



Rapport d'étude n° 04 | 2020

# DÉCARBONISATION DU TRANSPORT ROUTIER DES MARCHANDISES AU QUÉBEC : Scénarios de réduction des émissions de GES et électrification

## **PEDINOTTI-CASTELLE Marianne**

Étudiante au doctorat au Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Ingénierie Durable et Écoconception (LIRIDE), à l'Université de Sherbrooke

## **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

## **Ben AMOR**

Professeur agrégé, Département de Génie Civil et de Génie du Bâtiment, Université de Sherbrooke, directeur du Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Ingénierie Durable et Écoconception (LIRIDE)

Nous remercions l'équipe de Énergir, Marc Beauchemin, Francisco Doyon, David Ducasse, Sébastien Lajoie, Thierry Salem, et Nicolas Bombard du Centre des Technologies du Gaz Naturel (CTGN), pour leur collaboration durant le projet. Le projet a pu bénéficier du soutien de Kathleen Vaillancourt de chez ESMIA Consultants pour la modélisation avec le modèle NATEM.

**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.

Aout 2020

Chaire de gestion du secteur de l'énergie  
HEC Montréal  
3000, chemin de la Côte-Sainte-Catherine  
Montréal (Québec) Canada  
H3T 2A7  
[energie.hec.ca](http://energie.hec.ca)

©2020 HEC Montréal. Tous droits réservés pour tous pays. Toute traduction et toute reproduction sous quelque forme que ce soit sont interdites. Les textes publiés dans la série des rapports d'étude n'engagent que la responsabilité de(s) auteur(s)

# Table des matières

Sommaire exécutif .....	1
Executive Summary .....	3
Glossaire .....	5
1. Introduction .....	7
1.1. La situation au Québec .....	7
1.2. L'objectif de cette étude .....	7
2. Méthodologie .....	7
2.1. Description du modèle NATEM-Canada.....	7
2.2. Scénario de référence .....	8
2.3. Scénarios de réduction .....	9
2.4. Scénarios alternatifs.....	10
3. Principaux résultats .....	11
3.1. Émissions de GES et coûts relatifs des scénarios.....	11
3.2. Consommation d'énergie finale .....	12
3.3. Production et consommation d'électricité .....	14
3.4. Consommation des bioénergies .....	15
3.5. Part de marché des véhicules pour le transport de marchandises .....	18
4. Sources d'incertitudes de l'étude .....	19
5. Résultats des scénarios de réduction .....	23
5.1. Évolution de la demande et des émissions de GES .....	23
5.2. Consommation d'énergie finale .....	25
5.3. Production et consommation d'électricité .....	27
5.4. Consommation des bioénergies .....	28
5.5. Part de marché des véhicules pour le transport de marchandises .....	30
6. Résultats des scénarios alternatifs .....	33
6.1. Consommation d'énergie finale du secteur des transports.....	33
6.2. Production et consommation d'électricité .....	34
6.3. Consommation des bioénergies .....	35
6.4. Part de marché des véhicules pour le transport de marchandises .....	36
7. Limites de l'étude .....	38
8. Conclusion de l'étude.....	38
Références.....	40
Annexe A : Hypothèses détaillées.....	41
Annexe B : Autres scénarios de réduction (meilleure compétitivité du gaz naturel et du gaz naturel renouvelable) .....	47

## Sommaire exécutif

Le transport des marchandises représente un défi particulier dans les objectifs de réduction d'émission de gaz à effet de serre (GES) parce que ce secteur, parmi tous les autres, a connu la plus forte croissance des émissions au Québec entre 1990 et 2018 (+144 %). Il est important d'étudier de la manière la plus systématique les scénarios de décarbonisation pour bien comprendre les enjeux qui caractérisent les différentes trajectoires possibles. Dans un contexte où l'électrification est régulièrement mise de l'avant comme la principale, et souvent l'unique, solution pour la décarbonisation, cette étude explore plus largement les options de complémentarité des carburants et des technologies de propulsion qui permettraient d'atteindre, complètement ou presque, les cibles de réduction de GES de 2030 et 2050. Le modèle NATEM du système énergétique canadien et québécois a été utilisé pour cette étude. Il permet d'inclure toutes les technologies disponibles et les secteurs de consommation pour analyser les enjeux de décarbonisation de manière systémique.

Cette étude est décomposée en six sections : dans la section 1, une mise en contexte est faite; dans la section 2, les scénarios sont présentés ainsi que leurs hypothèses principales ; dans la troisième section, les résultats principaux sont présentés ; puis les sources d'incertitudes de l'étude sont détaillées dans la section 4. Finalement, les résultats de tous les scénarios sont détaillés dans les sections 5 et 6.

Trois principaux scénarios sont étudiés dans cette étude, ainsi que d'autres scénarios complémentaires. Un premier n'inclut aucune contrainte ferme sur la réduction des émissions, mais simplement les politiques fédérales et régionales déjà en place, notamment les normes sur les combustibles propres à venir à partir de 2022 et le prix plancher sur le carbone mis en place au Québec (scénario NCP). Un second impose une contrainte ferme sur les émissions, de manière à atteindre l'objectif du Québec pour 2030 et 90 % de celui de 2050 (scénario GES4). Enfin, un troisième scénario force l'électrification de tous les véhicules routiers pour le transport des marchandises (scénario GES4\_Elec) et atteint les mêmes cibles que celles du scénario GES4.

Deux résultats importants se dégagent de l'analyse de ces scénarios.

- (1) **L'impact majeur de l'électrification peut être tempéré.** Pour atteindre les cibles de réduction, l'électrification des secteurs de consommation est très importante. Cette électrification requiert cependant une capacité électrique installée de l'ordre du double de la capacité qui existe aujourd'hui. Éviter de forcer l'électrification du transport lourd permet non seulement d'enlever un poids supplémentaire sur le système électrique, mais on limite de manière significative le coût de la décarbonisation.
- (2) **Une multiplicité des technologies dans les véhicules de transport des marchandises amène une diversité souhaitable et nécessaire au marché.** En transport des marchandises, l'électrification des véhicules légers s'impose rapidement. Par contre, pour les véhicules moyens et lourds, aucune technologie ne se dégage clairement des autres. Privilégier une mixité des approches technologiques et énergétiques permettrait alors au marché d'acquiescer une plus grande flexibilité et une plus grande résilience, sans être plus dispendieux pour autant.

Ainsi, pour atteindre les cibles (scénario GES4), la consommation totale d'énergie au Québec diminue alors que la part de l'électricité augmente de manière très significative : une capacité de production électrique de 90 GW est nécessaire, alors qu'elle n'est que de 45 GW actuellement au Québec. Ce scénario coûte 10,8 % plus cher au Québec que le scénario de référence. Lorsque l'on force le modèle à électrifier les véhicules routiers de marchandise pour atteindre les objectifs de décarbonisation (scénario GES4\_Elec), la capacité électrique nécessaire augmente d'un 13 GW supplémentaire, atteignant les 103 GW. Cela entraîne un surcoût de 22,2 % par rapport au scénario de référence. Pour éviter cette surcharge additionnelle dans

le système électrique et limiter l'augmentation des coûts totaux de la décarbonisation, une diversité d'options technologiques doit être privilégiée pour les véhicules moyens et lourds.

Si la flotte de camions légers est électrifiée, il existe trop d'incertitudes dans les coûts et les contraintes entourant les camions moyens et lourds pour qu'une solution unique s'impose. Une électrification partielle se déroule à travers la technologie des véhicules hybrides branchables, qui pénètre de manière très importante le marché, mais le diesel et le gaz naturel (de sources renouvelables et traditionnelles) alimentent les camions en service. Le recours à ces véhicules permet de réduire les coûts globaux et évite, tel que mentionné plus haut, d'importants ajouts de capacité de production d'électricité. Les cibles de GES sont par ailleurs tout autant respectées. Il est cependant très difficile de choisir entre le diesel et le gaz naturel, à cause de la sensibilité au coût des technologies aux normes d'émissions de polluants atmosphériques et à la source des matières renouvelables nécessaires pour produire des biocarburants (biodiesel et gaz naturel renouvelable).

Cette étude illustre les changements importants qui sont à la fois nécessaires et possibles de réaliser dans le système énergétique québécois. En transport des marchandises, il est aussi envisageable de décarboniser la consommation d'énergie. Il est cependant nécessaire de garder toutes les options ouvertes parce qu'une grande sensibilité est présente entre différentes technologies. L'électrification complète du secteur, pour les véhicules moyens et lourds, n'apparaît pas souhaitable dans ce contexte à cause des capacités électriques importantes supplémentaires qui seraient nécessaires, alors que d'énormes besoins électriques seront déjà sollicités dans les autres secteurs.

## Executive Summary

Freight transportation is a challenging sector for greenhouse gas (GHG) emission reduction objectives because this sector, among all the others, experienced the strongest growth in emissions in Quebec between 1990 and 2018 (+144 %). It is important to study decarbonization scenarios in the most systematic way in order to fully understand the issues that characterize the different possible trajectories. In a context where electrification is regularly put forward as the main and only solution for decarbonization, this study explores more broadly how a mix of fuels and technologies make it possible to achieve the GHG reduction targets of 2030 and 2050, completely or almost completely. The NATEM model of the Canadian and Quebec energy system is used for this study. This model makes it possible to include all available technologies and consumption sectors in order to analyze systematically decarbonization issues.

Three main scenarios are considered in this study, as well as other complementary scenarios. The first scenario does not include any firm constraints on emission reductions, but simply the federal and regional policies already in place, notably the clean fuel standards (coming into effect in 2022) and the carbon floor price implemented in Quebec (CFS scenario). A second scenario imposes a firm constraint on emissions in order to achieve Quebec's 2030 target and 90 % of the 2050 target (GHG4 scenario). Finally, a third scenario forces the electrification of all on-road vehicles for freight transportation (GHG4\_Elec scenario) and achieves the same targets as those of the GHG4 scenario.

Two main results emerge from the analysis of these scenarios.

**(1) The major impact of electrification can be tempered.** To reach the reduction targets, the electrification of the consumption sectors is very important. However, this electrification requires an installed electric capacity twice as big as the capacity that exists today. Avoiding forcing the electrification of heavy-duty transportation removes an additional burden on the electrical system, while significantly limiting the cost of decarbonization.

**(2) A multiplicity of technologies in freight vehicles brings a necessary diversity in the energy market.** In freight transportation, electrification of light-duty vehicles is rapidly becoming a necessity. For medium and heavy-duty vehicles, however, there is no technology clearly distinguishable from the others. Favoring a mix of technological and energy approaches then allow the market to acquire an increased flexibility and resilience, without being more expensive.

Thus, to reach the targets (GHG4 scenario), the total energy consumption in Quebec should decrease while the share of electricity should increase significantly: an installed electric capacity of 90 GW is required, whereas the currently installed capacity is only 45 GW in Quebec in 2020. This scenario costs 10.8 % more than the reference scenario. When the model is forced to electrify on-road freight vehicles to meet decarbonization targets (GHG4\_Elec scenario), the electric capacity required increases by an additional 13 GW, reaching 103 GW. This leads to an additional cost of 22.2 % compared to the baseline scenario. In order to avoid this additional overload in the electric system and to limit the increase in the total costs of decarbonization, a variety of technological options should be considered for medium and heavy-duty vehicles.

If the light-duty truck fleet is easily electrified, there are too many uncertainties in the costs and constraints surrounding medium and heavy-duty trucks for a single solution to be selected. A partial electrification is taking place through the plug-in hybrid vehicle technology, but both diesel and natural gas (from both

renewable and traditional sources) can power the trucks in service. The use of these vehicles reduces the overall costs and avoids, as mentioned above, significant additions to electric generation capacity. GHG targets are also met. However, the choice between diesel and natural gas is very difficult because of the cost sensitivity of the technologies to air pollutant emission standards and the source of renewable materials required to produce the two biofuels (biodiesel and renewable natural gas).

This study illustrates the significant changes that are both necessary and feasible to achieve in Quebec's energy system. In freight transportation, it is also possible to decarbonize energy consumption. However, it is necessary to keep all options open because there is a great sensitivity between different technologies. The complete electrification of the sector, for medium and heavy-duty vehicles, does not seem desirable in this context because of the significant additional electric capacity that would be required, whereas huge electrical needs will already be solicited in the other sectors.

# Glossaire

## **Cibles de réduction des émissions de GES**

Ce sont les cibles de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Les réductions sont calculées par rapport au niveau d'émission de 1990. Au Québec, les cibles de réduction des GES visent à réduire les émissions de 37,5 % en 2030 et de 80 % en 2050, par rapport au niveau de 1990.

## **Norme sur les combustibles propres (NCP)**

Règlement fédéral dont l'élaboration a été lancée en 2016. Son objectif est de mettre en place une réglementation visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) du Canada en accroissant l'utilisation de carburants à plus faible teneur en carbone.

## **Classification des camions utilisés pour le transport de marchandises**

Les camions utilisés pour le transport de marchandises sont décomposés en trois classes : camions légers, moyens et lourds. Les camions légers représentent les camions de classe 1 à 2, les camions moyens représentent les camions des classes 3 à 6 et les camions lourds ceux de classe 7 et 8. Les camions lourds de classe 8 sont eux-mêmes décomposés en camions lourds de classe 8a, à moteur de moins de 12 litres, équivalent à une charge inférieure à 65 000 livres (lbs), ou près de 30 tonnes (t) et en camions de classe 8b, de moteur de plus de 12 litres dont la charge peut monter jusqu'à 125 000 lbs (57 t). Cette classification se calque sur la classification du département de l'énergie américain (U.S. Department of Energy, n.d.).

## **Acronymes des technologies de camions**

ICE : internal combustion engine/moteur à combustion interne. Technologies traditionnelles de moteur à combustion utilisés dans les camions fonctionnant à l'essence, au diesel, au gaz naturel ou tout autre combustibles fossiles.

Hybrides : technologies hybrides non branchables.

PHEV : technologies hybrides branchables.

## **NATEM (North American TIMES Energy Model)**

Modèle d'optimisation des systèmes énergétiques de type TIMES développé par ESMIA Consultants.

## **Coût marginal de l'énergie**

Le modèle NATEM calcule et optimise les coûts marginaux de chaque forme d'énergie. Les coûts marginaux de l'énergie sont calculés à partir des hypothèses de base du modèle NATEM (par exemple, les prix d'importation, les coûts de production, de distribution, ou de maintenance de chaque filière énergétique) et des contraintes fournies par l'utilisateur au modèle. Les coûts de l'énergie du modèle sont ensuite optimisés sur l'horizon temporel choisi.

## **Énergie finale**

Énergie consommée par l'utilisateur, en opposition à l'énergie primaire qui est l'énergie produite par un système.

## **Biocarburants**

Les biocarburants sont des carburants à faible intensité en carbone. Dans la catégorie des biocarburants sont inclus les substituts au gaz naturel (gaz naturel renouvelable), les substituts à l'essence (éthanol, éthanol cellulosique, méthanol, butanol) et les substituts au diesel (biodiesel et Fischer-Tropsch diesel).

## **Gaz naturel renouvelable (GNR)**

Gaz naturel issu de bioénergies. Il existe actuellement trois générations de GNR :

- 1<sup>re</sup> génération : GNR issu de la biométhanisation (appelée aussi digestion anaérobie) des matières organiques.
- 2<sup>e</sup> génération : GNR issu de la valorisation de la biomasse forestière résiduelle par l'usage de différents procédés thermiques.
- 3<sup>e</sup> génération : Power-to-Gas (valorisation des surplus d'électricité renouvelable par l'entremise du réseau gazier par des procédés d'électrolyse et de méthanation).

# 1. Introduction

## 1.1. La situation au Québec

Le Québec a d'ambitieux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). L'atteinte de ces objectifs impliquera des changements d'une ampleur et d'une rapidité inédite : il faut pratiquement éliminer les émissions de GES dans les 30 prochaines années, alors que nos systèmes économiques sont conçus sur la prémisse d'une utilisation intensive d'hydrocarbures. En transport, et particulièrement en transport des marchandises, les émissions de GES ont énormément cru ces dernières 30 dernières années : +144 % entre 1990 et 2018 (ECCC, 2020). Cette augmentation s'est faite dans un contexte où les émissions globales du Québec déclinait de 4,8 %. Réduire à zéro (ou à un niveau très bas) les GES en transport des marchandises est donc un défi particulièrement exigeant.

L'électrification des transports est souvent présentée comme la solution naturelle pour décarboniser, surtout au Québec où la production d'électricité repose déjà entièrement sur les énergies renouvelables. Aucune étude détaillée n'a cependant été réalisée pour explorer les implications d'une telle électrification dans le secteur du transport routier des marchandises. Des options alternatives existent cependant, et des trajectoires différentes existent aussi dans l'horizon 2020-2050 pour atteindre l'objectif de décarbonisation. Ce rapport vise à combler ce manquement pour s'assurer que les choix faits par la société québécoise soient pris sur la base d'une analyse approfondie des options et des impacts possibles.

## 1.2. L'objectif de cette étude

L'objectif de cette étude est d'explorer la décarbonisation du secteur du transport routier de marchandises au Québec par une modélisation détaillée du système énergétique. En particulier, cette étude cherche à comprendre les implications d'une électrification du transport des marchandises et à identifier les meilleures pistes pour décarboniser ce secteur d'activité.

# 2. Méthodologie

Les hypothèses présentées dans cette section ont été établies conjointement avec l'équipe d'Énergir. Voir aussi l'annexe A pour les hypothèses détaillées sur les camions de transport de marchandises considérés dans cette étude.

## 2.1. Description du modèle NATEM-Canada

Le modèle NATEM-Canada est utilisé dans cette étude, mais l'analyse porte essentiellement sur la province du Québec. NATEM (North American TIMES Energy Model) est un modèle d'optimisation nord-américain de type TIMES nord-américain, et NATEM-Canada est la portion de NATEM représentant spécifiquement le Canada en 13 régions distinctes mais reliées entre elles par des flux énergétiques. Les hypothèses du modèle et le fonctionnement des modèles de type TIMES sont détaillés dans différents documents clés : (Astudillo, Vaillancourt, Pineau, & Amor, 2017; Gargiulo, Vaillancourt, & De Miglio, 2016; Vaillancourt, Bahn, Roy, & Patreau, 2018), auxquelles ont été appliqués spécifiquement pour cette étude une série de changements. La majorité de ces changements sont décrits dans ce rapport, dans les hypothèses des différents scénarios considérés ou dans l'Annexe A. NATEM est un modèle d'optimisation des systèmes énergétiques, c'est à dire qu'il détermine le système énergétique optimal pour répondre à la demande en énergie du Québec, au plus bas coût, et sur l'horizon temporel choisi. L'optimisation tient compte des ressources physiques et des contraintes imposées par l'utilisateur. Chaque technologie est caractérisée par

son coût, son efficacité, sa disponibilité, sa durée de vie technique, son taux d'occupation, son taux de rendement, etc. Sans contraintes spécifiques, la technologie la plus rentable (compte tenu des coûts d'investissement, d'activité, d'exploitation et de maintenance, ainsi que des paramètres technico-économiques et des coûts marginaux de chaque forme d'énergie) est choisie pour répondre à chaque demande. Les coûts marginaux de l'énergie sont calculés à partir des hypothèses de base (par exemple : les prix d'importation, les coûts de production, de distribution, ou de maintenance de chaque filière énergétique) et des contraintes sur les formes d'énergie fournies par l'utilisateur au modèle. Ces coûts sont optimisés sur l'horizon temporel choisi. NATEM-Canada regroupe 4 438 procédés et 540 produits interconnectés. NATEM-Canada est calibré pour l'année de base 2011. Il est divisé en périodes annuelles entre 2011 et 2050, quatre saisons (printemps, été, automne, hiver) et quatre périodes quotidiennes (jour, nuit et deux périodes de pointe). NATEM suppose une parfaite prévoyance (c'est-à-dire que toutes les décisions d'investissement sont prises à chaque période sur la base d'hypothèses futures connues) et une parfaite concurrence sur le marché. Il optimise horizontalement (dans tous les secteurs du marché de l'énergie) et verticalement (dans toutes les périodes pour lesquelles la limite est imposée). Le taux d'actualisation est fixé à 4 %. Les hypothèses de croissance du PIB et de la population sont basées sur les données de Vaillancourt et al. (Vaillancourt et al., 2018).

## 2.2. Scénario de référence

Le scénario de référence (REF) correspond à notre « cours normal des affaires ». C'est un scénario dans lequel aucune nouvelle mesure de réduction des GES n'est mise en place. Ce scénario reprend toutefois les politiques environnementales déjà planifiées, à savoir :

- Le marché du carbone existant au Québec.
- Les taxes fédérales et régionales sur les carburants diesel et essence.
- Le plan en électrification des transports, qui inclut une pénétration minimum des véhicules hybrides branchables et tout électriques : 1 000 000 de véhicules électriques ou hybrides branchables en 2030 (Ministère des Transports du Québec, 2015).
- La réglementation fédérale sur la teneur minimale en contenu renouvelable dans l'essence et le diesel vendu au Canada, avec un minimum de biocarburants : 2 % de biodiesel et 5 % d'éthanol (Gouvernement du Canada, n.d.).
- Les mesures du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (Gouvernement du Québec, 2012).
- Le règlement concernant la quantité de gaz naturel renouvelable devant être livrée par un distributeur ("R-6.01, r. 4.3 - Règlement concernant la quantité de gaz naturel renouvelable devant être livrée par un distributeur," n.d.), avec 5 % de GNR requis dans le bouquet énergétique du Québec en 2030 et 10 % de GNR requis après 2030.

