plages de vitesse)
Organisation et agrément du marché	
Camions longs	Augmentation de l'efficacité (optimisation des trajets)
Spécifications de la répartition modale	Augmentation du rail (dans les segments appropriés)
Introduction du label CO ₂	Augmentation du rail, augmentation de l'efficacité, promotion des mesures techniques.
Introduction de normes d'efficacité CO ₂	Promotion des mesures techniques
Aménagement du territoire	
Planification de l'espace avec de courtes distances	Augmentation de l'efficacité (optimisation des déplacements et de la production)
Technologie : Groupe motopropulseur	
Groupe motopropulseur	Réduction de la consommation des moteurs thermiques
Hybridation et optimisation des piles à combustible (H ₂)	Remplacement des combustibles fossiles (dans les segments appropriés)
Électrification de l'entraînement électrique par batterie avec ligne aérienne (système de caténaire)	Remplacement des combustibles fossiles (dans les segments appropriés)
Orientation (s) stratégique (s) protection du climat	Remplacement des combustibles fossiles (dans les segments appropriés)
Technologie : Châssis et carrosserie du véhicule	
Optimisation des véhicules	Réduction de la consommation, diverses mesures non liées au moteur.
Technologie : numérisation	
Conduite automatisée	Réduction de la consommation grâce à des styles de conduites optimisés (également en peloton)

Source : Office Fédéral des Transports, 2017

Une lecture sommaire des deux tableaux laisse entrevoir la volonté explicite du gouvernement suisse de favoriser la transition vers le transport ferroviaire. Sur quatorze mesures existantes, neuf ont pour effet d'accroître la part du transport ferroviaire et dix des vingt-cinq mesures envisageables ont le même effet. Les chemins de fer jouent un rôle important dans le transport de marchandises, car ils absorbent environ un quart du marché du trafic intérieur et d'import-export

et détiennent environ 70% du marché du transport transalpin¹². Cette performance suisse s'explique par les actions et mesures résolument tournées vers le transfert modal de la route vers le rail et démontre clairement l'orientation que le gouvernement fait de sa stratégie de réduction des émissions du secteur des transports pour l'atteinte de ses objectifs climatiques. C'est ainsi qu'en 2001, la Suisse introduisait une redevance sur les véhicules lourds de plus de 3,5 tonnes afin de réduire le trafic et la pollution de l'air. À travers cette redevance, elle se donnait en même temps les moyens de sa politique de transfert modal en finançant les infrastructures ferroviaires avec les deux tiers des revenus collectés (Federal Office for the Environment 2021).

Comme dans le cas de la Belgique, la Suisse a consenti des investissements sur les infrastructures ferroviaires avec par exemple la construction de voies de raccordement et des installations de transbordement pour le trafic combiné. Si ces mesures de transfert modal semblent avoir favorisé le transfert modal de la route au rail, il faudra noter que ce résultat est la conséquence de toutes les combinaisons de mesures réglementaires tarifaires, d'amélioration de performance, d'électrification, d'introduction de carburants alternatifs, etc.

4.6 Constats sur le transfert modal et l'intermodalité

Le principal avantage du transfert modal est de permettre la réduction du volume de transport sur le réseau routier ainsi que l'impact environnemental du transport (Trnka et al (2021). Heinold et Meisel (2018) à travers une étude de simulation approfondie avaient démontré que le taux d'émission des transports multimodaux était en moyenne 58 % inférieur au taux des transports routiers utilisant des carburants fossiles.

Bien que le transport multimodal soit plus économe en énergie et plus durable en termes de pollution, les études démontrent que les choix des acteurs du transport reposent le plus souvent sur les facteurs économiques qui sont très souvent liés à la flexibilité des itinéraires de transport (Yang et al. 2018). De plus, la mise en place d'un corridor multimodal nécessite des itinéraires de très longues distances ainsi qu'un volume assez important de marchandises pour rentabiliser ces itinéraires. En effet, pour être efficace, le transport multimodal de fret a besoin de longues distances, supérieures à 500 km¹³. Ce mode de transport malgré ses avantages en termes de réduction des émissions de CO₂ peut s'avérer économiquement peu ou pas rentable. En plus, les

¹² OFT, <https://www.bav.admin.ch/bav/fr/home/modes-de-transport/chemin-de-fer/fret-ferroviaire.html>

¹³ MAP Transport SA, *le transport multimodal en Europe*, <https://maptransport.com/2018/09/03/le-transport-multimodal-en-europe/>

corridors multimodaux pourraient également être victimes de leur succès à travers le transfert inverse du fret maritime vers les corridors multimodaux (rail-route) qui offrent le plus souvent des délais moins longs même si les coûts peuvent être plus élevés. C'est par exemple le cas du corridor Eurasian où le temps de transport moyen entre les villes centrales chinoises (par exemple, Chongqing) et les villes portuaires d'Europe de l'Ouest (par exemple le port de Rotterdam) par conteneur maritime est de 40 à 45 jours, tandis que celui du China Railway Express n'est que de 12 à 14 jours (Jiang, et al 2018). Cependant, si l'efficacité en termes de temps des corridors multimodaux pourrait être intéressante pour les marchandises de grande valeur et induire un transfert du fret aérien vers le transport multimodal, il demeure que le transport multimodal reste peu rentable et donc peu compétitif face aux autres modes de transport, notamment le transport maritime.

Les effets connexes du développement des transports multimodaux ne sont pas toujours pris en compte dans l'évaluation des coûts des infrastructures. Aussi, dans leur rapport d'étude sur les politiques de transport, Braun et al. (2017) ont identifié deux champs de conflits qui pourraient survenir dans la mise en œuvre de corridor multimodal. Il s'agit des nuisances sonores ferroviaires, et la crainte du déplacement des services ferroviaires régionaux existants ou de l'interférence entre le développement prioritaire de voies ferrées ou de fret supplémentaires et les services régionaux. Cependant, une comparaison avec le transport routier laisse entrevoir un avantage net du transport ferroviaire et maritime, car la construction des autoroutes demande plus d'espaces et la multiplication des camions crée plus de nuisance sonore. Aussi, le transfert modal entraînera une baisse du transport routier et donc de la demande en infrastructures. Enfin, une autre condition pour augmenter l'attractivité du transport intermodal reste la standardisation des conteneurs de marchandises et l'existence d'un réseau pertinent de terminaux intermodaux dans la zone cible. L'essor de ce mode de transport dépendra alors des instruments politiques, comme nous l'avons vu dans les cas de la Belgique et de la Suisse.

5 Les technologies réduisant les émissions de CO₂

Selon l'agence internationale de l'énergie (IEA, 2020), dans le camionnage, l'électricité et l'hydrogène domineront le mix énergétique en 2070, propulsant des véhicules qui ne dépendent plus des moteurs à combustion interne. La mise à l'échelle des camions électriques et à pile à hydrogène pourrait représenter environ 70% de la consommation finale d'énergie des camions à l'horizon 2070, ce qui contribuerait à une baisse presque équivalente de la pollution issue du secteur du transport routier. Ces prévisions reposent sur des développements rapides dans les batteries et les piles à combustible ainsi que sur des investissements massifs dans de nouvelles infrastructures, notamment des stations de ravitaillement en hydrogène, des bornes de recharge rapide pour camions électriques et des systèmes routiers électriques (système de caténaires) qui alimentent les véhicules lorsqu'ils roulent (IEA, 2020). Les véhicules électriques représentent un fort potentiel de réduction de GES dans leur phase d'utilisation, même si ce potentiel est aussi tributaire de la source de production d'électricité.

5.1 Électrification des transports : corridors électriques et système de caténaires

La part de plus en plus croissante de l'électrification des transports de marchandises est la preuve de la volonté des acteurs de réduire les émissions de gaz à effet de serre en favorisant des transports durables à faible ou zéro émission. Ainsi dans le cadre de l'électrification, deux principaux modèles se dégagent : les corridors électriques à travers la construction d'infrastructures de recharge pour soutenir les déplacements interurbains et les systèmes des routes électriques ou système de caténaire.

5.1.1 Corridors électriques

Le succès de la transition vers les véhicules électriques nécessite une bonne planification des infrastructures de soutien, notamment des réseaux de stations ou de bornes de recharge.

5.1.1.1 Cas du couloir entre le Portugal et l'Espagne : Projet CIRVE

L'objectif de ce corridor de mobilité durable est d'accroître l'utilisation des véhicules électriques dans ces deux pays et en France dans un cadre transfrontalier totalement interopérable permettant aux utilisateurs de véhicules électriques de transiter du nord de l'Europe vers la péninsule ibérique, assurant une liaison entre les parties sud et nord de l'Union européenne (IEA 2016). Il consistera au déploiement de 58 points de recharge rapide multistandards (40 en Espagne, 18 au

Portugal) le long des corridors ibériques de l'UE (Méditerranée et Atlantique) avec une attention particulière aux zones transfrontalières entre le Portugal, l'Espagne et la France. Ce projet qui prendra fin en décembre 2021 identifiera des solutions aux barrières juridiques techniques et économiques actuelles ainsi qu'un modèle commercial pour le déploiement des carburants alternatifs dans la péninsule ibérique.

5.1.1.2 L'autoroute électrique de la côte ouest (Californie)

Stimulés par la publication de l'étude de la «West Coast Clean Transit Corridor Initiative», les services publics d'électricité desservant la côte ouest ont proposé un plan d'implantation de 27 points de recharges rapides sur 1 300 miles (2 080 km) entre le Mexique et le Canada¹⁴. Ce corridor s'étendra de Whistler, en Colombie-Britannique à la frontière entre la Californie et le Mexique, avec des bornes de recharge installées tous les 25 à 50 miles le long de l'interstate I-5, des États-Unis et de la California Highway 99. Ce plan suggère également 41 sites supplémentaires sur les autoroutes de connexion, y compris les interstates I-8, I-10 et I-80 en Californie, I-84 dans l'Oregon et I-90 à Washington, ainsi que d'autres itinéraires de métro de Los Angeles.

Les stations du réseau de camions seraient installées d'ici 2025 et seront équipées pour les besoins de recharge des camions légers et moyens. Plus tard, 14 de ces 27 stations seraient mises à niveau pour permettre la recharge des grandes plateformes électriques (camions lourds) d'ici 2030. Le coût total du projet devrait être de 850 millions de dollars, bien plus que l'équivalent d'une autoroute électrique pour les voitures. Selon les estimations de l'étude, les véhicules électriques devront représenter près de 25% des camions moyens et 5% des camions lourds soit un total de 8% de tous les camions sur la route en Californie, dans l'Oregon et à Washington (West Coast Clean Transit Corridor Initiative, 2020).

5.1.2 Les systèmes de routes électriques (système de caténaire)

Les systèmes de routes électriques alimentent en électricité les véhicules en mouvement à l'aide de caténaires aériennes ou encore par conduction ou induction au sol. Le système de caténaire aérienne consiste à transmettre l'énergie au moyen de pantographes montés sur le toit des véhicules, comme dans le cas des trains électriques, tramways et trolleybus. Cette technologie

¹⁴ West Coast Clean Transit Corridor Initiative Study. I-5 Electric trucks charging sites mapped out by electric utilities <https://westcoastcleantransit.com/resources/WestCoastCleanTransitNewsRelease-Website.pdf>

s'applique principalement aux camions lourds de marchandises (classe 8 ou plus) sur longue distance. Cependant les véhicules doivent être dotés de sources secondaires d'énergie autonomes (par exemple, batteries, biocarburant ou piles à combustible à hydrogène, ou même un carburant fossile) pour pouvoir faire les derniers kilomètres de livraison de la marchandise en dehors du réseau électrifié. En plus de permettre des économies de consommation de carburant, l'avantage du système de caténaires est qu'il est facilement adaptable au réseau routier existant.

5.1.2.1 Le projet pilote d'autoroute électrique de l'Allemagne

La technologie eHighway est une solution de mobilité durable du transport routier de marchandises développé par Siemens¹⁵. La première piste de démonstration eHighway a été construite en 2011 près de Berlin, sur une route privée, dans le cadre du projet ENUBA, financé par le ministère allemand de l'Environnement (BMUB)¹⁶. L'idée de base du projet est de construire l'alimentation électrique uniquement sur des itinéraires longs et/ou raides, alors que pour les zones de croisement et pour le dernier kilomètre, il existe un moteur à combustion classique avec un générateur et en option un stockage d'énergie (Akerman, 2016). Cette expérimentation avait pour objectif de montrer à la fois les avantages écologiques et économiques du système eHighway, mais aussi la faisabilité d'une mise à l'échelle de l'infrastructure d'électrification. Une analyse du BMUB a montré qu'un système installé uniquement sur les parties les plus fréquentées du réseau routier allemand serait en mesure de traiter environ 60% de toutes les émissions du fret routier lourd¹⁷. C'est ainsi qu'en mai 2019, l'Allemagne procédait à l'ouverture de son premier eHighway sur 10 km (6,2 miles) d'autoroute sur le tronçon reliant l'aéroport de Francfort à un parc industriel voisin, permettant aux camions équipés de l'équipement nécessaire monté sur leur toit d'utiliser les câbles électrifiés pour se déplacer à des vitesses allant jusqu'à 90 km/h sans avoir à brûler de carburant diesel, se reconvertissant en combustion interne diesel une fois qu'ils quittent le tronçon électrifié.

5.1.2.2 Cas de la Suède (« world's first fossil fuel-free electric road in Sweden »)

En juin 2016, la première route électrique au monde pour poids lourds sans carburant fossile a été inaugurée sur un tronçon d'environ 2 km de long, près de Gävle en Suède. C'est la première fois que cette technologie est mise à l'échelle sur une route publique après la phase pilote en

¹⁵ Siemens mobility, <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/road/ehighway.html>

¹⁶ Processus de Paris sur la Mobilité et le Climat <http://www.ppmc-transport.org/ehighway-electrifying-heavy-duty-road-freight-transport/>

¹⁷ Processus de Paris sur la Mobilité et le Climat <http://www.ppmc-transport.org/ehighway-electrifying-heavy-duty-road-freight-transport/>

Allemagne. Durant cette phase pilote de mise à l'échelle, des essais seront réalisés pour mesurer la réduction de la pollution sonore et des émissions de CO₂ dans l'atmosphère. Ce système de caténaires aériennes alimentera les camions en énergie électrique, de la même manière que les chariots ou les tramways modernes sont alimentés. Le tronçon conçu a été adapté pour accueillir trois types de véhicules dont les véhicules électriques et des hybrides au diesel et au Gaz naturel comprimé (GNC). Ainsi les camions peuvent rouler en utilisant l'électricité de l'autoroute électronique via un pantographe actif.

Fruit de la coopération entre l'Union européenne, l'industrie (Vinnova, Scania et Siemens), le monde universitaire et les pouvoirs publics suédois, ce système d'alimentation par des lignes électriques aériennes devrait permettre à terme d'électrifier toute la section de l'E16 entre le port de Gävle et Borlänge, sur une distance de plus de 100 kilomètres.

5.1.2.3 L'autoroute électrique de la Californie

Le projet pilote d'autoroute électrique près des ports américains de Los Angeles et de Long Beach en Californie a été lancé en 2014 et devrait couvrir à terme une distance de 20 miles (32 km) du corridor Alameda. La première phase couvrant une bande d'environ 1 mile (1,6 km) a été ouverte et testée en janvier 2018. Ce projet réalisé en collaboration avec le groupe allemand Siemens et parrainé par la SCAQMD (South Coast Air Quality Management District) permettra une réduction des émissions de CO₂ des véhicules lourds de marchandises empruntant le corridor menant aux deux importants ports qui reçoivent chaque année près de 40% des produits importés aux États-Unis. Produit de la technologie Siemens, ce système est bâti sur le même modèle que les eHighway suédoise et allemande. Selon Siemens, l'eHighway doublera l'efficacité des camions de classe 8 et permet d'économiser 20 000\$ US de carburant sur 100 000 milles de conduite par camion¹⁸. Ce projet pilote permettra d'évaluer la faisabilité d'un système de mouvement de fret à zéro émission utilisant des câbles caténaires aériens ainsi que la possibilité de l'étendre à d'autres corridors routiers. À terme le projet permettra d'économiser 6 millions de CO₂ par an à travers la diminution de la consommation en produits pétroliers tout en améliorant la qualité de l'air.

