

Rapport final

**TRAJECTOIRES DE RÉDUCTION D'ÉMISSIONS
DE GES DU QUÉBEC – HORIZONS 2030 ET 2050
(Mise à jour 2021)**

Préparé pour :
**MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE
CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

Juin 2021

Trajectoires de réduction d'émissions de GES du Québec – Horizons 2030 et 2050 (Mise à jour 2021)

Préparé pour

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques



www.environnement.gouv.qc.ca

Ce projet a bénéficié d'une aide financière du gouvernement du Québec et répond aux objectifs du Plan pour une économie verte 2030.

Préparé par



www.dunsky.com

Avec le soutien de ESMIA Consultants, responsable de la modélisation au moyen du modèle NATEM.



www.esmia.ca

Photo de couverture: « Château Frontenac, Québec » par Simon Desmarais (<https://www.flickr.com/photos/simonippon/3095102826/>), *Creative Commons license*.

À propos de Dunsky

en chiffres

17 ans

40 professionnels dévoués

500+ projets dans 30 provinces et états

Dunsky a pour mission d'aider ses clients à accélérer la transition énergétique, de façon efficace et responsable. À cet effet, nous offrons des services analytiques et stratégiques centrés sur les bâtiments (efficaces), les énergies (renouvelables) et la mobilité (durable).

Basée au Québec, Dunsky appuie une clientèle nord-américaine, composée de gouvernements, distributeurs d'énergie, firmes privées et associations, par le biais de trois services clés : nous **quantifions les opportunités** (techniques, économiques, commerciales); nous **concevons les stratégies** (programmes, politiques, mise en marché) et nous en **évaluons la performance** (dans une perspective d'amélioration continue).

Survol

Expertise

Bâtiments **Énergies** **Mobilité**

Services

QUANTIFIER le potentiel
CONCEVOIR les stratégies
ÉVALUER la performance

Clients

SERVICES PUBLICS
GOVERNEMENTS
PRIVÉ + OBNI

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE.....	I
LA MÉTHODOLOGIE EN BREF	III
RÉSULTATS DE L'ANALYSE.....	IV
IMPLICATIONS POUR LE QUÉBEC	XIII
RISQUES ET INCERTITUDES	XVI
PERSPECTIVES POUR LE QUÉBEC.....	XVII
INTRODUCTION	1
CONTEXTE.....	1
REMERCIEMENTS	1
MÉTHODOLOGIE	2
DESCRIPTION DU MODÈLE NATEM.....	2
SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE	4
TRAJECTOIRES DE RÉDUCTION.....	5
PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET ANALYSES.....	7
TRAJECTOIRES GLOBALES ET SECTORIELLES.....	7
TRAJECTOIRES GLOBALES	7
TRAJECTOIRES SECTORIELLES – SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE (PRIX DU CARBONE MAXIMUM)	8
TRAJECTOIRES SECTORIELLES – TRAJECTOIRE C.....	9
SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET ANALYSE DES MESURES DE RÉDUCTION.....	10
ANALYSE ÉNERGÉTIQUE ET TECHNOLOGIQUE	12
ANALYSE ÉNERGÉTIQUE.....	12
BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS, COMMERCIAUX ET INSTITUTIONNELS.....	21
SECTEUR INDUSTRIEL	23
TRANSPORTS.....	25
SECTEURS NON ÉNERGÉTIQUES (DÉCHETS, AGRICOLE)	29
PRIORISATION DES MESURES ET IMPACTS POUR LE QUÉBEC.....	32
PRIORISATION DES MESURES	32
ATTEINTE DE LA CARBONEUTRALITÉ	34
AXES DE RECHERCHE	37
CONCLUSION	39

RAPPEL DES PRINCIPAUX RÉSULTATS	39
PERSPECTIVES POUR LE QUÉBEC	40
ANNEXE 1 – MÉTHODOLOGIE DÉTAILLÉE	42
TRAJECTOIRE B – RÉDUCTION DES DEMANDES	42
MOBILITÉ DURABLE / AMÉNAGEMENT URBAIN (1).....	42
TISSU INDUSTRIEL (2)	43
AJUSTEMENT DU SYSTÈME ALIMENTAIRE (3).....	44
AUTRES PRÉCISIONS MÉTHODOLOGIQUES	45
CAPTAGE ET SÉQUESTRATION DU CARBONE	45
DEMANDES UTILES ET ÉLASTICITÉS-PRIX	46
VISION PARFAITE DU FUTUR ET ADOPTION DES MESURES.....	46
ÉMISSIONS CONSIDÉRÉES PAR LE MODÈLE	47
CONCURRENCE INTERNATIONALE	47
ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES	48
ANNEXE 2 – PRIORISATION DES MESURES	49

Bioénergie avec captage et séquestration de carbone (BECS)

Combinaison d'une bioénergie (p. ex., biomasse résiduelle) et d'une technologie de **captage et séquestration du carbone (CSC)**. Le carbone absorbé par les arbres et cultures au moment de leur croissance est capté lors de la combustion de la bioénergie et séquestré, ce qui permet de générer des émissions négatives (réduction nette des concentrations de **GES** dans l'atmosphère).

Capacité de base fiable

La capacité d'un système de production d'électricité à répondre à une charge durant un intervalle de temps et une période précise. La **capacité de base fiable** permet de s'assurer que le réseau électrique sera en mesure de répondre à la demande, même durant les conditions les plus défavorables.

Captage atmosphérique direct (CAD)

Procédé permettant le captage direct du CO₂ dans l'air ambiant, généralement au moyen d'un solvant. Le CO₂ peut ensuite être valorisé, ou encore compressé et acheminé vers un site de séquestration. Comme le CO₂ est très dilué (environ 0,04 % du gaz atmosphérique), ce procédé requiert des quantités très importantes d'énergie. Cependant, le **CAD** permet aussi de générer des **émissions négatives** (en supposant que le CO₂ n'est pas émis à nouveau, par exemple à la suite de sa valorisation pour produire des carburants).

Carboneutralité

La **carboneutralité** se définit comme un bilan d'émission de **GES** équilibré, c'est-à-dire sans effet net sur le climat. On parle aussi d'émissions de **GES** nettes égales à zéro.

Pour devenir **carboneutre**, un État doit d'abord réduire ses émissions de **GES**. Il lui faut ensuite contrebalancer les émissions résiduelles en retirant des **GES** de l'atmosphère pour les séquestrer (autrement dit, en produisant des **émissions négatives**) et/ou en se faisant créditer des réductions d'émission ou des **émissions négatives** générées à l'étranger.

Captage et séquestration du carbone (CSC)

Technologies permettant de capter les émissions de **GES** (généralement de grands émetteurs), de les transporter puis de les séquestrer à long terme, normalement dans des formations géologiques.

« Corporate Average Fuel Economy » (CAFE)

Règlementation visant à améliorer l'efficacité énergétique moyenne des automobiles et camions légers vendus aux États-Unis.

Coût marginal

Coût de la dernière **tonne de CO₂ équivalent** réduite ($\$/\text{tCO}_2\text{éq}$), dans un scénario donné. Comme le modèle optimise en fonction des coûts et choisit d'abord les options les moins coûteuses, le **coût marginal** est le coût par **tCO₂éq** le plus élevé parmi les réductions de **GES** retenues.

Coût moyen

Coût d'une tonne de **GES** réduite obtenu en divisant les **coûts totaux** par le nombre de tonnes de **GES** réduites (\$/tCO₂éq).

Coûts totaux

Somme de tous les coûts d'un scénario qui sont requis pour l'ensemble des réductions d'émissions de **GES**. Ils incluent les coûts de capital et les coûts d'opération des technologies visées. Ils excluent cependant les coûts administratifs des mesures incitatives, les coûts de sensibilisation et ceux d'autres mesures préparatoires nécessaires à l'adoption de ces technologies.

Émissions négatives

Les **émissions négatives** correspondent à des retraits de **GES** de l'atmosphère, puis à leur séquestration. Les **émissions négatives** peuvent être produites tant par des solutions climatiques naturelles, comme le boisement, que par des moyens technologiques, comme la **bioénergie avec captage et séquestration de carbone** ou le **captage atmosphérique direct**.

Gaz à effet de serre (GES)

Substances gazeuses présentes dans l'atmosphère et qui contribuent à retenir la chaleur près de la surface de la Terre. L'augmentation des concentrations de **GES** due à l'industrialisation est la principale cause du réchauffement planétaire et des changements climatiques. Les **GES** sont généralement exprimés en **tonnes de CO₂ équivalent (tCO₂éq)**.

Énergie finale

L'**énergie finale** (parfois dite secondaire) représente l'énergie consommée par l'utilisateur final. Elle peut être dérivée de l'**énergie primaire** et avoir subi des transformations pour arriver à la forme destinée à la consommation finale. C'est le cas notamment de l'essence, du diesel et du mazout, qui proviennent du pétrole brut, ou encore des biocarburants fabriqués à partir de biomasse. À noter qu'en raison des pertes d'énergie associées à la transformation, la quantité d'**énergie finale** est toujours inférieure à celle d'**énergie primaire**.

Énergie primaire

L'**énergie primaire** réfère aux sources d'énergie présentes dans la nature, n'ayant pas subi de transformations (p. ex., l'hydroélectricité, l'énergie éolienne, le gaz naturel, le charbon, le pétrole brut et le bois de chauffage).

Endogène

Donnée qui est calculée par le modèle (par opposition à **exogène**). Pour le modèle **NATEM**, les quantités de biocarburants produits, par exemple, sont **endogènes**.

Exogène

Donnée qui est extérieure au modèle, qui est fournie par l'utilisateur (par opposition à **endogène**). Pour le modèle **NATEM**, les demandes utiles, par exemple, sont **exogènes**.