En plus de ces réglementations, certaines hypothèses, sont à souligner :

- **Demande de camions lourds** : les camions de classe 8 sont décomposés en deux catégories 8a et 8b, soit les camions à moteur de moins de 12 litres et en camions de moteur de plus de 12 litres. La demande pour les camions à moteur de plus de 12 litres (classe 8b) représentant 65 % de la demande totale pour le camionnage lourd, selon les données de la SAAQ de 2016. Cette distinction est importante pour les scénarios d'électrification puisqu'à l'heure actuelle, des options de camions électriques existent pour les camions de classe 8a tandis qu'aucune option d'électrification n'existe pour les camions de classe 8b. Le scénario d'électrification du transport de marchandise (GES4\_Elec), ne pouvant compter sur des camions électriques de classe 8b, a

uniquement recours à des camions électriques de classes 8a. Ce manque de disponibilité pénalise l'électrification.

- **Bornes de recharge électriques** : pour le secteur du transport routier des marchandises, des bornes de recharge lentes (bornes de recharge de nuit) et des bornes de recharge rapide (bornes de recharge de jour) sont modélisées. L'utilisation des différentes bornes de recharge varie selon le type de camion : l'hypothèse est faite que les camions de taille moyenne se rechargent à 70 % maximum aux bornes de recharge lentes et au maximum à 50 % aux bornes de recharge rapides et que les camions lourds suivent le même profil de charge que les camions moyens. Il se pourrait que cette contrainte ne puisse pas être opérationnelle d'un point de vue logistique et représente une approche conservatrice pour le scénario d'électrification (les camions lourds électriques pourraient en réalité se recharger en plus grande proportion aux bornes de recharge rapide). Ces contraintes opérationnelles dépassent le niveau de modélisation de cette étude. Une trop grande proportion de recharge de camions lourds en bornes lentes pourrait représenter une contrainte difficile à gérer pour une flotte de camions, avec des temps d'immobilité trop grands.
- **Transport et distribution des carburants** : il a été estimé que le réseau de distribution de l'essence et du diesel est actuellement à son plein potentiel, tandis que seul 40 % du territoire du Québec est couvert par les stations de ravitaillement au gaz naturel<sup>1</sup>. Le réseau de gaz naturel est cependant déjà présent dans tous les grands centres au Québec. Il serait possible de favoriser une couverture plus grande du territoire par la distribution de gaz naturel comprimé ou liquéfié par camion (et non par gazoduc), mais cette option n'est pas envisagée dans le modèle.

Ces hypothèses restent présentes dans tous les scénarios.

### 2.3. Scénarios de réduction

Pour étudier les possibilités de réduction des émissions de GES, cinq scénarios de réduction graduelle sont modélisés (Tableau 1). Le scénario NCP « norme sur les combustibles propres » inclut la norme sur les combustibles propres (Environment et Changement climatique Canada, 2019) et le règlement sur la quantité minimale de gaz naturel renouvelable devant être livrée par un distributeur. La norme sur les combustibles propres définit des exigences sur l'intensité en carbone des combustibles liquides et gazeux. Le règlement sur la quantité minimale de gaz naturel renouvelable devant être livrée par un distributeur définit un pourcentage minimal de gaz naturel renouvelable devant être livré au Québec par les fournisseurs de gaz naturel. Les quatre autres scénarios de réduction incluent aussi la norme sur les combustibles propres et le règlement sur le gaz naturel renouvelable et sont de plus alignés sur les cibles de réduction des GES du Québec (réduction de 37,5 % des émissions de GES en 2030 et de 80 % en 2050 par rapport au niveau de 1990). Il est à noter que dans le scénario GES4, les cibles de réduction du Québec ne sont pas atteintes en 2050. En effet, sans de nouvelles options, telles que la capture et séquestration du carbone, ou encore la réduction des demandes énergétiques, le modèle ne trouve pas de solution lui permettant d'atteindre la totalité des cibles de réduction du Québec en 2050.

---

<sup>1</sup> La couverture du territoire est estimée à partir des données suivantes : il existe 10 stations de recharge au gaz naturel actuellement et environ 25 seront nécessaires en 2030, avec une moyenne de 120 camions par stations et par jour. Le territoire est donc pour l'instant couvert à 40 % de sa pleine capacité.

Tableau 1. Principaux scénarios de réduction des émissions de GES.

Scénarios	Description
NCP	Cours normal des affaires incluant la norme sur les combustibles propres et le règlement sur la quantité minimale de gaz naturel renouvelable devant être livrée par un distributeur
GES1	Le Canada et le Québec atteignent 25 % de leurs cibles sur le territoire
GES2	Le Canada et le Québec atteignent 50 % de leurs cibles sur le territoire
GES3	Le Canada et le Québec atteignent 75 % de leurs cibles sur le territoire
GES4	Le Canada et le Québec atteignent 100 % de leurs cibles de 2030 et 90 % de leurs cibles de 2050 (due à des contraintes de faisabilité) sur le territoire

Note : Les quatre scénarios GES incluent la norme sur les combustibles propres, ainsi que le règlement concernant la quantité de gaz naturel renouvelable devant être livrée par un distributeur.

## 2.4. Scénarios alternatifs

Quatre scénarios alternatifs proposent des hypothèses technologiques et politiques différentes de celles des scénarios de réduction (Tableau 2). Chaque scénario alternatif est modélisé en partant des hypothèses du scénario de réduction GES4.

- **GES4\_Tax.** Le premier scénario alternatif correspond à un scénario dans lequel aucune des taxes fédérales (taxe d'accise fédérale, TAF) ni régionales (taxe sur les carburants provinciale, TCP) sur l'essence ou le diesel ne sont mises en place. Ce scénario permet de comparer les carburants disponibles selon leurs caractéristiques techniques et non pas les politiques en vigueur.
- **GES4\_Elec.** Le second scénario alternatif correspond à un scénario d'électrification totale du transport routier de marchandises en 2050. Ce scénario a pour objectif d'évaluer la faisabilité et les conséquences d'une électrification massive du secteur. On suppose dans ce scénario que les camions se rechargent tous en même temps.
- **GES4\_Inten.** Le troisième scénario analyse la sensibilité des résultats à l'intensité en carbone du gaz naturel renouvelable (GNR). En effet, selon la matière première disponible pour former le GNR, l'intensité carbone du carburant produit n'est pas la même. Au Québec, deux types de GNR sont considérés : le biométhane, ou GNR de première génération, produit à partir de la digestion anaérobie; et le GNR de seconde génération, produit à partir de résidus forestiers. Le GNR de première génération est déjà utilisé dans l'industrie et dans le chauffage résidentiel. Le GNR de seconde génération pourrait avoir un potentiel intéressant dans le transport de marchandises, mais son intensité en carbone est estimée supérieure à celle du diesel Fischer-Tropsch (diesel produit à partir de résidus forestiers) dans la norme sur les combustibles propres. Cependant, étant donné qu'aucun projet pilote n'est actuellement en cours au Canada, la valeur de l'intensité carbone du GNR de seconde génération reste difficile à établir.
- **GES4\_Coût.** Le quatrième scénario alternatif analyse la sensibilité des résultats aux variations de coûts des camions lourds. La compétition entre les camions lourds hybrides au gaz naturel et les camions lourds hybrides au diesel est en effet serrée, et les résultats peuvent varier si l'on considère que les coûts des camions au gaz naturel ont été légèrement surestimés. Ce scénario utilise donc des coûts légèrement inférieurs pour les camions hybrides branchables au gaz naturel que dans le scénario GES4.

Tableau 2. Description des scénarios alternatifs de réduction des émissions de GES

Scénarios	Description
GES4_Tax	Scénario GES4 sans les taxes applicables sur l'essence et le diesel.
GES4_Elec	Scénario GES4 plus une contrainte forçant les camions tout électriques à satisfaire 100 % de la demande en 2050.
GES4_Inten	Scénario GES4 avec des coefficients d'intensité de CO <sub>2</sub> du GNR de seconde génération inférieurs de 25 % à ceux du diesel Fischer-Tropsch dans la norme sur les combustibles propres.
GES4_Coût	Scénario GES4 plus une diminution anticipée des coûts des camions hybrides branchables au gaz naturel de 10 % d'ici 2030 et un autre 10 % entre 2030 et 2050.

Note : Les quatre scénarios alternatifs incluent la norme sur les combustibles propres, ainsi que le règlement concernant la quantité de gaz naturel renouvelable devant être livrée par un distributeur.

### 3. Principaux résultats

Cette section présente les principaux résultats des trois scénarios centraux de l'étude : les scénarios NCP, GES4 et GES4\_Elec. Plus de scénarios sont couverts dans les sections 5 et 6, permettant de mieux comprendre l'impact de certains facteurs.

#### 3.1. Émissions de GES et coûts relatifs des scénarios

Dans le scénario de référence sans action contre les émissions de GES, celles-ci seraient en légère augmentation d'ici 2050 (scénario REF), comme le montre la Figure 1. Avec les mesures actuellement en place (scénario NCP), les émissions seraient en légère diminution, mais loin d'atteindre les cibles de 2030 et de 2050. Il faut un scénario avec des contraintes bien plus importantes (GES4) pour arriver à la cible de 2030 et 90 % de celle de 2050. Ce scénario entraîne des changements majeurs dans le système énergétique, mais ne force pas l'électrification du transport routier des marchandises. Le coût global du scénario GES4 est plus élevé de 10,8 % par rapport au scénario de référence (Figure 2). On remarque avec les scénarios GES1, 2 et 3, qui représentent des contraintes de décarbonisation croissante (jusqu'à l'atteinte des cibles avec GES4), que plus on force une décarbonisation, plus les coûts augmentent.

Si on force l'atteinte des cibles avec une électrification du transport routier des marchandises (scénario GES4\_Elec), les mêmes cibles sont atteintes (Figure 1). Cependant, les coûts du scénario électrique sont plus grands : +22,2 % par rapport au scénario de référence, alors que sans forcer l'électrification on est à +10,8 % (Figure 2). Ces coûts plus importants sont essentiellement liés aux investissements en installations de production électrique supplémentaires requises pour alimenter la flotte de camions lourd. L'absence de camions électriques de classe 8b (équivalents aux camions lourds de plus de 12 litres) force aussi une multiplication des camions électriques de classe 8a, ce qui contribue à l'augmentation des coûts.

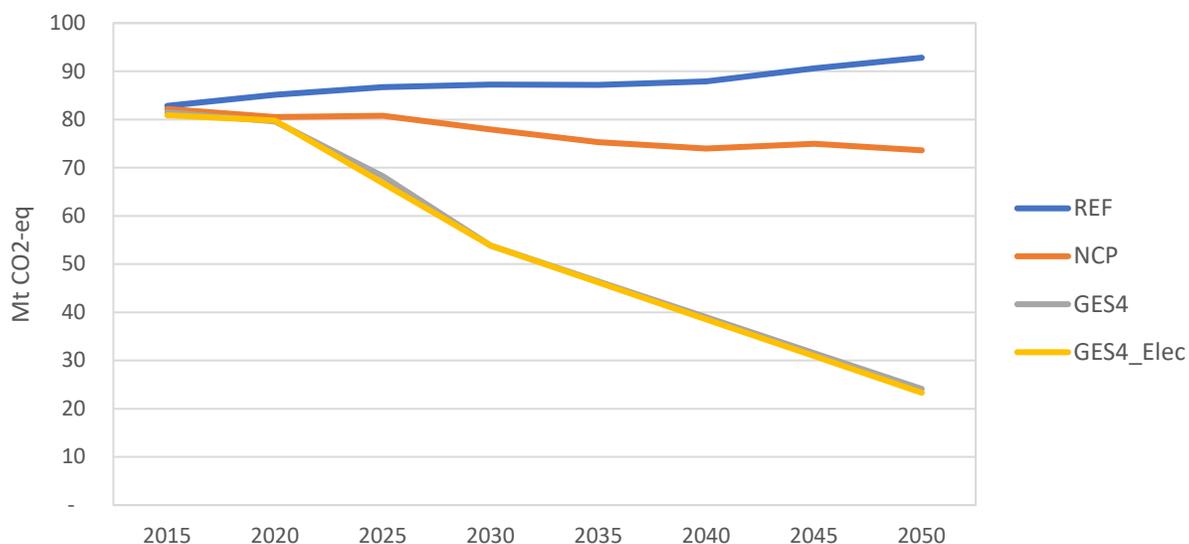


Figure 1. Évolution annuelle des émissions de GES au Québec à l’horizon 2050 et selon les trois scénarios de réduction considérés

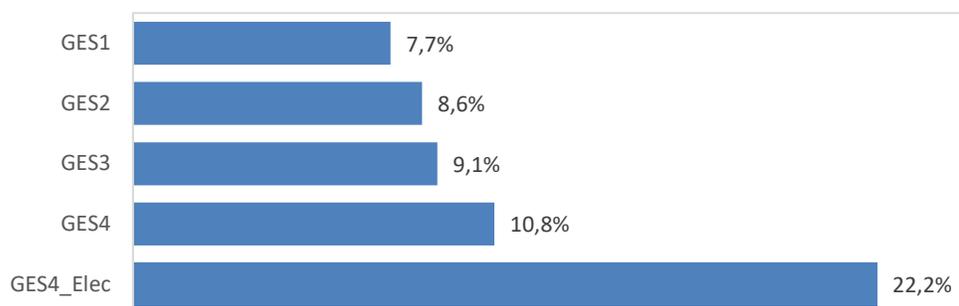


Figure 2. Évolution des coûts totaux relatifs des scénarios considérés au Québec par rapport au scénario de référence<sup>2</sup>

### 3.2. Consommation d’énergie finale

La diminution des émissions de GES est rendue possible par trois facteurs qui changent le profil de la consommation d’énergie : une forte électrification des procédés, une croissance de la bioénergie et une diminution de la consommation totale d’énergie (obtenue grâce à l’efficacité énergétique). Voir la Figure 3. Cette diminution de la consommation totale d’énergie se fait dans un contexte où la demande en transport est croissante (voir le détail dans la section 5.1).

Il est à noter qu’une consommation de produits pétroliers et de gaz naturel de source fossile persiste en 2050, puisque la cible vise une réduction de 80 % des émissions de GES et autorise donc encore un certain usage de ces hydrocarbures.

<sup>2</sup> Les coûts incluent l’ensemble des coûts d’infrastructures, des coûts technologiques et des coûts d’opération et de maintenance pour l’ensemble des secteurs. Ces coûts pourront être pris en charge par tous les acteurs du territoire du Québec : gouvernement, industries, entreprises et ménages.

Dans les résultats de la modélisation, l'hydrogène n'apparaît pas comme source d'énergie finale, même en 2050, parce que dans l'état actuel des hypothèses faites, des alternatives électriques et en bioénergie sont moins coûteuses. La géothermie et le solaire thermique sont des énergies aussi très marginales dans le mix énergétique.

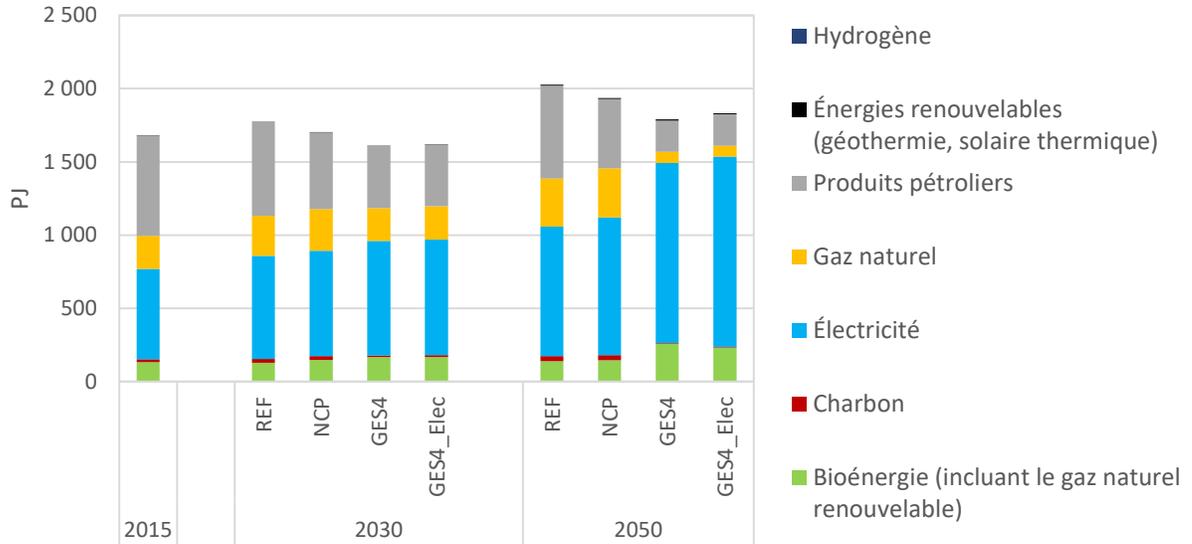


Figure 3. Consommation d'énergie finale au Québec, tous secteurs confondus (transport, résidentiel, commercial, industriel) en 2015, 2030 et 2050

Dans le secteur du transport de passagers (Figure 4a), l'atteinte des cibles passe essentiellement par l'électrification. Dans le secteur du transport des marchandises (routier, marin et ferroviaire), malgré une augmentation de la charge transportée en 2030 et 2050 (voir section 5.1), l'atteinte des cible (scénario GES4) passe par une demande en énergie qui diminue grâce à l'efficacité énergétique accrue des nouveaux véhicules (Figure 4b). L'évolution des sources d'énergie est aussi très importante : les bioénergies (incluant le gaz naturel renouvelable (GNR)) ont un rôle important dès 2030, mais surtout pour 2050. L'électricité est aussi croissante dans le scénario GES4, tout comme le gaz naturel conventionnel. Ce sont le diesel, l'essence et le mazout lourd qui sont en déclin marqué et, dans le cas du mazout lourd, éliminé en 2050.

Le scénario d'électrification du transport des marchandises (GES4\_Elec) implique une très forte demande d'énergie électrique. Celle-ci est élevée en raison de l'obligation, dans le modèle, de multiplier les camions lourds électriques de moins de 12 litres, en substituts aux camions lourds de plus de 12 litres. D'après les hypothèses de cette étude, aucune technologie électrique de plus de 12 litres ne serait assez développée pour être envisagée d'ici 2050. Ce manque de disponibilité technologique fait peser un poids très élevé sur les résultats du modèle, si une électrification est exigée. Les bioénergies, le GNR et le gaz naturel permettent cependant d'atteindre les mêmes cibles (scénario GES4), à moindre coût – comme illustré précédemment (Figure 2).

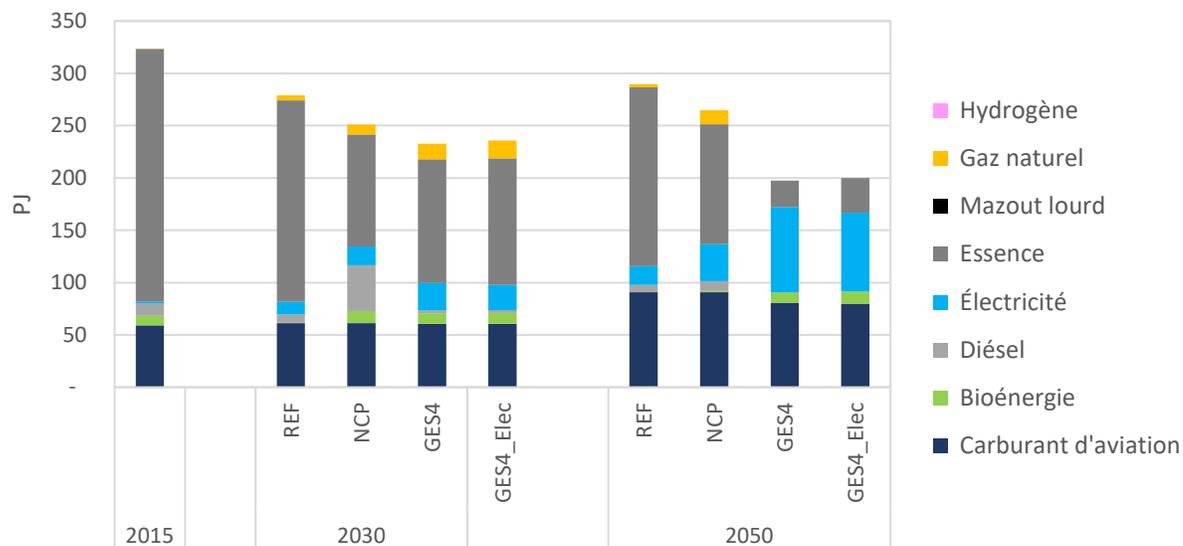


Figure 4a. Consommation d'énergie finale dans le secteur du transport des passagers (tous modes confondus) au Québec en 2015, 2030 et 2050

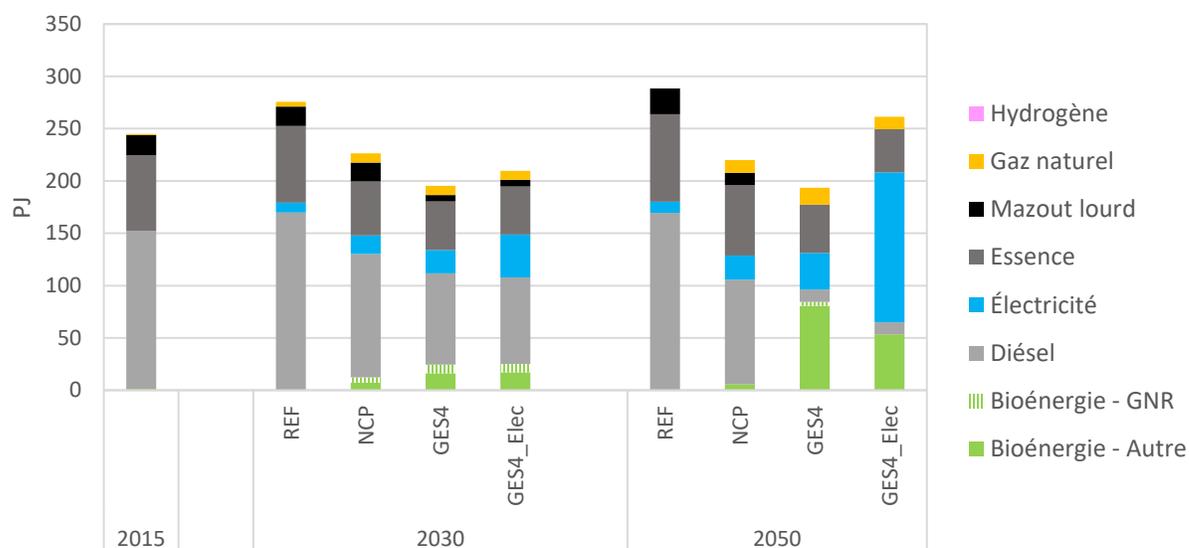


Figure 4b. Consommation d'énergie finale dans le secteur du transport des marchandises (tous modes confondus) au Québec en 2015, 2030 et 2050

### 3.3. Production et consommation d'électricité

L'atteinte des cibles de 2030 et de 2050 exige une augmentation de la consommation d'électricité, et donc des capacités de production de celle-ci. La Figure 5 illustre la croissance de cette capacité qui est requise dans le système énergétique québécois. D'environ 45 GW en 2015, il faudrait ajouter plus de 5 GW d'ici 2030 dans les scénarios d'atteinte des cibles (GES4 et GES4\_Elec) et doubler ou plus la capacité de production électrique d'ici 2050. Les coûts d'investissement et d'opération font en sorte que l'éolien domine dans les ajouts de capacité, avec du solaire aussi présent. Notons que les contraintes d'intermittence et d'équilibre entre la production et la consommation sont prises en compte par le modèle NATEM.