¹⁸ INSIDEEVs, *First US eHighway launched in California by Siemens* <https://insideevs.com/news/336589/first-us-highway-launched-in-california-by-siemens/>

5.1.3 Constats sur l'électrification des transports

L'électrification du fret routier est encore incertaine et l'équilibre de l'adoption de la technologie à long terme pourrait changer en fonction de l'infrastructure de soutien ainsi que du soutien politique au cours des prochaines années. La principale critique de l'électrification repose sur l'autonomie des batteries qui ne permettent toujours pas de longues distances. Ces limites reflètent les difficultés pratiques liées aux besoins en énergie et en densité de puissance du transport longue distance notamment dans le domaine du camionnage (IEA, 2020). En plus de l'autonomie, le temps de recharge des batteries reste également une équation à résoudre dans les plus brefs délais. Par rapport aux véhicules utilitaires légers, les défis liés à l'électrification des camions de fret sont importants en raison du poids des véhicules et du volume de marchandises, des heures de services et des distances à parcourir. Finalement, la décarbonation du fret routier dépendra de la conversion aux technologies à émissions très faibles ou nulles. Les systèmes de routes électriques (ERS) constituent actuellement une des meilleures technologies envisageables pour réduire les émissions de fret routier tout en répondant aux impératifs énergétiques du secteur (OCDE, 2019). De nos jours, il existe des algorithmes qui permettent de faire des calculs et des estimations pour l'implantation optimale des bornes de recharges le long des corridors d'autoroute.

Au regard de leurs caractéristiques, les systèmes de routes électriques sont donc prometteurs pour le transport de marchandises lourdes sur de longues distances, mais ne présentent pas vraiment d'intérêt pour les poids lourds qui sont utilisés pour le transport de marchandises intra-urbain et sur des routes avec peu de passages de camions. Le transport routier lourd pourrait être autorisé à parcourir de longues distances sans consommation de carburant, sans émissions et avec un bruit réduit. Le système de caténaire présente aussi l'avantage d'être adaptable aux infrastructures existantes et n'a donc pas d'incidences négatives sur l'exploitation mixte sur la route. Cependant, les coûts de mise en œuvre peuvent représenter un frein important pour le développement des systèmes de routes électriques au service du fret routier. Par exemple les coûts estimés pour la construction d'un kilomètre de système de caténaire aérienne varient entre 1,6 et 2,2 millions\$ US, alors qu'ils seront quatre fois moins chers pour l'électrification d'une ligne ferroviaire (ODCE, 2019).

En plus, l'efficacité de l'électrification dépendra de la source de production l'électricité requise

pour alimenter les camions, car des émissions supplémentaires pourraient être induites dans le secteur de l'électricité. Malgré ce potentiel effet rebond, l'efficacité de ce système d'alimentation demeure intéressante compte tenu du rendement élevé des moteurs électriques. Si l'on veut en faire des solutions attrayantes et faciliter leur déploiement, il ne faut pas laisser les propriétaires des flottes supporter à eux seuls les coûts d'infrastructures associés à l'électrification.

5.2 Les carburants alternatifs

Les carburants alternatifs complètent l'efficacité énergétique comme moyen de résoudre les nombreux dilemmes économiques, sociétaux et environnementaux (IEA, 2017). En 2018, les énergies renouvelables ont contribué à environ 3,7% de la demande de carburant pour les transports, avec environ 4 EJ (Exajoule) de consommation. Les biocarburants ont fourni 93% de cette consommation, le reste étant de l'électricité renouvelable (IEA, 2019). Selon l'IEA (2019), la production de biocarburants devrait augmenter de 25% durant la période 2019-2024 pour atteindre 190 milliards de litres. Parmi les carburants alternatifs en forte croissance, certains ont le vent en poupe. Il s'agit entre autres de :

- ✓ L'éthanol dont la production a plus que triplé pour atteindre 11 milliards de litres en 2018 avec une capacité de production qui devrait augmenter de près de 50% d'ici 2021 (IEA, 2019).
- ✓ La production de biodiesel et de HVO¹⁹ a augmenté de 9% de 2017 à 2018, atteignant 43 milliards de litres. Elle devrait augmenter d'un tiers, pour atteindre environ 57 milliards de litres en 2024 (IEA, 2019).
- ✓ Le gaz naturel qui est la principale source de méthane actuellement disponible et utilisé dans les moteurs bicarburants (qui sont des moteurs conçus pour fonctionner simultanément avec du gazole et un carburant gazeux²⁰). Il doit être sous forme de gaz naturel comprimé (GNC) ou de gaz naturel liquéfié (GNL) pour en faire un carburant de transport approprié (IEA 2017).
- ✓ L'hydrogène qui est depuis longtemps considéré comme un carburant de transport potentiel, offrant une alternative à faible émission de carbone par rapport aux produits pétroliers et au gaz naturel, et complétant d'autres alternatives comme l'électricité et les biocarburants avancés. La demande d'hydrogène pur est d'environ 70 Mt (Mégatonne) par an, principalement pour le raffinage du pétrole et la production chimique. Cet hydrogène est actuellement produit

¹⁹ HVO : Hydrogenated Vegetable Oil

²⁰ Conseil Economique et Social des Nations Unies, *ECE/TRANS/WP.29/GRPE/2012/13/Rev.1*
<https://unece.org/DAM/trans/doc/2012/wp29grpe/GFV-21-08e.pdf>

à partir de gaz naturel et de charbon, et les émissions de CO₂ associées sont importantes (IEA, 2020).

Dans cette section, nous mettrons plus d'emphasis sur le cas de l'hydrogène et le gaz naturel liquéfié (GNL) ou comprimé (GNC) comme carburants alternatifs.

5.2.1 Le projet Clean Energy Partnership (Allemagne)

Initié par un consortium de 15 compagnies, « *Clean Energy Partnership (CEP)* » est un projet phare du programme national allemand d'innovation pour la technologie de l'hydrogène et des piles à combustible dans le secteur du transport.

En octobre 2004, la première station de ravitaillement en hydrogène CEP a ouvert ses portes à la station-service Aral sur Messedamm à Berlin-Ouest. Pour la première fois, l'hydrogène gazeux et liquide était disponible publiquement pour le ravitaillement en carburant aux côtés du diesel et de l'essence (Fried, 2011). Dans la phase initiale, les 50 premières stations de remplissage d'hydrogène ont été construites dans les zones métropolitaines et les principaux corridors en Allemagne. Aujourd'hui, c'est un réseau de 91 stations opérationnelles d'hydrogène réparties sur le territoire allemand avec 44 autres en construction (CEP, 2021). En Allemagne, les stations à hydrogène sont intégrées aux stations-service existantes, car les standards pour les pompes à carburant correspondent aux standards pour le stockage et la distribution de l'hydrogène. À partir de 2021, des stations supplémentaires seront construites là où il y a une demande de véhicules utilitaires et où une station-service publique a du sens pour un réseau croissant de stations-service pour voitures²¹. Avec la montée en puissance des véhicules, le projet *H₂ Mobility* prévoit de construire jusqu'à 400 stations de remplissage en Allemagne d'ici 2023²².

Les expériences positives du CEP en matière d'utilisation des véhicules dans des conditions quotidiennes démontrent la viabilité de l'hydrogène en tant qu'alternative durable aux carburants conventionnels (Fried, 2011). Le CEP a posé la première pierre de réseau de stations-service en définissant des standards et des normes valables au niveau mondial. Pour minimiser les émissions de CO₂, le CEP se concentre sur l'hydrogène « vert » et déjà, au moins 50% de l'hydrogène des stations-service CEP est produit à partir d'énergie renouvelable.

²¹ *H₂ Mobility* <https://h2.live/en/h2mobility>

²² Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPAC) <http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%208.2%20-%20Programme%20allemand%20-%20rev%20mars%202020%20ThA.pdf>

5.2.2 Le réseau japonais de stations à hydrogène

Si l'Europe par rapport aux autres continents présente un réseau de distribution d'hydrogène plus développé en termes de stations de ravitaillement (« hydrogen refueling station » ou HRS) avec plus de 170 stations en 2018, le leader en nombre de véhicules à pile à combustible est l'Amérique du Nord avec plus de 45% du total des véhicules, suivi par l'Asie avec 43%. En termes de HRS, l'Asie se classe en deuxième position devant le continent américain avec plus de 130 HRS dont la majorité se trouve au Japon (environ 80 HRS en 2016) (Apostolou et Xydis, 2019).

Le projet d'autoroute japonaise de l'hydrogène est un réseau de stations de remplissage d'hydrogène placé le long des routes pour faciliter l'alimentation des véhicules à pile à hydrogène. Les deux premières stations de ravitaillement en hydrogène ont été construites en mars 2005 pour le *Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project (JHFC) Expo*, pour promouvoir l'utilisation des véhicules à hydrogène. À la fin de 2012, il y avait 17 stations d'hydrogène opérationnelles au Japon. L'objectif de ce projet était de rendre l'achat de véhicules fonctionnant à l'hydrogène plus attractif pour le public. Depuis 2014, Toyota et Honda ont commencé à introduire des véhicules à pile à combustible (FCV) qui convertissent l'hydrogène en électricité. Très ambitieux, le Japon se fixait déjà en 2002 des objectifs à la hauteur de ses ambitions pour promouvoir les véhicules à piles à hydrogène en estimant à 5 millions le nombre de véhicules et à 4 000 le nombre de stations de ravitaillement d'ici la fin de 2020 (IEA, 2004). Même si ces objectifs sont loin d'être atteints, le Japon demeure leader dans ce domaine en Asie avec ses 135 stations opérationnelles en 2020 et en se fixant de nouveaux objectifs réalistes de 320 stations en 2025 et de 900 en 2030 (Suzuki et al. 2021). Un des défis de l'utilisation de l'hydrogène reste sa production : pour que l'hydrogène soit vert, il faut le produire par électrolyse avec de l'électricité sans émissions de GES. L'efficacité de la production d'hydrogène par électrolyse, par rapport à l'utilisation directe de l'électricité, est encore un obstacle.

5.2.3 La California Fuel Cell Partnership

La *California Fuel Cell Partnership (CaFCP)* composé d'entreprises privées, d'organismes d'État et du gouvernement fédéral a dès les années 2000, tenté de démontrer la viabilité des voitures et des bus à pile à combustible. Ce partenariat a permis d'exploiter environ 50 voitures et bus à pile à combustible jusqu'en 2003 et de produire des informations importantes sur les

véhicules et l'infrastructure de ravitaillement nécessaire pour les soutenir (Samuelsen et al. 2020). À la suite de ce projet pilote, comme partout ailleurs, un réseau stations de ravitaillement a été construit pour soutenir le développement des véhicules à pile à hydrogène. Dans le modèle californien du réseau de stations de ravitaillement, la plupart de l'hydrogène est produit dans une installation centrale et transportée par camion ou par pipeline jusqu'à la station. En 2020, la Californie disposait d'un réseau de 40 stations HRS opérationnelles, dont deux stations pour les véhicules lourds à Los Angeles (CaFCP H2 station list. 2020).

En 2016, la CaFCP publiait son plan d'action pour la promotion des véhicules de transport de marchandises fonctionnant à l'hydrogène. Dans ce plan, des recommandations ont été faites à l'industrie et au gouvernement pour favoriser et encourager le développement des camions électriques à pile à combustible et les infrastructures à hydrogène. Ainsi pour impulser le développement des camions de transport de marchandises, le plan recommande au gouvernement de mettre en place des projets pilotes de démonstration à court terme pour servir de preuve, collecter des données, comprendre les lacunes et en apprendre davantage sur la faisabilité à long terme de la technologie. Ce plan recommande également que 33 % de l'hydrogène utilisé dans les transports soit issu de sources renouvelables (CaFCP, Action plan 2016). Des incitatifs ont également été mis en place pour financer les innovations et le développement des stations de ravitaillement. En 2018, la Californie a pris un décret exécutif B-48-18 (EO B-48-18) qui oblige les parties prenantes à œuvrer pour établir un réseau de 200 stations d'ici 2025, car cela permettra la réalisation d'économies d'échelle et la croissance future qui ne dépendrait plus des incitatifs du gouvernement (California Air Resources Board, 2020).

5.2.4 Déploiement pilote d'un réseau GNC/GNL intelligent en Flandres (Belgique)

Cette phase pilote de réseau de ravitaillement en GNL/GNC basé sur le concept innovant de « pipeline CNG mobile virtuel », a été mise en œuvre en Flandres entre 2015-2019, dans le cadre du programme « Connecting Europe Facility (CEF) ». L'action a contribué à étendre la fourniture de stations de ravitaillement en gaz naturel liquéfié (GNL) et en gaz naturel comprimé (GNC) en Belgique. Le projet a consisté en une production centralisée de GNC/GNL et un transport par pipeline vers plusieurs stations satellites GNC. Le premier réseau pilote est composé d'une station

centrale de GNL/GNC à Heverlee et d'une station satellite de GNC à Hoboken²³. Le réseau pilote a fait l'objet d'une étude qui a validé la viabilité technique, économique et écologique du concept. L'évaluation a également analysé la possibilité d'élargir le concept à une plus grande échelle, en cherchant à surmonter les limites et barrières restantes du marché ciblant à la fois le trafic léger et le trafic lourd.

5.2.5 Le projet « Causeway » : un réseau public de GNC (Irlande)

En Irlande, les véhicules lourds ne représentent que 4% du parc circulant sur les routes irlandaises, mais génèrent 30% des émissions du transport routier²⁴. Comme partout ailleurs la transition vers des véhicules lourds à faible ou à zéro émission, représente un défi majeur pour l'atteinte des objectifs de mobilité durable.

La première approche de l'Irlande sur le gaz naturel destiné aux transports routiers a été initiée dans le cadre du projet *Causeway*. Co-financé par le mécanisme pour l'interconnexion de l'Union européenne et mis en œuvre par l'université nationale d'Irlande Galway et *Gas Networks Ireland*, il vise à développer un réseau de gaz naturel comprimé (GNC) en Irlande avec intégration de gaz renouvelable, de 91 stations GNC, 12 installations d'injection de gaz renouvelable relié au réseau et avec un objectif compris entre 2 500 et 3 000 véhicules au GNC d'ici 2030 (CEF Transport, 2017). C'est dans ce cadre que la première station de GNC installée au port de Dublin a été inaugurée en août 2019 (Torregrossa, 2019).

Aussi pour accélérer la transition, le gouvernement à travers le programme GNC de *Gas Networks Ireland*, a décidé d'accompagner les transporteurs pour le renouvellement et/ou la conversion de leur flotte, en accordant des subventions qui couvrent jusqu'à 20% de la différence entre les véhicules fonctionnant au GNC et ceux fonctionnant au diesel, avec un plafond de 5 000 euros²⁵.