Gaz naturel renouvelable (GNR)

Gaz naturel carboneutre issu de la bioénergie. Il peut être obtenu de différentes manières, notamment par captage aux sites qui émettent du méthane (sites d'enfouissement des déchets, fosses à lisier, etc.), ou par procédé de biométhanisation ou gazéification.

Gigawatt (GW)

Mesure la puissance et équivaut à un milliard de watts. Le plus grand barrage hydro-électrique du Québec, Robert-Bourassa (rivière La Grande), a une capacité de près de 6 **GW**.

« North American TIMES Energy Model » (NATEM)

Modèle techno-économique, multirégional, couvrant en détail les systèmes énergétiques du Canada, des États-Unis et du Mexique. **NATEM** a été développé à partir du générateur de modèles d'optimisation **TIMES**.

Pompe à chaleur

Également appelée thermopompe, elle permet d'utiliser une source d'énergie (habituellement de l'électricité) pour transférer, plutôt que produire, de la chaleur. Dans un bâtiment, le transfert de chaleur peut s'effectuer vers l'intérieur (chauffage) ou vers l'extérieur (climatisation). Une **pompe à chaleur** est généralement beaucoup plus efficace que l'utilisation directe de l'énergie.

Potentiel de réchauffement planétaire (PRP)

Multiplicateur permettant de comparer différents **gaz à effet de serre** entre eux sur la base de leur impact sur le réchauffement climatique par rapport au CO₂. Par exemple, un **PRP** de 28 a été attribué au méthane dans le modèle, ce qui signifie qu'une tonne de méthane est 28 fois plus puissante qu'une tonne de CO₂. Le **PRP** est également appelé potentiel de réchauffement global (PRG).

Réserve du ministre

La **réserve du ministre** constitue l'un des mécanismes de stabilisation des prix du SPEDE. Elle vise à contenir l'impact d'une hausse soudaine des prix des droits d'émission sur le marché du carbone. En cas de hausse rapide du prix de marché, la réserve rendra disponible, uniquement aux émetteurs québécois, des unités d'émission qui seront vendues à des prix prédéterminés par règlement. La réserve du ministre est ainsi une solution de dernier recours pour la conformité des émetteurs québécois qui offre une certaine prévisibilité à moyen/long terme sur le coût maximal pour la conformité.

Térawattheure (TWh)

Mesure une quantité d'énergie, habituellement d'électricité, et équivaut à un milliard de kilowattheures. Un **térawattheure** peut alimenter environ 40 000 maisons unifamiliales détachées chauffées à l'électricité durant un an.

« The Integrated MARKAL-EFOM System » (TIMES)

Générateur de modèles d'optimisation supporté par un programme de l'Agence internationale de l'énergie et présentement utilisé dans plus de 80 institutions réparties dans près de 70 pays.

Tonne de CO₂ équivalent (tCO₂éq)

Somme des émissions de différents **GES**, ramenée en tonnes de CO₂ sur la base de leur **PRP** respectif. Par exemple, 2 tonnes de CO₂ et une tonne de méthane équivalent à 30 **tCO₂éq** (le méthane a un **PRP** de 28, donc une tonne de méthane équivaut à 28 tonnes de CO₂).

Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (« Land use, land use change and forestry » - LULUCF)

Secteur d'émission de **GES** couvrant tout changement dans l'utilisation des terres et forêts, par exemple la reforestation, les changements de pratiques agricoles, ou l'étalement urbain. De nombreux sigles sont utilisés en français : UTCF, UTCATF, ATCATF, ARSS... Afin d'éviter toute confusion, nous avons utilisé le sigle anglais dans ce rapport.

Véhicules zéro émission (VZE)

Véhicules automobiles légers entièrement électriques ou fonctionnant à l'hydrogène, ou tout autre véhicule qui n'émet aucun polluant. La norme **VZE** du Québec, qui s'applique aux constructeurs automobiles, vise à augmenter le nombre de **VZE** vendus afin de réduire les émissions de **GES** (la norme touche également les véhicules à faible émission ou VFE).

AVANT-PROPOS

Ce rapport, mis à jour à la suite d'une première publication en 2019, est le fruit d'un exercice de modélisation visant à tracer les grandes lignes d'une décarbonisation de l'économie québécoise. Ni prévision, ni plan d'action, il décline les changements requis et des scénarios potentiels pour atteindre les cibles et objectifs du Québec, tout en abordant les coûts et bénéfices qui en découleront pour le Québec. Pour que ces changements aient lieu, des mesures économiques et réglementaires vigoureuses seront nécessaires.

Les mesures se déclinent en quatre blocs : la maîtrise de l'énergie, l'électrification de nombreux usages de l'énergie, la production accrue d'électricité et de bioénergies, ainsi que d'autres mesures touchant l'agriculture, les déchets et l'industrie.

Il existe une certaine latitude quant aux choix possibles pour l'atteinte des cibles de réduction. Le modèle utilisé étant d'abord un outil d'optimisation économique, des arbitrages en fonction de priorités sociétales demeurent possibles. Pour la production d'électricité, par exemple, des choix différents pourraient être faits quant aux filières sollicitées (hydroélectricité, solaire, éolien) pourvu que les critères de fiabilité en énergie et en puissance soient respectés. Il serait possible, par exemple, de recourir davantage aux thermopompes pour limiter la nouvelle production requise.

Soulignons par ailleurs que l'incertitude, touchant autant les hypothèses que les résultats, s'accroît plus on se projette loin dans le temps. Ces derniers, bien que reflétant les meilleures connaissances et prévisions d'aujourd'hui, seront appelés à changer avec l'arrivée de nouvelles normes sociales, de nouveaux contextes économiques et, surtout, de nouveaux développements technologiques qui pourraient modifier substantiellement les trajectoires envisagées. Notre exercice de modélisation sur une trentaine d'années présente le portrait d'une économie québécoise largement décarbonisée et permet de poser les gestes appropriés maintenant pour l'atteinte de la cible à l'horizon 2030, tout en gardant en tête les grandes tendances identifiées dans ce rapport à l'horizon 2050 (électrification, bioénergies, etc.) afin d'assurer une cohérence à long terme.

Nous espérons que ce rapport pourra contribuer positivement à l'immense chantier qu'est la décarbonisation de l'économie du Québec.



| SOMMAIRE

SOMMAIRE

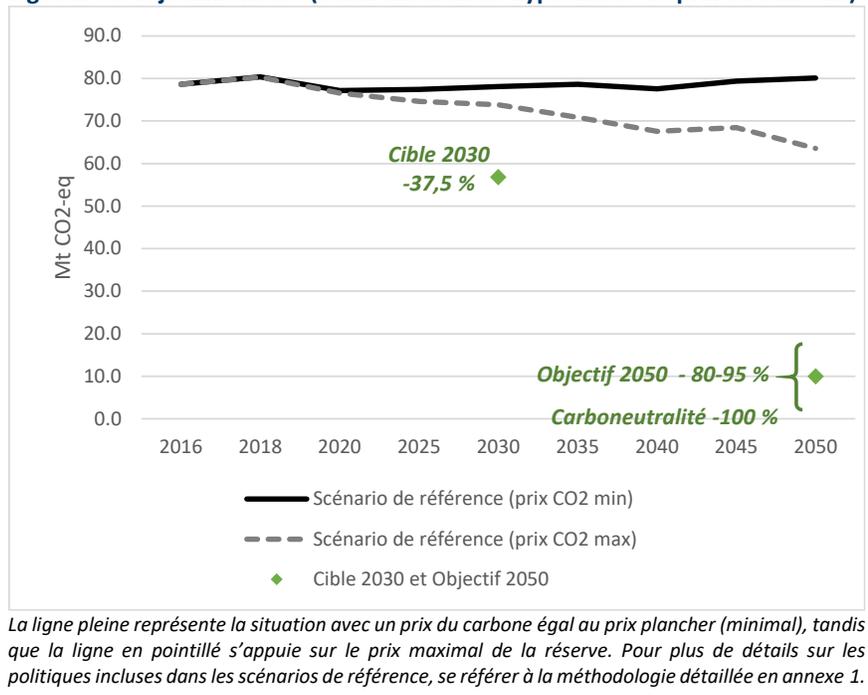
INTRODUCTION

En 2015, dans le contexte de la Conférence de Paris sur le climat, le Québec s'est doté d'une cible ambitieuse de réduction d'émissions de gaz à effet de serre (GES) de 37,5 % à l'horizon 2030 par rapport à 1990. Le Québec s'est également donné comme objectif, en 2015, une réduction d'émissions de 80 à 95 % d'ici 2050. Il considère maintenant, dans le contexte de sa politique-cadre sur les changements climatiques, l'atteinte de la carboneutralité à cet horizon, soit une réduction d'émissions nette de 100 %.

Ces engagements, s'ils sont atteints, feront du Québec un chef de file de la lutte contre les changements climatiques. Toutefois, leur réussite implique des changements sans précédent, notamment dans la structure énergétique du Québec.

C'est dans ce contexte que le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) a retenu les services de Dunsky pour répondre aux questions suivantes : **comment le Québec sera-t-il en mesure d'atteindre ses objectifs ? Quelles sont les trajectoires possibles ?**

Graphique S1 : Le portrait des émissions de GES incluant les politiques en vigueur ou déjà annoncées (selon différentes hypothèses de prix du carbone)



Pourquoi établir des trajectoires ?