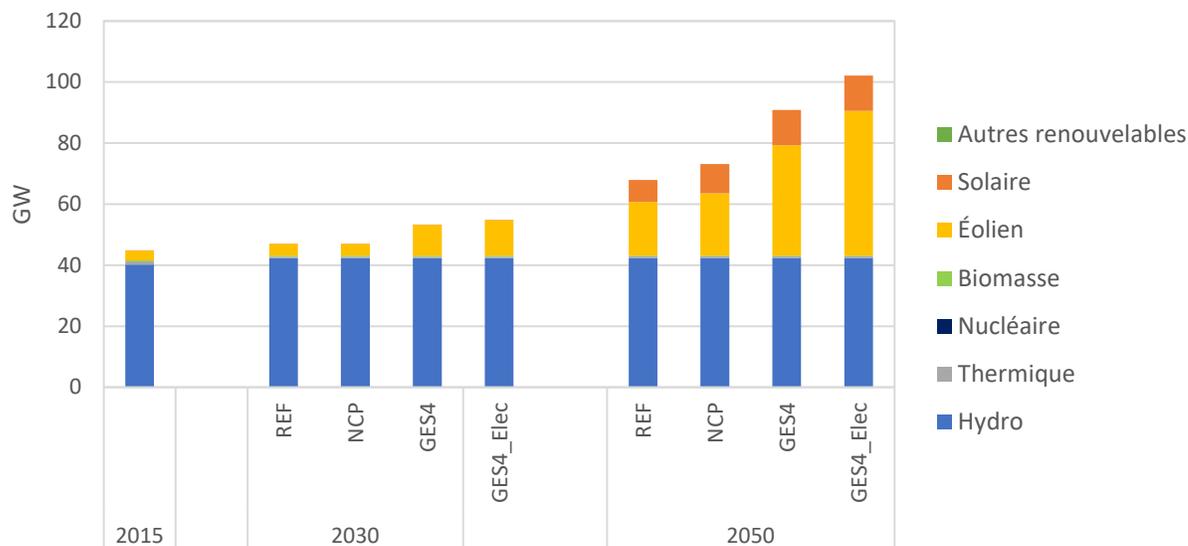


Figure 5. Capacité électrique installée au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

L'électrification des transports, qui progresse dans tous les scénarios considérés, est cependant extrêmement importante dans le scénario GES4\_Elec. Il est à noter que même si peu de camions lourds de marchandises sont 100 % électriques (voir section 3.5 et la Figure 12), comme la technologie des camions hybrides rechargeables se déploie rapidement, la consommation d'électricité liée au transport des marchandises par camions lourds est significative et dépasse même celle des camions légers.

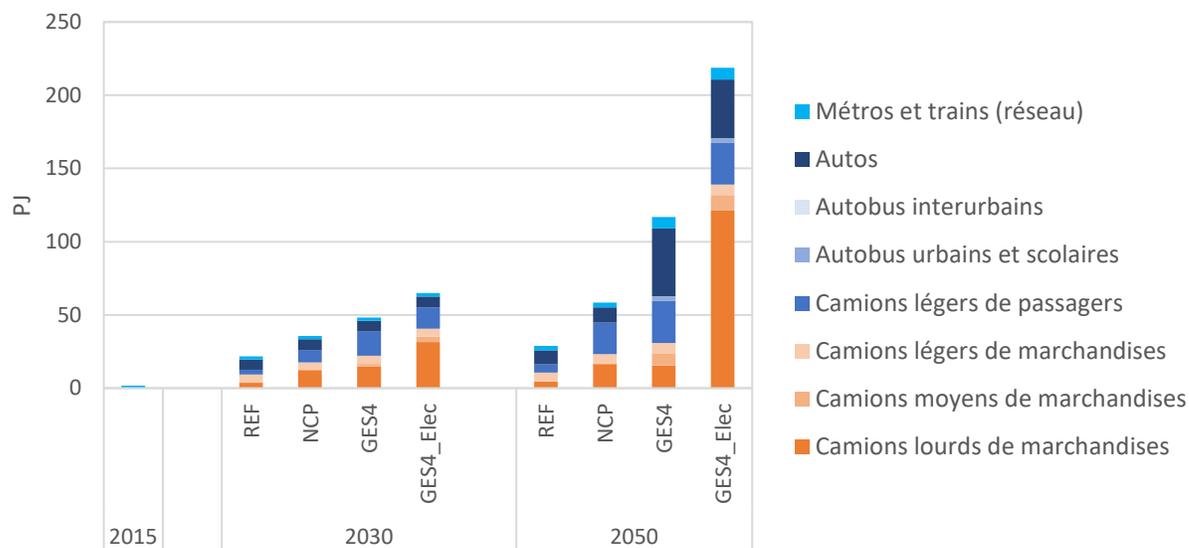
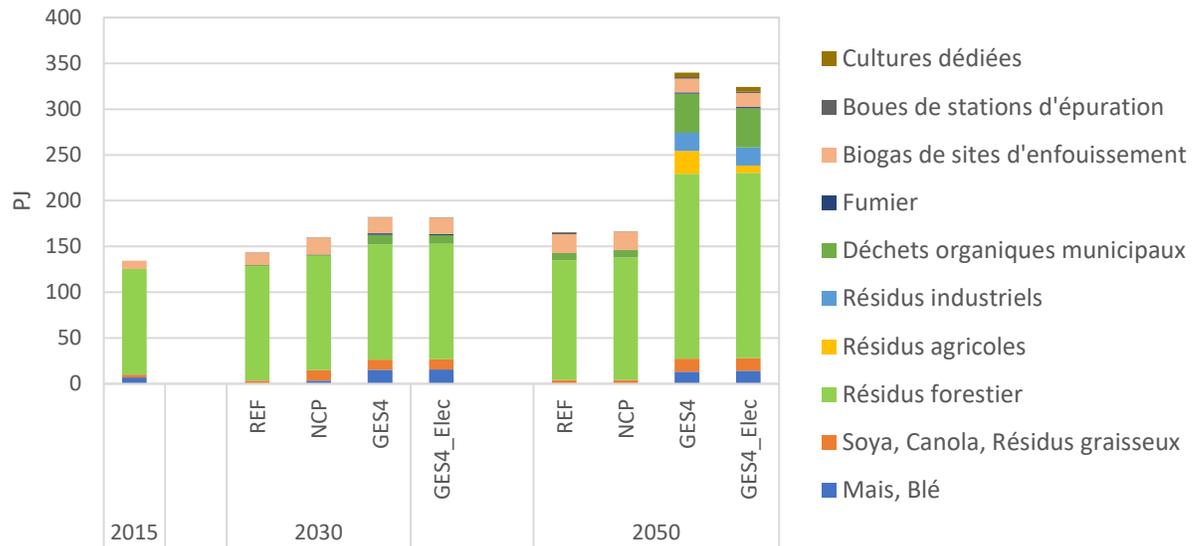


Figure 6. Consommation électrique du secteur des transports (tous modes confondus) au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions (note : 20 PJ ≈ 5,5 TWh)

### 3.4. Consommation des bioénergies

Les bioénergies prenant davantage d'importance dans le mix énergétique, il est important de comprendre leur provenance. La Figure 7 présente les sources de matière première pour ces bioénergies, pour tous les

secteurs de consommation du Québec. Alors que les résidus forestiers sont déjà la principale source de matière première, leur apport est croissant, surtout dans les scénarios d'atteinte des cibles d'émissions. Une valorisation accrue des biogaz de sites d'enfouissement et des déchets organiques municipaux est aussi significative, tout comme un plus grand usage de céréales et de cultures qui pourraient être dédiées à l'alimentation. Il y a cependant des limites à l'augmentation de la contribution de ces sources, et en 2050, les résidus agricoles et industriels sont utilisés, tout comme certaines nouvelles cultures dédiées.



\* Cultures dédiées : arbres à croissance rapide cultivés spécifiquement pour la production de biocarburants.

Figure 7. Utilisation par type de matières premières pour la production de bioénergie au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

Ces sources de bioénergie (Figure 7) sont transformées en divers produits illustrés à la Figure 8. Si la biomasse forestière continue de dominer les produits utilisés dans tous les secteurs de consommation, l'éthanol, le biodiesel et le GNR sont importants dès 2030 dans les scénarios d'atteinte des cibles (GES4 et GES4\_Elec). C'est évidemment dans le secteur du transport que ces carburants prennent une place. En 2050, le GNR continue d'augmenter sa contribution, avec le recours additionnel de technologies de deuxième génération pour satisfaire la demande en GNR. Le diesel Fischer-Tropsch apparaît de manière importante en 2050, étant donné la nécessité d'avoir des carburants plus propres. Il est à noter, cependant, que la quantité de diesel Fischer-Tropsch est très sensible au coût des technologies, comme discuté dans la section 4.

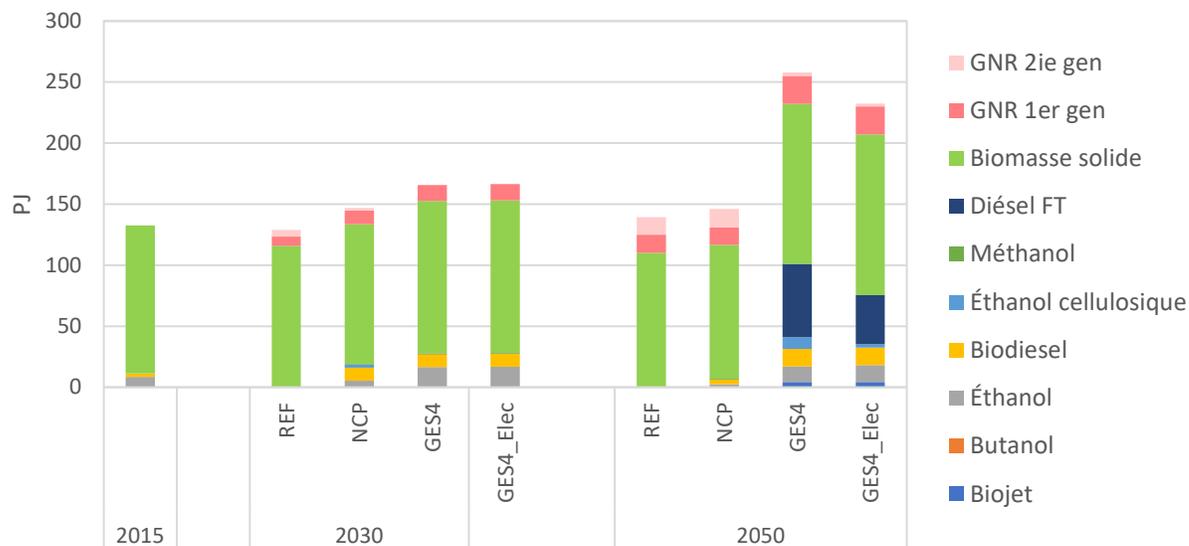


Figure 8. Consommation des divers types de bioénergies tous secteurs confondus au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

Dans le scénario d'atteinte des cibles (GES4), le secteur du transport utilise autour de 25 % des bioénergies en 2030 (approximativement 35 PJ sur 165 PJ) et près de 40 % en 2050 (95 PJ sur 250 PJ). Voir la Figure 9. On constate l'importance en 2030 de l'éthanol, du GNR et du biodiesel. En 2050, c'est le diesel Fisher-Tropsch qui prend une grande importance – dans la mesure où les sources d'incertitude (discutées à la section 4) jouent en sa faveur. Dans un contexte où plusieurs facteurs peuvent avoir une influence contraire, la diversité des carburants renouvelables, déjà présente à la Figure 9, pourrait s'accroître. Le GNR, notamment, pourrait prendre davantage d'importance.

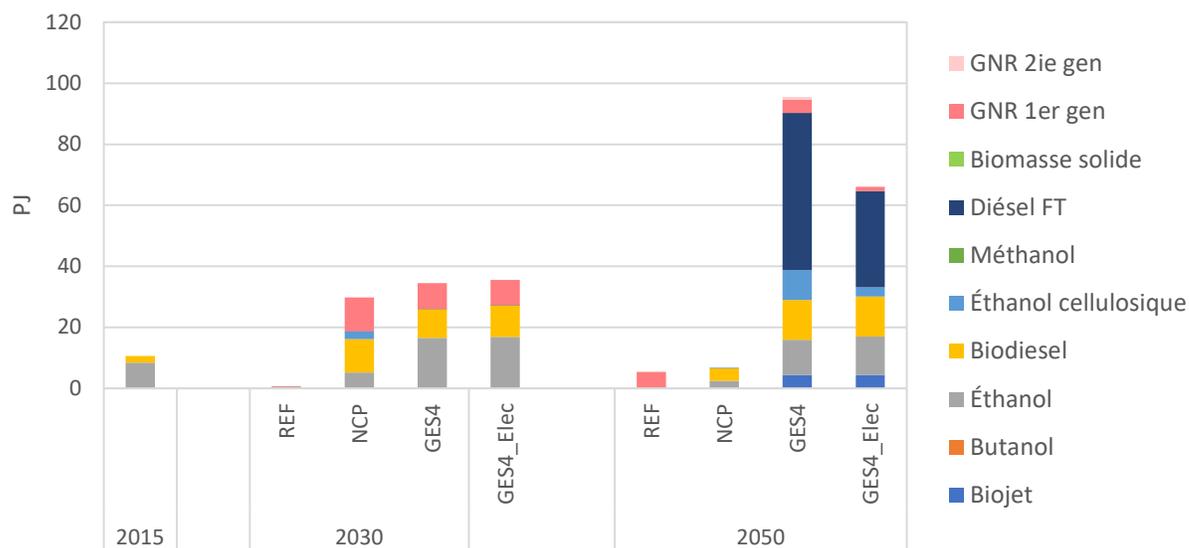


Figure 9. Consommation des divers types de bioénergies dans le secteur du transport au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

### 3.5. Part de marché des véhicules pour le transport de marchandises

Dans les trois catégories de véhicules pour le transport routier des marchandises (camions légers, moyens et lourds), les résultats sont très différents. Pour les camions légers (Figure 10), l'électrification est rapide dès 2030, même en l'absence de contrainte de réduction des émissions de GES. En 2050, pour atteindre les cibles, l'électrification complète du parc de camions légers est réalisée. L'obligation d'électrifier (scénario GES4\_Elec) n'est pas nécessaire parce que les avantages de la technologie électrique font qu'elle domine naturellement les choix d'investissement dans le cas des petits véhicules de transport de marchandise.

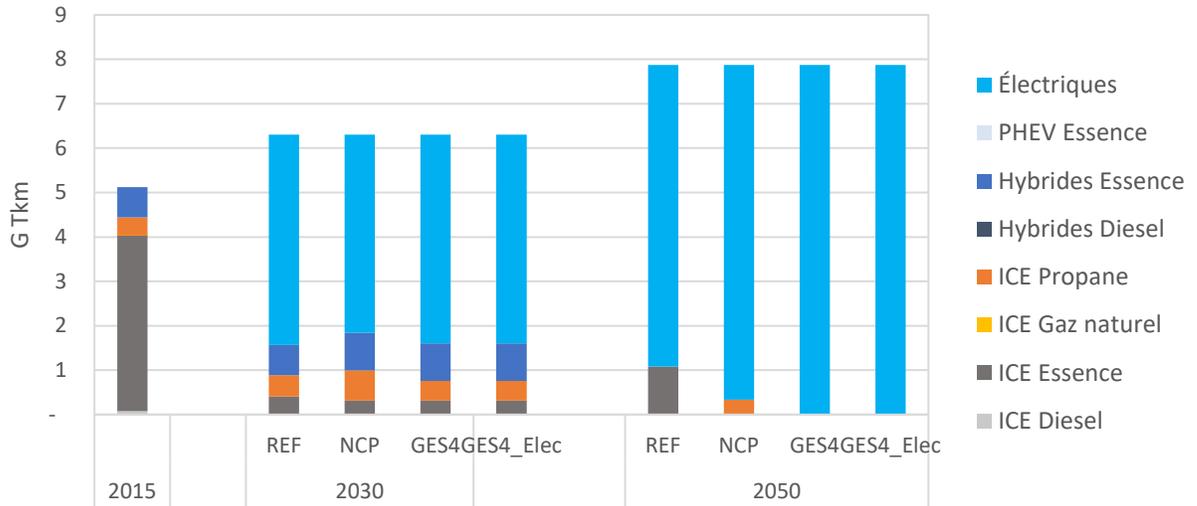


Figure 10. Parts de marchés des camions légers pour satisfaire la demande de transports des marchandises au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

Pour les camions moyens (Figure 11), les technologies hybrides prennent beaucoup d'importance naturellement, mais la contrainte d'atteindre les cibles force l'adoption de technologies hybrides rechargeables (PHEV) dès 2030. En 2050, dans le scénario GES4, on ne retrouve plus que des hybrides rechargeables et des camions moyens électriques, alors que dans le scénario GES4\_Elec on ne trouve, forcément, que des véhicules électriques.

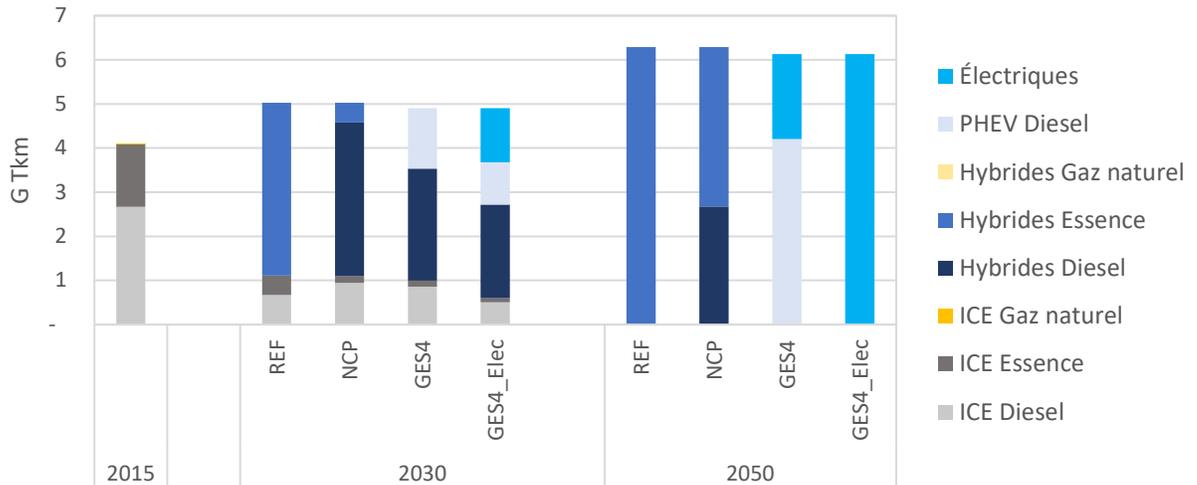


Figure 11. Parts de marchés des camions moyens pour satisfaire la demande de transports des marchandises au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

Pour les camions lourds, la technologie hybride rechargeable fait rapidement son apparition en 2030, même sans les contraintes de réduction des émissions (scénario NCP). Dès 2030, pour l'atteinte des cibles, la technologie traditionnelle des camions au diesel (ICE Diesel) est presque éliminée. Les camions lourds hybrides rechargeables (PHEV) prennent en charge l'essentiel du transport de marchandises, avec le diesel et le gaz naturel comme source de carburant complémentaire.