5.2.6 Constats sur les carburants alternatifs

Si les carburants liquides restent répandus dans les transports, c'est parce qu'ils présentent une densité énergétique, une portabilité et une stabilité au stockage relativement élevées et faciles à

²³ Connecting Europe Facility transport, 2014-BE-TM-0170-S <https://ec.europa.eu/inea/en/node/10971>

²⁴ Gas Mobility. Irlande : un programme national pour favoriser l'achat de camions au GNC <https://www.gaz-mobilite.fr/actus/irlande-programme-national-favoriser-achat-camions-gnc-2887.html>

²⁵ Gas Mobility. Irlande : un programme national pour favoriser l'achat de camions au GNC <https://www.gaz-mobilite.fr/actus/irlande-programme-national-favoriser-achat-camions-gnc-2887.html>

livrer. Cela vaut tout particulièrement pour les véhicules lourds de marchandises pour de longues distances. Les carburants liquides bénéficient aussi d'une vaste infrastructure de distribution déjà établie. Bien que les biocarburants se répandent partout dans le monde depuis un certain temps déjà, leur consommation reste marginale dans la plupart des régions. Ils n'occupent une place de choix que dans quelques pays, comme le Brésil, la Chine et les États-Unis. La plus grande part (l'éthanol) est issue de produits agricoles (par exemple, canne à sucre, maïs ou huile végétale), ce qui fait craindre un changement indirect d'affectation des sols (IEA, 2017) ou même de destruction d'écosystème pour accroître les superficies agricoles. Dès lors qu'ils peuvent être produits à partir de résidus organiques, de déchets, d'algues ou de cellulose, les biocarburants deviennent une option beaucoup plus intéressante pour la décarbonation des transports, même si leur mise au point se révèle difficile (OCDE 2019).

Quant à l'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie dans les transports, les stations de ravitaillement représentent le pilier sur lequel le développement des véhicules à pile à hydrogène sera bâti. Ce type de véhicule réduirait la pollution atmosphérique, car, comme les véhicules électriques à batterie, ils n'ont aucune émission d'échappement (IEA, 2019). Avec une densité énergétique et des puissances importantes, l'hydrogène permet de limiter le temps de recharge et d'assurer une autonomie importante. Il est donc particulièrement adapté à la mobilité intensive, longue distance et au transport lourd. La mobilité hydrogène permet en outre d'opérer dans des zones à faibles émissions et dans des environnements sensibles au bruit (ABB France, 2018). En 2019, 470 stations de ravitaillement en hydrogène étaient en service dans le monde, soit une augmentation de plus de 20% par rapport à 2018 (IEA, 2020). Comme mentionné plus haut dans le cas de l'Allemagne ou de la Californie, l'hydrogène présente l'avantage d'être facilement adaptable aux infrastructures existantes de distribution de carburants fossiles et cela pourrait faciliter son expansion. Cependant, cette technologie en est à ses prémices industrielles et les coûts de production de l'hydrogène restent encore très élevés. Par exemple le coût de revient de la production de l'hydrogène renouvelable par électrolyse est estimé à environ 8,77\$ US par KgH_2 ²⁶ (EIN²⁷ 2018). Le coût de production ne sera pas le seul enjeu pour l'utilisation de l'hydrogène. En effet, les rendements (50 kWh²⁸ et 9 litres d'eau pour 1 kgH₂) restent également

²⁶ KgH_2 : Kilogramme d'Hydrogène

²⁷ EIN : Energy Independence Now

²⁸ kWh : kilowattheures

faibles (IREC²⁹, 2020) et les pertes d'efficacité tout au long de la chaîne de valeur (conversion du réservoir aux roues) estimées entre 40% à 57% (IEA 2015) sont difficiles à réduire avec les technologies actuelles. Ainsi la production d'hydrogène pourrait aussi induire une forte demande d'électricité et engendrer du même coup des perturbations dans la gestion et la distribution du secteur de l'électricité.

Le développement du réseau de stations de ravitaillement en plus d'être coûteux, comporte d'énormes risques de sécurité, car l'hydrogène étant une molécule très volatile sa manipulation comporte des risques d'inflammation. Cela nécessite alors des normes de sécurité très strictes pour la sécurité des travailleurs, des usagers et de tierces personnes. En plus, certaines études démontrent que pour que le modèle d'affaire de déploiement de réseau de stations de ravitaillement soit rentable, il faudra un seuil minimum de véhicules à piles à hydrogène. Par exemple l'évaluation de rentabilité réalisée par Iordache et al. (2017) dans le cas des états membres de l'Union européenne a démontré qu'un nombre initial élevé de véhicules à pile à hydrogène rend un programme de développement de réseau de ravitaillement en hydrogène commercialement viable, mais que cela implique de mettre toute la pression sur les constructeurs automobiles, ou de les stimuler, afin de produire des volumes importants de véhicules à pile à hydrogène. Ce qui oblige les gouvernements à supporter des programmes de promotion et de facilitation pour les utilisateurs et les entreprises.

5.3 Efficacité énergétique et performance environnementale du transport routier : Les normes d'économie de carburants

Contrairement aux véhicules légers, les normes sur les véhicules lourds ont pris du temps avant d'être mises en application, si bien qu'à nos jours, de nouveaux véhicules lourds sont encore vendus sans aucune restriction d'émission. Fort heureusement, la couverture des réglementations pour les véhicules lourds a finalement commencé à rattraper son retard. En 2016, la couverture n'était seulement que de 50% (IEA, 2020). Alors qu'environ 85% des voitures et des véhicules utilitaires légers vendus en 2019 étaient couverts par des normes d'économie de carburant, 70% des véhicules utilitaires lourds vendus dans le monde fonctionnaient également sur des marchés soumis à des réglementations sur l'efficacité des véhicules (IEA, 2020). Ainsi des progrès ont été

²⁹ IREC : Institut de Recherche en Économie Contemporaine

observés ces dernières années en termes d'efficacité et de normes d'émission de CO₂ pour les véhicules lourds.

5.3.1 Cas de l'Union européenne (UE 2019/1242)

Les véhicules lourds tels que les bus, les camions, etc., sont responsables d'environ un quart des émissions de CO₂ du transport routier et de 6% des émissions totales de l'Union européenne³⁰. Malgré certaines améliorations de l'efficacité de la consommation de carburant ces dernières années, ces émissions continuent d'augmenter, principalement en raison de l'augmentation du trafic routier de marchandises. Même si elles existaient déjà dans les États membres, les toutes premières normes d'émission de CO₂ à l'échelle de l'UE pour les véhicules lourds, adoptées en 2019, fixent des objectifs de réduction des émissions moyennes des nouveaux camions pour 2025 et 2030 (UE 2019/1242). Selon l'UE, ce règlement contribuera à l'objectif contraignant d'une réduction nationale d'au moins 40% des émissions de gaz à effet de serre pour l'ensemble de l'économie d'ici à 2030 par rapport aux niveaux de 1990³¹. Ainsi à travers l'application de ce règlement, l'UE compte réduire ses émissions de 54 Mt éq.CO₂ entre 2020 et 2030, ce qui va représenter des réductions de 15% à partir de 2025 et de 30% à partir de 2030, permettant ainsi des économies à la pompe d'environ 25 000 et 55 000 euros pour les 5 premières années d'utilisation des camions neufs produits à partir de 2025. Par ailleurs, ils devront également atteindre un minimum de vente de véhicules lourds à faibles ou à zéro émission à hauteur de 2% de leurs ventes annuelles en 2025 (Briand et al. 2019). Ce règlement vient également renforcer le règlement EU 2017/2400 portant sur la surveillance et la communication de données relatives aux émissions de CO₂ et à la consommation de carburant des véhicules utilitaires lourds. Ce dernier règlement entré en vigueur en janvier 2019, oblige les constructeurs de camions des quatre classes qui représentent la majorité des émissions de véhicules lourds et de la consommation de carburant, ayant un poids brut du véhicule de plus de 7,5 tonnes et produit pour la vente dans l' Union européenne, à soumettre des rapports annuels obligatoires sur les consommations et les émissions de véhicules concernés. À cet effet, l'UE a développé l'outil de calcul de la consommation d'énergie des véhicules (VECTO) pour renforcer la surveillance.

³⁰ EU Commission, *Reducing CO₂ emission from heavy-duty vehicles* https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy_fr

³¹ UE, *Règlement (UE) 2019/1242* <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1242/oj?locale=fr>

5.3.2 Normes d'efficacité de la Chine

La norme GB 30510-2018 vient remplacer la première norme GB 30510-2014 sur la consommation de carburant pour les véhicules utilitaires lourds. Cette norme spécifie les limites de consommation de carburant des véhicules utilitaires lourds à essence et au diesel dont le poids total brut est supérieur à 3,5 tonnes, y compris les camions porteurs, les semi-remorques, les autocars, les camions à benne basculante et les autobus urbains. (GAQSIQ of PRC et SA of PRC 2018). Le tableau 5 ci-dessous récapitule les normes de consommations applicables aux véhicules en fonction de leur poids brut.

Tableau 5 : Norme de consommations par catégorie de véhicule (Chine)

Véhicules non articulés		Véhicules articulés	
PTRC ³² (tonnes)	Consommation de carburant (l/100km)	PTRC (tonnes)	Consommation de carburant (l/100km)
3,5 – 4,5	11,5	Moins de 18,0	28,0
4,5 – 5,5	12,2	18,0 – 27,0	30,5
5,5 – 7,0	13,8	27,0 – 35,0	32,0
7,0 – 8,5	16,3	35,0 – 40,0	34,0
8,5 – 10,5	18,3	40,0 – 43,0	35,5
10,5 – 12,5	21,3	43,0 – 46,0	38,0
12,5 – 16,0	24,0	46,0 – 49,0	40,0
16 – 20,0	27,0	Plus de 49,0	40,5
20,0 – 25,0	32,5		
25,0 – 31,0	37,5		
Plus de 31,0	38,5		

Source : GAQSIQ of PRC et SA of PRC 2018

5.3.3 Normes d'efficacité de l'Inde pour les véhicules poids lourds

Contrairement aux pays développés, les véhicules utilitaires lourds en Inde représentent une part plus importante de l'utilisation finale du pétrole de transport. Cette situation s'explique en partie par la croissance rapide du secteur des véhicules utilitaires ainsi que de la consommation de diesel qui a doublé au cours de la dernière décennie, passant de 36,6 millions de tonnes métriques (MMT) en 2002 à 72,9 MMT en 2015 (ICCT, 2017). C'est en 2014 que l'Inde a officiellement débuté son processus de réglementation de l'efficacité énergétique des véhicules lourds, avec la mise en place d'un comité directeur pour guider l'élaboration des normes d'efficacité. Ce processus participatif a connu l'implication de plusieurs acteurs tel le ministère des Transports routiers et des autoroutes, de la Petroleum Conservation and Research Association (PCRA, qui

³² PTRC : Poids Total Roulant à Charge

fait partie du MoPNG), l'office de l'efficacité énergétique et de diverses autres parties prenantes. C'est ainsi qu'en août 2016, le gouvernement indien à travers le ministère du Pétrole et du Gaz naturel (MoPNG) publiait les normes définitives d'efficacité énergétique pour les véhicules utilitaires lourds (ICCT, 2017). Le règlement vise à réduire la consommation de carburant et les émissions de gaz à effet de serre des camions et des autobus à moteur diesel dont le poids brut du véhicule est égal ou supérieur à 12 tonnes, car ces types de véhicules représentent environ 60% de la consommation totale de carburant et des émissions de GES de l'ensemble du parc de véhicules utilitaires lourds. Les nouvelles normes comprennent deux phases de conformité réglementaire dont la phase 1 est entrée en vigueur le 1er avril 2018, tandis que la phase 2 entrera en vigueur le 1er avril 2021. Le tableau 6 présente une synthèse des normes de consommation autorisées de la phase 1 selon les catégories de véhicules utilitaires lourds pour une vitesse moyenne de 40km/h, tandis que le tableau 7 présente les normes applicables à la phase 2 dans les mêmes conditions.

Tableau 6 : Norme de consommations par catégorie de véhicule (Inde, Phase 1)

Catégories	PTRC (tonnes)	Configuration axiale	Consommation de carburant (l/100km)	
			Valeur à la limite de poids inférieure	Valeur à la limite de poids supérieure
N3 Véhicules non articulés	12,0 – 16,2	4x2	14,7	16,2
	16,2 – 25,0	6x2	16,2	21,5
	16,2 – 25,0	6x4	16,2	22,6
	25,0 – 31,0	8x2	21,5	24,7
	25,0 – 31,0	8x4	22,5	28,1
	31,0-37,0	10x2	24,7	30,4
N3 Véhicules articulés	35,2 – 40,2	4x2	27,0	31,9
	40,2 – 49,0	6x2	31,9	37,4
	40,2 – 49,0	4x2 et 6x2	31,9	43,0

Source : ICCT, 2017

Tableau 7 : Norme de consommations par catégorie de véhicule (Inde, Phase 2)

Catégories	PTRC (tonnes)	Configuration axiale	Consommation de carburant (l/100km)	
			Valeur à la limite de poids inférieure	Valeur à la limite de poids supérieure
N3 Véhicules non articulés	12,0 – 16,2	4x2	13,6	14,9
	16,2 – 25,0	6x2	14,9	19,5
	16,2 – 25,0	6x4	14,9	20,9
	25,0 – 31,0	8x2	19,5	22,1
	25,0 – 31,0	8x4	15,7	20,1
	31,0-37,0	10x2	22,1	27,9
N3 Véhicules	35,2 – 40,2	4x2	25,9	30,0

articulés	40,2 – 49,0	6x2	20,6	26,1
	40,2 – 49,0	4x2 et 6x2	30,0	38,9

Source : ICCT, 2017

Pour les modèles de véhicules existants, cette nouvelle norme entrera en vigueur à partir du 1^{er} juillet 2021 alors que pour les nouveaux modèles, elle entrera en vigueur à partir de juillet 2019.

5.3.4 Normes d'émissions de GES pour les moteurs et véhicules à usages moyen et lourd (É.-U.)

En réponse à la directive du 21 mai 2010 du président Obama pour la prise de mesures coordonnées afin de produire une nouvelle génération de véhicules propres, l'EPA³³ et la NHTSA³⁴ ont finalisé des réglementations (tableau 8) pour établir un programme national complet qui réduira les émissions de gaz à effet de serre et la consommation de carburant des véhicules lourds routiers. C'est ainsi que les normes de consommation de carburant pour les véhicules lourds aux États-Unis ont été adoptées en 2013 pour une mise en application à partir de 2014³⁵. Les normes finales d'émissions de gaz à effet de serre de l'EPA sont en vigueur depuis 2014 tandis que les normes de consommation de carburant finales de la NHTSA seront volontaires pour la période 2014 à 2015, devenant obligatoires à partir de 2016 pour la plupart des catégories réglementaires.

Tableau 8 : Norme de consommation et d'émission de CO₂ par catégorie de véhicule (É.-U.)

Classe	2b	3	4	5	6	7	8
PTRC (lbs.³⁶)	8,501 - 10,000	10,001- 14,000	14,000- 16,000	16,000- 19,500	19,500- 26,000	26,000- 33,000	> 33,001
Standard EPA d'émission de CO₂ en vigueur à partir de 2017 (gram/ton mile)	373				225		222
Standard de consommation de carburant en vigueur à partir de 2017. (gallon per 1,000 ton mile)	36,7				22,1		21,8

Source : **Federal Register**/Vol. 76, No. 179/Thursday, September 15, 2011/Rules and Regulations (<https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2011-09-15/pdf/2011-20740.pdf>)

³³ EPA: Environment Protection Agency

³⁴ NHTSA: National Highway Traffic Safety Administration

³⁵ **Federal Register**/Vol. 76, No. 179/Thursday, September 15, 2011/Rules and Regulations <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2011-09-15/pdf/2011-20740.pdf>

³⁶ Lbs.: pounds

À partir de 2014, le coût de ces normes était estimé à environ 8 milliards de dollars, mais elles devraient permettre d'économiser 50 milliards de dollars sur la durée de vie des véhicules (ONU/CEE, 2017).