Dans le Plan pour une économie verte 2030, publié en novembre 2020, le gouvernement a indiqué qu'il entend prendre un engagement dans le but d'atteindre la carboneutralité (émissions de GES nettes égales à zéro) à l'horizon 2050. De plus, en avril 2021, le Québec a joint la campagne Objectif zéro des Nations unies, qui vise à engager les acteurs infranationaux envers l'atteinte de la carboneutralité d'ici le milieu du siècle.

Ces engagements récents s'ajoutent à ceux pris dans un contexte international en 2015. En adhérant au Protocole d'accord sur le leadership climatique mondial (Under2MOU), une entente intergouvernementale de portée internationale approuvée par le décret 7 juillet 2015, le Québec s'est en effet doté d'un objectif de réduction des émissions de GES d'entre 80 et 95 % d'ici 2050, par rapport à 1990.

L'atteinte de ces objectifs implique une vision à long terme en matière climatique. Les trajectoires présentées dans ce rapport constituent une analyse des options possibles, selon les mesures en place et les pratiques et technologies existantes, permettant au Québec non seulement d'atteindre ces objectifs de 2050, mais également d'atteindre sa cible de 2030 qui vise une réduction d'émissions de GES de 37,5 %, par rapport à 1990.

LA MÉTHODOLOGIE EN BREF

Quatre trajectoires de réduction des émissions québécoises de GES ont été testées à l'aide du modèle NATEM en considérant les différentes solutions technologiques disponibles (voir tableau S1). Pour chaque trajectoire, la modélisation cumule les mesures des trajectoires précédentes et inclut davantage de solutions de réduction de GES pour pousser le modèle à maximiser les réductions à l'horizon 2050, jusqu'à atteindre la carboneutralité si cela est possible. La trajectoire C, par exemple, inclut les mesures technologiques de réduction de GES et les réductions de demandes utiles des scénarios précédents, en y ajoutant le captage et la séquestration du carbone.

Comment interpréter les résultats de l'étude ?

Lorsqu'on cherche à déterminer dans quelle mesure il est possible de réduire les émissions de GES, on entreprend souvent une démarche en trois temps : on commence par le potentiel « technique » (tout ce qu'il est techniquement possible de faire), puis le potentiel économique (ce qu'il est possible de faire selon des contraintes économiques), et enfin, on évalue le potentiel « réalisable » qui tient compte des autres barrières de marché (p. ex. préférences des consommateurs, disponibilité des produits, accès au financement) ou sociales et institutionnelles (p. ex. acceptabilité sociale).

La modélisation utilisée ici est de type technico-économique, ce qui signifie qu'elle ne tient pas compte des barrières. *Ainsi, loin d'une prévision des choix et comportements du marché, les résultats reflètent ce qui est théoriquement possible (et économiquement optimal).*

À titre d'exemple, prenons l'efficacité énergétique. Puisque bon nombre de mesures pour améliorer l'efficacité énergétique sont déjà rentables pour le consommateur, le modèle présume que son adoption se fera naturellement. Or, l'efficacité énergétique fait face à de multiples barrières autres qu'économiques, limitant ainsi son adoption réelle par le marché.

Le lecteur avisé tiendra compte de cette limite dans son interprétation des résultats.

Tableau S1 – Trajectoires de réduction des émissions de GES¹

	Trajectoire A	Trajectoire B	Trajectoire C	Trajectoire D
Réductions ciblées²				
Horizon 2030	-37,5 %	-37,5 %	-37,5 %	-37,5 %
Horizon 2050	Maximum possible, jusqu'à la carboneutralité			
Réductions atteintes par le modèle				
Horizon 2030	-37,5 %	-37,5 %	-37,5 %	-37,5 %
Horizon 2050	-80 %	-82 %	-86 %	-100 %
Types de moyens (par rapport au scénario précédent ou à la référence)	Mesures technologiques de réduction des émissions de GES³	Réduction des demandes utiles⁴	Captage et séquestration du carbone (CSC)⁵	Émissions négatives (BECSC, CAD)

L'étude menée par l'équipe Dunsky et Esmia est le fruit d'une modélisation détaillée de l'ensemble des solutions, technologiques et autres, connues ou prévisibles en date de mai 2021. Elle présente les résultats d'un modèle d'optimisation qui vise à atteindre les cibles au plus bas coût, à l'intérieur de contraintes qui lui ont été imposées. Les pages suivantes présentent ces résultats, ainsi que certaines de leurs implications pour la société québécoise.

RÉSULTATS DE L'ANALYSE

L'analyse est claire : les cibles et objectifs du Québec aux horizons 2030 et 2050, quoique très ambitieux, sont potentiellement réalisables⁶. Le Québec peut même atteindre la carboneutralité d'ici 2050 et ce, sur son propre territoire (c'est-à-dire sans recourir à l'achat de droits d'émission par l'entremise de ses entreprises sur le marché de la WCI ou de crédits carbonés à l'international) en incluant dans son panier de mesures des technologies telles que la bioénergie avec captage et séquestration du carbone (BECSC) et le captage atmosphérique direct (CAD). Cela étant dit, l'atteinte des objectifs de réduction de GES

¹ Calculé à PRP de 28 pour le méthane.

² En pourcentage de réduction par rapport aux émissions de 1990. Il s'agit ici de réductions nettes au Québec, sans achats de crédits ou de solutions climatiques naturelles.

³ Dans les faits, les mesures technologiques sont déjà disponibles dans les scénarios de référence, mais leur adoption est poussée par l'ajout d'une contrainte de réduction des émissions de GES dans les trajectoires de réduction.

⁴ Les hypothèses de réduction des demandes utiles sont présentées à l'annexe 1 de ce rapport. L'impact marginal relativement petit (2% de réductions additionnelles) peut surprendre, mais il est le résultat méthodologique de l'application en premier lieu de l'ensemble des mesures technologiques (Trajectoire A) dans le modèle. Si les mesures de réduction des demandes utiles avaient d'abord été appliquées, elles auraient conduit à une baisse d'environ 20 % des émissions de GES.

⁵ Les quantités disponibles pour la séquestration géologique sont précisées à l'annexe 1, sous-section « Captage et séquestration du carbone »

⁶ L'exercice actuel de modélisation vise à établir la faisabilité de la carboneutralité essentiellement au niveau technologique, tout en incorporant des mesures de réductions de la demande et en établissement des trajectoires d'émission de GES optimisées du point de vue économique.

nécessitera des investissements importants de l'ensemble des agents économiques et impliquera que le Québec entre dans une profonde réforme économique de façon à accélérer la cadence de ses efforts, et qu'il agisse sur tous les fronts pour y arriver :

1/ TECHNOLOGIES : Accélérer les technologies sobres en carbone

Dans chaque secteur, il existe des solutions de rechange technologiques sobres en carbone. Une stratégie de réduction axée sur le remplacement de technologies (p. ex. véhicules électriques à la place des véhicules à essence) pourrait permettre d'accomplir la majeure partie des objectifs de réduction. Cette approche axée sur les technologies nécessiterait d'agir massivement dans chaque secteur.

2/ COMPORTEMENTS⁷ : Agir pour réduire les demandes

Des changements seront nécessaires de façon à induire, par exemple, un transfert modal en faveur des transports collectifs et actifs, un aménagement du territoire plus compact, l'intégration du principe d'économie circulaire dans l'industrie et un ajustement du système alimentaire pour favoriser l'alimentation humaine de source végétale et éliminer le gaspillage. En plus d'amener des réductions additionnelles, la réduction des demandes permettra non seulement de *diminuer le coût* de la transition vers les technologies sobres en carbone, mais également *le risque* de manquer nos objectifs si l'on se repose uniquement sur les technologies. Elles ont par ailleurs un impact positif important sur le bilan énergétique en diminuant l'électricité additionnelle requise pour effectuer la transition.

3/ CAPTAGE ET SÉQUESTRATION DE CARBONE : Capturer et séquestrer ce qu'il reste

Les solutions de rechange technologiques et les changements de comportement demeurent les meilleurs outils pour transitionner vers un Québec sobre en carbone, entre autres parce qu'ils procurent des co-bénéfices majeurs pour la province (santé, économie, etc.). Néanmoins, le captage et la séquestration de carbone (CSC) sont des technologies qui restent disponibles pour capter les émissions restantes.

4/ÉMISSIONS NÉGATIVES: Atteindre la carboneutralité

Finalement, il faudrait générer des « émissions négatives », c'est-à-dire réduire la quantité de CO₂ dans l'atmosphère par le déploiement de technologies comme la bioénergie avec captage et séquestration du carbone (BECSC) et le captage atmosphérique direct (CAD), afin de contrebalancer des émissions qu'il est impossible d'éliminer complètement, ce qui permettrait au Québec d'envisager l'atteinte de la carboneutralité sur son territoire.

⁷ Les leviers pouvant mener à des changements de comportements sont multiples et peuvent inclure la réglementation, l'aménagement du territoire, l'amélioration de l'offre de transports collectifs, etc.

Cadre d'analyse et limites méthodologiques

L'élaboration de trajectoires optimisées de réduction d'émissions de GES aux horizons 2030 et 2050 repose sur l'utilisation du modèle d'optimisation énergétique NATEM – Canada.