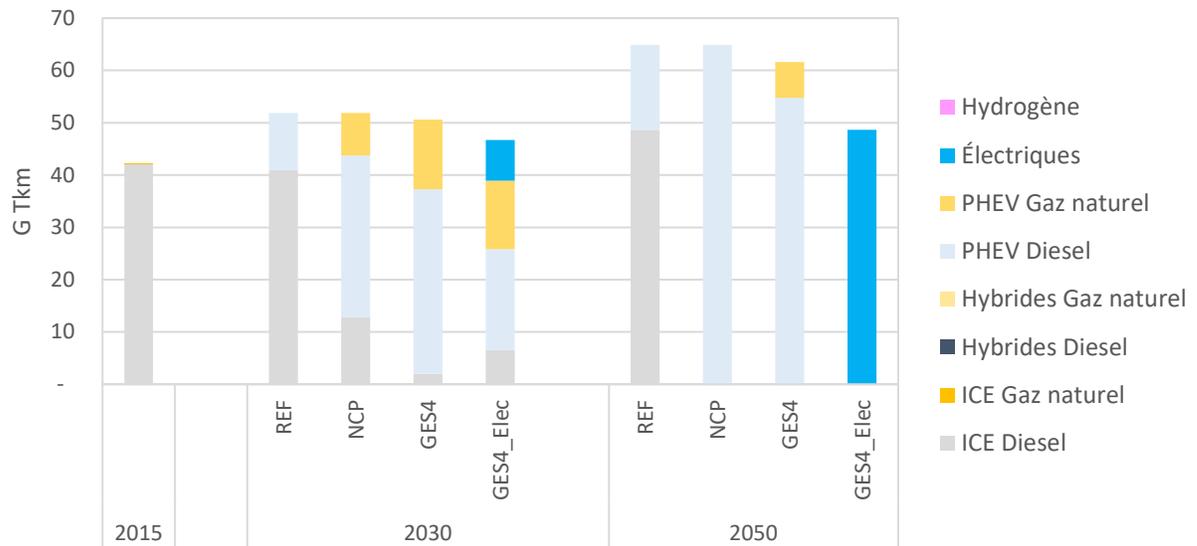


Figure 12. Parts de marchés des camions lourds pour satisfaire la demande de transports des marchandises au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

On peut ainsi constater que si la technologie des moteurs conventionnels au diesel s'efface rapidement du portrait, aucune technologie ne domine clairement pour la remplacer. Cela est vrai pour les camions moyens, mais surtout pour les camions lourds. Cette tendance mérite une analyse plus approfondie, pour tenter de mieux comprendre ces résultats. La section 4 sur les sources d'incertitude offre cette analyse.

## 4. Sources d'incertitudes de l'étude

Le Tableau 3 présente les hypothèses qui sont les principales sources d'incertitudes de cette étude. Les sources d'incertitudes sont principalement dues à un manque de projets pilotes et donc, un manque de données sur les nouvelles filières énergétiques et sur les nouvelles technologies qui en découlent (par exemple, filière de l'hydrogène). Une modification de ces hypothèses (comme montré plus tard dans la section 6 avec les scénarios alternatifs), peut changer la tendance des résultats.

Ces incertitudes ont surtout un impact sur les camions lourds pour lesquels aucune énergie ne s'impose clairement. Si les véhicules hybrides rechargeables prennent de l'importance, il existe plusieurs options possibles : au diesel ou au gaz naturel. Ces deux carburants peuvent eux-mêmes être de source fossile ou renouvelable. Les émissions de polluants atmosphériques liées au diesel (et au diesel renouvelable) ne sont pas prises en compte dans le modèle NATEM et pourraient pénaliser cette énergie. De même, l'utilisation des matières premières dépendra de la disponibilité de projets de transformation en biodiesel, diesel Fisher-Tropsch et GNR (1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> génération). En plus de cela, l'intensité en carbone de certains carburants alternatifs n'est actuellement pas assez documentée pour être exacte. La concurrence entre les camions

hybrides rechargeables (PHEV) diesel et au gaz naturel est donc très serrée, plus que ce que les Figures 11 et 12 indiquent. Les Figures 13, 14 et 15 explorent la sensibilité de certains résultats au prix des véhicules hybrides rechargeables utilisant du gaz naturel comme carburant d'appoint. Le scénario GES4\_Coût est similaire au scénario GES4, avec simplement une légère réduction du prix de ces véhicules.

D'une manière générale, l'ensemble de ces sources d'incertitude tend à montrer que différentes technologies sont nécessaires et pertinentes pour répondre à la demande et pour être résilient face aux évolutions possibles des technologies et des marchés. Miser sur une technologie unique pourrait s'avérer non seulement coûteux, mais aussi risqué si une tendance non anticipée avait un impact significatif sur le marché et rendait cette technologie désuète.

Tableau 3. Sources d'incertitudes de cette étude

Incertitudes	Hypothèses de l'étude
Compétition entre les camions lourds hybrides branchables fonctionnant au gaz naturel et au diesel	Surcoût à l'achat estimé* à 119 000 \$ pour les camions lourds hybrides branchables au gaz naturel à moteur de plus de 12 litres (classe 8b), comparé aux camions lourds hybrides branchables au diesel.
Intensité en carbone des carburants alternatifs	Il est estimé que l'intensité en carbone du gaz naturel de seconde génération est supérieure à l'intensité en carbone du diesel Fischer-Tropsch. Aucun projet pilote à date pour confirmer ceci.
Régulation sur les polluants atmosphériques, particules fines, NOx et SOx autres que CO <sub>2</sub> , et CH <sub>4</sub>	Le modèle ne prend pas en compte les divers polluants atmosphériques associés aux camions roulant au diesel.
Couverture du réseau de ravitaillement	Il est estimé que le réseau de ravitaillement au gaz naturel n'est qu'à 40 % de son plein potentiel au Québec (voir section 2.2). Des coûts sont donc associés au développement du réseau de gaz naturel.
Sensibilité sur les filières de production des carburants alternatifs	Il existe des incertitudes sur toute la chaîne de production des différents carburants alternatifs, incluant la production, le transport et la distribution, en particulier pour les biocarburants, le gaz naturel renouvelable, l'hydrogène ou l'électricité. Les incertitudes concernent autant l'évolution des coûts que les paramètres techniques, comme l'efficacité de conversion.
Quantité, types et coûts des matières premières disponibles pour la production de carburants alternatifs	Évolution des quantités de matières premières dans le temps qui seront disponibles pour la production de carburants alternatifs étant donné la compétition pour divers usages dans un contexte de réduction des GES. Coûts relatifs à la préparation des matières premières.

\*selon les données du marché

En baissant légèrement (de 10 % en 2030 et d'un autre 10 % en 2050) le prix des PHEV au gaz naturel (scénario GES4\_Coût), on peut observer dans la Figure 13 que le GNR devient beaucoup plus compétitif en 2050 que dans le scénario GES4. D'environ 5 PJ, sa contribution au secteur du transport passe à 25 PJ, avec une grande part de GNR de 2<sup>e</sup> génération. Le diesel Fisher-Tropsch reste la bioénergie la plus importante, mais dans une moindre proportion.

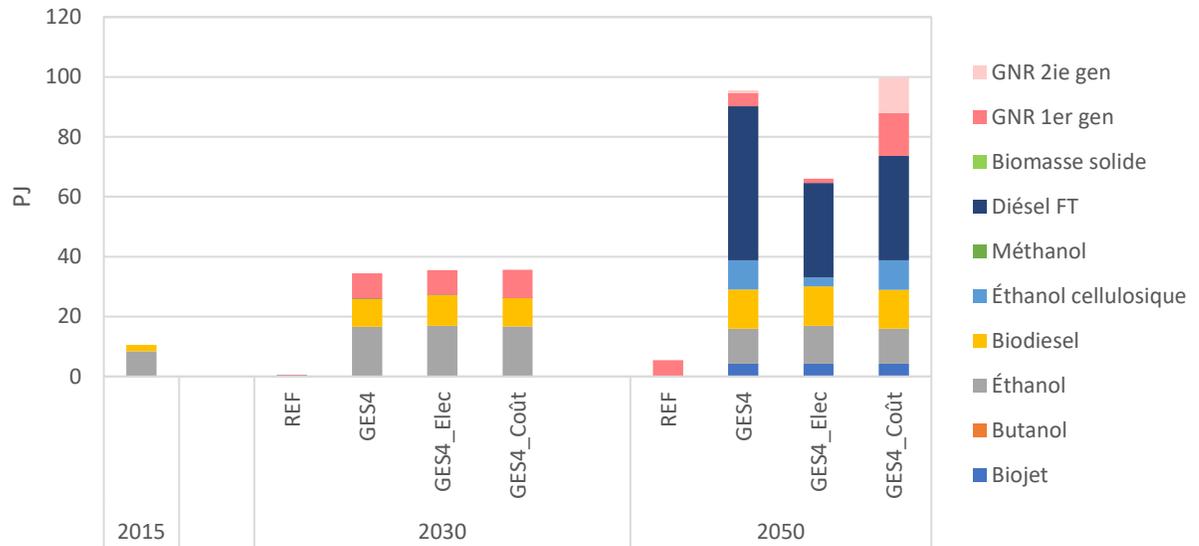


Figure 13. Consommation des divers types de bioénergies dans le secteur du transport au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

La consommation de bioénergie dans le secteur du transport illustrée dans la Figure 13 reflète les choix de camions moyens et lourds (les camions légers restant électriques), comme les Figures 14 et 15 indiquent. Pour les camions moyens, la compétition est serrée selon les scénarios entre camions électriques, hybrides branchables au diesel et hybrides non branchables au diesel. Pour les camions lourds, le choix doit se faire entre hybrides branchables au diesel et hybrides branchables au gaz naturel. Dans le scénario GES4\_Coût, ce sont les PHEV au gaz naturel qui dominent le segment des camions lourds (Figure 15).

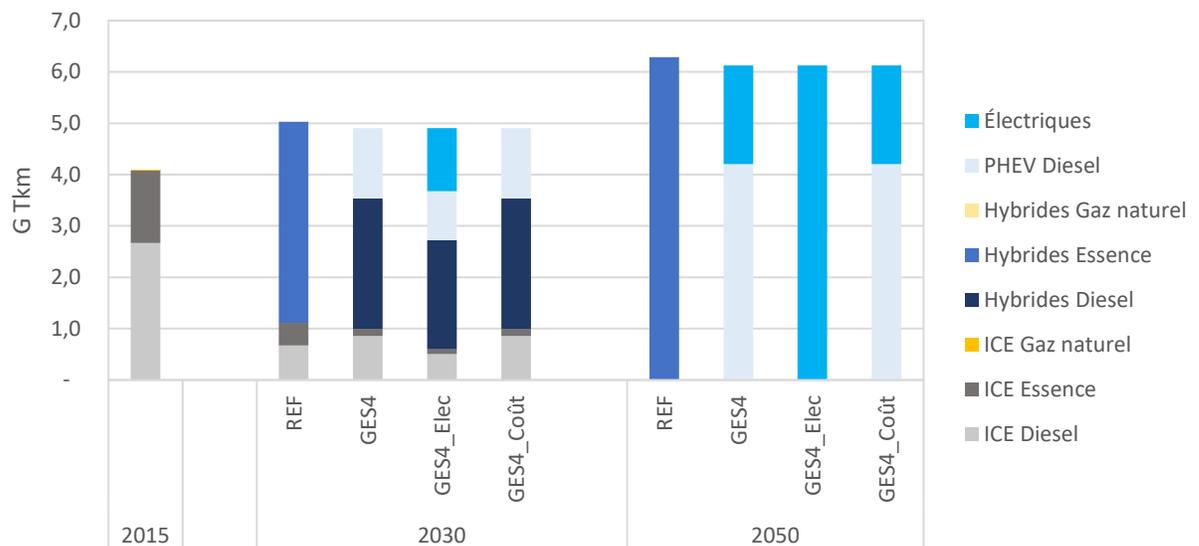


Figure 14. Parts de marchés des camions moyens pour satisfaire la demande de transports des marchandises au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

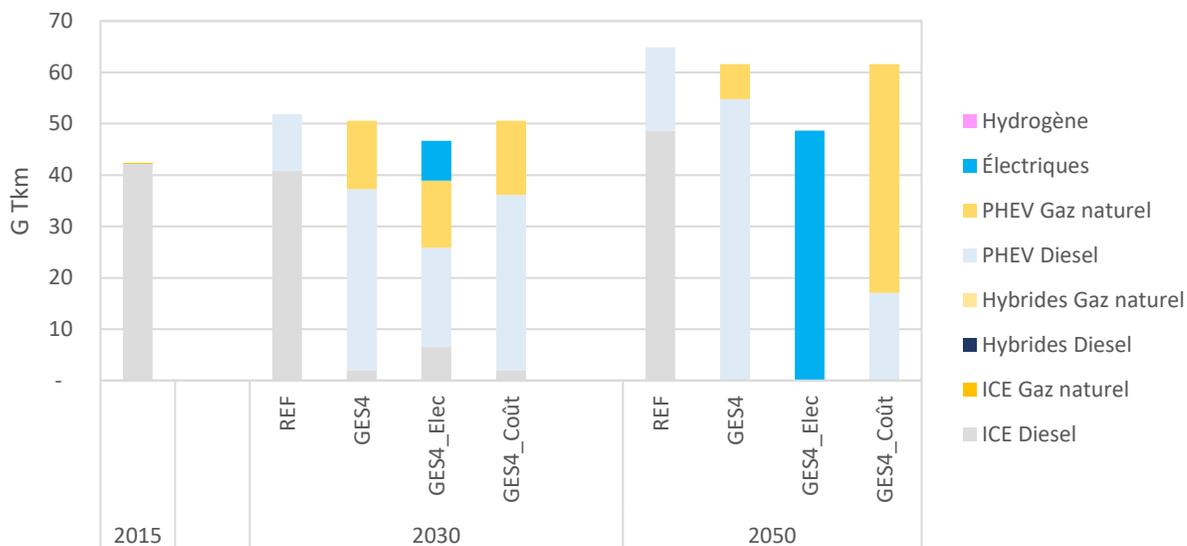


Figure 15. Parts de marchés des camions lourds pour satisfaire la demande de transports des marchandises au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios alternatifs

L'ensemble de ces incertitudes, notamment celle liée au coût des camions PHEV au gaz naturel, montre qu'une mixité d'approches technologiques et énergétiques dans le transport des marchandises est à privilégier. Aucune technologie ne se dégageant clairement comme dominante, la diversité offre une flexibilité plus à même de minimiser les coûts dans les différents cas de figure pour pourraient se réaliser.

## 5. Résultats des scénarios de réduction

### 5.1. Évolution de la demande et des émissions de GES

Les Figures 16 et 17 montrent l'évolution des demandes de transport de passagers et de marchandises telles qu'elles sont estimées dans NATEM. Les demandes augmentent linéairement entre 2015 et 2050, et en particulier la demande pour le camionnage lourd dans le transport des marchandises. On pourrait penser que l'augmentation de la demande engendre systématiquement une augmentation des émissions. En réalité, même dans le scénario de référence dans lequel les émissions de GES continuent d'augmenter d'environ 10 Mt d'équivalent CO<sub>2</sub> entre 2015 et 2050, les émissions de GES n'augmentent pas proportionnellement à la demande (Figure 18). Ceci s'explique par le fait que l'efficacité énergétique des véhicules augmente en parallèle, permettant de limiter l'augmentation des émissions dans le secteur des transports. À noter également, une norme simple sur les combustibles propres permettrait de diminuer les émissions d'environ 5 Mt d'équivalent CO<sub>2</sub> d'ici 2050.

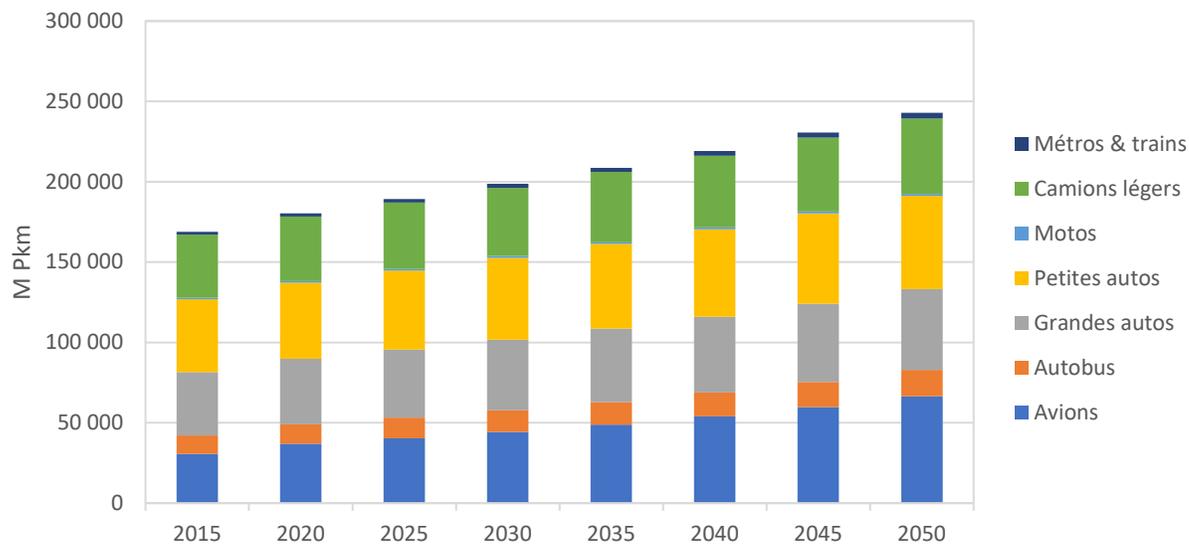


Figure 16. Évolution de la demande pour le transport de passagers au Québec entre 2015 et 2050 (en MP.km)

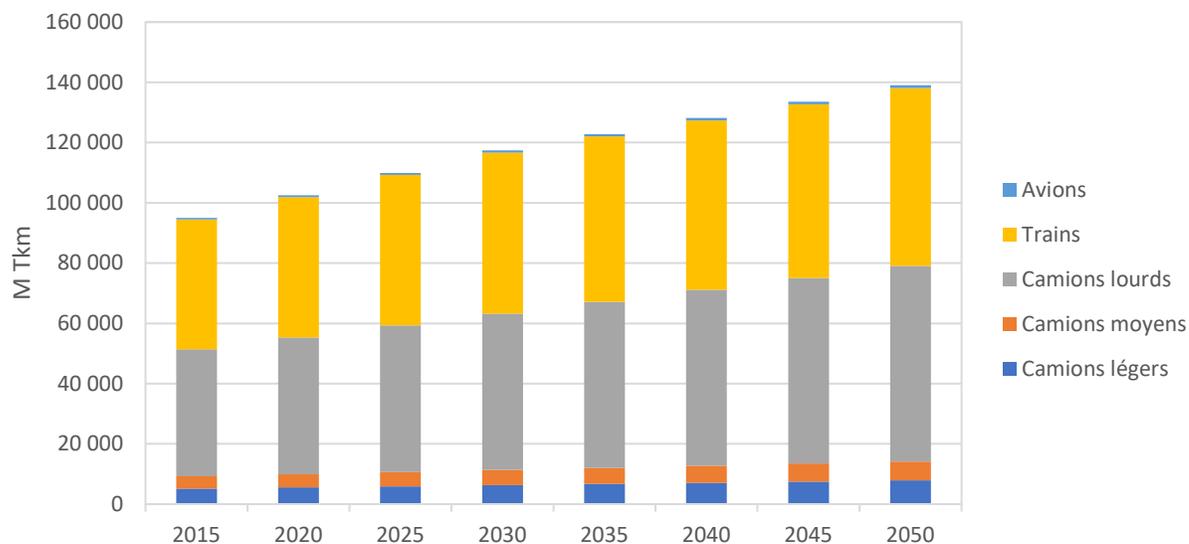


Figure 17. Évolution de la demande pour le transport de marchandises au Québec entre 2015 et 2050 (en MT.km)

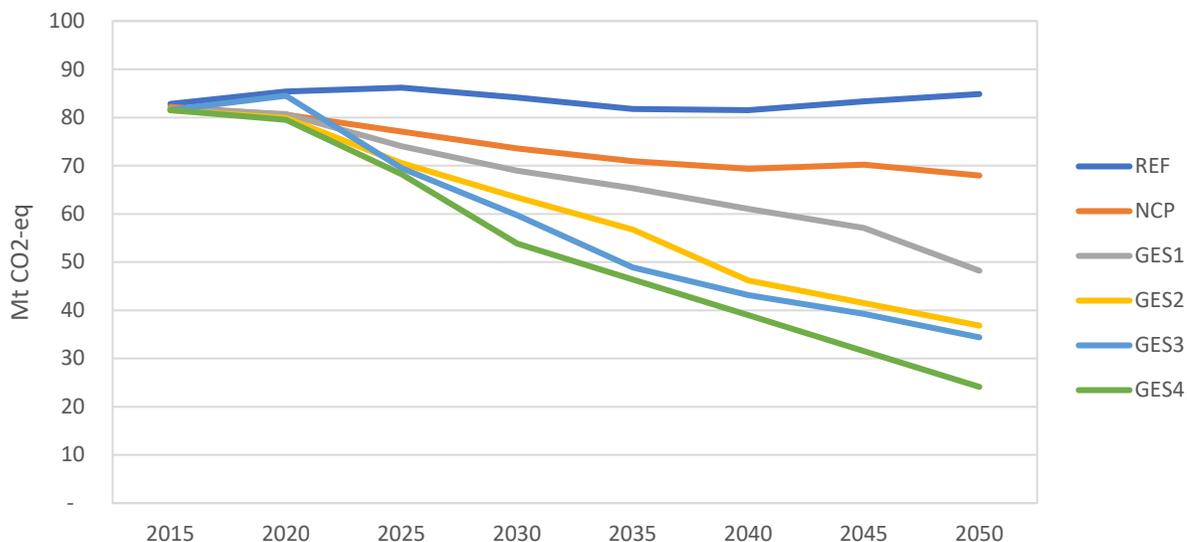


Figure 18. Évolution annuelle des émissions de GES au Québec à l’horizon 2050 et selon les scénarios de réduction considérés

## 5.2. Consommation d’énergie finale

En regardant la consommation d’énergie dans sa globalité (tous secteurs confondus), la préférence pour réduire les émissions de GES va à la suppression graduelle des produits pétroliers, au développement du gaz naturel peu exploité dans le secteur des transports à moyen terme (2030) et surtout à l’électrification sur le long terme (2050) (Figure 19). Les bioénergies se développent aussi, à la mesure de leur potentiel. Dans le transport des passagers, l’électrification devrait être généralisée. Dans le transport de marchandises (Figure 20b), au contraire, la tendance n’est pas à l’électrification. En effet, plus la contrainte de réduction des émissions est élevée, plus les bioénergies répondent à la demande du transport de marchandises, en remplacement du diesel. Dans le transport des marchandises, l’électrification est en effet limitée puisque toute une partie de la flotte n’existe pas sous forme électrique. À noter, dans tous les scénarios mettant en place une norme sur les combustibles propres, l’utilisation du gaz naturel pour le transport des marchandises devient significative aux horizons 2030 et 2050.