5.3.5 Constats sur les normes d'efficacité

Les normes d'efficacité sur les véhicules lourds datent de la dernière décennie même si les constructeurs pour des raisons de compétitivité s'y étaient déjà intéressés. L'avantage de ces normes tient au fait qu'il existe déjà de nombreuses technologies facilement disponibles aujourd'hui pour obtenir des réductions importantes de la consommation de carburant, et qu'il existe également de grandes opportunités pour des réductions plus importantes à l'avenir grâce au développement de systèmes d'entraînement hybrides avancés et de technologies de moteur. Aussi, l'analyse coûts-bénéfice démontre également que les gains sont nettement supérieurs aux coûts, comme cité dans le cas des États-Unis.

Cependant la multitude de normes qui diffèrent d'une région à l'autre ne permet pas vraiment de développer des normes universelles tout en maximisant sur les meilleures performances possibles. En plus de ces divergences, et du retard enregistré dans le domaine des transports lourds, il faudra noter les délais d'applications qui sont déjà éloignés et risquent d'être prolongés pour accommoder les constructeurs automobiles peu flexibles. Ainsi les pays qui n'ont pas encore de normes devraient s'en doter, ceux qui en disposent déjà devraient les rendre plus strictes pour réduire leurs émissions. La Chine par exemple gagnerait en adoptant de nouvelles normes plus strictes.

6 TIC et systèmes de transports intelligents (STI)

Il ne suffira pas seulement de mettre en œuvre des politiques ambitieuses pour ramener les émissions mondiales de CO₂ sous des niveaux acceptables pour limiter le réchauffement climatique. Il faudrait également qu'un éventail complet de mesures logistiques et technologiques soit déployé et que des changements exogènes contribuent à enrayer la croissance de la demande en transport. Le rôle des technologies de l'information et de la communication (TIC) pourrait toutefois s'amplifier et contribuer grandement à l'efficacité du fret de marchandises.

6.1 Le projet LOGICAL ou l'informatique en nuage au service de la coordination logistique (UE)

Initié en 2007 dans six pays de l'Europe centrale (Allemagne, Hongrie, Italie, Pologne, République tchèque et Slovaquie), le principal objectif du projet pilote LOGICAL (Transnational LOGistics' Improvement through Cloud computing and innovAtive cooperative business modeLs) était d'intégrer l'informatique en nuage dans la routine quotidienne des opérateurs et des fournisseurs d'infrastructures³⁷. L'idée est d'améliorer la compétitivité des plateformes logistiques d'Europe Centrale en réduisant les coûts de transaction, tout en encourageant l'usage collectif de modes de transport plus durables. La plateforme nuage du projet offrira aussi de nouvelles opportunités de business aux entreprises en tant que « market place » en ligne et en offrant la possibilité d'offrir des services de logistique. Elle devrait également permettre la gestion des documents de transport tout en éliminant les coûts associés dans le processus traditionnel. Les bénéficiaires et les utilisateurs de cet outil transnational d'informatique en nuage appliquant un système de tarification à l'usage, sont les petites et moyennes entreprises de logistique qui n'ont pas les moyens d'acquérir les licences coûteuses des systèmes informatiques³⁸.

6.2 Le programme « SmartWay » (États-Unis).

Le programme SmartWay de l'agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA) vise à aider les entreprises à faire progresser la durabilité de la chaîne d'approvisionnement, en mesurant, en comparant et en améliorant l'efficacité du transport de marchandises. Lancé en 2004, ce programme volontaire de partenariat public-privé poursuit les objectifs suivants (EPA, Learn about SmartWay, 2020) :

- ✓ Fournir un système complet et reconnu pour suivre, documenter et partager des informations sur la consommation de carburant et les émissions de fret à travers les chaînes d'approvisionnement ;
- ✓ Aider les entreprises à identifier et à sélectionner des transporteurs de fret, des modes de transport, des équipements et des stratégies opérationnelles plus efficaces pour améliorer la

³⁷ UE, LOGICAL Project

https://ec.europa.eu/regional_policy/archive/projects/stories/details_new.cfm?pay=SI&the=60&sto=3141&lan=9®ion=ALL&obj=ALL&per=2&defl=EN

³⁸ UE, Interopérabilité comme moteur de croissance dans les entreprises de logistique en Europe centrale

https://ec.europa.eu/regional_policy/fr/projects/Italy/embracing-cloud-computing-for-better-coordinated-logistics

durabilité de la chaîne d'approvisionnement et réduire les coûts liés au mouvement des marchandises ;

- ✓ Soutenir la sécurité énergétique mondiale et compenser les risques environnementaux pour les entreprises et les pays ;
- ✓ Réduire les émissions liées au transport de marchandises en accélérant l'utilisation de technologies avancées d'économie de carburant.

Toujours en collaboration avec ses partenaires l'EPA a mis en place le label « SmartWay » qui désigne ses détenteurs comme chefs de file faisant progresser la chaîne d'approvisionnement vers des pratiques opérationnelles plus propres et plus durables (EPA, SmartWay Brand, 2020). Le programme SmartWay est également reconnu par les gouvernements étrangers, dont le Canada, et les chefs d'entreprise d'autres pays comme l'un des meilleurs moyens d'améliorer l'efficacité du fret et de réduire les coûts tout en réduisant la pollution atmosphérique et en améliorant la compétitivité, la sécurité énergétique et le développement économique durable³⁹.

6.3 Le projet « Mobilidata » (Belgique)

En 2019, le gouvernement flamand en coopération avec l'Union européenne a lancé le projet *Mobilidata* pour installer une infrastructure de trafic intelligente sur les routes flamandes. Ce programme permettra la réalisation de solutions de mobilité innovante avec des partenaires privés, sur la base d'une infrastructure numérique, de feux de signalisation intelligents et de sources de données qualitatives et durables. Cela permet aux décideurs, aux entreprises, aux gouvernements, aux citoyens et aux créateurs d'applications de commencer à rendre le trafic plus fluide, plus durable, plus confortable et plus sûr pour chaque usager de la route⁴⁰. Il se décline en trois objectifs stratégiques⁴¹ à savoir :

- ✓ Investir dans l'opérationnalisation de feux de signalisation intelligents coopérant avec les usagers de la route en fonction des situations de circulation les plus pertinentes à traiter dans les cas d'utilisation.
- ✓ Développer un système de données ouvertes permettant aux usagers de la route d'accéder et de fournir des informations pertinentes (en temps réel) au système.

³⁹ EPA, *SmartWay program*, <https://www.epa.gov/smartway/smartway-global-collaboration>

⁴⁰ Belgium tender, *Mobilidata Project*, <https://www.belgiumtenders.com/tender/mobilidata--project-a-core-2d5d223.php>

⁴¹ UE, *Projet Mobilidata*, <https://trimis.ec.europa.eu/programme/mobilidata>

✓ Développer des outils d'appui aux politiques, développer la R&D pour les cas d'utilisation de la mobilité de « prochaine génération » en mettant l'accent sur les usagers les plus vulnérables de la route (vélos et piétons) et les applications de guidage des camions.

En effet, l'action permettra le déploiement d'au moins 90 contrôleurs intelligents de feux de signalisation (iTLC⁴²) desservant l'ensemble du réseau routier RTE-T traversant la Région flamande (2019-BE-TM-0258-W). Cela implique des emplacements liés au corridor Mer du Nord-Méditerranée, au corridor Mer du Nord-Baltique et au corridor Rhin-Alpin ainsi qu'aux nœuds urbains d'Anvers et de Bruxelles. Ce projet qui s'étendra sur la période 2020-2023 permettra de réaliser des études de faisabilité dans d'autres régions.

6.4 Constats sur les TIC et les STI

Les systèmes de transports intelligents (STI) sont d'importants outils complémentaires aux politiques et actions de mobilité durable telles que l'électrification, le déploiement de corridors durable avec des stations de ravitaillement, etc. En plus des performances de durabilité, ils permettent également l'amélioration des coûts de transports à travers la coopération entre les acteurs.

Cependant, les « échanges de fret en ligne », qui permettent de répartir les marchandises selon les capacités, ont tendance à fonctionner sur un seul mode, par exemple au sein du transport routier. S'ils étaient multimodaux, l'intermodalité pourrait être davantage encouragée. En outre, des liens mieux intégrés en termes de TIC entre les organisations situées tout au long d'une chaîne d'approvisionnement permettraient de prévoir plus précisément les volumes à transporter, évitant de ce fait de nombreux déplacements inutiles (UE, 2010). Selon Crainic et al. (2009), pour atteindre le plein potentiel des STI, il faut donc relever le défi de rendre l'utilisation la plus intelligente possible du matériel déployé et de l'énorme richesse de données qu'il fournit. Ces derniers affirment également que l'introduction de meilleurs logiciels d'aide à la décision basés sur la recherche opérationnelle pourrait améliorer de manière très significative les performances ultimes des STI de fret.

⁴² iTLC: intelligent Traffic Light Control

7 Synthèses de quelques politiques et instruments de transport durable

Dans cette section nous synthétisons les niveaux d'initiatives de décarbonation du transport de marchandises dans dix pays parmi ceux retenus dans cette étude. Ces pays ont été choisis en raison de la disponibilité des informations assez fiables sur leurs politiques et mesures de décarbonation. Nous essayons ensuite de classer ces mesures ou pratiques en fonction des priorités que chaque pays accorde à chaque mesure particulière en leur affectant des indices (voir légende). Pour cela nous présentons dans un tableau récapitulatif les indices de chaque pays en lien avec les pratiques retenues. Les détails sur les mesures de chaque pays sont en annexes.

Tableau 9 : Synthèses des niveaux d'initiatives et des pratiques discutées dans les pays identifiés.

Pays	Tarif. et incitatifs	Inter-modalité	Electrification	Système de caténaires	Biocarburant GNC/GNL	Efficacité énergétique	TIC/STI	Hydro gène	Total indices	Variation des émissions de GES en transport (camions lourds) 1990-2018
Californie	3	3	2	2	3	2	2	2	19	2%
Royaume-Uni	4	3	2	1	2	2	2	1	17	-7%
Suisse	4	3	2	1	2	2	1	2	17	19%
Allemagne	4	3	3	1	2	1	1	2	17	44%
Suède	4	2	2	2	2	1	1	1	15	-7%
Belgique	4	3	2	0	2	1	1	1	14	30%
Japon	3	1	2	0	2	2	1	2	13	-16%
France	3	2	2	0	2	1	1	2	13	1%
Irlande	4	2	2	0	2	1	1	1	13	144%
Chine	3	3	3	0	0	1	0	2	12	Non Disponible

Interprétation des niveaux d'initiatives :

- 0** : Aucune mesure existante ou aucune donnée fiable recueillie lors de cette recherche
- 1** : Phase pilote ou en étude. Cela peut tout aussi concerner un projet pilote sur des véhicules légers et dont les résultats pourront être applicables aux véhicules lourds.
- 2** : Programmes/projets de mise à l'échelle
- 3** : Programmes/projets de mise à l'échelle avancée ou existences de plusieurs mesures/instruments
- 4** : Lorsque la taxe maximale applicable est supérieure à 2 000€ (indice applicable seulement à la colonne « tarification et incitatifs ») (voir annexes pour les niveaux de taxes).

Une analyse sommaire de ce tableau nous permet de constater que tous les pays retenus ont des pratiques avancées en termes de tarification ou d'incitatifs, même si dans la plupart des cas ces mesures sont encore insuffisantes ou inadaptées pour le transport de marchandises. Cependant, comme on peut le constater dans les annexes, le niveau de taxes varie considérablement d'un pays à l'autre. Par exemple pour les pays comme le Royaume uni (561,5 € - 6 310,7 € /an), l'Irlande (420 € - 4 906 €/an), la Suisse (596,4€ - 3 670,3 €/an), le niveau de la taxe est assez élevé (pouvant aller au-delà de 3 500 €). Ces taxes sont en générale des taxes annuelles d'immatriculation pour les véhicules émetteurs, de plus en plus pénalisantes selon le niveau d'émission. Ce niveau de taxation pourrait être perçu comme une mesure plus agressive comparativement à la Chine (7,63 € - 718,52 €/an), la France (16 € - 932 € /an) ou au Japon (54,03 € -1 535,71 €/an). En comparant également le total des indices avec les variations de GES des camions lourds et autobus, on peut entrevoir une certaine corrélation entre ces deux variables. Ainsi, à l'exception du Japon et de la France, tous les autres pays ayant connu une variation modérée de leurs GES (<30 %) ont un « total indice » assez élevé. Ce qui impliquerait que plus les mesures se multiplient et sont agressives, plus elles auront une incidence positive sur la réduction des émissions de GES. Quant aux mesures incitatives, leurs impacts sur le comportement des acteurs, tendent à diminuer dans le temps. Ainsi dans une analyse des mesures de subvention pour la promotion des véhicules à faible émission en Chine, Ma et al. (2017), ont constaté que la technologie restait un facteur de goulot d'étranglement dans l'industrie de véhicules à faible émission et que l'effet du progrès technologique sur la diffusion des véhicules à faible émission était plus important que les politiques de subvention économique. Ils suggèrent à cet effet que les fonds alloués aux subventions d'achat de véhicules soient plutôt redirigés sur la recherche et développement pour l'efficacité énergétique et des systèmes de transports

intelligents. Sur ce point presque tous les pays accusent un retard assez important. Aucun pays n'ayant encore des mesures en phase avancée.

L'électrification des transports, bien que plus avancée pour les véhicules utilitaires légers, reste encore marginale et toujours en phase pilote pour les véhicules lourds, principalement à cause de la faible autonomie des batteries et le temps de recharge encore long. Malgré le faible taux de pollution du fret ferroviaire et maritime et des systèmes de caténaires, les projets et programmes y afférents sont en phase pilote ou de développement. Cette situation s'explique par la complexité du transport multimodal et l'ampleur des investissements que cela nécessite pour les systèmes de caténaires. Comme nous pouvons également le constater, la majorité des projets et programmes de développement de l'hydrogène comme source d'énergie dans les transports sont encore au stade pilote ou de recherche-développement. Sur ce plan on note que des pays ou des états comme l'Allemagne, le Japon, la Chine et la Californie ont une bonne avance avec des projets pilotes ou de mise à l'échelle. Certains de ces projets ne concernent pas directement le transport de marchandises, mais nous les avons retenus, car les résultats des recherches pourraient également servir dans le cadre du transport de marchandises.

8 L'avenir du secteur des transports de marchandises au Québec : perspectives et pistes d'action

Le découplage des activités de transport avec les émissions de GES est une étape cruciale pour la décarbonation du sous-secteur de transport des marchandises. Les politiques de transport seront alors déterminantes pour l'atteinte des objectifs de l'accord de Paris. Depuis lors, plusieurs pays ont mis en place des mesures et des politiques pour atténuer les émissions dans le secteur du transport.

Les politiques de transport sont étroitement liées aux investissements dans les transports. Ce secteur nécessite de lourds investissements et cela conduit à l'implication du gouvernement dans la mise en place de politiques et de stratégies claires pour impulser la transition durable. Ainsi pour chaque pratique abordée dans ce travail, nous identifions quelques pistes d'action applicables au contexte et en fonction des instruments déjà existants.