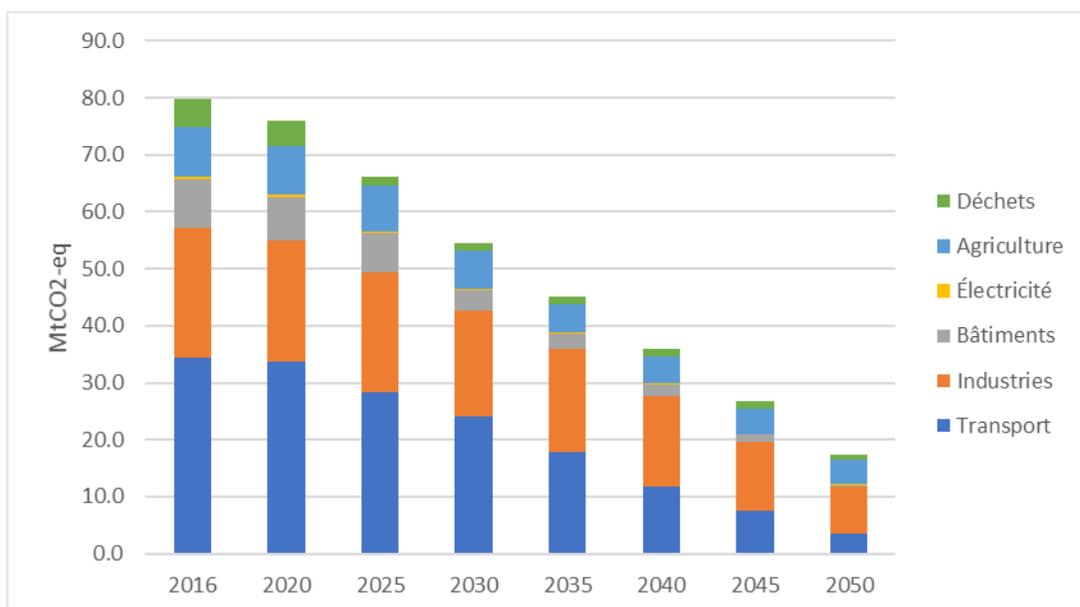
Les facteurs suivants n'ont pas été pris en compte dans l'analyse :

- Les enjeux de concurrence internationale ;
- Certains effets des changements climatiques sur la production d'électricité ;
- Les émissions non comprises dans l'inventaire du Québec, par exemple les mesures touchant l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie ;
- Les émissions liées au cycle de vie des produits, par exemple les émissions pour la fabrication des biens importés.

1/ ACCÉLÉRER LES TECHNOLOGIES SOBRES EN CARBONE

L'ampleur du défi à surmonter pour atteindre les cibles et objectifs de réduction du Québec, surtout à l'horizon 2050, ne laisse pas la possibilité d'écarter quelque option que ce soit. Chaque secteur d'émissions doit être sollicité pour réduire ses émissions de GES. L'utilisation des technologies permet de réduire les émissions totales du Québec sous la barre des 20 Mt, ce qui est significatif. Des mesures additionnelles seront toutefois requises pour réduire davantage et neutraliser ces émissions résiduelles de près de 20 Mt (surtout en agriculture, procédés industriels et aviation) et atteindre la carboneutralité (graphique S2).

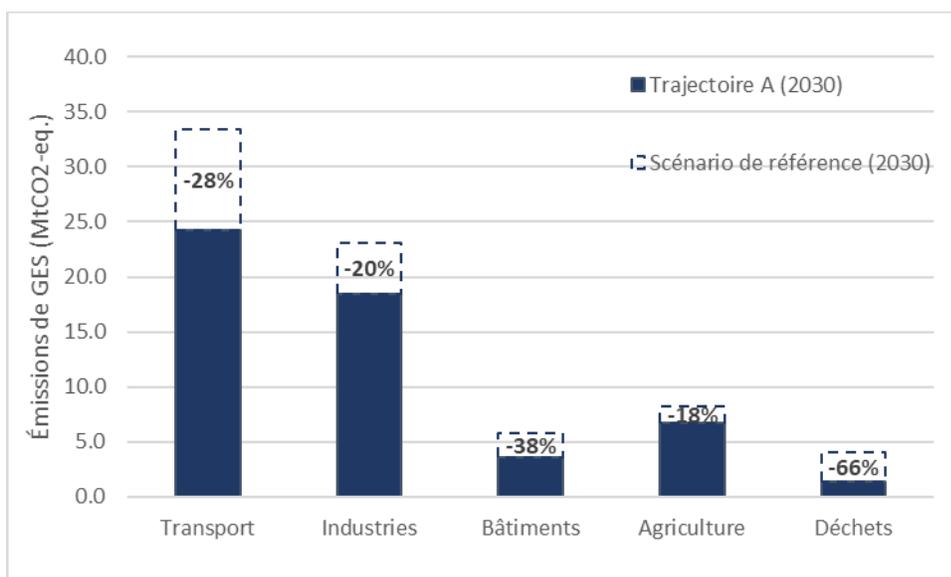
Graphique S2 : Les émissions par secteur, selon la trajectoire Mesures technologiques de réduction de GES (Trajectoire A)



Pour 2030, en comparaison aux émissions de 2016, les réductions proviennent surtout du transport, et dans une moindre mesure, de l'agriculture, des bâtiments, de l'industrie et des déchets. Contrairement à la modélisation de 2019 où il augmentait légèrement, le niveau des émissions industrielles diminue d'ici 2030 dans les trajectoires de réduction de GES. Cela s'explique par le fait que les prévisions de croissance de la production industrielle (tonnes de produits) ont été revues à la baisse pour refléter les dernières prévisions économiques utilisées par NATEM. Ces nouvelles prévisions ont été influencées par la pandémie à court et moyen terme, mais également par une révision des tendances économiques à plus long terme. Cette croissance plus faible et l'application de technologies de réduction se traduisent par une diminution des émissions de ce secteur à l'horizon 2030. Notons que les effets à long terme de la pandémie demeurent encore très incertains.

Le graphique S3 présente les niveaux d'efforts par secteur dans la réduction des GES d'ici 2030, toujours selon la trajectoire A. L'effort absolu de réduction le plus important provient du secteur des transports, avec une baisse des émissions de 9 Mt par rapport au scénario de référence, alors que le secteur des déchets fournit l'effort relatif le plus important en réduisant ses émissions de 66%.

Graphique S3 : La réduction des émissions attendue pour chaque secteur en 2030.



En 2050, le portrait est quelque peu différent et la variation entre les secteurs s'accroît. Pour certains secteurs, il serait possible d'atteindre une très grande réduction (au-delà de 75 %) :

- Les **transports** (89 % de réduction) pourront être largement électrifiés (environ le tiers de la consommation totale d'énergie) et, pour les segments où ce n'est pas possible, être alimentés à la bioénergie (biocarburants) (environ le quart de la consommation totale d'énergie). L'hydrogène fait également son apparition à l'horizon 2050, mais demeure marginal sauf pour l'atteinte de la carboneutralité (Trajectoire D). Le carburant d'aviation demeure le principal frein à des réductions encore plus importantes en raison de contraintes techniques (part maximale de bioénergie dans le carburant) et de la concurrence entre les différents usages de la bioénergie (rareté de la ressource).
- Les **bâtiments** pourront eux aussi être électrifiés (ceux qui chauffent aujourd'hui au gaz naturel et au mazout) par l'installation de thermopompes (surtout dans le résidentiel) ou de résistances électriques (surtout dans le commercial). La bioénergie, qui apparaît dans les scénarios de

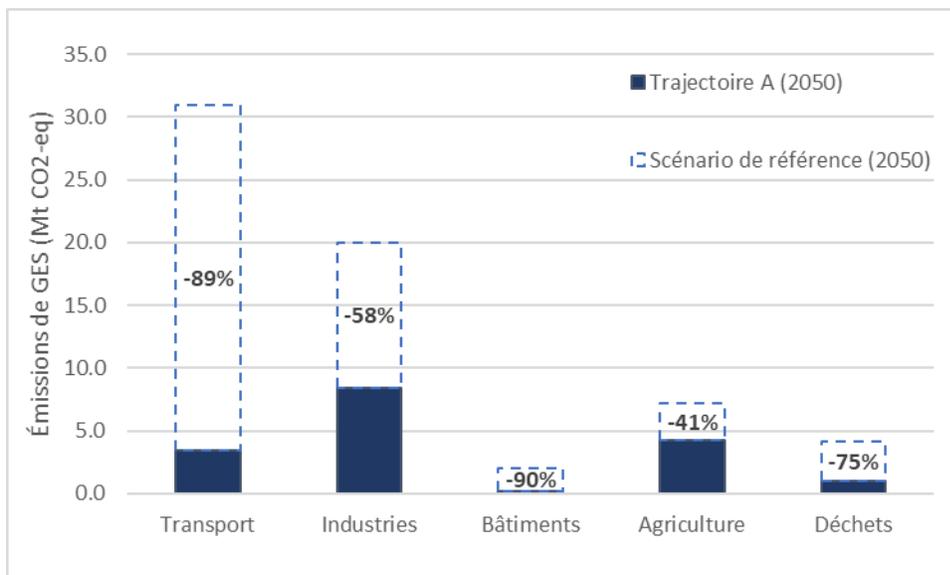
référence pour le chauffage des bâtiments, est toutefois peu utilisée pour la chauffe dans les trajectoires de réduction et réservée à d'autres secteurs.

- Les **déchets** pourront être traités de façon à grandement réduire leurs émissions (jusqu'à 75 %⁸, par compostage généralisé, captage du méthane au site d'enfouissement et valorisation énergétique).

En revanche, il sera plus difficile de réduire significativement les émissions dans les deux autres secteurs :

- Le secteur des **industries**, aujourd'hui le deuxième plus gros émetteur après les transports, atteint un minimum de 8 Mt d'émissions de GES à l'horizon 2050, soit une réduction des émissions de 58 %. Seules les émissions négatives produites par ce secteur (bioénergie utilisée pour de la chaleur de procédé avec CSC) permettent de compenser complètement les émissions de procédé, qui demeurent largement présentes en 2050 dans toutes les trajectoires. Certains sous-secteurs seront toutefois en mesure de réduire ou d'éliminer les émissions de procédé par l'application de nouvelles technologies.
- L'**agriculture** représente seulement 10 % des émissions actuellement, mais son potentiel de réduction est limité à 41 % à l'horizon 2050. La majorité des émissions du secteur agricole provient de l'utilisation d'engrais azotés pour les sols, de la gestion du fumier et de la fermentation entérique provenant de l'élevage des ruminants. Sauf pour le fumier, les technologies existantes ne permettent pas d'atteindre des niveaux de réduction élevés.