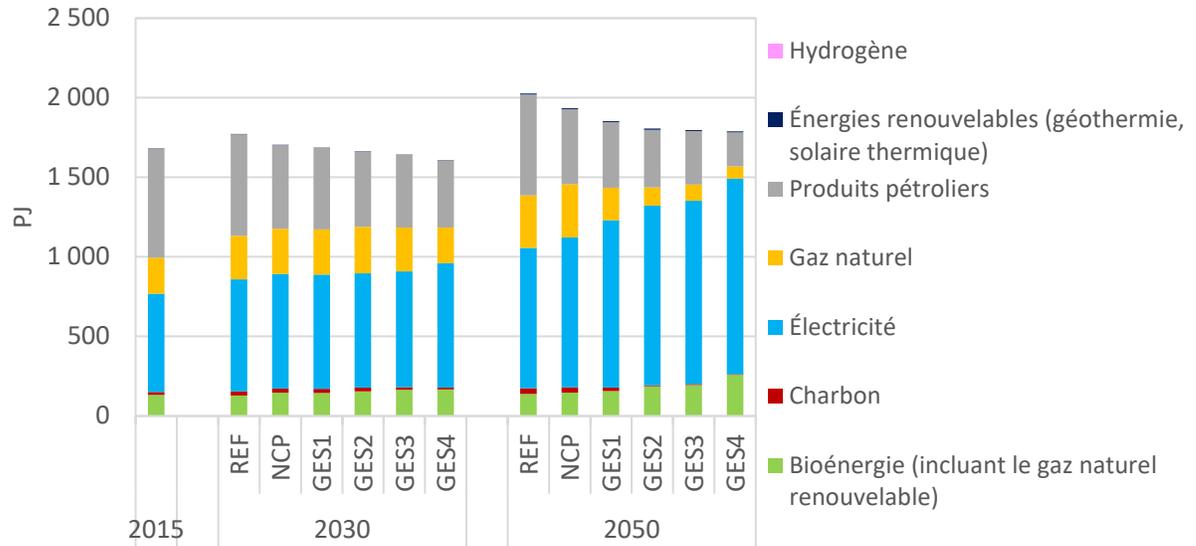


Figure 19. Consommation d'énergie finale au Québec, tous secteurs confondus (transport, résidentiel, commercial, industriel) en 2015, 2030 et 2050

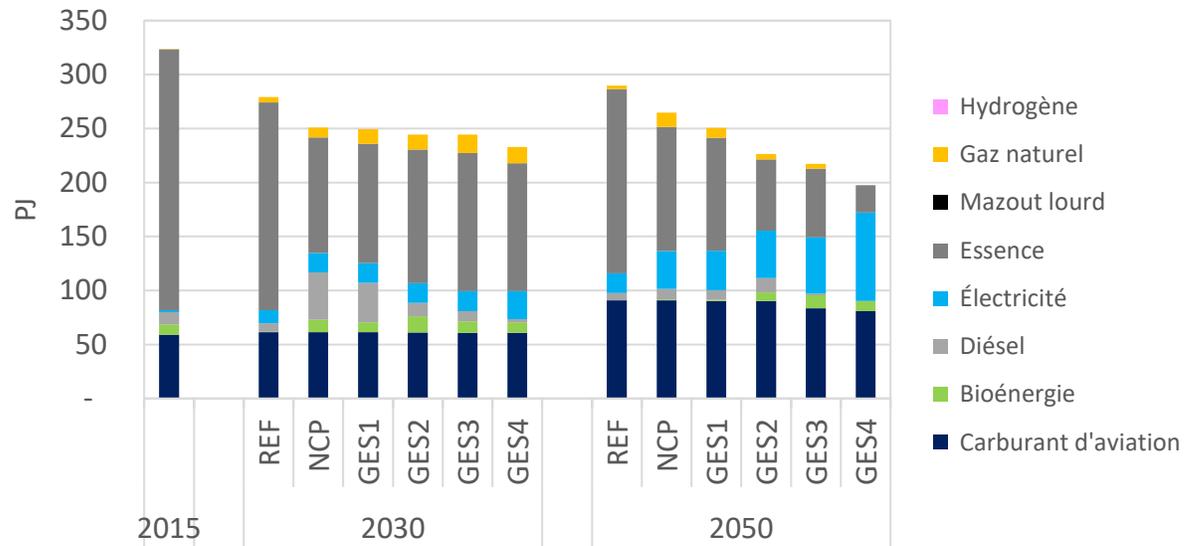


Figure 20a. Consommation d'énergie finale dans le secteur du transport des passagers (tous modes confondus) au Québec en 2015, 2030 et 2050

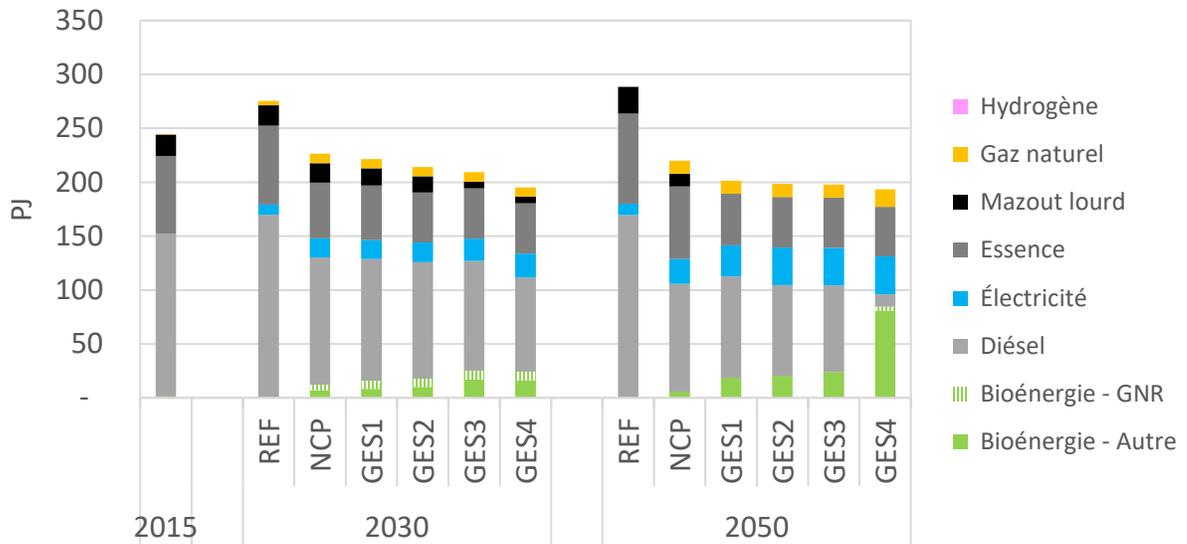


Figure 20b. Consommation d'énergie finale dans le secteur du transport des marchandises (tous modes confondus) au Québec en 2015, 2030 et 2050

### 5.3. Production et consommation d'électricité

Une électrification des secteurs implique une augmentation de la capacité électrique de la région (Figure 21). Si en 2030, l'augmentation de la capacité électrique de la région est envisageable, c'est en 2050 que la capacité électrique devrait réellement exploser et doubler pour atteindre 90 GW de capacité, dans le scénario de réduction le plus contraignant (GES4). Dans le secteur des transports, l'électrification se produit principalement dans le transport des passagers, avec une augmentation du parc d'automobiles et de camions légers électriques (Figure 22). Dans le secteur du transport des marchandises, l'électrification se retrouve au niveau des camions légers ou moyens et reste très limitée dans les camions lourds. En effet, la viabilité technique des véhicules électriques et des infrastructures de recharge sont restreintes dans la catégorie des camions lourds à moteur de plus de 12 litres (classe 8b). C'est pour cette raison que l'électrification n'est pas présentée comme la solution unique dans le secteur du transport de marchandises.

Il est à souligner que cette augmentation de la capacité électrique s'observe dans les résultats du modèle NATEM, qui n'inclut pas de manière standard des programmes de gestion de la demande de pointe. De tels programmes pourraient réduire de manière significative les besoins en puissance – sans toutefois renverser les tendances générales qui se dégagent des résultats présentés. Aussi, toutes les technologies sont techniquement possibles dans NATEM. Si l'éolien et le solaire sont les technologies choisies pour l'accroissement de la capacité dans les résultats, c'est sur la base de leurs coûts globaux moins grands, tout en respectant les contraintes de puissance et de disponibilité incluent dans le modèle.

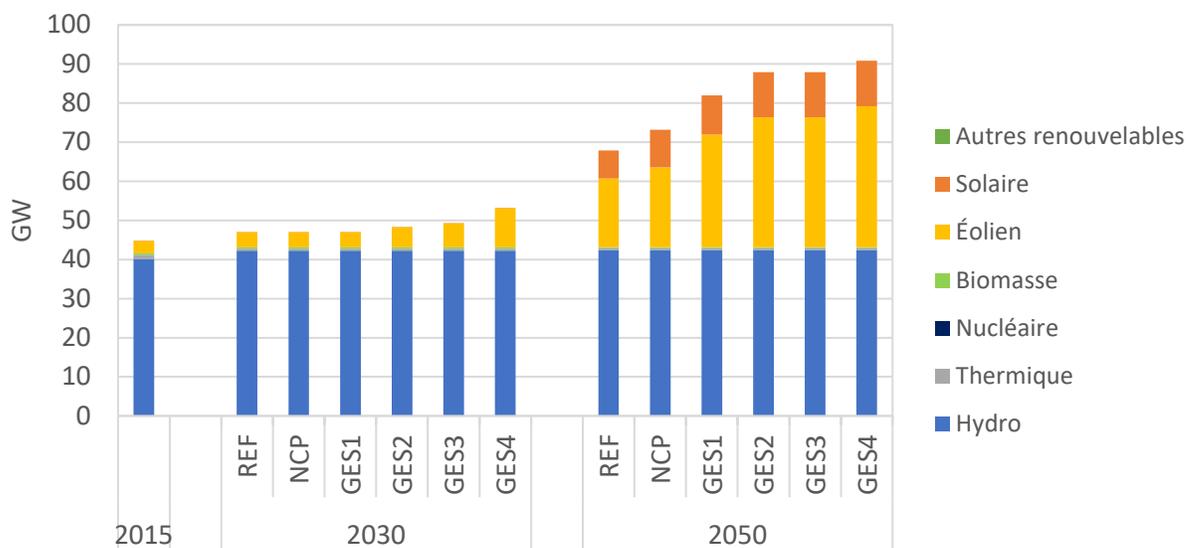


Figure 21. Capacité électrique installée au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

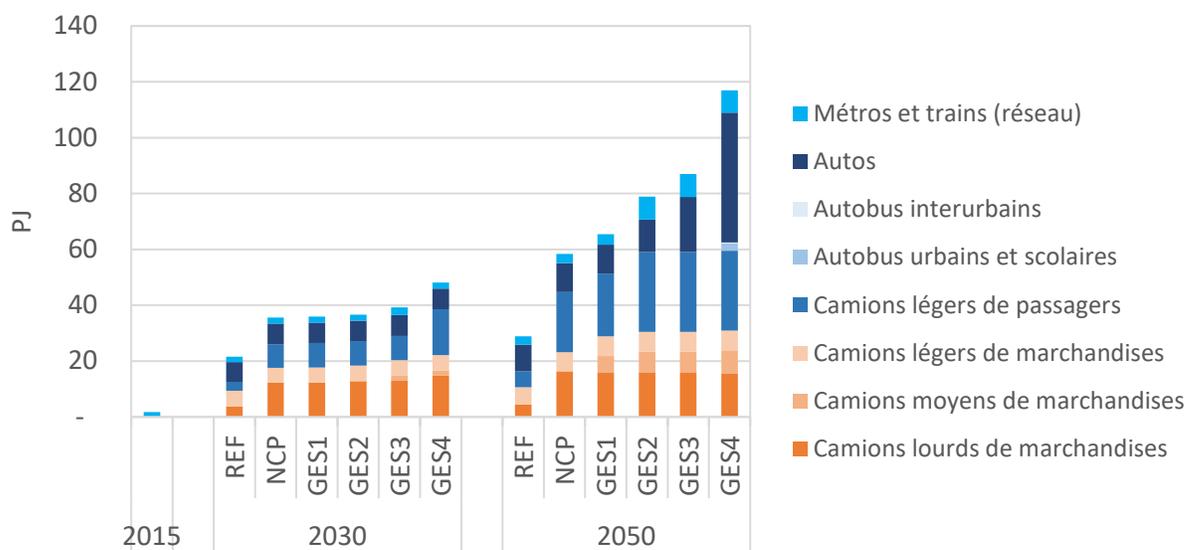
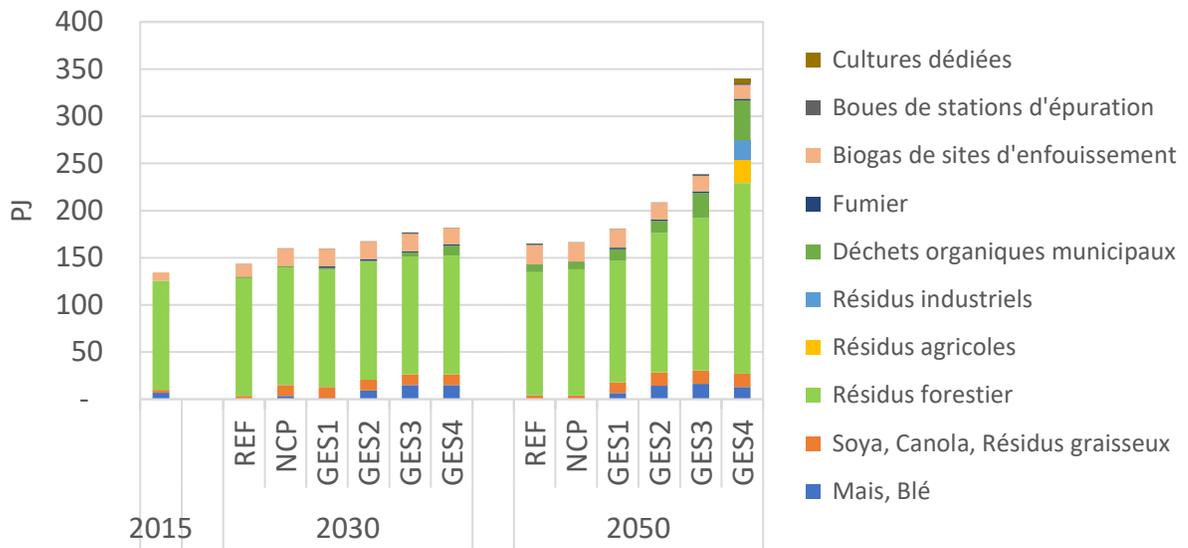


Figure 22. Consommation électrique du secteur des transports (tous modes confondus) au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions (note : 20 PJ ≈ 5,5 TWh)

## 5.4. Consommation des bioénergies

Les bioénergies sont produites essentiellement à partir de résidus forestiers au Québec (Figure 23); les résidus forestiers sont utilisés directement sous forme solide dans l'industrie des pâtes et papiers, pour divers usages industriels et pour le chauffage résidentiel (Figure 24). Présentement, les résidus forestiers, combinés au biogaz issu des sites d'enfouissement et au soya, canola, maïs, blé et autres résidus gras, suffisent à répondre à la demande en bioénergie de la province. L'atteinte des objectifs de réduction des GES pour 2030 favorise davantage l'utilisation des cultures agricoles (maïs, canola, etc.) pour la production de biocarburants de première génération comme l'éthanol et le biodiesel, ainsi que la valorisation du biogaz et l'utilisation directe des matières organiques municipales pour la digestion anaérobie contrôlée. Alors

que le potentiel d'exploitation des cultures agricoles pour la production de biocarburants de première génération atteint sa limite de disponibilité dès 2030 dans les scénarios de réduction les plus contraignants, un potentiel important réside dans la déviation des matières organiques municipales pour la production de gaz naturel renouvelable. Le plein potentiel est atteint en 2050 dans les scénarios les plus contraignants. La quantité de biomasse forestière utilisée dans l'industrie des pâtes et papiers diminue au profit de la production de bioénergies de deuxième génération comme l'éthanol cellulosique, le FT diesel ou le gaz naturel renouvelable. Les quantités augmentent graduellement avec les cibles de réduction des GES. Dans les scénarios les plus contraignants (GES4), les résidus agricoles et industriels sont aussi utilisés pour compléter la biomasse forestière. Un large éventail de matières premières est disponible et en compétition pour la production de diverses formes de bioénergies. Le plein potentiel de l'ensemble des matières premières est atteint en 2050 dans un scénario permettant d'atteindre une cible de réduction ambitieuse. Cependant, la vitesse de développement et d'exploitation de ces différentes sources dépendra d'un ensemble de facteurs affectant la demande pour la bioénergie. Dans le secteur des transports, du gaz naturel renouvelable (GNR) de première génération, du biodiesel et de l'éthanol sont consommés en priorité. Dans les scénarios qui exigent des réductions des émissions plus importantes, c'est le diesel Fischer-Tropsch (diesel FT) et l'éthanol cellulosique qui sont consommés, avant le GNR de seconde génération et ce, malgré la compétition réelle entre ces carburants alternatifs. Ceci s'explique par une combinaison de facteurs comme la quantité, le type et le coût des matières premières disponibles pour la production de carburants alternatifs.



\*Cultures dédiées : arbres à croissance rapide cultivés spécifiquement pour la production de biocarburants.

Figure 23. Utilisation par type de matières premières pour la production de bioénergie au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

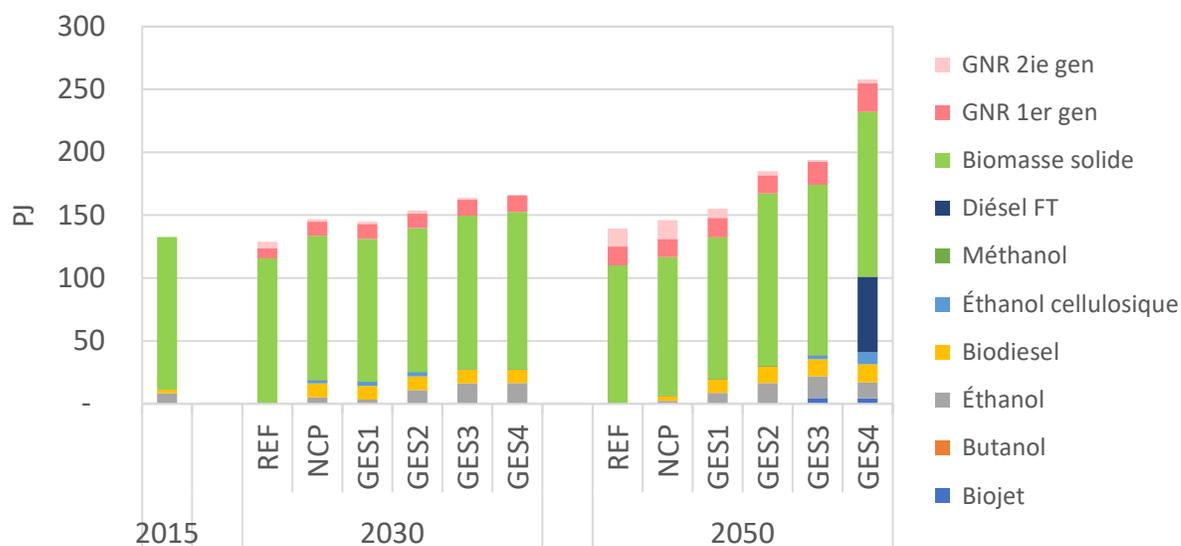


Figure 24. Consommation des divers types de bioénergies tous secteurs confondus au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

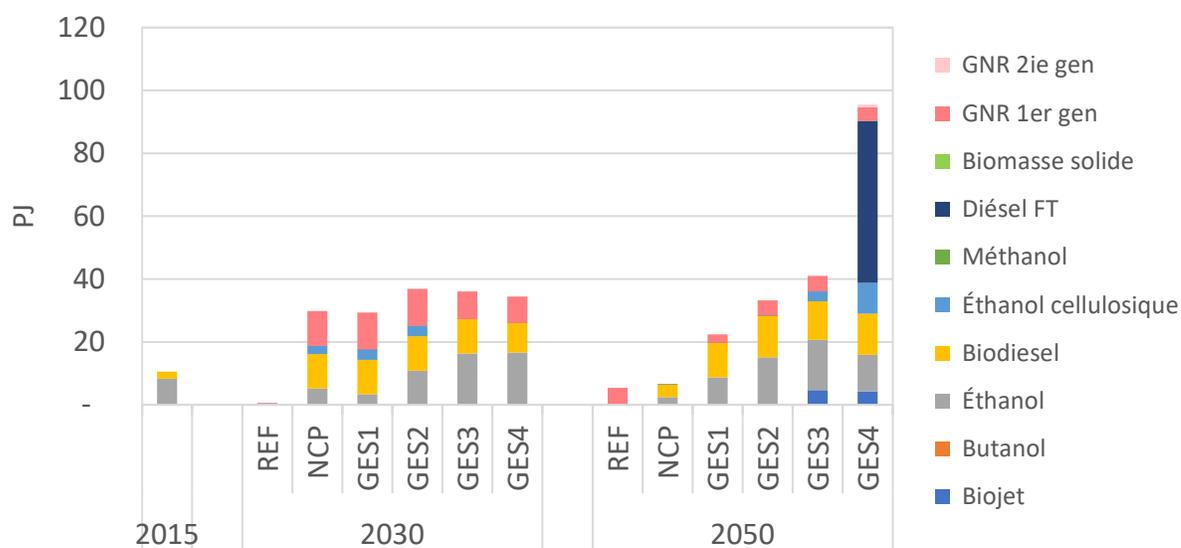


Figure 25. Consommation des divers types de bioénergies dans le secteur du transport au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

## 5.5. Part de marché des véhicules pour le transport de marchandises

Les Figures 26, 27 et 28 présentent les parts de marché par types de véhicules pour chacune des classes de camions (légers, moyens et lourds). Comme pour le transport des passagers, l'électrification se présente comme la solution dans le secteur des camions légers, à l'horizon 2050. Les véhicules hybrides commencent à trouver leur place à moyen terme (2030). Toujours à moyen terme, pour les camions moyens, ce sont les véhicules hybrides au diesel qui viennent remplacer les hybrides à essence du scénario de référence. Sur le long terme, des véhicules hybrides diesel branchables font leur apparition. Si la contrainte de réduction des émissions est très exigeante (GES4), l'électrification des camions moyens a une place plus importante, avec des camions moyens tout électriques. Quant aux camions lourds, la solution identifiée par le modèle pour

la réduction des émissions de GES se trouve dans les camions hybrides branchables (PHEV) au diesel, qui viennent remplacer les véhicules à combustion interne (ICE) au diesel sur le long terme. Sur le moyen terme, les véhicules roulant au gaz naturel ont aussi leur place, permettant de remplacer les véhicules à combustion interne les plus polluants plus rapidement. Dans le camionnage lourd, l'électrification se fait à travers les véhicules hybrides branchables (PHEV). Comme vu dans la Figure 25, sur le long terme, le diesel proviendrait du diesel FT ou du biodiesel, et le gaz naturel de GNR de première génération. Parmi les véhicules hybrides branchables, il est important de souligner que la compétition est serrée entre les hybrides branchables fonctionnant au diesel et ceux fonctionnant au gaz naturel. Les incertitudes se retrouvent tout le long de la chaîne de production : évolution des coûts d'achat et d'entretien des camions, évolution des efficacités des camions, évolution des coûts de production de ces deux biocarburants de génération plus avancées, coûts et disponibilité des matières premières pour leur production, coefficients du cycle de vie pour la norme sur les combustibles propres selon le mode de production et les matières premières utilisées. Les scénarios alternatifs démontrent que la tendance sur les camions lourds pourrait facilement être modifiée, et que certains paramètres sont sensibles et peuvent affecter la solution optimale.