1. Tarification et mesures incitatives : La transition vers des modes de transports durables ne pourrait se faire sans des mesures d'accompagnements et des incitatifs pour les acteurs du secteur. Dans le cadre de sa politique énergétique et de sa stratégie d'électrification des transports, le Québec dispose d'une bonne batterie de mesures incitatives auxquelles pourraient s'ajouter les suivantes :

- ✓ L'internalisation des externalités liées au transport routier : il s'agira de prendre en compte dans le coût du péage (ou d'une taxe kilométrique), les coûts liés aux infrastructures, à la pollution atmosphérique et sonore, à l'occupation/utilisation du territoire, etc. la prise en compte de tous ces coûts permettra de refléter les coûts réels du fret routier et par conséquent de rendre les autres modes de transport plus compétitifs.
- ✓ Le renforcement des mesures d'accompagnements (Éco-Camionnage, subventions véhicules hybrides/électriques) pour les opérateurs du transport de frets afin d'accélérer la décarbonation de leurs flottes de véhicules lourds ou le transfert vers le ferroviaire et les voies navigables internes ;
- ✓ Outre le prix du carbone lié au marché du carbone et la taxe sur les carburants, le Québec n'utilise pas encore d'autres mesures coercitives comme les taxes ou les taux d'immatriculation basés sur la pollution des véhicules. Il serait utile que le gouvernement adopte ce type de mesures qui peuvent être plus incitatives que les subventions.

2. Transfert modal : Selon des estimations du Ministère des Transports, en 2006-2007, 6 % des déplacements de camions avaient un potentiel d'intermodalité dans le contexte d'alors, sans mesures additionnelles ou d'améliorations structurelles de l'intermodalité et du réseau ferroviaire (MTQ, 2013). Le fait que le transport ferroviaire relève des compétences fédérales ne laisse que de faibles marges de manœuvre aux provinces pour mettre en œuvre des stratégies de décarbonation incluant le transport ferroviaire. La mise en œuvre d'une telle option ne sera possible qu'avec une réforme majeure du secteur permettant aux provinces d'avoir voix de chapitre quant à l'organisation et le financement de son réseau interne. Même si le Québec dispose déjà d'un *programme visant la réduction ou l'évitement des émissions de gaz à effet de serre par le développement du transport intermodal (PREGTI)*, ses actions trop timides n'ont pas encore réussi à inverser la tendance des émissions du transport de marchandises, toujours à la hausse depuis 1990 (MT, 2019). Par exemple, son budget financé par le Fonds vert est conditionnel à la disponibilité des ressources financières. Aussi, l'axe de navigation du fleuve Saint-Laurent constitue un atout important pour le transfert modal de la route vers le transport navigable interne et maritime.

Largement plus écoénergétiques, les transports ferroviaire et maritime représentent des avenues très prometteuses pour la décarbonation du transport de marchandises. Bien que nécessitant de lourds investissements, ils demeurent des modes moins polluants et plus adaptés au transport de marchandises en vrac. Les principaux obstacles de ces modes de transport se déclinant en matière de coûts, de temps, de flexibilité et d'adaptabilité, l'action du gouvernement consisterait principalement à accompagner les acteurs dans un partenariat public-privé avec des investissements conséquents pour développer les infrastructures associées. Comme dans le cas de la Belgique, des subventions pourraient être accordées aux entreprises logistiques qui optent pour le transfert vers ces modes. Pour pallier l'obstacle de flexibilité et promouvoir le transport intermodal, le développement d'une plateforme intermodale avec en sus la création de ports secs permettra ainsi de mettre en avant les avantages compétitifs de l'intermodalité et de décharger le volume du fret routier.

3. Électrification : Bien que le Québec déclare que l'électrification des transports est une de ses priorités pour l'atteinte de ses objectifs de carboneutralité, ses actions pour le transport des marchandises restent timides. Pourtant le Québec dispose d'importantes ressources entrant dans

le processus d'électrification des transports et du transport lourds en particulier. Il dispose aussi d'un génie-conseil spécialisé dans la conception et la construction d'infrastructure de transport d'électricité qui pourrait être transférable au développement de réseau routier caténaire. Avec d'importants gisements de Lithium, élément essentiel dans la fabrication des batteries, une électricité propre et en surplus, et des expertises à la pointe de la technologie avec des entreprises comme Lion Electric qui se spécialise dans la production de bus et camions électriques, ou AddEnergie qui est le leader dans la conception et l'installation de bornes de recharges, le Québec pourrait se tailler une place de choix dans l'électrification des transports. Cela passera par des engagements plus ambitieux et des investissements conséquents. En plus des mesures tarifaires et incitatives, le gouvernement pourrait :

- ✓ Élaborer un plan d'électrification des transports des marchandises avec des cibles de décarbonation assez objectives, mais très ambitieuses. Un tel plan permettra de donner une orientation claire aux investisseurs et aux parties prenantes du secteur du transport en orientant le sens de l'innovation ;
- ✓ Investir massivement dans la recherche et développement pour promouvoir les innovations de niches, et soutenir les projets d'électrification dans le cadre de partenariat public-privé. Cela engagerait des investissements assez conséquents, mais les effets de la décarbonation du secteur et de l'ensemble de l'économie seront plus que bénéfiques ;
- ✓ Mobiliser les parties prenantes et développer des partenariats avec d'autres provinces au Canada ou d'autres États aux États-Unis pour la création d'une industrie électrique dynamique et innovante (développement de corridors électriques par exemple).
- ✓ Investir dans des infrastructures d'avenir comme les systèmes de caténaires et la création de corridors électriques sur les grands axes routiers comme par exemple l'axe A20-H401 entre Québec et Windsor. Contrairement à l'hydrogène dont la technologie est encore à ses débuts et qui présente des enjeux en matière de rendement dans la production ou de gestion de la forte demande d'électricité induite, le système de caténaire qui est une technologie déjà testée et ayant fait ses preuves dans le domaine ferroviaire, présente des opportunités pour des applications dans le transport lourd de marchandises. Puisque les pantographes intelligents peuvent se connecter et se rétracter automatiquement pendant que le véhicule est en déplacement et qu'il existe déjà des technologies de recharge rapide par câbles, il sera possible de recharger complètement les batteries sur un dixième de leurs distances d'autonomie. Par

exemple pour une autonomie de 100 km, il serait possible de recharger complètement les batteries sur 10 km. À plus court terme, il est possible d'utiliser des camions déjà disponibles à système hybride diesel et biodiesel, le temps que la technologie à batterie soit davantage commercialisée (Kayser-Bril et coll., 2021). Ainsi par ce stratagème, on pourrait pallier le problème de coûts élevés des infrastructures de système de caténaire et les rendre plus rentables. Cette option permettrait non seulement de faire des économies considérables en consommation de carburant, mais aussi de décarboner le transport routier des marchandises.

- ✓ Adopter des mesures de décarbonation pour les derniers kilomètres de livraison en milieu urbain. Cela passerait par la création de points de collectes et des restrictions d'émission en zone urbaine pour les camions et les modes de transports utilisés pour la livraison finale.

4. Carburants alternatifs : Les propriétés de l'hydrogène, environ 500 km d'autonomie et 3 minutes de recharge (Edwards et al. 2021), comparativement aux batteries électriques sont un atout majeur pour la mobilité intensive, longue distance et le transport lourd. Le nombre de pays qui se dotent de politiques soutenant directement les investissements dans les technologies de l'hydrogène augmente, avec une attention croissante sur de nouvelles applications telles que le transport routier. Au niveau fédéral, l'hydrogène est déjà au centre des préoccupations et des projets de recherche et développement sont déjà en cours (Shamsi et al. 2021). Le Québec dispose de plusieurs atouts pour la production d'hydrogène par électrolyse avec de l'énergie déjà propre. Ainsi quelques mesures pourraient être mises en place pour accélérer l'adoption de l'hydrogène comme source d'énergie dans les transports. Il s'agit entre autres de :

- ✓ Établir des signaux à long terme avec des politiques publiques établissant des feuilles de route spécifiques pour l'industrialisation et le passage à l'échelle permettant de renforcer la confiance des investisseurs. Tout comme la Californie, le Québec pourrait élaborer un plan d'action pour le développement des véhicules à piles à hydrogène.
- ✓ Établir des régulations et standards pour le développement des infrastructures pour la production et la distribution de l'hydrogène ;
- ✓ Promouvoir la recherche et développement dans ce sens et stimuler la demande d'hydrogène pour les transports ;
- ✓ Participer dans un partenariat public-privé, au financement des projets pilotes et des infrastructures de la chaîne de valeur ;

- ✓ Mise en place d'un réseau de distribution sur les grands axes routiers, condition minimale pour l'expansion des véhicules à pile à hydrogène.
- ✓ Quant à la promotion des carburants moins polluants comme le gaz, puisqu'il existe déjà une route bleue entre le Québec et l'Ontario (MERN, 2015), le Québec devrait intensifier ses actions par la promotion de corridors bleus avec l'implantation de stations de ravitaillement au GNC/GNL.

Pour promouvoir de telles technologies, le rôle des gouvernements est crucial et la collaboration avec les parties prenantes pour relever les principaux défis, n'est pas facultative si on veut faire de l'hydrogène une source importante dans le système énergétique au sens large.

5. Efficacité énergétique : Améliorer l'efficacité énergétique des camions est une des manières les plus efficaces de réduire les émissions de CO₂. Selon une étude de Transport et Environnement (2020), en utilisant toutes les technologies disponibles et potentielles, il serait possible de rendre les camions jusqu'à 43 % plus économes en carburant d'ici 2030 par rapport à 2015 (Delgado et al. 2017 cité dans Transport et Environnement, 2020). Au Canada, les questions des normes réglementaires pour l'efficacité énergétique relèvent du gouvernement fédéral, et ces normes sont pratiquement alignées sur les normes américaines. Cependant, le Québec pourrait également mettre en place des incitatifs pour faciliter la transition rapide vers des véhicules plus efficaces et/ou en imposant des quotas de véhicules lourds à faible ou zéro émission aux entreprises de logistique opérant au Québec. Le partage d'information et des meilleures pratiques avec des Etats avant-gardistes comme la Californie devraient être envisagé dans une perspective de la coopération internationale. En plus de faciliter la décarbonation, cette mesure d'efficacité énergétique entraînera des économies de consommation de carburant qui permettrait de réaliser des économies et de rendre les nouvelles versions de véhicules lourds très compétitives.

6. TIC et STI, une meilleure efficacité logistique : La demande de transport ainsi que la consommation d'énergie pourraient être réduites grâce à une optimisation et à une meilleure utilisation de la capacité existante de la flotte de véhicules. En 2013, une étude de CPCS (MTQ, 2013) estimait qu'environ 36.8% des camions se déplacent à vide au Québec. Les quelques actions suivantes peuvent permettre d'améliorer l'efficacité de la logistique tout en favorisant la décarbonation des transports :

- ✓ Développer des technologies qui favorisent le partage d'information sur les disponibilités de

volumes et de capacité de transports. Par exemple, une déclaration obligatoire des volumes disponibles pourrait être exigée, pour permettre de les rendre disponibles. Ainsi, les opérateurs logistiques pourraient comme dans le cas de véhicules légers (autopartage, covoiturage) réduire/minimiser les déplacements à vide et réduire les consommations de carburants, même si les déséquilibres commerciaux entraîneront toujours une utilisation sous-optimale de la capacité de fret ;

- ✓ Favoriser le développement et l'adoption de technologies visant à accroître l'adéquation des différents modes de transports et donc de l'intermodalité. Cela permettra de résoudre les goulots d'étranglement aux terminaux de chargement et de transfert ;
- ✓ Dans le cadre du péage routier, les STI pourraient également être mise à contribution pour réduire les coûts liés aux mesures tarifaires et accroître l'efficacité de ces mesures. C'est par exemple le cas du péage routier basé sur la distance parcourue.

Conclusion

Les chiffres sur les émissions de CO₂ (36 % des émissions totales, OCDE 2019) imputables au secteur des transports révèlent non seulement le poids du transport dans les émissions de CO₂, mais également son rôle croissant dans les efforts de décarbonation. Il est donc impératif que la décarbonation du transport de marchandises (environ 25 % des émissions du secteur du transport) occupe une place de plus en plus grande dans les priorités des pouvoirs publics.

Si des mesures de décarbonation ont existé depuis fort longtemps pour les véhicules légers et le transport urbain, le cas des véhicules lourds accuse un retard notable, avec des politiques ou des mesures de décarbonation assez récentes.

Malgré les instruments et mesures politiques déjà en place pour promouvoir des transports moins polluants, la tendance des émissions ne semble pas avoir connu de répit. Cette situation est en partie due aux émissions issues de la croissance de la demande de transport pour le fret, induisant ainsi l'augmentation rapide des véhicules lourds sur les routes, mais aussi le temps assez long qu'il faut pour que les mesures aient un impact sur les émissions.

La bonne nouvelle est qu'il y a encore une bonne marge de manœuvre pour améliorer l'efficacité ou pour transiter vers des modes moins polluants. S'il est encore trop tôt pour affirmer avec certitude que la technologie et l'innovation seront la voie du futur, force est de reconnaître que les innovations technologiques auront leur place dans le processus de transition du secteur des transports vers la carboneutralité. En effet l'efficacité des véhicules lourds à faible ou zéro émission peut varier considérablement entre 20 à 77 % en fonction de la technologie utilisée (carburants alternatifs, hybride, électrique, etc.) (Akerman, 2016). Selon l'agence internationale de l'énergie (IEA, 2020), plus de 60% des réductions d'émissions en 2070 proviendront de technologies qui ne sont pas encore disponibles sur le marché aujourd'hui, ce qui fait de ces options technologiques de véritables opportunités pour la décarbonation des transports. Cependant, force est de reconnaître que les alternatives actuelles pour les énergies renouvelables ne sont pas encore avancées et coûtent encore plus cher que les énergies fossiles.

À travers cette recherche, le constat qui se dégage est que les mesures et les pratiques mises en œuvre sont insuffisantes et peuvent ne pas avoir des impacts assez importants au regard de l'ampleur des effets du transport. Par contre, plus il y a de mesures plus leurs actions combinées auront des impacts conséquents.

Ainsi, l'action des gouvernements comme celui du Québec devra consister à mettre en place toutes les politiques et les mesures d'accompagnement nécessaires et en partenariat avec l'industrie des véhicules, les secteurs de l'énergie et des transports, pour favoriser la recherche et développement des technologies qui vont permettre d'amorcer et de réaliser la décarbonation des transports. Comme mentionné plus haut, le Québec dispose de ressources comme l'énergie hydroélectrique, les réserves de lithium et l'expertise pour amorcer l'électrification des transports lourds. Cependant, il devrait également se tourner vers d'autres technologies et vecteurs énergétiques telles que l'hydrogène, qui pourrait être complémentaire dans le contexte québécois. Aussi, la place du transfert modal dans des transports décarbonés n'est plus à démontrer. Le faible taux de pollution du fret ferroviaire et des voies navigables internes ne sont pas à négliger dans les stratégies de décarbonation et l'Union européenne l'a d'ailleurs bien comprise en déclarant 2021, année européenne du rail⁴³.

Enfin, si cette recherche documentaire s'est limitée aux pratiques internationales en matière de décarbonation du transport de marchandises, d'autres avenues telles que des études de faisabilité de corridors électriques (système de caténaires), de nouveaux corridors ferroviaires ou de mise en place de réseaux de production et de distribution d'hydrogène dans le contexte québécois doivent être explorées pour donner aux décideurs plus d'outils et de données pour justifier leurs choix stratégiques en matière de transport.