Graphique S4 : La réduction des émissions attendue pour chaque secteur en 2050.



⁸ Dans l'édition 2019 du rapport, la réduction allait jusqu'à 94 %. La différence s'explique par le fait que davantage de réductions d'émissions de GES se réalisent maintenant déjà dans le scénario de référence, en raison d'un prix du carbone plus élevé. Voir sous-section « Scénario de référence » de la section « Méthodologie » pour plus d'information sur le prix carbone.

D'un point de vue strictement technologique, il semble tout à fait possible d'atteindre la cible de 2030 (-37,5 %), seulement par la réduction des émissions de GES québécoises. En revanche, recourir uniquement à des technologies de réduction permettrait seulement d'atteindre le bas de l'intervalle de l'objectif de 80-95 % de réduction en 2050 visé par le Under2 MOU. L'atteinte de la carboneutralité nécessiterait alors des mesures additionnelles axées notamment sur la réduction des demandes, la capture et séquestration du carbone, ou encore l'achat de crédits de carbone internationaux. Pour l'atteinte de la carboneutralité à l'horizon 2050, il faudra non seulement obtenir des niveaux élevés de réductions de GES par l'application de technologies de réduction et une réduction de certaines demandes, mais également déployer le CSC, notamment pour produire des émissions négatives avec la BECSC et le CAD (voir prochaines sections). Les solutions climatiques naturelles comme la reforestation, qui ont été exclues de cette modélisation, pourraient également faire partie des solutions.

2/ AGIR POUR RÉDUIRE LES DEMANDES

L'atteinte de l'objectif 2050 sera facilitée par la réduction des demandes totales en énergie. Cela passera par un examen des choix qui influencent nos façons de consommer, de se déplacer, de construire nos villes ou encore de nous alimenter.

En agissant sur ces leviers, et avant même de s'attaquer aux changements technologiques, les émissions de GES seront réduites d'emblée de 20 % en 2050 par rapport au scénario de référence. En y ajoutant les réductions technologiques, des réductions de 82 % sous le niveau de 1990 sont possibles en 2050.

L'IMPORTANCE DE RÉDUIRE DES DEMANDES

- **Co-bénéfices importants**

Les réductions de demandes amènent d'importants co-bénéfices sociaux et environnementaux. Par exemple, les transports actifs contribuent à la bonne forme physique (qualité de vie, hausse de la productivité, baisse des besoins en soins de santé, etc.) alors que les transports en commun permettent une réduction de la congestion routière. Ces bénéfices s'ajoutent à l'amélioration de la qualité de l'air et la diminution du bruit, qui sont également amenées par la voiture électrique. Les réductions de demandes accroissent les quantités et la diversité des co-bénéfices.

- **Réduction de coûts et productivité**

Bien que les réductions de demandes soient exogènes au modèle et que leurs coûts complets n'aient donc pas été intégrés, il est largement admis que ces mesures permettent une baisse des coûts totaux au niveau de la société, facilitant d'autant la transition énergétique. L'élimination du gaspillage alimentaire, l'optimisation des transports et le recyclage industriel sont toutes des mesures qui contribueront à la bonne performance et à la productivité de l'économie.

- **Réduction de la demande en énergie**

Réduire les demandes, c'est aussi réduire directement tous leurs intrants, dont l'énergie. En réduisant les déplacements en automobile ou encore le gaspillage alimentaire, en optimisant l'aménagement du territoire et des villes et l'ensemble des projets à la source, on réduit la production et la consommation non nécessaires et une quantité importante d'énergie (électricité et autres) est rendue disponible pour faciliter la transition. Cela signifie aussi un besoin moindre d'ajout de capacité électrique sur le territoire québécois pour des gains GES équivalents à ceux qui auraient pu être obtenus en utilisant plus d'énergie et plus de technologies.

- **L'impact des réductions : 2 % ou 20 % ?**

L'ordre de la modélisation des types de mesures est primordial. Lorsque simulées en premier, les réductions de demandes permettent une réduction d'environ 20 % des GES en 2050. Cependant, comme elles sont modélisées après les mesures technologiques, leur apport à la réduction des émissions semble beaucoup plus petit. À titre d'exemple, si les transports sont complètement électrifiés, une réduction subséquente de la demande en transport n'aura aucun impact sur les GES dans le modèle et dans l'inventaire des émissions de GES. À l'inverse, si la demande en transport est réduite en premier lieu, son apport à la réduction des émissions devient plus important et la baisse des émissions découlant de l'électrification sera moindre.

Dans les faits, chacun de ces types de mesures est mis en place simultanément et permet de réduire les émissions de GES.

Si la combinaison des réductions de demandes et des technologies de réduction de GES ne permet pas d'aller beaucoup plus loin que l'utilisation seule de technologies en termes de réductions totales de GES à l'horizon 2050, les réductions de demandes comportent toutefois d'immenses avantages, dont la génération de très intéressants co-bénéfices comme l'amélioration de la qualité de l'air, la diminution du bruit, la diminution de la congestion routière et des pertes de temps, l'amélioration de la qualité de vie en milieu urbain, etc. En outre, cela permettra de réduire de manière substantielle la quantité d'électricité additionnelle qu'il faudra produire et de limiter les nouveaux moyens de production (barrages hydroélectriques, parcs éoliens et solaires).

Finalement, la réduction des demandes peut contribuer à réduire les émissions de GES dans les sous-secteurs pour lesquels les changements technologiques auront été plus limités que prévu. Elle vient donc réduire le risque que les objectifs du Québec ne soient pas atteints.

Pour réduire les demandes, le Québec devra s'attaquer aux défis suivants :

- **Mobilité et aménagement**

Densification des villes, nouvelle construction plus compacte et transfert modal (davantage de transport en commun et transports actifs, train et covoiturage pour le transport des passagers, transfert du camion vers le train pour le transport des marchandises, etc.).

- **Tissu industriel**

Transition vers des industries vertes et intégration des principes d'économie circulaire⁹.

- **Système alimentaire**

Diminution du gaspillage alimentaire et diversification des sources de protéines du régime alimentaire¹⁰.

3/ CAPTER ET SÉQUESTER CE QU'IL RESTE, ET ATTEINDRE LA CARBONEUTRALITÉ

Pour atteindre la carboneutralité en 2050, le captage et séquestration de carbone (CSC)¹¹ s'avérera sans doute nécessaire. Cette technologie consiste à capter une quantité de carbone pour le séquestrer dans le sol. Elle est donc une option complémentaire aux réductions d'émissions, mais qui doit être prévue en parallèle dès maintenant pour assurer la possibilité d'y avoir recours au besoin.

⁹ Réduction et valorisation des déchets à tous les niveaux de l'économie, ainsi qu'augmentation de la durée de vie et réutilisation des produits manufacturés.

¹⁰ Cette diversification des protéines alimentaires se traduirait par une diminution de la consommation de produits d'origine animale. Bien que cette diminution ait un effet indéniable sur la réduction des émissions de GES (et autres impacts environnementaux), son impact sur le territoire québécois est limité étant donné que la production québécoise d'élevage est intégrée au commerce interprovincial et international (fortes importations et exportations).

¹¹ Le CSC « traditionnel » consiste à capter les émissions (provenant de combustibles fossiles) à la sortie d'une usine, rendant le bilan de cette usine neutre en carbone ou presque. La bioénergie avec CSC (BECS), quant à elle, consiste à produire de l'électricité, de la chaleur ou de l'hydrogène à partir de bioénergie, et d'en capter les émissions produites. Puisqu'il s'agit d'émissions biogéniques (c.-à-d. provenant de la biomasse récente), les capter et les séquestrer revient à retirer du CO₂ de l'atmosphère, donc à générer des émissions négatives.

Notre analyse montre qu’une fois les technologies sobres en carbone adoptées (#1 ci-haut) et la demande réduite (#2 ci-haut), les émissions de GES qui subsistent sont principalement issues des procédés industriels ainsi que de l’agriculture (émissions non énergétiques). Il est probable que de nouvelles technologies fassent leur apparition, permettant ainsi de réduire ces émissions pour le moment incompressibles. Des réductions de demandes plus importantes que celles considérées dans cette étude pourraient également permettre des réductions accrues dans ces secteurs. Dans le cas inverse, la BECSC (bioénergie avec CSC) ou le CAD pourraient combler la différence. Le Québec serait même en mesure, selon nos simulations, d’atteindre la carboneutralité sur son territoire d’ici 2050.

Soulignons que l’objectif 2050 pourrait être atteint à un coût moindre en ayant davantage recours au CSC¹² que ce qui a été envisagé ici (plafond de 2,5 MtCO₂éq par an en 2035 et 5 MtCO₂éq en 2040). Toutefois, ce faisant, le Québec laisserait de côté d’importants co-bénéfices que les mesures de réduction à la source offrent (qualité de l’air, santé humaine, indépendance par rapport aux énergies fossiles et balance commerciale). De plus, il prévaut toujours une certaine incertitude quant à la permanence des séquestrations et sur le potentiel maximum de stockage à long terme.

Dans cette optique, les technologies de CSC offrent une relative marge de manœuvre pour atteindre l’objectif à l’horizon 2050, advenant que les mesures de réduction s’avèrent insuffisantes.