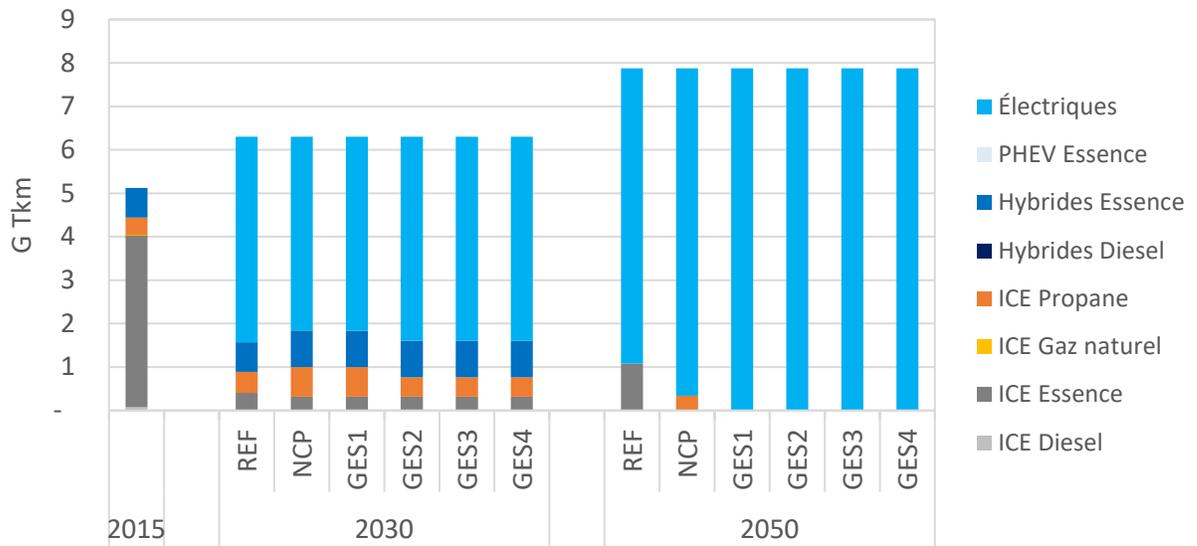


Figure 26. Parts de marchés des camions légers pour satisfaire la demande de transports des marchandises au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

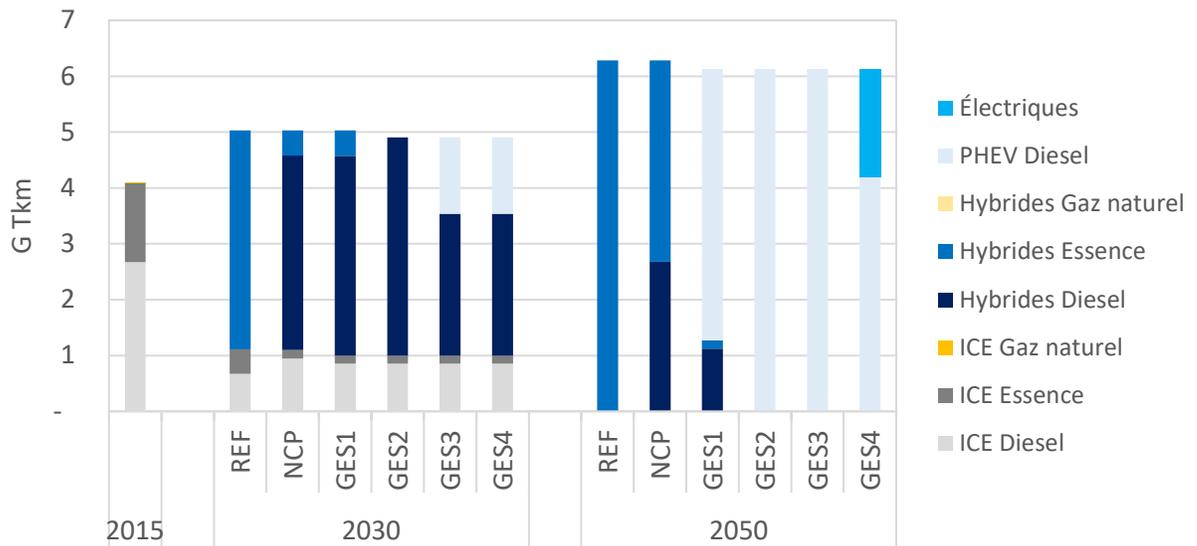


Figure 27. Parts de marchés des camions moyens pour satisfaire la demande de transports des marchandises au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

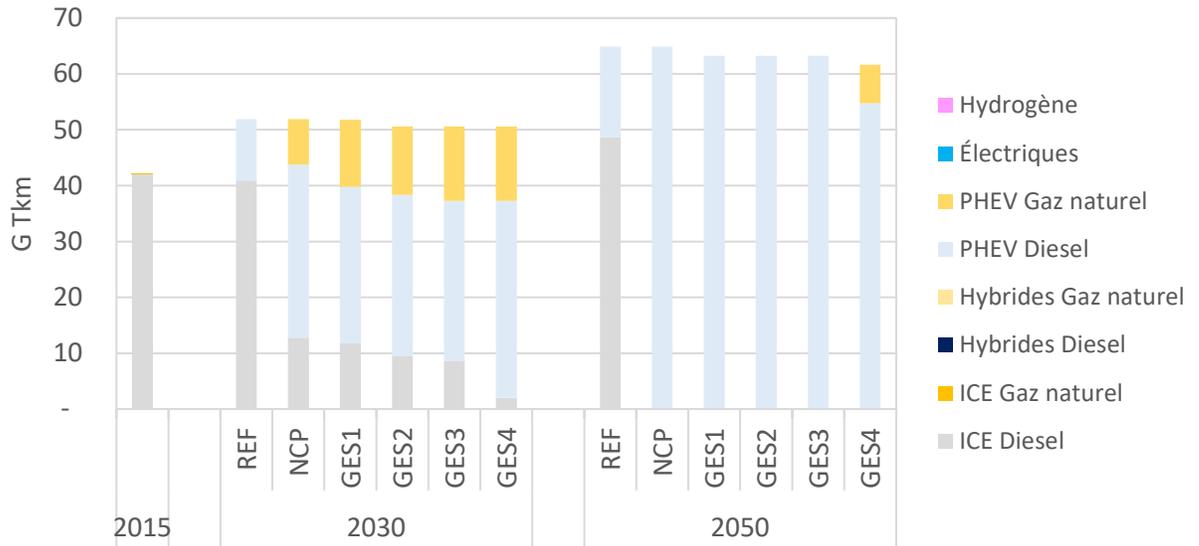


Figure 28. Parts de marchés des camions lourds pour satisfaire la demande de transports des marchandises au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction des émissions

## 6. Résultats des scénarios alternatifs

Les scénarios alternatifs se comparent tous avec le scénario GES4, étant basés sur les mêmes contraintes de réduction des GES.

### 6.1. Consommation d'énergie finale du secteur des transports

Première constatation, le retrait des taxes sur les carburants laisse plus de place au diesel et à l'essence et moins de place aux bioénergies et au gaz naturel sur le moyen comme sur le long terme (Figure 29b). Deuxièmement, le scénario d'électrification électrifie autant que possible les classes de camions de transport de marchandises. Cela implique que toute la demande qui était satisfaite avec des camions lourds de moteur de plus de 12 litres est maintenant satisfaite avec des camions lourds de moteur de moins de 12 litres (il n'existe pas à l'heure actuelle d'option tout électrique pour les camions lourds de plus de 12 litres). Ceci a pour conséquence d'augmenter la consommation d'énergie dans les transports à la hauteur de 60 PJ. Dernière constatation, les scénarios mettant plus en valeur le gaz naturel (soit en réestimant l'intensité carbone du gaz naturel renouvelable : GES4\_Inten, soit en diminuant le coût des camions lourds branchables au gaz naturel : GES\_Coût) permettent au gaz naturel renouvelable de prendre une part plus importante dans le transport des marchandises. La variation de critères, tels que le coût ou l'intensité carbone, font varier les résultats. La filière du gaz naturel renouvelable mériterait donc d'être étudiée plus en profondeur afin de limiter les sources d'incertitudes sur ces critères.

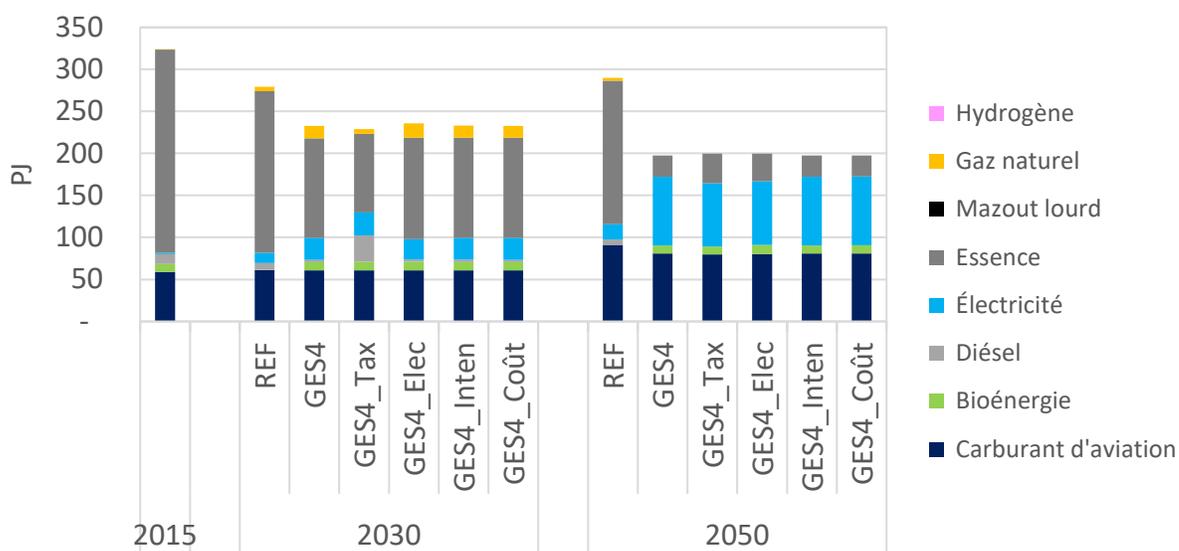


Figure 29a. Consommation d'énergie finale dans le secteur du transport des passagers (tous modes confondus) au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios alternatifs considérés

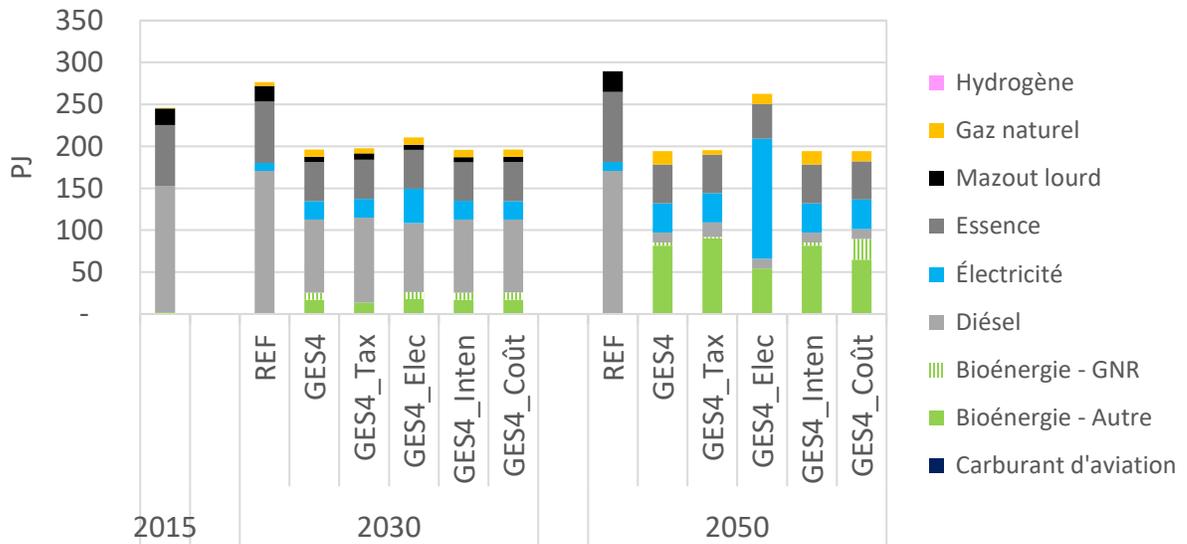


Figure 29b. Consommation d'énergie finale dans le secteur du transport des marchandises (tous modes confondus) au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios alternatifs considérés

## 6.2. Production et consommation d'électricité

Les trois scénarios GES4\_Tax, GES4\_Inten et GES4\_Coût n'augmentent que de 2 GW la capacité électrique requise pour répondre à la demande québécoise (Figure 30) et n'augmentent que de quelques PJ l'électricité consommée dans le secteur des transports (Figure 31). Le scénario GES4\_Elec, scénario d'électrification requiert une capacité électrique supérieure de 13 GW au scénario GES4, scénario qui lui-même requerrait une capacité électrique du réseau déjà énorme de 90 GW (le double de la capacité actuelle de 45 GW). Dans ce scénario, la consommation électrique du secteur des transports augmente en effet de 109 PJ (30 TWh) par rapport au scénario le plus exigeant sur la réduction des émissions, le scénario GES4.

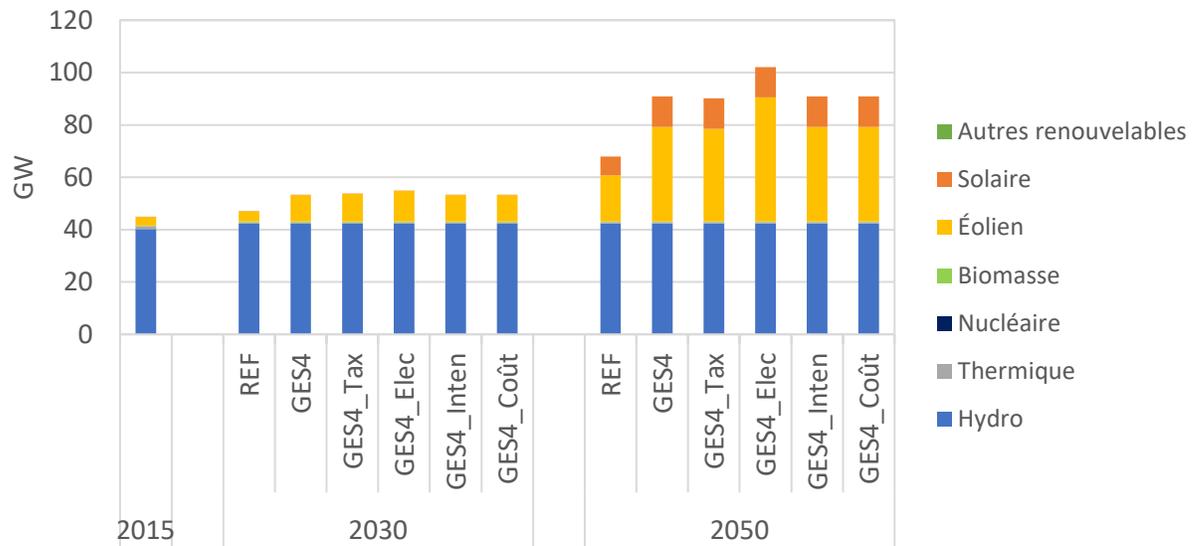


Figure 30. Capacité électrique installée au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios alternatifs considérés

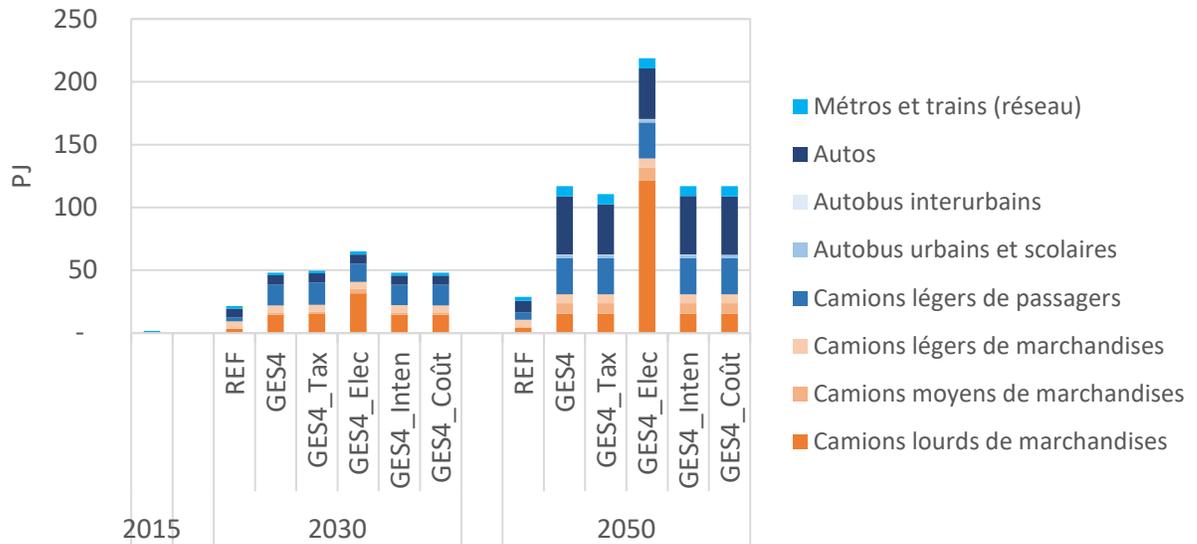


Figure 31. Consommation électrique du secteur des transports (tous modes confondus) au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios alternatifs considérés

### 6.3. Consommation des bioénergies

Les matières premières utilisées pour produire de la bioénergie restent sensiblement les mêmes dans les scénarios alternatifs que dans le scénario GES4. Cependant, la consommation de ces bioénergies évolue selon l’alternative envisagée (Figure 32). Si les taxes sont retirées des carburants essence et diesel, les bioénergies sont, à moyen comme à long terme, moins consommées. Dans les deux autres scénarios, plus de place étant laissée au gaz naturel, le potentiel du GNR de seconde génération se déploie.