⁴³ Commission européenne, 2021 année européenne du rail, https://ec.europa.eu/france/news/20210104/annee_europeenne_du_rail_fr

Annexes

Annexe 1. Allemagne : Mesures et politiques en transport durable de marchandises

Mesures	Politiques et pratiques en place	Étape de mise en œuvre
Tarification et incitatifs	Péage des véhicules poids lourds fondé sur la distance ⁴⁴ Taxe sur les véhicules à moteur ⁴⁵ (592 € -2 717,25 €/an) Subvention directe à l'achat de camions à batterie électrique et à pile à hydrogène ⁴⁶ .	4
Intermodalité/multimodalité	Le projet Masterplan pour le transport de marchandises et la logistique ⁴⁷ (investissement de 86 milliards d'euros dans les transports ferroviaires) Cadre réglementaire européen du secteur du ferroviaire ⁴⁸ Le projet multimodal Geodis	3
Électrification	Plan général pour les infrastructures de recharge électrique ⁴⁹ (programme 1 million de bornes en 2030). Projet de 7 à 10 millions de véhicules électriques en Allemagne à l'horizon 2030	3
Système de caténaires	Le projet d'autoroute électrique	1
Biocarburant, GNL/GNC	Augmentation du bioéthanol dans l'essence - E10 Réseau de GNL/GNC European Hydrogen Refuelling Station Availability System ⁵⁰	2
Efficacité énergétique	Règlements UE 2017/2400 et UE 2019/1242	1
Système de transport intelligent (STI/TIC)	EU Intelligent Transport System Directives	1
Réseau hydrogène	Le projet Clean Energy Partnership Objectif 2050 : construction de 140 stations à hydrogène pour décarboner le transport de marchandises ⁵¹ (investissements de 9milliards d'euros)	2

Note : La taxe allemande sur les véhicules à moteur est fonction du poids à vide des véhicules, de la classe d'émission sonore et de la classe d'émission de gaz. Cette taxe varie entre 592 € et 2 717,25 € par an pour les véhicules dont le poids à vide est compris entre 3,5 et 23 tonnes.

⁴⁴ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_5.aspx?Key=8f53500e-a177-443f-b6f5-aeaa4f975ed2&OryCtx=4&OryFlag=2

⁴⁵ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_5.aspx?Key=02049ce1-d2e5-4b91-92d7-4a20504c2e3a&OryCtx=4&OryFlag=1

⁴⁶ <http://www.avere-france.org/Uploads/Documents/1592402408d84e99da95297522e2ff1eeada45b89->

[TE_comment_decarboner_le_fret_francais_d_ici_2050.pdf](#)

⁴⁷ <file:///Users/user/Desktop/Doc%20Etudes%20HEC/Projet%20d'int%C3%A9gration/Inter%20et%20multimodalit%C3%A9/Fret%20ferroviaire%20en%20RFA%20-%20une%20dynamique%20%20optimiser.html>

⁴⁸ COM (2016) 501, une stratégie européenne pour une mobilité à faible taux d'émissions

⁴⁹ <https://www.bundesregierung.de/breg-fr/dossier/protection-du-climat/verkehr-1674028>

⁵⁰ <https://www.h2-mobile.fr/actus/belgique-air-liquide-met-jour-station-hydrogene-zaventem/>

⁵¹ <https://www.h2-mobile.fr/actus/allemande-140-stations-hydrogene-decarboner-transport-marchandises/>

Annexe 2. Belgique : Mesures et politiques en transport durable de marchandises

Mesures	Politiques et pratiques en place	Étape de mise en œuvre
Tarification et incitatifs	Taxe de circulation ⁵² (337€ - 2138€/an) Taxe de circulation supplémentaire ⁵³ (véhicule >12 tonnes) Ecomalus sur l'immatriculation des véhicules Droits d'accise sur les carburants et l'électricité ⁵⁴ Réduction de taxe pour les véhicules diesel équipés d'un filtre à particules ⁵⁵ Réduction d'impôt pour l'acquisition d'un véhicule électrique ⁵⁶	4
Intermodalité/multimodalité	Subvention annuelle aux opérateurs intermodaux Partenariat public-privé pour les investissements dans les infrastructures Cadre réglementaire européen du secteur du ferroviaire	3
Électrification	Développement de bornes de recharge rapides sur les corridors routiers	1
Système de caténaires	---	0
Biocarburant, GNL/GNC	Déploiement pilote d'un réseau GNC/GNL intelligent en Flandres Augmentation du bioéthanol dans l'essence - E10 European Hydrogen Refuelling Station Availability System ⁵⁷	2
Efficacité énergétique	Règlements UE 2017/2400 et UE 2019/1242	1
Système de transport intelligent (STI/TIC)	Le projet « Mobilidata » EU Intelligent Transport System Directives	1
Réseau hydrogène	Projet pilote d'installation de station de ravitaillement en hydrogène ⁵⁸ (2016)	1

Note : La taxe de circulation de la Belgique est définie en fonction de la puissance du moteur des véhicules. Elle varie entre 337 € et 2138 € par an et pour les véhicules dont la puissance varie entre 10 et 20 CV.

⁵² https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_4.aspx?Key=0797d08c-feaa-4f67-b2eb-28cee1759dbd&QryCtx=3&QryFlag=3

⁵³ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_5.aspx?Key=02049ce1-d2e5-4b91-92d7-4a20504c2e3a&QryCtx=4&QryFlag=1

⁵⁴ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_1.aspx?Key=d93bac59-3fe6-49a2-b4cd-90e20564318e&QryCtx=10

⁵⁵ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_14.aspx?Key=517d2cd2-9de4-415d-b01a-7ac6ee8d0b38&QryCtx=2

⁵⁶ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_1.aspx?Key=d93bac59-3fe6-49a2-b4cd-90e20564318e&QryCtx=10

⁵⁷ <https://www.h2-mobile.fr/actus/belgique-air-liquide-met-jour-station-hydrogene-zaventem/>

⁵⁸ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1464285916301158>

Annexe 3. Californie : Mesures et politiques en transport durable de marchandises

Mesures	Politiques et pratiques en place	Étape de mise en œuvre
Tarifification et incitatifs	Marché carbone, Taxes sur les carburants ⁵⁹ Frais de poids de véhicule ⁶⁰ (300,1€ – 1 865,9€/an) Subvention directe à l'achat de camions à batterie électrique et à pile à hydrogène. Subventions pour l'utilisation d'énergie alternative ⁶¹	3
Intermodalité/multimodalité	California international ports of entry project ⁶² (POE) Emission Reduction Program – Phase II	2
Électrification	L'autoroute électrique de la côte ouest California's Advanced Clean Trucks rule ⁶³	2
Système de caténaires	L'autoroute électronique de la Californie	2
Biocarburant, GNL/GNC	Subventions pour véhicules à carburant de remplacement et infrastructures de ravitaillement ⁶⁴ Incitatifs pour les carburants alternatifs	3
Efficacité énergétique	Normes d'émissions de GES pour les moteurs et véhicules à usages moyens et lourd Règlement sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre des véhicules lourds du CARB ⁶⁵	2
Système de transport intelligent (STI/TIC)	Connected Vehicle Technology (CVT) on freight truck emissions ⁶⁶ Le programme « SmartWay »	2
Réseau hydrogène	La California Fuel Cell Partnership Quota de vente de camions zéro émission ⁶⁷ (électrique et à hydrogène). 5-9% en 2024 et 30-50% en 2050	2

Note : Les frais de poids de véhicules en Californie varient entre 300,1 € et 1865,9 € par an pour des poids allant de 10 000 à 80 000 livres.

⁵⁹ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_5.aspx?Key=02049ce1-d2e5-4b91-92d7-4a20504c2e3a&QryCtx=4&QryFlag=1

⁶⁰ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_5.aspx?Key=02049ce1-d2e5-4b91-92d7-4a20504c2e3a&QryCtx=4&QryFlag=1

⁶¹ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_14.aspx?Key=517d2cd2-9de4-415d-b01a-7ac6ee8d0b38&QryCtx=2

⁶² California Transportation Plan 2050

⁶³ <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/advanced-clean-trucks>

⁶⁴ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_14.aspx?Key=517d2cd2-9de4-415d-b01a-7ac6ee8d0b38&QryCtx=2

⁶⁵ <https://www.transportpolicy.net/standard/california-heavy-duty-ghg/>

⁶⁶ <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2213624X20300353?token=675BFA75416CDAD4AC678DF35A1B16661D07FAF02649CAB3E2035C7BD63582B561C31B70864617B59E78A17CD65EFAA2>

⁶⁷ <https://www.h2-mobile.fr/actus/californie-quotas-encourager-developpement-camions-hydrogene/>

Annexe 4. Chine : Mesures et politiques en transport durable de marchandises

Mesures	Politiques et pratiques en place	Étape de mise en œuvre
Tarifification et incitatifs	Taxe de protection de l'environnement (ancienne «taxe sur les polluants») Taxe sur les véhicules et les bateaux ⁶⁸ (7,63 € - 718,52 €/an) Policy of restricting internal combustion engine vehicle (ICEV) purchase and the abolishment of traffic restrictions for NEVs Tax exemption for NEVs	3
Intermodalité/multimodalité	Le corridor multimodal de la Chine Le corridor trans eurasia	3
Electrification	New Energy Vehicle Master Plan ⁶⁹ Policy of restricting internal combustion engine vehicle (ICEV) purchase and the abolishment of traffic restrictions for NEVs TVTC (Thousands of Vehicles, Tens of Cities) program, promoting NEVs in pilot cities. 12 000 electric trucks on the roads in the past decade ⁷⁰	3
Système de caténaires	---	0
Biocarburant, GNL/GNC	---	0
Efficacité énergétique	La norme GB 30510-2018	1
Système de transport intelligent (STI/TIC)	---	0
Réseau hydrogène	Formation de trois grands pôles industriels d'hydrogène et de piles à combustible ⁷¹ . Accord de livraison de 4000 camions à hydrogène en 2025 par Hyundai ⁷²	2

Note : La taxe sur les véhicules et les bateaux de la Chine varie entre 2,18 € et 16,33 € par tonnes de poids net par an. En effectuant une transposition sur les camions dont le poids net serait compris entre 3,5 tonnes et 44 tonnes, on obtient l'intervalle 7,63 € et 718,52 €.

⁶⁸ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_5.aspx?Key=02049ce1-d2e5-4b91-92d7-4a20504c2e3a&QryCtx=4&QryFlag=1

⁶⁹ <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0301421517304895?token=824140C974D206139996DB3AB7470865C2EB9C1F911353C4733CB383FB5613CAA777D478FFDA553791BB01DC95BFA56F>

⁷⁰ <https://www.iea.org/reports/trucks-and-buses>

⁷¹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319920342506>

⁷² <https://www.h2-mobile.fr/actus/hyundai-va-livrer-4000-camions-a-hydrogene-chine/>

Annexe 5. France : Mesures et politiques en transport durable de marchandises

Mesures	Politiques et pratiques en place	Étape de mise en œuvre
Tarifification et incitatifs	La taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques (TICPE). La taxe carbone et taxe à l'essieu ⁷³ (16 € - 932 € /an ⁷⁴) Taxe annuelle sur les véhicules automobiles à fortes émissions de CO2 (taxe annuelle sur la détention de véhicules polluants) Une prime à la conversion pour passer à des véhicules propres ⁷⁵ Amortissement accéléré des voitures électriques et des voitures fonctionnant au GPL ou au GNC ⁷⁶	3
Intermodalité/multimodalité	Le programme opérateurs ferroviaire de proximité ⁷⁷ Le renforcement de l'efficacité et du report modal dans les transports de marchandises ⁷⁸	2
Électrification	Une prime à la conversion pour passer à des véhicules propres ⁷⁹ Bonus à l'achat de véhicules à faibles émissions de CO2 ⁸⁰	2
Système de caténaires	---	0
Biocarburant, GNL/GNC	Projet de développement des véhicules au gaz (330 à 840 postes de ravitaillement pour les véhicules au gaz naturel) Amortissement spécial pour les achats de véhicules au gaz naturel ⁸¹ Augmentation du bioéthanol dans l'essence – E10	2
Efficacité énergétique	Réglementation française de l'information GES des prestations de transports ⁸²	1
Système de transport intelligent (STI/TIC)	Digitalisation du transport ferroviaire ⁸³ EU Intelligent Transport System Directives	1
Réseau hydrogène	Projet de 2000 véhicules poids lourds et 400 stations hydrogène ⁸⁴	2

Source : Ministère de la Transition écologique (<https://www.ecologie.gouv.fr>)

Note : La taxe à l'essieu de la France varie entre 16 € et 932 € en fonction de la catégorie du véhicule. La catégorie est définie le PTAC exprimé en tonnes, le nombre d'essieux et le type de suspension⁸⁵.

⁷³ http://www.avere-france.org/Uploads/Documents/1592402408d84e99da95297522e2fff1eada45b89-TE_comment_decarboner_le_fret_francais_d_ici_2050.pdf

⁷⁴ [https://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/vosdroits/F31220#:~:text=La%20taxe%20sp%C3%A9ciale%20sur%20certains,de%2012%20tonnes%20et%20plus\).&text=L'essieu%20est%20une%20barre.camion%2C%20semi%2Dremorque\).](https://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/vosdroits/F31220#:~:text=La%20taxe%20sp%C3%A9ciale%20sur%20certains,de%2012%20tonnes%20et%20plus).&text=L'essieu%20est%20une%20barre.camion%2C%20semi%2Dremorque).)

⁷⁵ <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/LOM%20-%20Mobilité%20propre.pdf>

⁷⁶ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_14.aspx?Key=517d2cd2-9de4-415d-b01a-7ac6ee8d0b38&QryCtx=2

⁷⁷ <https://www.ecologie.gouv.fr/operateurs-ferroviaires-proximite-ofp>

⁷⁸ <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/LOM%20-%20Mesures%20clés.pdf>

⁷⁹ <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/LOM%20-%20Mobilité%20propre.pdf>

⁸⁰ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_14.aspx?Key=517d2cd2-9de4-415d-b01a-7ac6ee8d0b38&QryCtx=2

⁸¹ http://www.avere-france.org/Uploads/Documents/1592402408d84e99da95297522e2fff1eada45b89-TE_comment_decarboner_le_fret_francais_d_ici_2050.pdf

⁸² <https://www.ecologie.gouv.fr/information-ges-des-prestations-transport>

⁸³ <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/PIA4%20-%20acceleration%20transport%20-%20synthèse%20web-diffusion.pdf>

⁸⁴ http://www.avere-france.org/Uploads/Documents/1592402408d84e99da95297522e2fff1eada45b89-TE_comment_decarboner_le_fret_francais_d_ici_2050.pdf

Annexe 6. Irlande : Mesures et politiques en transport durable de marchandises

Mesures	Politiques et pratiques en place	Étape de mise en œuvre
Tarification et incitatifs	Taxe carbone sur les carburants fossiles pour les transports, Taxe sur les véhicules à moteur ⁸⁶ (420 € - 4 906 €/an) Taxe d'immatriculation des véhicules basée sur les émissions de CO ₂ ⁸⁷	4
Intermodalité/multimodalité	Cadre réglementaire européen du secteur du ferroviaire	2
Électrification	Taxe d'immatriculation des véhicules basée sur les émissions de CO ₂ ⁸⁸ (ne s'applique pas aux véhicules électriques)	2
Système de caténaires	---	0
Biocarburant, GNL/GNC	Le projet « Causeway » : un réseau public de GNC	2
Efficacité énergétique	Règlements UE 2017/2400 et UE 2019/1242	1
Système de transport intelligent (STI/TIC)	EU Intelligent Transport System Directives	1
Réseau hydrogène	Hydrogen Mobility Ireland : Projet de décarbonisation de réseaux de bus urbains en Irlande avec de l'hydrogène renouvelable ⁸⁹ .	1

Note : la taxe sur les véhicules à moteur de l'Irlande est fonction du poids à vide. La plage concernant les véhicules dont le poids varie entre 3,00 et 23,0 tonnes est de 420 € - 4 906 €.