Rappelons également que l’analyse se base sur les solutions connues aujourd’hui et qu’il est possible que de nouvelles solutions apparaissent au cours de l’horizon visé, notamment celui de 2050, offrant ainsi davantage de possibilités pour l’atteinte des cibles et objectifs.

Achat de crédits carbone

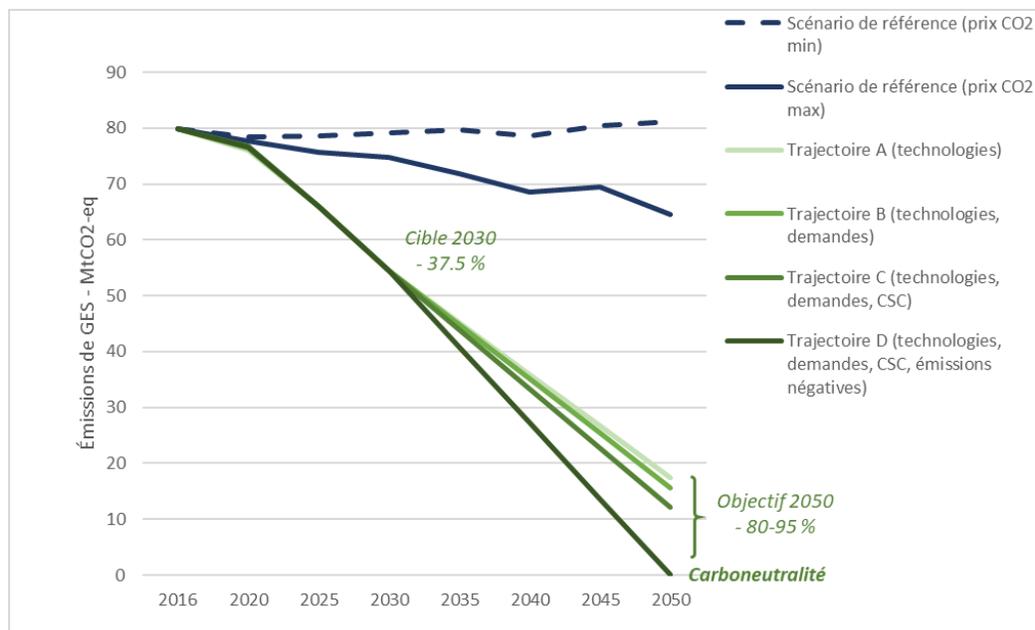
Si le Québec n’arrive pas à réduire suffisamment ses émissions sur son territoire aux horizons 2030 et 2050, l’achat de crédits à l’étranger pourrait faire partie de la solution, qu’il s’agisse d’achats par les entreprises via le système de plafonnement et d’échange de droits d’émission ou possiblement par l’achat de crédits à l’international par le gouvernement lui-même.

Les achats à l’étranger sont un mécanisme prévu dans le cadre du SPEDE du Québec, permettant de réduire les émissions de GES au meilleur coût possible à l’intérieur du marché commun. D’un point de vue purement financier, les réductions sur le territoire du Québec peuvent être substantiellement plus coûteuses à réaliser que le prix pour acheter des réductions à l’étranger.

Cela étant dit, réduire les émissions au Québec permettrait tout de même de réduire le risque financier associé à l’achat de droits d’émission ou de crédits carbonés sur les marchés car le prix et la rareté de ceux-ci risquent d’augmenter significativement dans le temps. De plus, en investissant dans son économie, le Québec participe à la transformation de son économie, en plus d’améliorer sa qualité de l’air ainsi que sa balance commerciale énergétique.

¹² Plutôt que de séquestrer le carbone, il est possible également de l’utiliser. Toutefois, cela revient souvent à le libérer à nouveau dans l’atmosphère à plus ou moins brève échéance. Les utilisations du carbone qui permettent de le fixer à long terme sont peu nombreuses, mais en développement. Dans notre simulation, nous avons permis l’utilisation de petites quantités de carbone pour certains substituts du ciment.

Graphique S5 : La réduction des émissions en jouant sur quatre leviers : A- l'optimisation technologique, B- la réduction de demandes, C- le CSC et D- les émissions négatives (BECSC/CAD)



Atteindre les objectifs de réduction que s'est fixés le Québec nécessitera un changement de cap majeur pour la société québécoise, ce qui aura une incidence sur l'économie du Québec, son environnement et sa population.

1/ DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE ET EMPLOI

Le Québec bénéficiera de **création d'emplois et de croissance économique** dans les secteurs à faible niveau d'émission de GES, chez les fournisseurs de technologies propres et de bioénergie, en efficacité énergétique et en production d'électricité, entraînant des besoins de formation pour les travailleurs. Selon une étude consacrée aux impacts économiques de l'efficacité énergétique, celle-ci permettrait à elle seule de créer ou maintenir 25 000 emplois et de faire croître le PIB du Québec de 4 milliards de dollars en moyenne par année à l'horizon 2030¹³. Le développement accéléré du secteur énergétique, avec la production d'électricité locale et la fabrication de biocarburants, sera aussi porteur pour la province et ses régions.

En revanche, la restructuration de l'économie affectera d'autres secteurs. Une **perte d'emplois** est à prévoir dans le secteur pétrolier, tandis que le gaz naturel sera touché, mais dans une moindre mesure, car une bonne partie des besoins pourront être comblés avec du gaz naturel renouvelable (une forme de bioénergie).

Modélisation des impacts économiques de 2019

La modélisation de 2019 a porté une attention particulière aux coûts, investissements et impacts sur la balance commerciale, notamment par l'application répétée du modèle afin d'établir très finement la courbe des coûts marginaux et d'en déduire les coûts totaux pour la société. Les estimés monétaires de cet encadré proviennent du rapport publié en 2019 et n'ont pas fait l'objet d'une réévaluation pour la présente mise à jour.

Rappelons les principaux constats de la modélisation de 2019 :

- Pour atteindre la cible de 2030, **des investissements moyens de 1,7 milliard** de dollars par année (sur la période 2021-2030), à l'échelle de la société, seraient nécessaires en sus des investissements déjà prévus dans le scénario de référence.
- Le coût net moyen annuel pour l'ensemble de la société est évalué à **950 millions de dollars** par année sur la période 2021-2030 (et à **8,5 milliards de dollars** par année sur la période 2031-2050). Ces coûts correspondent à un **coût moyen de 87 \$/tCO₂éq à l'horizon 2030 (et de 220 \$/tCO₂éq à l'horizon 2050)**. À noter que la modélisation précédente ne visait pas l'atteinte de la carboneutralité, mais plutôt une réduction de -87.5% en 2050.
- Ceci inclus l'ensemble des coûts incrémentaux (i.e. les coûts additionnels des technologies propres), les économies d'énergie et autres économies/coûts d'opération pour l'ensemble des secteurs économiques, ainsi que la valeur résiduelle des actifs à la fin de la période modélisée. Par contre, ces coûts n'incluent pas la valeur monétaire d'autres bénéfices majeurs, comme la diminution des coûts pour le système de santé ou encore le gain de productivité chez les travailleurs.
- Avec la décarbonisation de l'économie, on assistera à une forte diminution de la dépendance au pétrole et au gaz naturel importés. En 2030, la balance commerciale du Québec pour l'énergie s'améliorera de près de **2 milliards de dollars par an**. D'ici 2050, ce gain se porte à près de **5 milliards de dollars par an**.

Pour atteindre la carboneutralité, il faudra déployer davantage de solutions de réduction et de captage des émissions de CO₂. Le coût marginal des réductions et leur coût total sont donc poussés à croître. Cependant, les technologies continuent d'évoluer rapidement, notamment en production d'électricité renouvelable, stockage de l'électricité, électrification des transports et émissions négatives, ce qui permettra de faciliter la transition et d'alléger la facture globale.

¹³ Dunsky expertise en énergie. 2018. *The Economic Impact of Improved Energy Efficiency in Canada - Employment and other Economic Outcomes from the Pan-Canadian Framework's Energy Efficiency Measures*.

L'atteinte de cibles et objectifs de réduction ambitieux mènera également au développement de nouvelles technologies commercialisables, voire **exportables** (telles que les anodes inertes pour la production d'aluminium), ou qui procureront un avantage concurrentiel au Québec. Le Québec pourra ainsi se **positionner favorablement** pour faire partie de la nouvelle économie verte, qui pourrait représenter, d'ici 2030, un marché de 10 000 milliards de dollars à l'échelle mondiale¹⁴.

Enfin, grâce à son approvisionnement énergétique sobre en carbone, le Québec bénéficiera d'une **attractivité** accrue auprès des entreprises qui chercheront à réduire leur empreinte carbone ou à se prémunir contre les risques — notamment financiers — d'un resserrement de la réglementation en matière d'émissions de GES et des fluctuations de prix des hydrocarbures. Les produits québécois demeureront compétitifs dans un contexte d'utilisation de mécanismes d'ajustement carbone aux frontières visant à réduire les asymétries de prise en compte des émissions de GES associées à la fabrication de produits dans les politiques climatiques, une mesure que l'Union européenne est en voie de mettre en place.