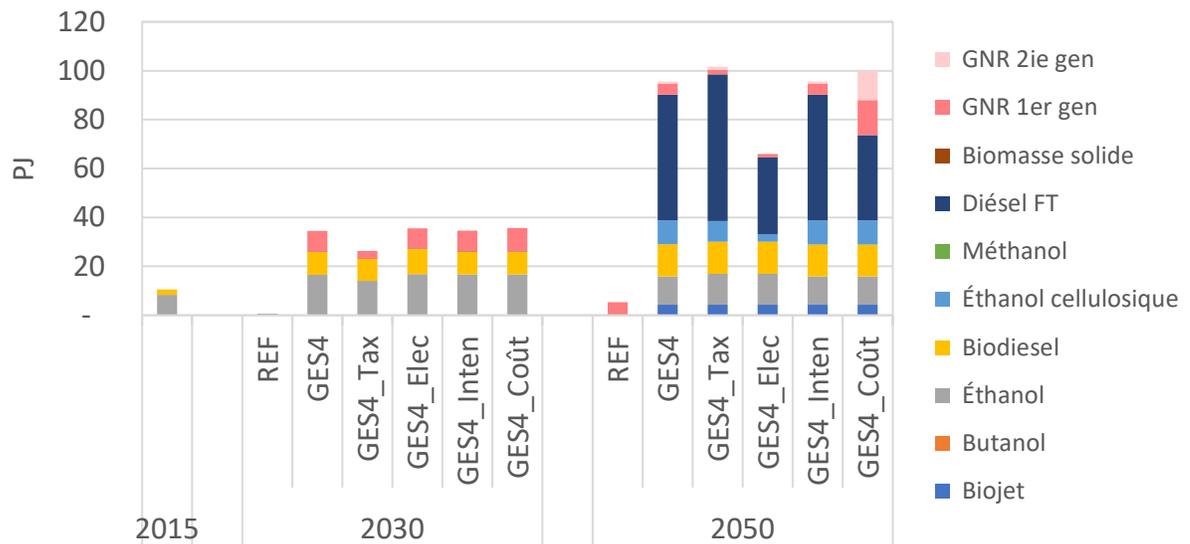


Figure 32. Consommation des divers types de bioénergies dans le secteur du transport au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios alternatifs considérés

## 6.4. Part de marché des véhicules pour le transport de marchandises

Les Figures 33, 34 et 35 présentent les parts de marché par types de véhicules pour chacune des classes de camions (légers, moyens et lourds). Pour les camions légers, c'est toujours l'électrification qui prédomine. Dans le scénario d'électrification, les camions moyens et les camions lourds sont électrifiés eux aussi. La demande pour les camions lourds à moteur de plus de 12 litres (classe 8b) étant transférée aux camions lourds à moteur de moins de 12 litres. En effet, l'option de camions tout électriques sur les camions lourds à moteur de plus de 12 litres n'existe pas encore et présente des défis techniques de poids et d'intensité de recharge qui demeureront significatifs même à l'horizon 2050. Le scénario dans lequel aucune taxe sur les carburants n'est appliquée retarde l'électrification du transport routier des marchandises, rend l'investissement plus rapide dans les hybrides branchables au diesel (PHEV) pour le secteur des camions moyens, et laisse moins de place au gaz naturel dans le secteur du camionnage lourd. Les deux autres scénarios sont instructifs d'un point de vue du camionnage lourd puisqu'ils permettent de constater que le gaz naturel (et le gaz naturel renouvelable) est en réelle compétition avec le diesel. Dans les scénarios GES4\_Inten et GES4\_Coût, les deux tiers de la demande du camionnage lourd est satisfaite par des hybrides branchables au gaz naturel sur le long terme. Ces scénarios amènent à réfléchir sur la place du gaz naturel. C'est pourquoi les cinq scénarios de réduction ont été refait en inversant la compétition entre le diesel et le gaz naturel dans le camionnage lourd (voir l'Annexe B pour tous les détails de ces scénarios). En réduisant l'écart de coût de seulement 10 % entre les hybrides branchables fonctionnant au gaz naturel et ceux au diesel, les résultats montrent une part du gaz naturel beaucoup plus importante et l'introduction des hybrides branchables au gaz naturel dans le camionnage lourd, remplaçant les hybrides branchables au diesel. Ces résultats sont présentés dans l'Annexe B de ce document. Cette hypothèse est d'autant plus crédible étant donné, qu'au-delà de l'enjeu des gaz à effet de serre, le resserrement des normes d'émissions sur les polluants atmosphériques, tels que les oxydes d'azote (NOx) et les particules fines (PM), pénalise les véhicules à moteur diesel par rapport à ceux utilisant du gaz naturel.

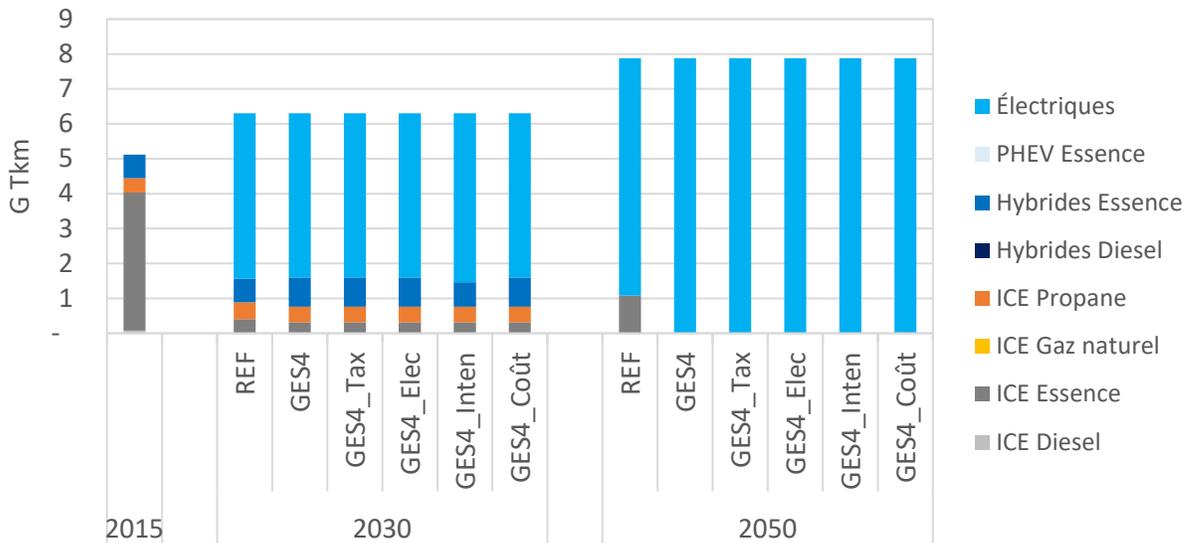


Figure 33. Parts de marchés des camions légers pour satisfaire la demande de transports des marchandises au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios alternatifs considérés

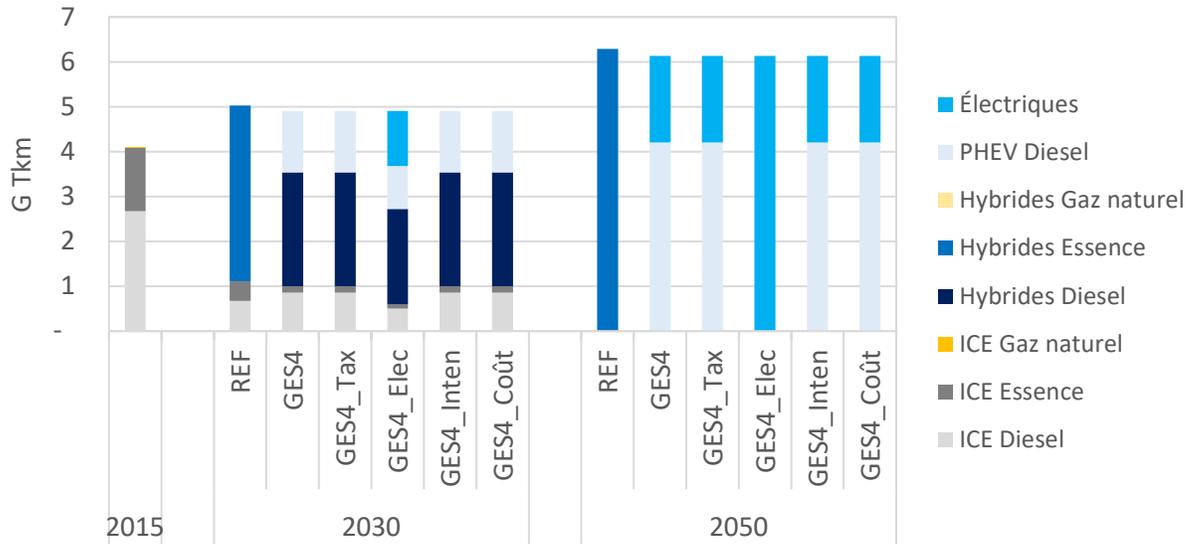


Figure 34. Parts de marchés des camions moyens pour satisfaire la demande de transports des marchandises au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios alternatifs considérés

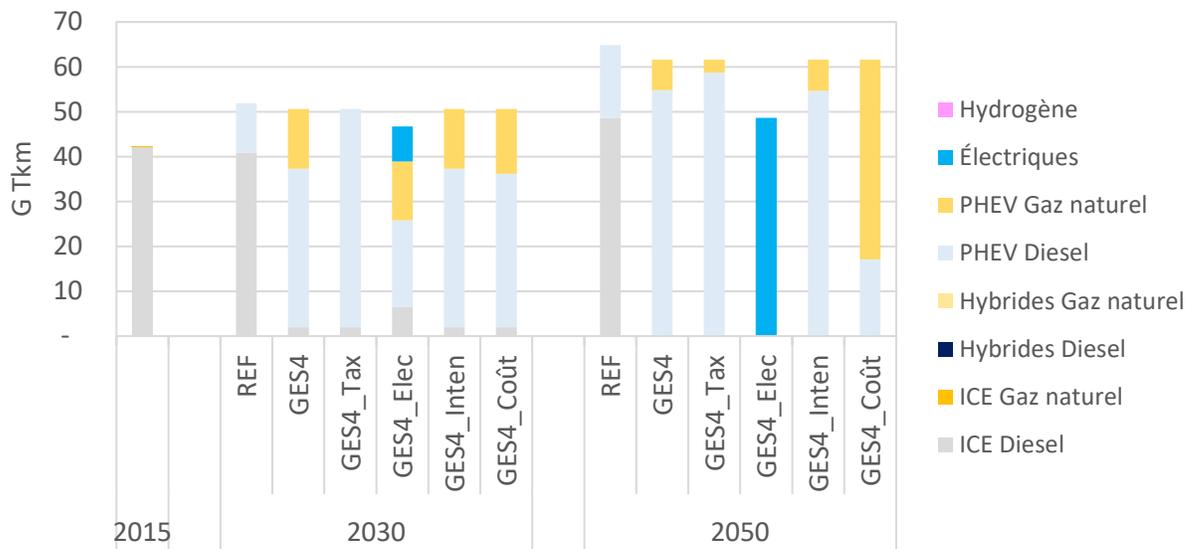


Figure 35. Parts de marchés des camions lourds pour satisfaire la demande de transports des marchandises au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios alternatifs considérés

## 7. Limites de l'étude

Cette étude se veut une analyse systématique de la décarbonisation au Québec, avec une emphase particulière sur le transport routier des marchandises, qui est le secteur qui a le plus augmenté ses émissions de GES au Québec entre 1990 et 2018. Bien que le plus grand soin ait été apporté pour élaborer des hypothèses et des scénarios réalistes et robustes, la modélisation effectuée comporte des limites. Nous les résumons ici.

- **Technologies étudiées** : il est impossible de connaître exactement quelles seront les technologies disponibles en 2030 et 2050, ainsi que leurs coûts et contraintes. Les résultats présentés n'incluent pas de possibles camions électriques de classe 8b, ni les camions alimentés à l'électricité par système de caténaire, dont la documentation et la modélisation dépassaient la portée de l'étude. Cela constitue une limite importante; des travaux sont en cours pour intégrer ces options par ailleurs.
- **Transfert modal** : la modélisation utilisée ne permet pas de transfert modal (par exemple des camions lourds au train), alors qu'à moyen et long terme cette option pourrait s'avérer intéressante. Si un tel transfert était réalisé, les conclusions de cette étude pourraient être très différentes.
- **Contraintes logistiques et opérationnelles** : le modèle NATEM inclus un très large éventail de technologies énergétiques et de secteurs de demande. C'est ce qui fait sa force, en permettant de d'analyser le système énergétique dans son ensemble. En contrepartie, plusieurs détails opérationnels, dans certains sous-secteurs, lui échappent. Ces détails peuvent parfois représenter des contraintes significatives qui ne sont pas inclus dans l'optimisation réalisée par le modèle. Les résultats présentés doivent donc être considérés comme des indications générales, davantage que comme des prescriptions précises.
- **Analyses de sensibilité** : bien qu'un effort ait été déployé pour inclure certaines analyses de sensibilité, celles-ci pourraient être plus approfondies. En particulier, toutes les incertitudes indiquées à la section 4 pourraient donner lieu à des analyses plus poussées et les sensibilités aux différents niveaux de coûts pourraient être davantage étudiées.
- **Impacts fiscaux de la baisse des ventes d'essence et de diesel** : le modèle NATEM analyse le système énergétique dans une perspective de minimisation des coûts totaux sur la base des caractéristiques des technologies considérées. Il ne considère pas les équilibres fiscaux liés aux revenus des taxes sur les carburants et des dépenses liées aux infrastructures de transports (coûts du réseau routier par exemple). Dans les scénarios de décarbonisation, la réduction de la vente de produits pétroliers entraînera inévitablement une réduction des revenus issus des taxes sur les carburants. Les solutions à ce déséquilibre fiscal ne font pas parties du périmètre d'analyse de l'étude.

## 8. Conclusion de l'étude

Cette étude compare différents scénarios de décarbonisation au Québec avec une attention particulière sur le secteur du transport routier des marchandises. Les scénarios couvrent différents degrés de décarbonisation (de 25 % à 100 %, ou presque, d'atteinte des cibles) ainsi que des scénarios alternatifs, notamment un où l'électrification des camions de marchandises est forcée.

Il se dégage des résultats que l'atteinte des cibles est possible, grâce à une réduction globale de la demande énergétique (malgré une hausse des services énergétiques obtenus) et à l'électrification d'un grand nombre de procédés. Une hausse substantielle de la capacité de production d'électricité est nécessaire pour

satisfaire la consommation d'électricité supplémentaire. L'énergie éolienne, et en plus faible proportion le solaire, viennent répondre à cette demande additionnelle. Dans le secteur du transport des marchandises, l'électrification se fait naturellement (sans contrainte explicite dans le modèle) et complètement pour les camions légers, mais uniquement partiellement pour les camions moyens. Les technologies hybrides rechargeables, au diesel ou gaz naturel restent présentes pour les camions moyens et complètement pour les camions lourds. Ce diesel et ce gaz naturel, cependant, sont essentiellement de sources renouvelables – grâce aux bioénergies qui permettent de les produire. À noter également que la filière de l'hydrogène n'apparaît pas pour l'instant dans les résultats. Avec les données actuellement disponibles, les technologies de transport à l'hydrogène ne se présentent pas comme des solutions envisageables (que ce soit au niveau du coût de l'énergie ou du coût des technologies qui l'utilisent). L'hydrogène reste une question en suspens dans le secteur des transports, et l'essor dont bénéficiera - ou non - cette technologie sera déterminée par l'orientation du marché.

Lorsque l'électrification est forcée dans le transport routier des marchandises (scénario GES4\_Elec), la demande en électricité augmente de manière importante par rapport au scénario de décarbonisation sans cette contrainte : environ 30 TWh d'énergie et 13 GW de capacité supplémentaires sont nécessaires. Si cela permet d'éviter une production de diesel ou de gaz naturel renouvelable à partir de résidus forestiers, il est permis de se questionner sur la pertinence de vouloir électrifier ce segment du transport. En effet, les impacts sur le système électrique seront déjà énormes. Diversifier les solutions et les approches apparaît, dans les résultats de cette analyse, comme étant moins coûteux sur le plan financier : on limite le coût de la décarbonisation à +8,9 % par rapport au scénario de référence, contre +19,5 % en forçant l'électrification. Cela permettrait aussi d'exploiter différentes technologies et de bénéficier d'une diversité énergétique qui peut être intéressante en certaines circonstances<sup>3</sup>. Ne plus considérer une solution unique pour la transition énergétique, mais se donner la chance d'ouvrir sur un panel de solutions permettrait d'apporter de la résilience au système énergétique. C'est le marché qui décidera du tournant que va prendre le transport des marchandises et dans ce contexte, être capables de fournir plusieurs alternatives est important.

Cette étude ne prétend pas apporter de conclusion finale sur le sujet. Plusieurs analyses supplémentaires devraient être menées, notamment des études plus détaillées sur les impacts de la recharge de véhicules électriques de promenade et de marchandises sur le réseau. Beaucoup d'inconnues restent encore présentes sur les habitudes de recharge, sur les contraintes logistiques que la recharge imposerait sur les véhicules de marchandise ainsi que sur les infrastructures nécessaires pour ces recharges au niveau du réseau de distribution. D'autres technologies pourraient aussi jouer un rôle, comme les camions électriques à caténaire. Enfin, les transferts modaux dans le transport de marchandises (vers le rail ou les bateaux) devraient aussi être explorés. Ces modes de transport étant beaucoup moins énergivores, ils pourraient contribuer à réduire grandement les besoins énergétiques dans le secteur du transport.

---

<sup>3</sup> Par exemple, en période d'événements extrêmes, comme celui de la crise du verglas de 1998, une flotte de véhicules entièrement électriques n'aurait pas simplifié le retour à la normale.

## Références

- Astudillo, M. F., Vaillancourt, K., Pineau, P.-O., & Amor, B. (2017). Can the household sector reduce global warming mitigation costs? sensitivity to key parameters in a TIMES techno-economic energy model. *Applied Energy*, 205, 486–498. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.130>
- Environnement et Changement climatique Canada. (2019). *Norme sur les combustibles propres - approche réglementaire proposée*. Retrieved from <https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/climate-change/pricing-pollution/Clean Fuel Standard - Proposed Regulatory Approach June 2019 FR.pdf>
- Gargiulo, M., Vaillancourt, K., & De Miglio, R. (2016). *Documentation for the TIMES Model - Part IV*. Retrieved from <http://iea-etsap.org/index.php/documentation>
- Gouvernement du Canada. (n.d.). Règlement sur les carburants renouvelables. Retrieved May 29, 2020, from <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/gestion-pollution/production-energie/reglement-carburants/renouvelables.html>
- Gouvernement du Québec. (2012). *Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques*. Retrieved from [http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/plan\\_action/pacc2020.pdf](http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/plan_action/pacc2020.pdf)
- Ministère des Transports du Québec. (2015). Propulser le Québec par l'électricité - Plan d'action d'électrification des transports 2015-2020. Retrieved February 16, 2018, from [http://transportselectriques.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/CIAO-050-LG2-MTQ-Rapport2016FRv2.1\\_.pdf](http://transportselectriques.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/CIAO-050-LG2-MTQ-Rapport2016FRv2.1_.pdf)
- R-6.01, r. 4.3 - Règlement concernant la quantité de gaz naturel renouvelable devant être livrée par un distributeur. (n.d.). Retrieved July 23, 2020, from <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/R-6.01, r. 4.3>
- U.S. Department of Energy. (n.d.). Alternative Fuels Data Center: Maps and Data - Vehicle Weight Classes & Categories. Retrieved July 1, 2020, from <https://afdc.energy.gov/data/10380>
- Vaillancourt, K., Bahn, O., Roy, P.-O., & Patreau, V. (2018). Is there a future for new hydrocarbon projects in a decarbonizing energy system? A case study for Quebec (Canada). *Applied Energy*, 218, 114–130. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.02.171>

## Annexe A : Hypothèses détaillées

Tableau A.1. Désagrégation du secteur du transport routier des marchandises dans NATEM pour la province du Québec

Secteur	Classe de véhicule	Demande 2011 (Mt.Km)	Demande 2050 (Mt.Km)
Camions légers	1-3	4 822	7 876
Camions moyens	4-6	3 849	6 286
Camions lourds < 12 L*	7, 8a	13 902	26 633
Camions lourds > 12 L*	8b	25 817	49 461

\*La demande pour le camionnage lourd est décomposée selon l'hypothèse suivante : 35 % de camions lourds ont un moteur inférieur à 12 litres et 65 % ont un moteur supérieur à 12 litres.

Tableau A.2. Contraintes maximales (%) sur l'utilisation des différents types de bornes de recharge pour le transport de passagers

Secteur	Bornes de recharge résidentielles	Bornes de recharge au travail	Bornes de recharge rapides
Voitures	30 %	70 %	50 %

Tableau A.3. Contraintes maximales (%) sur l'utilisation des différents types de bornes de recharge pour le transport de marchandises

Secteur	Borne de recharge lente	Borne de recharge rapide
Camions légers	60 %	60 %
Camions moyens	70 %	50 %
Camions lourds	70 %	50 %

Tableau A.5. Coûts et efficacités des camions légers au Québec

Technologie	Année	Efficacité (GJ/100km)			Coût inv. (\$)	Coûts OM (\$/km)
		Fuel	Élect.	H2		
Propane	2020	0,404			41 000	0,15
	2030	0,298				
	2050	0,244				
Essence (10 % éthanol, maïs)	2020	0,337			44 000	0,15
	2030	0,248				
	2050	0,203				
Diesel (5 % biodiesel, Canola)	2020	0,281			52 000	0,16
	2030	0,207				
	2050	0,169				
Gaz naturel	2020	0,337			65 000	0,16
	2030	0,248				
	2050	0,203				
Hybride essence-électrique (10 % éthanol) 20 km	2020	0,197			53 000	0,14
	2030	0,145				
	2050	0,119				
Hybride électrique-diesel (5 % biodiesel) 20 km	2020	0,183			61 000	0,15
	2030	0,135				
	2050	0,110				
Batterie Li20 150 km	2020		0,078		49 000	0,13
	2030		0,058			
	2050		0,047			
Batterie Li20 300 km	2020		0,078		73 580	0,13
	2030		0,058			
	2050		0,047			
Batterie Li20 450 km	2020		0,078		88 900	0,13
	2030		0,058			
	2050		0,047			

Plug in vehicle (éthanol E10) Li16 50 km	2020	0,129	0,032		60 500	0,13
	2030	0,095	0,023			
	2050	0,078	0,019			

Tableau A.6. Coûts et efficacités des camions moyens au Québec

Technologie	Année	Efficacité (GJ/100km)			Coût inv. (\$)	Coûts OM (\$/km)
		Fuel	Élect.	H2		
Essence (10 % éthanol, maïs)	2020	1,072			65 000	0,19
	2030	0,867				
	2050	0,801				
Diesel (5 % biodiesel, canola)	2020	0,932			62 000	0,19
	2030	0,754				
	2050	0,696				
Gaz naturel	2020	1,060			85 000	0,21
	2030	0,754				
	2050	0,696				
Hybride essence-électrique (10 % éthanol)	2020	0,750			69 000	0,19
	2030	0,607				
	2050	0,560				
Hybride diesel-électrique (D95, canola)	2020	0,615			80 000	0,19
	2030	0,497				
	2050	0,459				
Hybride GN-électrique	2020	0,587			85 000	0,21
	2030	0,475				
	2050	0,439				
Batterie Li 20 175 km	2020		0,260		123 900	0,14
	2030		0,211			
	2050		0,194			
Plugin vehicle Li20 (D95) 50 km	2020	0,466	0,099		96 890	0,14
	2030	0,377	0,079			
	2050	0,348	0,073			

Tableau A.7. Coûts et efficacités des camions lourds de moteur de moins de 12 litres au Québec

Technologie	Année	Efficacité (GJ/100km)			Coût inv. (\$)	Coûts OM (\$/km)
		Fuel	Élect.	H2		
Diesel (5% biodiesel, canola)	2020	1,295			182 000	0,22
	2030	1,005				
	2050	0,847				
Hybride biodiesel-électrique (D95, canola) 50 km branchable	2020	0,622	0,505		228 000	0,20
	2030	0,382	0,467			
	2050	0,305	0,407			
Gaz naturel	2020	1,451			252 000	0,23
	2030	1,025				
	2050	0,847				
Hybride (GN-électrique) 50 km branchable	2020	0,777	0,435		286 000	0,20
	2030	0,502	0,384			
	2050	0,407	0,330			
Batterie Li25 500 km	2020		0,362		450 000	0,19
	2030		0,281			
	2050		0,237			
Hydrogène (électrolyse)	2020			0,645	450 000	0,20
	2030			0,490		
	2050			0,404		
Hydrogène (SMR - GN)	2020			0,648	450 000	0,20
	2030			0,490		
	2050			0,404		

Tableau A.8. Coûts et efficacités des camions lourds de moteur de plus de 12 litres au Québec.