⁸⁵ [https://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/vosdroits/F31220#:~:text=La%20taxe%20sp%C3%A9ciale%20sur%20certains.de%2012%20tonnes%20et%20plus\).&text=L'essieu%20est%20une%20barre.camion%2C%20semi%2Dremorque\).](https://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/vosdroits/F31220#:~:text=La%20taxe%20sp%C3%A9ciale%20sur%20certains.de%2012%20tonnes%20et%20plus).&text=L'essieu%20est%20une%20barre.camion%2C%20semi%2Dremorque).)

⁸⁶ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_5.aspx?Key=02049ce1-d2e5-4b91-92d7-4a20504c2e3a&QryCtx=4&QryFlag=1

⁸⁷ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_1.aspx?Key=d93bac59-3fe6-49a2-b4cd-90e20564318e&QryCtx=10

⁸⁸ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_1.aspx?Key=d93bac59-3fe6-49a2-b4cd-90e20564318e&QryCtx=10

⁸⁹ <https://www.h2-mobile.fr/actus/irlande-bus-hydrogene-test-dublin/>

Annexe 7. Japon : Mesures et politiques en transport durable de marchandises

Mesures	Politiques et pratiques en place	Étape de mise en œuvre
Tarifcation et incitatifs	Taxe sur la charge de pollution (taxe SOx) Taxe au tonnage des véhicules à moteur ⁹⁰ (54,03 € 1535,71 €/an) Subventions pour camions à faibles émissions (NOx) Substitution des automobiles à faibles émissions pour les opérateurs de transport ⁹¹	3
Intermodalité/multimodalité	Privatisation de la Japan National Railway et perte de compétitivité avec le trafic routier ⁹²	1
Électrification	Objectif de 15-20% de véhicules à faible émission à l'horizon 2020 ⁹³ ; Projet 2 millions de chargeurs électriques en 2020	2
Système de caténaires	---	0
Biocarburant, GNL/GNC	Compressed Natural Gaz Vehicles target : 1 million vehicles by 2010 ⁹⁴	2
Efficacité énergétique	Efficacité énergétique pour les camions lourds et Normes japonaises de consommation de carburant pour charges lourdes 2025 ⁹⁵	2
Système de transport intelligent (STI/TIC)	La stratégie de la « Smart city ⁹⁶ »	1
Réseau hydrogène	Développement des technologies de pile à combustible, de production d'hydrogène, de transport et de stockage. Mise à l'échelle du réseau japonais de station à hydrogène. Engagement de l'industrie automobile dans la production de camions à hydrogène ⁹⁷ (Toyota, Asahi, etc.)	2

Note : La taxe au tonnage des véhicules du Japon varie entre 21,61 € et 66,77 € par tonne par an. Par transposition et pour les tonnages concernés de 2,5 à 23 tonnes à vide, on obtient l'intervalle 54,03 € - 1535.71 € par an.

⁹⁰ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_5.aspx?Key=02049ce1-d2e5-4b91-92d7-4a20504c2e3a&QryCtx=4&QryFlag=1

⁹¹ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_14.aspx?Key=517d2cd2-9de4-415d-b01a-7ac6ee8d0b38&QryCtx=2

⁹² <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/109152/1/786474963.pdf>

⁹³ <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0959652618338277?token=B0F4E29A3A1A99465E982490C49D46C6167B2C689F9D72DB76AEC211F4596D70D4699324FC6CF109A2488B0536FCDB51>

⁹⁴ https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421504001855?casa_token=Q-p6OW9XR7MAAAAA:P3gN5nn5Pfw7_fvkJ_yhU3CxY3xXIC-zv1gdWGL8xz9Gzi-ICOM7YT0Jy115Ke1YfGtKAhg

⁹⁵ <https://www.transportpolicy.net/standard/japan-heavy-duty-fuel-economy/>

⁹⁶ <https://journals.openedition.org/echogeo/14598>

⁹⁷ <https://www.lefigaro.fr/flash-eco/japon-tests-en-conditions-reelles-de-camions-a-hydrogene-a-partir-de-2022-20201013>

Annexe 8. Royaume-Uni : Mesures et politiques en transport durable de marchandises⁹⁸

Mesures	Politiques et pratiques en place	Étape de mise en œuvre
Tarification et incitatifs	Taxe d'accise sur les véhicules ⁹⁹ (561,5€ – 6 310,7€ /an) La taxe sur les véhicules basée sur les émissions de CO ₂ ¹⁰⁰ Taxe d'obligation sur les combustibles non fossiles Subvention automobile à faibles émissions ¹⁰¹ Primes de franchise ferroviaire ¹⁰²	4
Intermodalité /multimodalité	A strategic vision for rail : rail freight delivering for the economy and environment Cadre réglementaire européen du secteur ferroviaire	3
Electrification	Low Emission Freight and Logistics Trial (LEFT) ¹⁰³ Developing one of the best electric vehicle infrastructure networks in the world	2
Système de caténaires	Zero emission research project and dynamic charging ¹⁰⁴	1
Biocarburant, GNL/GNC	Low Emission Freight and Logistics Trial (LEFT) ¹⁰⁵ Increasing the bioethanol in petrol – E10	2
Efficacité énergétique	Integrated Delivery Program ¹⁰⁶ (IDP) Enforcing emission limits European CO ₂ emission regulations for cars, vans, and now heavy-duty vehicles (HDVs)	2
Système de transport intelligent (STI/TIC)	Voluntary speed limiter Telematics to optimize vehicle routing	2
Réseau hydrogène	The role of hydrogen in the UK's decarbonization strategy remains undefined ¹⁰⁷	1

Note : La taxe d'accise sur les véhicules du Royaume-Uni est en fonction du nombre d'essieux et du poids du véhicule. Elle varie entre 561,5 € et 6 310,7 € par an.

⁹⁸ Dans le cas du Royaume-Uni et de l'Irlande, plusieurs politiques et instruments de l'Union européenne s'appliquent encore.

⁹⁹ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_4.aspx?Key=0797d08c-feaa-4f67-b2eb-28cee1759dbd&QryCtx=3&QryFlag=3

¹⁰⁰ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_1.aspx?Key=d93bac59-3fe6-49a2-b4cd-90e20564318e&QryCtx=10

¹⁰¹ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_14.aspx?Key=517d2cd2-9de4-415d-b01a-7ac6ee8d0b38&QryCtx=2

¹⁰² https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_1.aspx?Key=d93bac59-3fe6-49a2-b4cd-90e20564318e&QryCtx=10

¹⁰³ **UK Department for transport (2018).** *The Road to Zero, next steps towards cleaner road transport and delivering our Industrial Strategy,*

¹⁰⁴ **UK Department for transport (2018).** *The Road to Zero, next steps towards cleaner road transport and delivering our Industrial Strategy,*

¹⁰⁵ **UK Department for transport (2018).** *The Road to Zero, next steps towards cleaner road transport and delivering our Industrial Strategy,*

¹⁰⁶ **UK Department for transport (2018).** *The Road to Zero, next steps towards cleaner road transport and delivering our Industrial Strategy.*

¹⁰⁷ <file:///Users/user/Downloads/1-s2.0-S221313882031328X-main.pdf>

Annexe 9. Suède : Mesures et politiques en transport durable de marchandises

Mesures	Politiques et pratiques en place	Étape de mise en œuvre
Tarifification et incitatifs	Taxe sur le CO ₂ ¹⁰⁸ Taxe sur les émissions de NO _x Taxe sur les véhicules à moteur ¹⁰⁹ (217,64 € - 2 783 €/an) Subvention auto éco ¹¹⁰ Subventions pour la recherche liée aux transports ¹¹¹ (Subvention de recherche sur les véhicules électriques et hybrides)	4
Intermodalité/multimodalité	Cadre réglementaire européen du secteur du ferroviaire, Le programme RTE-T	2
Électrification	Projet infragreen ¹¹²	2
Système de caténaires	<u>fossil fuel-free electric road in Sweden</u>	2
Biocarburant, GNL/GNC	Augmentation du bioéthanol dans l'essence - E10	2
Efficacité énergétique	Règlements UE 2017/2400 et UE 2019/1242	1
Système de transport intelligent (STI/TIC)	EU Intelligent Transport System Directives ¹¹³ (Digital Single market strategy)	1
Réseau hydrogène	Le projet HIT-2-Corridors ¹¹⁴	1

Note : La taxe sur les véhicules à moteur de la Suède varie entre 217,64 € et 2 783 € en fonction du poids et du nombre d'essieux

¹⁰⁸ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_1.aspx?Key=d93bac59-3fe6-49a2-b4cd-90e20564318e&QryCtx=10

¹⁰⁹ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_5.aspx?Key=02049ce1-d2e5-4b91-92d7-4a20504c2e3a&QryCtx=4&QryFlag=1

¹¹⁰ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_1.aspx?Key=d93bac59-3fe6-49a2-b4cd-90e20564318e&QryCtx=10

¹¹¹ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_14.aspx?Key=517d2cd2-9de4-415d-b01a-7ac6ee8d0b38&QryCtx=2

¹¹² https://ec.europa.eu/regional_policy/archive/projects/stories/details_new.cfm?pay=SE&the=97&sto=3622&lan=9®ion=ALL&obj=ALL&per=2&defL=DE

¹¹³ https://ec.europa.eu/transport/themes/its_fr

¹¹⁴ <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1464285915700167?token=09702EEED847B0F83BB031EF6FDAF87D18703FC28EDD15540315ED8F3A505C2AFAE77B0BD90EBD7F85ED412214D348D0>

Annexe 10. Suisse : Mesures et politiques en transport durable de marchandises

Mesures	Politiques et pratiques en place	Étape de mise en œuvre
Tarifcation et incitatifs	Taxe basée sur la distance et le poids des véhicules lourds ¹¹⁵ Redevance sur la circulation des poids lourds ¹¹⁶ (596,4 € – 3 670,3 €/an) Subventions pour le raccordement des lignes ferroviaires Prise en charge des installations terminales Taxe incitative sur la teneur en soufre des carburants automobiles ¹¹⁷ Compensation du transport ferroviaire de marchandises non transalpin et compensation pour le transport transalpin combiné ¹¹⁸	4
Intermodalité/multimodalité	transfert route-rail des transports de marchandises	3
Électrification	Contrats de bonus / malus	2
Système de caténaires	Électrification de l'entraînement électrique par batterie avec ligne aérienne	1
Biocarburant, GNL/GNC	Increasing the bioethanol in petrol – E10	2
Efficacité énergétique	Réglementation sur les émissions Introduction de normes d'efficacité CO ₂	2
Système de transport intelligent (STI/TIC)	EU Intelligent Transport System Directives	1
Réseau hydrogène	Hybridation et optimisation des piles à combustible (H ₂). Partenariat H2 Energy et Hyundai pour la livraison de 1600 camions à hydrogène d'ici 2025 ¹¹⁹	2

Source : Office Fédéral des Transports, 2017

Note: La taxe sur les véhicules à moteurs de la Suisse varie entre 217,64 € et 2 783 € pour les véhicules dont le poids total est compris entre 3,5 tonnes et plus de 26 tonnes.

¹¹⁵ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_1.aspx?Key=d93bac59-3fe6-49a2-b4cd-90e20564318e&QryCtx=10

¹¹⁶ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_5.aspx?Key=02049ce1-d2e5-4b91-92d7-4a20504c2e3a&QryCtx=4&QryFlag=1

¹¹⁷ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_5.aspx?Key=02049ce1-d2e5-4b91-92d7-4a20504c2e3a&QryCtx=4&QryFlag=1

¹¹⁸ https://pinedatabase.oecd.org/QueryResult_14.aspx?Key=517d2cd2-9de4-415d-b01a-7ac6ee8d0b38&QryCtx=2

¹¹⁹ <https://www.h2-mobile.fr/actus/hyundai-livre-premiers-camions-hydrogene-suisse/>

Références bibliographiques

- Akerman Patrick (2016).** *Electrified heavy-duty road transport*, Siemens A.G. 2016.
- Apostolou D, Xydis G. (2019).** *A literature review on hydrogen refuelling stations and infrastructure. Current status and future prospects*. Elsevier, renewable and sustainable energy reviews, 2019.
- Armstrong J, Preston J, (2011).** *Alternative railway futures: growth and or specialization?*
- ASEA Brown Boveri (ABB) France (2018).** *Écrire le futur de l'hydrogène bas carbone, enjeux et solutions*, livre blanc, 2018.
- Beaulieu & Roy (2009).** *Optimisation de la chaîne logistique et productivité des entreprises*. Centre sur la productivité et la prospérité, HEC Montréal.
http://cpp.hec.ca/cms/assets/documents/recherches_en_cours/optimisation-de-la-chaine-logistique-et-productivite-des-entreprises.pdf, consulté le 22 mars 2021.
- Braun C, Günther F. C, Tosoni I, Otsuka N, (2017).** *Case Studies on Transport Policy 5 : Developing Trans-European Railway Corridors: Lessons from the Rhine- Alpine Corridor*. p. 533
- Briand Y. et Svensson J. (Iddri) M. Koning et F. Combes (Université Gustave Eiffel) G. Lamy, P. Pourouchottamin et J-M. Cayla (EDF R&D) J. Lefèvre (Cired) (2019).** *Trajectoires de décarbonation profonde du transport de marchandises*, rapport descriptif, décembre 2019.
- BVRLA (2018),** *What is an RDE2 vehicle?*<https://www.bvrla.co.uk/resource/what-is-an-rde2-vehicle.html>, consulté le 03 mars 2021.
- CaFCP (2016).** *Action plan summarized*, <https://cafcf.org/sites/default/files/MDHD-action-plan-summarized-2016.pdf>, consulté le 17 mars 2021.
- CaFCP H2 (2020).** *Station list*. <https://cafcf.org/stationmap>, consulté le 17 mars 2021.
- California Air Resources Board (2020).** *Annual Hydrogen Evaluation*,
<https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/annual-hydrogen-evaluation>, consulté le 17 mars 2021.
- CEF Transport, (2017).** *Green connect - A public CNG network*. <https://ec.europa.eu/inea/en/connecting-europe-facility/cef-transport/2017-ie-tm-0141-w>, consulté le 17 mars 2021.
- Clean Energy Partnership (2021).** *Faire le plein avec H2. La mobilité de l'hydrogène commence maintenant*,
<https://h2.live>
- COM (2008) 436,** *Proposition de directive du parlement européen et du conseil modifiant la directive 1999/62/CE relative à la taxation des poids lourds pour l'utilisation de certaines infrastructures*, p.3,
<https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2008/FR/1-2008-436-FR-F1-1.Pdf>, consulté le 1er mars 2021.
- COM (2011) 144 Livre blanc:** *Feuille de route pour un espace européen unique des transports – vers un système de transport compétitif et économe en ressources*»^[1]_{SEP}p.2.
- COM (2016) 501,** *une stratégie européenne pour une mobilité à faible taux d'émissions*, Bruxelles
[https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/strategies/news/doc/2016-07-20-decarbonisation/com\(2016\)501_fr.pdf](https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/strategies/news/doc/2016-07-20-decarbonisation/com(2016)501_fr.pdf), consulté le 1er mars 2021.
- Conseil du Patronat du Québec (2017).** *La contribution du transport*^[1]_{SEP}*des marchandises à la prospérité du Québec*. <https://www.cpq.qc.ca/workspace/uploads/files/etude4prosperte130317.pdf>. Étude sur la prospérité n°4 mars 2017
- Crainic T. G, Gendreau M, Potvin J-Y (2009).** *Intelligent freight-transportation systems: Assessment and the contribution of operations research*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 17, Issue 6, 2009, pp.541-557.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X08000648>
- Direction générale de la sécurité et du camionnage (2018).** *Portrait statistique et économique du camionnage au Québec*. Direction des communications du ministère des Transports.