↗ Exportations



Économie verte :
10 000 milliards \$/an
à l'échelle mondiale
en 2030

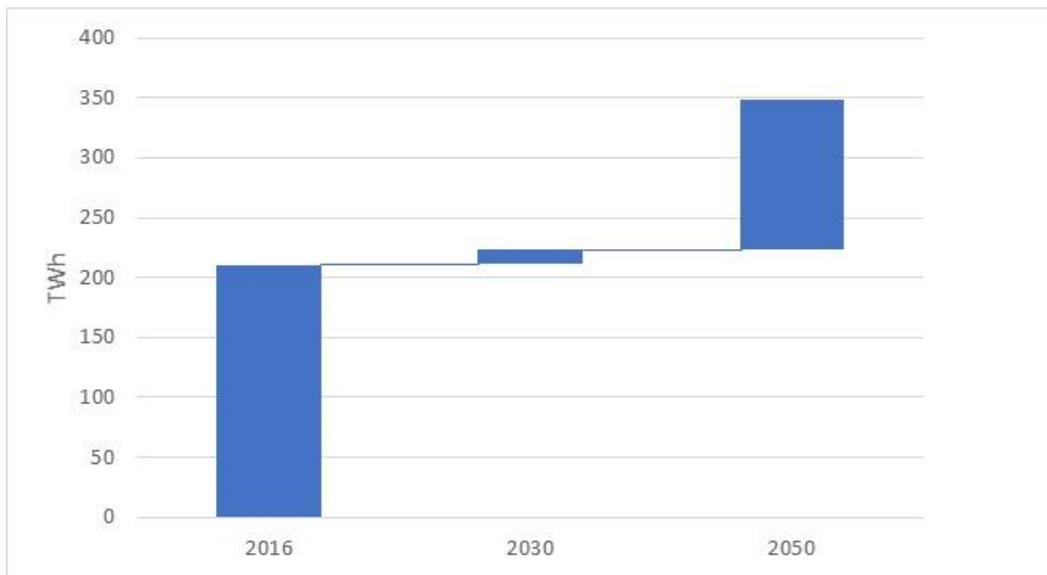
2/ PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Pour répondre à l'électrification croissante des systèmes (dans les transports, les bâtiments et l'industrie), il sera nécessaire, tout d'abord, de consommer l'électricité plus efficacement (en privilégiant l'efficacité énergétique, le transport en commun, une économie circulaire, etc.), mais également d'augmenter la production d'électricité, à partir de sources propres comme l'éolien, le solaire et l'hydroélectricité (graphique S6). Bien qu'une augmentation de la production d'électricité soit nécessaire pour effectuer la transition énergétique, on note toutefois une diminution des besoins additionnels en électricité relativement à ceux décrits dans le rapport de 2019, notamment à l'horizon 2030, pour deux raisons principales :

- Une révision à la baisse du taux d'augmentation anticipé de la production industrielle future au Québec (qui devrait croître à un rythme moins rapide que prévu en 2019), et
- L'incorporation de délais de construction pour la nouvelle production d'électricité plus longs et plus réalistes dans les hypothèses, surtout pour la grande hydroélectricité, ce qui pousse le modèle à réduire les exportations d'électricité à plus court terme plutôt que de mettre en œuvre de nouvelles capacités de production.

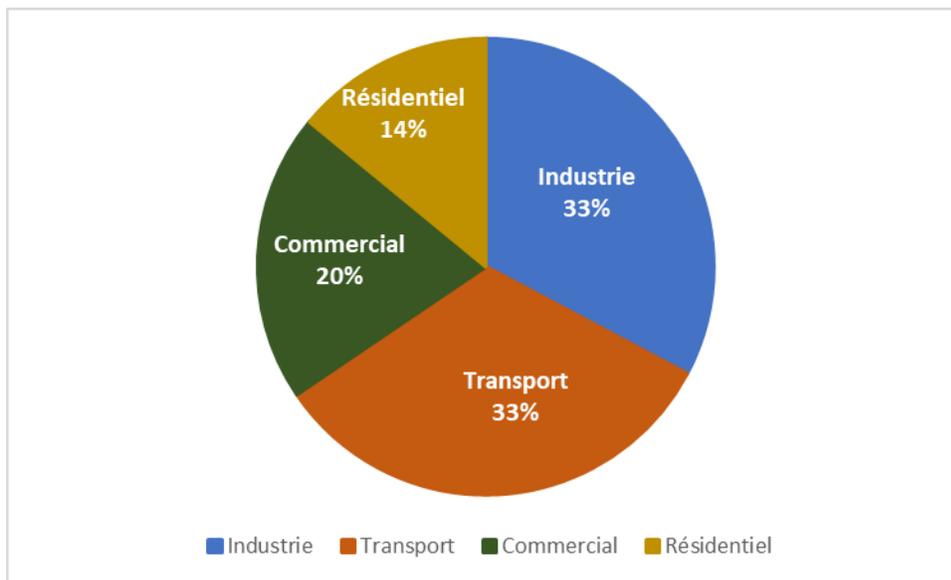
¹⁴ Basé sur une étude de The Global Commission on the Economy and Climate (2015) "*Seizing the Global Opportunity*". Selon cette étude, le marché mondial des technologies sobres en carbone s'élevait à 5 500 milliards de dollars américains en 2011, et bénéficie d'une croissance annuelle de 3 %.

Graphique S6 : L'électricité additionnelle requise en 2030 et en 2050 pour répondre à l'électrification croissante des systèmes, (selon la trajectoire de réduction Trajectoire D).



Afin d'atténuer les coûts associés à la croissance des besoins en électricité, le Québec pourrait accroître ses efforts en efficacité énergétique, au-delà de ce qui est inclus dans le modèle (le potentiel est en effet plus élevé). L'électricité additionnelle à l'horizon 2050 (graphique S7) est utilisée à parts égales ou presque dans le secteur industriel, le transport et le bâtiment (résidentiel et commercial).

Graphique S7 : La répartition de la consommation additionnelle d'électricité à l'horizon 2050 (par rapport à 2016).



3/ SANTÉ ET ENVIRONNEMENT

La réduction de l'utilisation du mazout dans les bâtiments et du pétrole dans les transports aura un impact positif significatif sur la qualité de l'air, et par ricochet, sur la santé des Québécois. Le recours accru à la bioénergie pourrait cependant augmenter le niveau de particules dans l'air ; la prudence devra donc être de mise lors du choix du type de bioénergie, de la technologie utilisée et de l'endroit où elle sera utilisée. Toutefois, comme l'essentiel de la biomasse solide à l'horizon 2050 serait utilisée en industrie ou pour la production d'électricité, il est possible de choisir des sites qui épargneront les centres urbains.



Les besoins supplémentaires en électricité nécessiteront de développer davantage les énergies renouvelables, ce qui pourrait inclure soit des parcs éoliens, des parcs solaires et/ou des barrages hydroélectriques. Malgré l'empreinte carbone très faible de ces sources d'énergie, elles ne sont pas sans conséquence sur l'environnement. Afin de limiter les impacts, le Québec devra investir davantage dans l'efficacité énergétique et pourrait favoriser les secteurs industriels peu énergivores pour les nouveaux sites.

RISQUES ET INCERTITUDES

Étant donné l'horizon de temps considéré, l'incertitude sur les résultats de l'analyse à l'horizon 2050 demeure élevée, bien que celle pour 2030 soit moindre. Il convient donc de porter attention aux risques et opportunités suivants, qui pourraient complexifier ou faciliter selon le cas l'atteinte des cibles et objectifs, notamment pour 2050.

1/ RISQUES ET OPPORTUNITÉS TECHNOLOGIQUES

Nous réitérons que notre analyse tient seulement compte des technologies connues à ce jour, qu'elles soient commercialisées ou en développement. Considérant le rythme des innovations dans les dernières décennies, il est probable que de nouvelles technologies fassent leur apparition d'ici 2030 et encore plus d'ici 2050. Ces nouvelles technologies pourraient alors faciliter l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de GES, en offrant davantage de choix dans les solutions à mettre en œuvre, et à un coût qui pourrait s'avérer moindre.

À l'inverse, certaines technologies en développement ou en processus d'homologation pourraient ne pas se matérialiser tel que prévu, mettant à risque certaines réductions d'émissions de GES. Nous avons en 2019 modélisé un scénario excluant le recours aux technologies les moins certaines¹⁵. Dans ce cas, les réductions maximales pouvant être atteintes étaient substantiellement inférieures à 80 % en 2050 et n'atteignaient donc pas l'objectif minimal de réduction de GES du Québec. Ceci confirme l'importance d'appuyer le développement de technologies afin de consolider les options de réduction disponibles. Cela souligne également l'importance des efforts visant à réduire les demandes énergétiques en premier lieu.

¹⁵ Cela concerne les anodes inertes pour la production d'aluminium, la molécule 3-NOP qui bloque la production entérique de méthane chez les bovidés, l'électrification du camionnage lourd, les procédés de réduction directe à l'hydrogène, le CSC limité à une faible utilisation et la substitution limitée du clinker dans la production de ciment.

2/ ACCEPTABILITÉ SOCIALE



Notre analyse montre que, d'ici 2050, un virage devra s'effectuer pour délaissier les énergies fossiles, notamment au profit d'une plus grande électrification. Miser sur l'efficacité énergétique sera essentiel pour atténuer les besoins additionnels en électricité, mais il est probable que cela ne suffise pas. Ainsi, on prévoit que le Québec aura besoin de 137 TWh de plus à l'horizon 2050 par rapport à 2016 (Trajectoire D), soit une augmentation de 65 % de la capacité de production. À titre de comparaison, la production annuelle actuelle de la filière éolienne au Québec est de l'ordre de 11 TWh et d'environ 8 TWh pour le dernier projet hydroélectrique La Romaine. L'ajout de parcs éoliens, de panneaux solaires ou de nouveaux barrages pourrait soulever des enjeux d'acceptabilité sociale.

L'analyse souligne également que l'atteinte des cibles et objectifs passera par la réduction de la demande totale en énergie. Augmenter la densité des villes, favoriser le transport en commun, se tourner vers le train pour le transport des marchandises, tout cela exigera un changement profond d'orientation en matière de transport et d'aménagement du territoire. L'appui de la population à ce changement de cap sera donc essentiel.