Technologie	Année	Efficacité (GJ/100km)			Coût inv. (\$)	Coûts OM (\$/km)
		Fuel	Élect.	H2		
Diesel (5 % biodiesel, canola)	2020	1,993			235 000	0,22
	2030	1,546				
	2050	1,304				
Gaz naturel	2020	2,232			354 000	0,23
	2030	1,577				
	2050	1,304				
Hybride électrique en série prolongateur diesel (30 % elect. – 70 % diesel) branchable	2020	1,395	0,448		369 000	0,20
	2030	1,082	0,348			
	2050	0,913	0,293			
Hybride électrique en série prolongateur GN (30 % elect. – 70 % GN) branchable	2020	1,634	0,269		488 000	0,20
	2030	1,113	0,325			
	2050	0,913	0,293			
Hydrogène (électrolyse)	2020			0,996	550 000	0,20
	2030			0,754		
	2050			0,621		
Hydrogène (SMR - GN)	2020			0,996	550 000	0,20
	2030			0,754		
	2050			0,621		

## Annexe B : Autres scénarios de réduction (meilleure compétitivité du gaz naturel et du gaz naturel renouvelable)

Le scénario de référence et les cinq autres scénarios de réduction des émissions de GES ont été repris en diminuant les coûts d'investissement des camions lourds plus de 12 litres hybrides branchables au gaz naturel de 10 % en 2030 par rapport à 2020 et d'un autre 10 % entre 2030 et 2050.

Tableau B.1. Scénarios alternatifs de réduction des émissions de GES

Scénarios	Description
REF_Coût	Cours normal des affaires
NCP_Coût	Cours normal des affaires incluant la norme sur les combustibles propres et le règlement sur la quantité minimale de gaz naturel renouvelable devant être livrée par un distributeur
GES1_Coût	Le Canada et le Québec atteignent 25 % de leurs cibles sur le territoire
GES2_Coût	Le Canada et le Québec atteignent 50 % de leurs cibles sur le territoire
GES3_Coût	Le Canada et le Québec atteignent 75 % de leurs cibles sur le territoire
GES4_Coût	Le Canada et le Québec atteignent 100 % de leurs cibles de 2030 et 90 % de leurs cibles de 2050 (due à des contraintes de faisabilité) sur le territoire

Note : Les scénarios de GES incluent la norme sur les combustibles propres et le règlement sur la quantité minimale de gaz naturel renouvelable devant être livrée par un distributeur.

Note 2 : Les scénarios incluent une baisse des coûts d'investissement des camions lourds plus de 12 litres PHEV au gaz naturel de 10 % en 2030, par rapport à 2020, et un autre 10 %, entre 2030 et 2050.

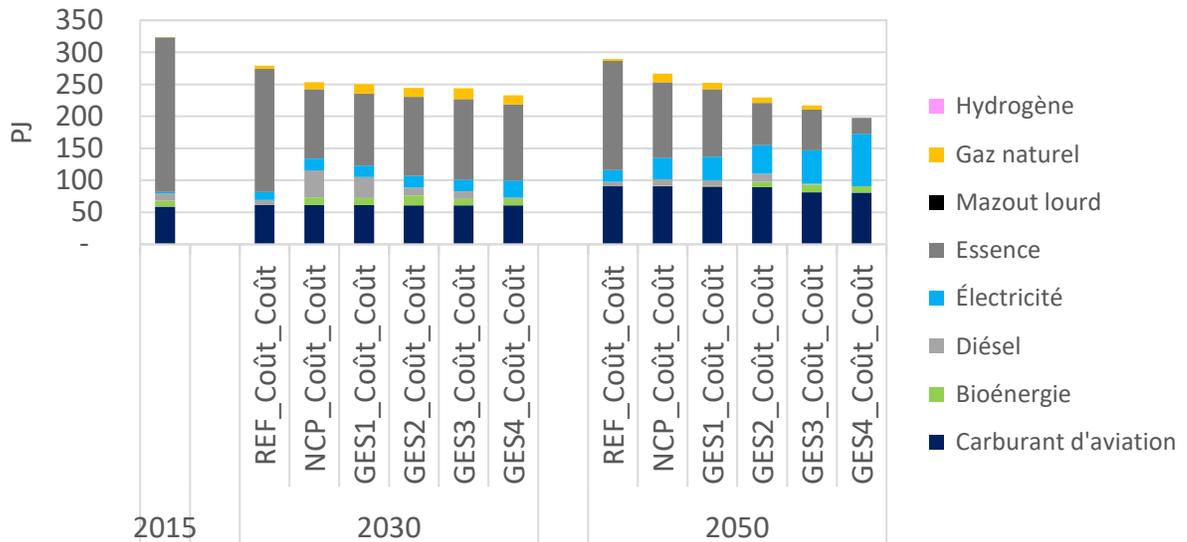


Figure B.1a. Consommation d'énergie finale dans le secteur du transport des passagers (tous modes confondus) au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction alternatifs considérés

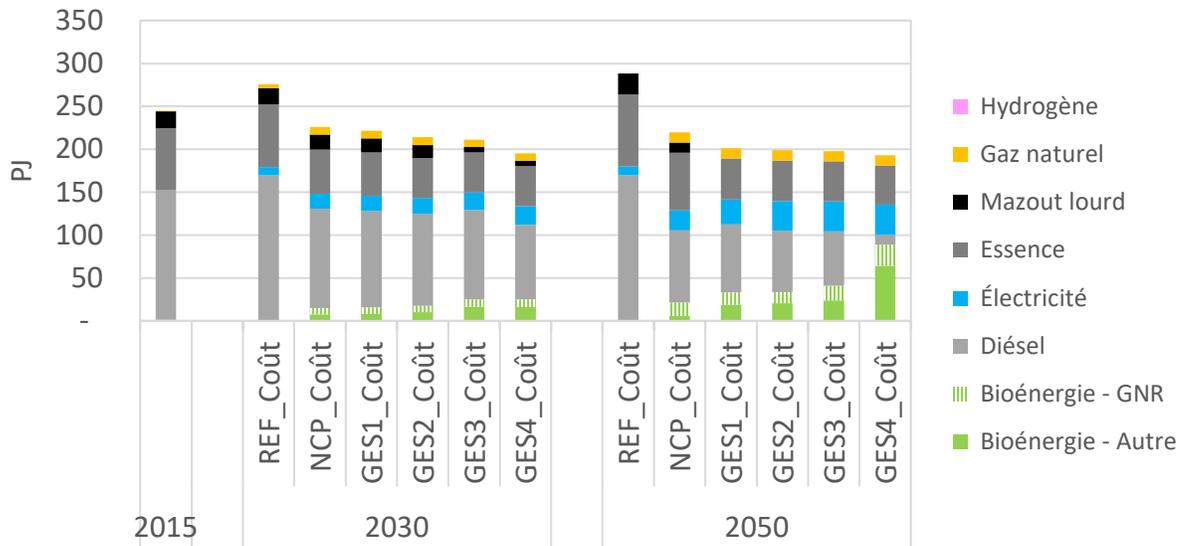


Figure B.1b. Consommation d'énergie finale dans le secteur du transport des marchandises (tous modes confondus) au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction alternatifs considérés

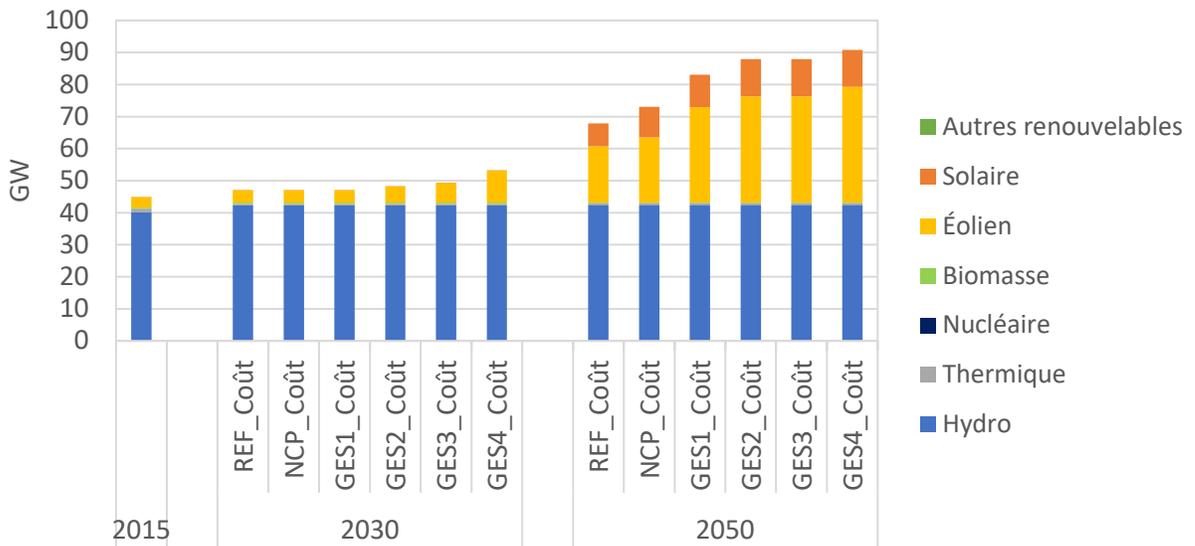


Figure B.2. Capacité électrique installée au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction alternatifs considérés

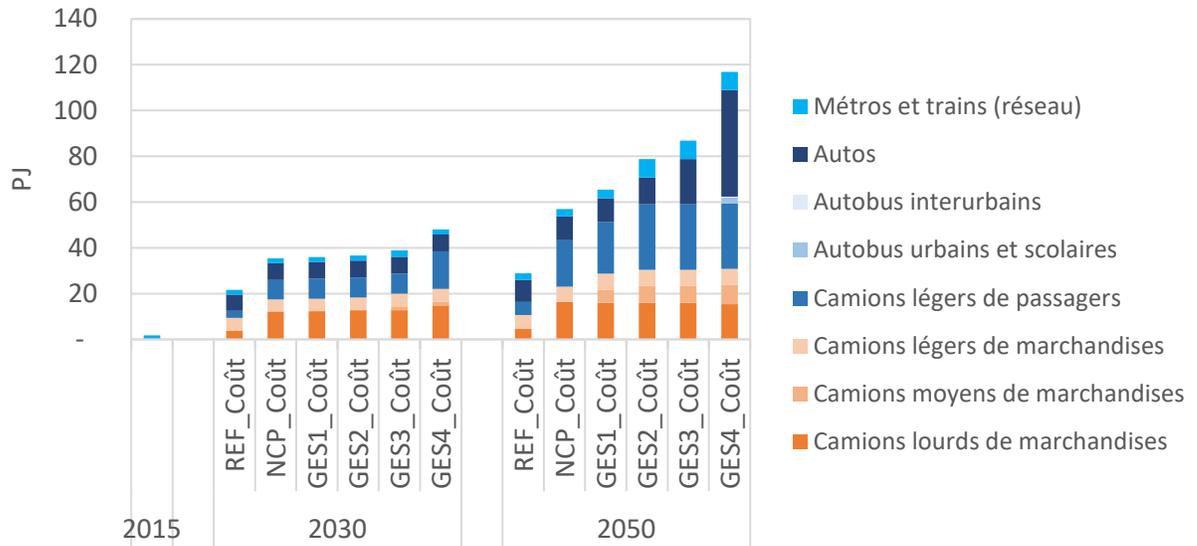


Figure B.3. Consommation électrique du secteur des transports (tous modes confondus) au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction alternatifs considérés

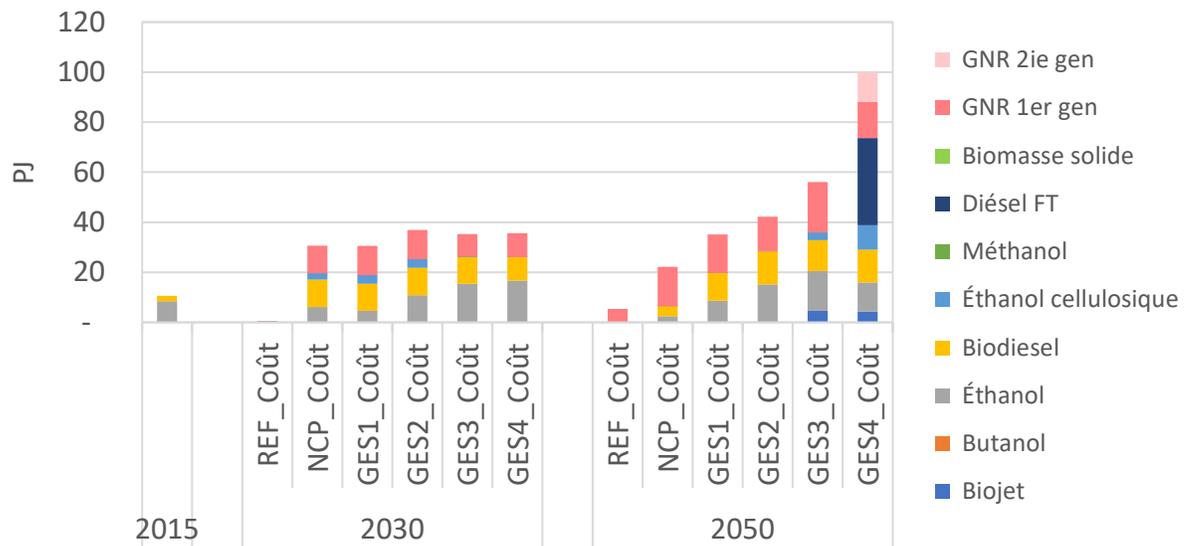


Figure B.4. Consommation des divers types de bioénergies dans le secteur du transport au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction alternatifs considérés

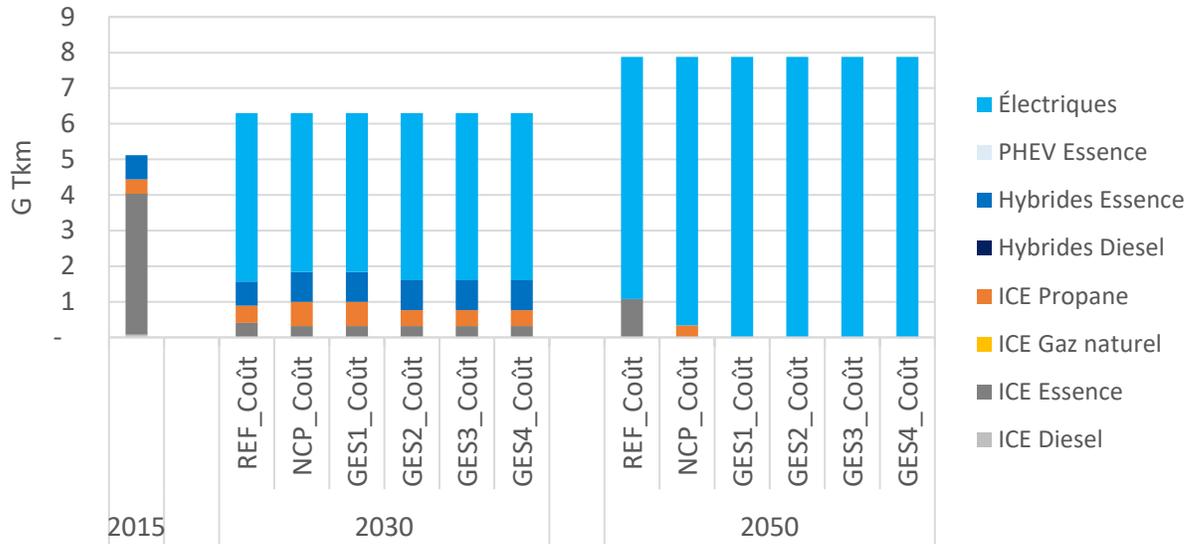


Figure B.5. Parts de marchés des camions légers pour satisfaire la demande de transports des marchandises, au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction alternatifs considérés

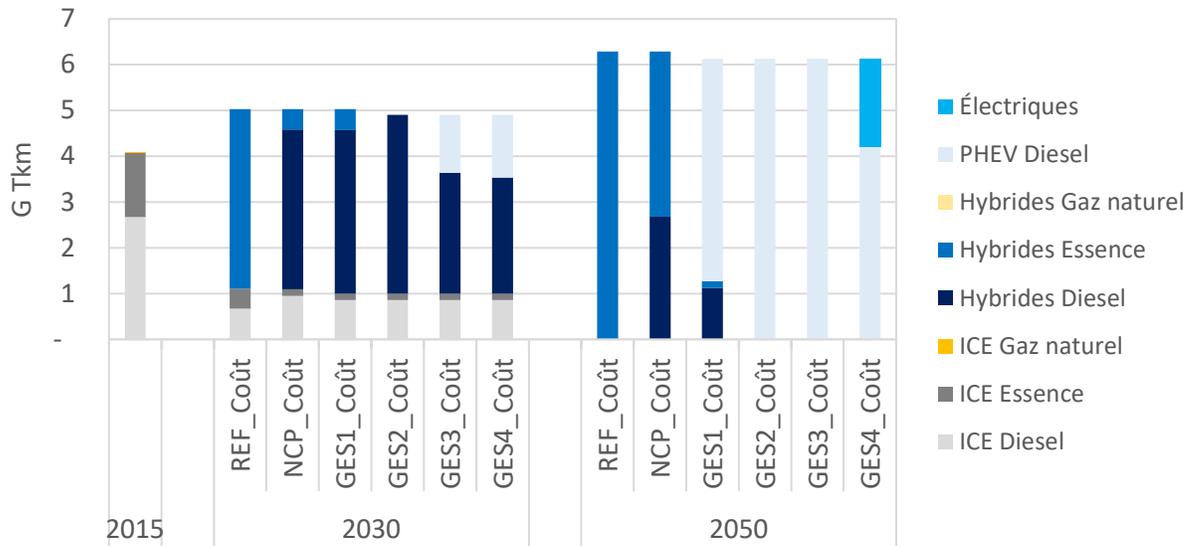


Figure B.6. Parts de marchés des camions moyens pour satisfaire la demande de transports des marchandises, au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction alternatifs considérés

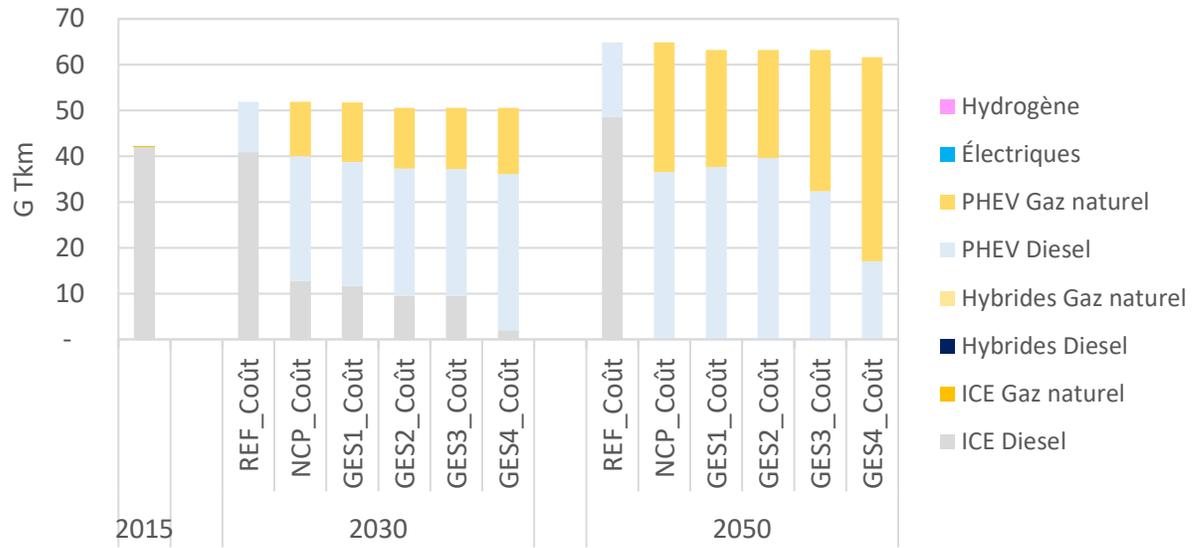


Figure B.7. Parts de marchés des camions lourds pour satisfaire la demande de transports des marchandises, au Québec en 2015, 2030 et 2050 selon les scénarios de réduction alternatifs considérés