- Directive 2011/76 / CE** du Parlement européen et du Conseil du 27 septembre 2011 (JO L 269/1 du 14.10.2011) modifiant la directive 1999/62 / CE relative à la tarification poids lourds pour l'utilisation de certaines infrastructures. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32011L0076>, consulté le 02 mars 2021.
- Directive 92/106/CEE du Conseil**, du 7 décembre 1992, relative à l'établissement de règles communes pour certains transports combinés de marchandises entre États membres, article 1, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A31992L0106>, consulté le 04 mars 2021.
- Energy independence Now (EIN) (2018)**. *California renewable hydrogen roadmap*. <https://einow.org/rh2roadmap>, consulté le 11 avril 2021.
- EPA (2020)**. *Learn about SmartWay : SmartWay advances sustainable transportation supply chains*, <https://www.epa.gov/smartway/learn-about-smartway>, consulté le 20 mars 2021.
- EPA (2020)**. *SmartWay Brand*, <https://www.epa.gov/smartway/use-smartway-brand>, consulté le 20 mars 2021.
- EU 2017/2400 (2017)**. *Commission Regulation as regards the determination of the CO₂ emissions and fuel consumption of heavy-duty vehicles*. Published in the Official Journal of the European Union on 29 December 2017 and entered into force on 18 January 2018.
- Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI) (2021)**. *Le système de péage poids lourds*, article <https://www.bmvi.de/SharedDocs/EN/Articles/StV/Tolling-Scheme/hgv-tolling-scheme-2018.html>, consulté le 02 mars 2021.
- Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI) (2018)**. *Tarifs des poids lourds soumis à péage à partir du 1^{er} janvier 2019*, https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/lkw-mautgebuehren.pdf?__blob=publicationFile, consulté le 02 mars 2021
- Federal Office for the Environment (2021)**. *Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2019 : National Inventory Report and Reporting Tables (CRF)*. Submission of April 2021 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. p. 553
- Frey K, Lambrecht M, Dziekan K, Köder L. (2015)**. *A road toll for Germany: Every kilometre counts*. The contribution of an HGV, coach and car toll to the environment-oriented financing of transport infrastructure. German Environment Agency.
- Fried Claudia (2011)**. *Clean Energy Partnership develops fuel of the future for hydrogen mobility in Germany*, Fuel Cells Bulletin, Volume 2011, Issue 6, 2011, pp. 12-14.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine (GAQSIQ) of PRC and Standardization Administration (SA) of PRC (2018)**. *Fuel consumption limits for heavy-duty commercial vehicles*, national standards for China GB 30510-2018 To substitute GB30510-2014, release on 2018-02-26.
- Geodis (2018)**. *Geodis réduit l'empreinte carbone du transport routier entre l'Allemagne et l'Espagne en lançant un nouveau service rail-route*, communiqué de presse du 22 octobre 2018.
- Heinold A. et Meisel F. (2018)**. *Emission rates of intermodal rail/road and road-only transportation in Europe: A comprehensive simulation study*.
- IEA (2004)**. *HYDROGEN & FUEL CELLS. Review of National R&D Programs*.
- IEA (2015)**. *Technology Roadmap. Hydrogen and Fuel Cells*. <https://webstore.iea.org/download/direct/537>, consulté le 22 avril 2021.
- IEA (2016)**. *Stratégies : Couloir de mobilité durable entre le Portugal et l'Espagne, projet CIRVE 2015-EU-TM-0409-S. Dernière mise à jour : 24 octobre 2019*. <https://ec.europa.eu/inea/en/connecting-europe-facility/cef-transport/2015-eu-tm-0409-s>, consulté le 03 mars 2021.
- IEA (2017)**. *CO₂ emissions based vehicles tax rates from 1st April 2017 UK*, <https://www.iea.org/policies/6703-co2-emission-based-vehicle-tax-rates-from-1-april-2017?country=United%20Kingdom%2CPortugal%2CSpain%2CFrance%2CPeople%27s%20Republic%20of%20China&jurisdiction=National§or=Road%20transport%2CTransport&technology=Road%20transport%20technologies%2CTransport%20infrastructure%20technologies%2CElectric%20cha>

[rging%20infrastructure%2CPassenger%20light-duty%20vehicle&type=Economic%20instruments%2CFiscal%2Ffinancial%20incentives%2CGrants%2Fsubsidy%2CTaxes%2C%20fees%20and%20charges%2CTaxes%2C%20fees%20and%20charges%2CResearch%2C%20development%20and%20deployment](#), consulté le 03 mars 2021.

IEA (2017). *The Futur of trucks. The implications for Energy and Environment.* p. 131

IEA (2019). *CO₂ emissions from fuel combustion 2019 Highlights*, p. 13 ;

IEA (2019). *Renewables 2019 : Analysis and forecast to 2024.*

IEA (2019). *Taxe d'immatriculation basée sur les émissions de CO₂ en Espagne.*

<https://www.iea.org/policies/6766-registration-tax-based-on-co2-emissions?country=United%20Kingdom%2CPortugal%2CSpain%2CFrance%2CPeople%27s%20Republic%20of%20China&jurisdiction=National§or=Road%20transport%2CTransport&technology=Road%20transport%20technologies%2CTransport%20infrastructure%20technologies%2CElectric%20charging%20infrastructure%2CPassenger%20light-duty%20vehicle&type=Economic%20instruments%2CFiscal%2Ffinancial%20incentives%2CGrants%2Fsubsidy%2CTaxes%2C%20fees%20and%20charges%2CTaxes%2C%20fees%20and%20charges%2CResearch%2C%20development%20and%20deployment>, consulté le 16 mars 2021.

IEA (2019). *The future of hydrogen. Seizing today's opportunities*, report for the G20, Japan.

IEA (2020). *Energy Technology perspective 2020.* <https://webstore.iea.org/download/direct/4165>, consulté le 03 février 2021.

IEA (2020). *Hydrogen*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/hydrogen>

IEA (2020). *Tracking transport 2020*, <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020>, consulté le 24 février 2021.

IEA (2020). *Trucks and Bus*, AIE, Paris <https://www.iea.org/reports/trucks-and-buses>, consulté le 18 mars 2021.

IEA (2021), *données et statistiques*, <https://www.iea.org/data-and-statistics/?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySector>, consulté le 23 février 2021.

Institut de Recherche en Économie Contemporaine (IREC) (2020). *L'hydrogène, un vecteur énergétique pour la transition.* <https://irec.quebec/ressources/publications/Hydrogene-Vecteur-energetique-pour-la-transition-IREC2020.pdf>.

Institute for Transport Studies, Université de Leeds, Royaume-Uni (2010). *L'avenir du transport durable de marchandises et de la logistique*, p.21. Département thématique B : Politiques structurelles et de cohésion, Union européenne.

International Council on Clean Transportation (ICCT) (2017). *Fuel consumption standards for heavy-duty vehicles in India.* Policy update, December 2017.

Iordache M, Schitea D, Iordache I. (2017). *Hydrogen refuelling station infrastructure roll-up, an indicative assessment of the commercial viability and profitability in the Member States of Europe Union.* Elsevier, International Journal of Hydrogen Energy, 26 October 2017.

Jiang Y, Qiao G, Lu J. (2019). *Impacts of the New International Land–Sea Trade Corridor on the Freight Transport Structure in China, Central Asia, the ASEAN Countries and the EU*, <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2210539519302263?token=58D2D3978B44E2FF2566CF86A8DFC8913A915E1939A098BD41C9F3E15EF44339EF7F74CF57D9852C65C55F8BD372721B>, consulté le 06 mars 2021.

Jiang Y, Sheu J.-B., Peng Z., Yu B. (2018). *Hinterland Patterns of China Railway (CR) Express in China Under the Belt and Road Initiative: A Preliminary analysis.* p. 190.

Ma S, Fan Y, Feng L. (2017). *An evaluation of government incentives for new energy vehicles in China focusing on vehicle purchasing restrictions.* Energy policy 110, ScienceDirect.

- McKinnon, A. (2009).** *The present and future land requirements of logistical activities.* *Land Use Policy*, p. 265.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (2016).** *Politique énergétique du Québec 2030; l'énergie des Québécois sources de croissance.* <https://mern.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2016/04/Politique-energetique-2030.pdf>, consulté le 03 février 2021.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) (2015).** *Politique énergétique 2016-2025 : la décarbonisation du transport routier.* Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2015
- Ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques (2020).** *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2018 et leur évolution depuis 1990,* <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2018/tableaux-emissions-annuelles-GES-1990-2018.pdf>, Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale de la réglementation carbone et des données d'émission.
- Ministère des Transports (2013).** *Étude multimodale du transport des marchandises au Québec en appui aux plans territoriaux de mobilité durable,* CPCS Solution en croissance, 2013.
- Ministère des Transports (2013).** *Étude multimodale du transport des marchandises à l'échelle du Québec, des grands corridors de transports et des territoires de PTMD.* Volume 1
- Ministère des Transports (2018).** Portrait statistique et économique, le camionnage au Québec.
- Ministère des Transports (2019).** *Plan stratégique 2019-2023.*
- Ministère des Transports (2019).** *Programme visant la réduction ou l'évitement des émissions de gaz à effet de serre par le développement du transport intermodal.*
- Nations Unies/Commission économique pour l'Europe (ONU/CEE) (2017).** *Meilleures pratiques pour promouvoir l'efficacité énergétique,* deuxième édition, New York et Genève, 2017, <https://unece.org/DAM/energy/se/pdfs/geee/pub/ECE ENERGY 100 Rev.1 f.pdf>, consulté le 19 mars 2021.
- New Zealand Ministry of Transport (TE MANATŪ WAKA) (2019).** *Changes to petrol excise duty and road user charges,* <https://www.transport.govt.nz//assets/Uploads/OIA-response/Estimated-revenue-from-ped-ruc-and-rft-in-akl.pdf>, consulté le 07 Avril 2021.
- New Zealand Transport Agency (2021).** *RUC tariff and transaction fees,* <https://www.nzta.govt.nz/vehicles/licensing-rego/road-user-charges/ruc-rates-and-transaction-fees/#RUC-rates-for-distance-licences-powered>, consulté le 07 Avril 2021.
- Nouvelle-Zélande (2017).** *Loi de 2017 portant modification de la loi sur l'innovation énergétique (véhicule électrique et autres questions),* <https://www.legislation.govt.nz/act/public/2017/0027/latest/DLM7005054.html>, consulté le 1er mars 2021
- OCDE (2019).** *Perspectives des transports, Forum International des Transports 2019.*
- OECD (2021)** *ITF Transport Outlook 2021 - Chapter 2* (Figure 2.5. Global demand for freight transport by mode to 2050).
- Office Fédéral des Transports (OFT) (2017).** *Contribution du transport de marchandises aux objectifs fédéraux de protection climatique.* Rapport novembre 2017. <https://www.bav.admin.ch/bav/fr/home/modes-de-transport/chemin-de-fer/fret-ferroviaire.html> (Traduction Google).
- Pekin, E., Macharis, C., Brussel, V.U., Caris, A., Janssens, G. K., Jourquin, B., (2008).** *Integrated decision support tools for intermodal freight transport.* Nectar Cluster Meeting on Freight Transport and Intermodality, pp. 1–13. <https://documentserver.uhasselt.be/bitstream/1942/8352/1/NectarDelft28032008Pekin.pdf>
- Reace Louise Edwards, Carolina Font-Palma, Joe Howe (2021).** *The status of hydrogen technologies in the UK: A multi-disciplinary review.* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221313882031328X>
- Règlement (UE) 2018/956** du Parlement européen et du Conseil du 28 juin 2018 sur la surveillance et la déclaration des émissions de CO2 et de la consommation de carburant des véhicules lourds neufs. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/956/oj>, consulté le 04 mars 2021

- Samuelson S, Shaffer B, Grigg J, Lane B, Reed J. (2020).** *Performance of a hydrogen refuelling station in the early years of commercial fuel cell vehicle deployment.* Elsevier, International Journal of Hydrogen Energy, 2021.
- Santos Bruno F, Limbourg Sabine, Carreira Joana S. (2015).** *The impact of transport policies on railroad intermodal freight competitiveness – The case of Belgium.* p.
- Shamsi H, Tran M, Akbarpour S, Maroufmashat A, Fowler M. (2021).** *Macro-level optimization of hydrogen infrastructure and supply chain for zero-emission vehicles on a Canadian corridor,* <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620352070>. Journal of Cleaner Production, Volume 289, 2021.
- Suzuki T, Shiota K, Izato Y, Komori M, Sato K, Takai Y, Ninomiya T, Miyake A. (2021).** *Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refuelling station model.* Elsevier, International Journal of Hydrogen Energy, 2021.
- Teusch, J. et Braathen N. (2019).** *Are environmental tax policies beneficial? : Learning from program evaluation studies,* OECD Environment Working Papers, n° 150, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/218df62b-en> consulté le 23 mars 2021.
- Torregrossa M. (2019).** *La première station GNV d'Irlande ouvre ses portes.* <https://www.gaz-mobilite.fr/actus/premiere-station-gnv-irlande-ouvre-ses-portes-2367.html>, consulté le 17 mars 2021.
- Transition énergétique Québec (TEQ) (2018).** *Plan directeur en transition, innovation et efficacité énergétiques du Québec 2018-2023, conjuguer nos forces pour un avenir énergétique durable,* https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/plan-directeur/TEQ_PlanDirecteur_web.pdf, consulté le 24 février 2021.
- Transport & Environnement (2020).** *Comment décarboner le fret français d'ici 2050 ?*
- Trnka M, Ondrejka R, DanišovičP, Pitoňák M. (2021).** *Horizons of Railway Transport 2020 : Support of Intermodal Transport in TRITIA Area.*
- UE (2019).** *Mobilidata, 2019-BE-TM-0258-W,* <https://ec.europa.eu/inea/en/connecting-europe-facility/cef-transport/2019-be-tm-0258-w>, consulté le 20 mars 2021
- UE 2019/1242 (2019).** *Règlement du parlement européen et du conseil du 20 juin 2019 établissant des normes de performance en matière d'émissions de CO₂ pour les véhicules utilitaires lourds neufs et modifiant les règlements (CE) n° 595/2009 et (UE) 2018/956 du Parlement européen et du Conseil et la directive 96/53/CE du Conseil.*
- UK. Department of Transport (2018).** *The Road to Zero Next Steps Towards Cleaner Road Transport and Delivering Our Industrial Strategy.pdf.* p.2et3.
- Union européenne (UE) (2010).** *L'avenir du transport durable de marchandises et de la logistique,* parlement européen, direction générale des politiques internes, département thématique b: politiques structurelles et de cohésion, atelier. <http://www.europarl.europa.eu/studies>.
- United Nations Climate Change (UNCC) (2021).** *Base de données de la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.* https://di.unfccc.int/flex_annex1, consulté le 11 avril 2021.
- West Coast Clean Transit Corridor Initiative (2020).** *Fact sheet,* last update June 2020, <https://westcoastcleantransit.com/resources/G20-049%20West%20Coast%20Clean%20Transit%20Corridor%20Fact%20Sheet.pdf>, consulté le 16 mars 2021.
- Woodburn, Allan, Whiteing, Anthony (2010).** *Transferring freight to greener transport modes,* Green Logistics: Improving the environmental sustainability of logistics. Kogan Page, pp. 124-139.
- Yang, D, Jiang L, & Ng, A. K. Y. (2018).** *One belt one road, but several routes: A case study of new emerging trade corridors connecting the Far East to Europe.* Transportation Research Part A, 117, 190–204.