Finalement, le recours aux technologies de captage et de séquestration du carbone (CSC, BECSC, CAD) pourrait également soulever des enjeux d'acceptabilité liés notamment aux craintes à propos de l'injection aux sites de séquestration, même pour les premières tonnes séquestrées. C'est, entre autres, pour cette raison que nous avons limité ces options dans nos scénarios.

PERSPECTIVES POUR LE QUÉBEC

Ce qu'on peut retenir de toute cette analyse, c'est que le défi climatique du Québec en est un d'envergure. Toutefois, non seulement le Québec est parmi les mieux placés à l'échelle internationale pour le relever, mais il peut en tirer des bénéfices importants, tant pour son économie que pour la santé des Québécois. En particulier :

- L'électricité provient presque entièrement de sources renouvelables, plaçant le Québec à l'avant-plan de la course pour décarboniser l'électricité ;
- Le Québec a déjà réussi un premier jalon de l'électrification des usages, soit la conversion de la majorité du chauffage résidentiel à l'électricité dans les années 1980 ;
- Le Québec dispose encore d'abondantes ressources renouvelables inexploitées (notamment éolienne et solaire), lui permettant encore d'accroître sa production d'électricité sans émission de GES à des coûts très compétitifs ;
- À l'inverse, le Québec ne produisant ni pétrole ni gaz naturel, sa transition vers l'énergie propre est beaucoup plus facile que pour des régions dont l'économie dépend en partie des énergies fossiles ;
- La biomasse est disponible en grande quantité sur le sol québécois, permettant ainsi la production de bioénergie et de biocarburants locaux ; et
- Le Québec dispose également d'un potentiel géologique suffisant de séquestration du carbone.

Au regard de cette analyse, voici les priorités qui émergent :

Si le Québec souhaite tirer le maximum de co-bénéfices de sa transition vers une société sobre en carbone — tant pour l'économie que pour la santé humaine —, il lui faudra prioriser l'électrification des transports, la réduction et la valorisation des déchets, ainsi que la production et l'utilisation de bioénergies¹⁶.

Les réductions dans les transports sont parmi les plus coûteuses, mais sont probablement celles qui procurent les bénéfices les plus importants (amélioration de la balance commerciale du secteur énergétique, de la qualité de l'air et de la santé des Québécois).

Afin de minimiser les coûts et les risques de cette transition, le Québec devra miser davantage sur l'efficacité énergétique et la réduction des demandes. Des actions en matière d'urbanisme, d'aménagement du territoire, d'économie circulaire ou d'ajustement du système alimentaire rendront la marche moins grande à monter quand viendra le temps de remplacer les technologies actuelles par des solutions de rechange sobres en carbone.

Le captage et la séquestration du carbone (CSC) peuvent avoir un rôle à jouer comme technologie de dernier recours afin de permettre au Québec d'atteindre ses cibles et objectifs sans nécessiter l'achat de crédits. Bien que ces mesures soient risquées, peu efficaces d'un point de vue énergétique et n'apportent pas les co-bénéfices des autres options de réductions, le recours au CSC permet à plus long terme l'atteinte de la carboneutralité lorsque combiné à la bioénergie (BECSC) ou au captage atmosphérique direct (CAD).

Nous concluons que le Québec est particulièrement bien placé pour réussir la décarbonisation de son économie et pour tirer son épingle du jeu sur les plans de l'économie et de la santé humaine. Toutefois, l'effort nécessaire ne doit pas être sous-estimé, et devra viser *toutes les occasions* de réduction sans exception.

¹⁶ À noter que l'analyse ne tient pas compte de la dette carbone, ni des émissions sur le cycle de vie complet.



RAPPORT PRINCIPAL

INTRODUCTION

CONTEXTE

Nous sommes heureux de présenter ce rapport final au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) portant sur l'établissement des trajectoires globales et sectorielles optimisées de réduction d'émissions de GES aux horizons 2030 et 2050.

Ce rapport porte sur les trajectoires de réduction d'émissions de GES qu'il est possible d'atteindre en adoptant des technologies sobres en carbone, une réduction de certaines demandes, ainsi que le déploiement de technologies permettant de capter et séquestrer le carbone, avec une emphase sur l'atteinte de la carboneutralité au Québec à l'horizon 2050.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les partenaires suivants pour leur expertise et leur implication soutenue tout au long du projet : le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, le ministère des Finances du Québec, Transition énergétique Québec et le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec.

Les résultats et analyses présentés dans ce rapport n'engagent que les auteurs.

MÉTHODOLOGIE

L'élaboration de trajectoires optimisées de réduction d'émissions de GES aux horizons 2030 et 2050 a reposé sur l'utilisation du modèle d'optimisation énergétique NATEM – Canada. Cette section décrit succinctement les caractéristiques de ce modèle, ainsi que l'approche suivie pour définir les scénarios de référence puis plusieurs trajectoires de réduction des émissions de GES. Le lecteur est invité à consulter l'annexe 1 pour plus de détails sur la méthodologie employée.

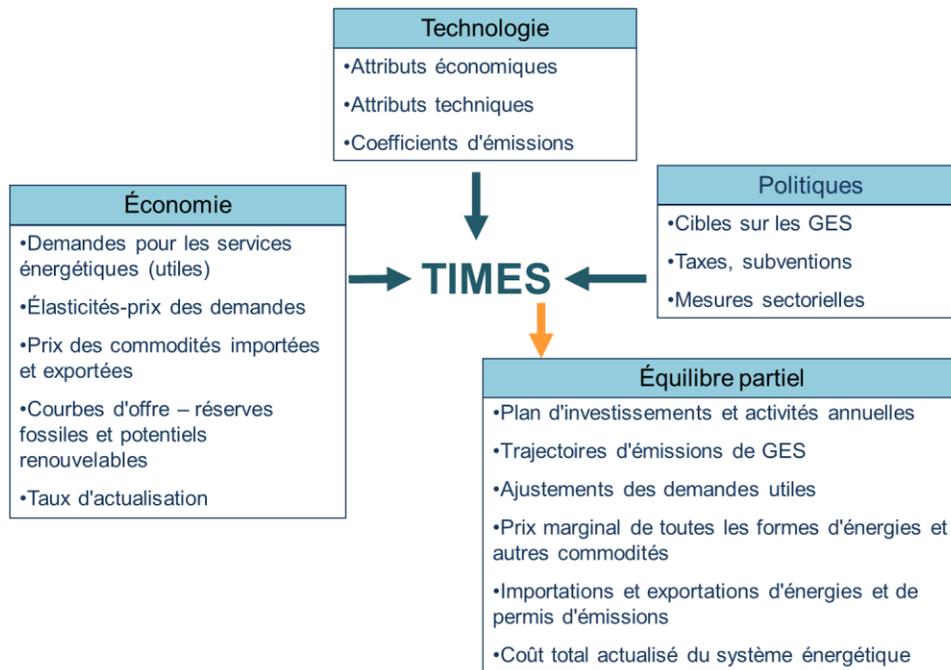
DESCRIPTION DU MODÈLE NATEM

La modélisation a été réalisée à l'aide du modèle d'optimisation énergétique NATEM (North American TIMES Energy Model) pour le Canada, conçu par ESMIA. NATEM est un modèle techno-économique, multirégional, couvrant en détail les systèmes énergétiques du Canada, des États-Unis et du Mexique. NATEM a été développé à partir du générateur de modèles d'optimisation le plus avancé, TIMES, supporté par un programme de l'Agence internationale de l'énergie et présentement utilisé dans plus de 80 institutions réparties dans près de 70 pays.

Le modèle NATEM-Canada permet de représenter de manière très détaillée le système énergétique intégré des 13 provinces et territoires du Canada, leurs émissions de gaz à effet de serre (GES), les flux d'énergie interprovinciaux et internationaux, ainsi que leur évolution à long terme (2050). Les analyses portent essentiellement sur le Québec, mais de manière dynamique dans un contexte canadien.

La figure M-1 présente les principaux intrants et extrants associés à la famille de modèles TIMES dont NATEM fait partie.

Figure M-1. Principaux intrants et extrants du modèle d'optimisation NATEM



- Intrants.** Ces modèles fonctionnent à partir d'un nombre de demandes utiles pour des services énergétiques (par ex. des passagers-kilomètres dans le secteur des transports), lesquelles sont spécifiées de manière exogène sur un horizon futur. NATEM-Canada est dirigé par 70 segments de demandes utiles dans chaque région projetée à l'horizon 2050. Ensuite, chaque étape du système énergétique (extraction, transformation, distribution, utilisation finale, importation, exportations, etc.) est décrite par le biais de technologies spécifiques, caractérisées par des paramètres économiques et techniques, évoluant dans le temps, ainsi que des coefficients d'émissions de GES. NATEM contient plus de 4000 technologies pour chaque région, dont le Québec, incluant des technologies existantes, des versions améliorées de technologies existantes, ainsi que des technologies émergentes ou nouvelles.
- Calculs.** Sous l'hypothèse que les marchés de l'énergie sont en concurrence parfaite, une seule optimisation, permettant de minimiser le coût total net pour la société du système énergétique et des secteurs non-énergétiques, simule l'équilibre du marché sur toute la période. La minimisation du coût total concerne les coûts d'investissement dans les technologies, les coûts fixes et variables d'exploitation et de maintenance, ainsi que les coûts des combustibles importés, les revenus de combustibles exportés et la valeur résiduelle des technologies à la fin de l'horizon temporel.
- Extrants.** Les principaux résultats concernent les investissements dans les capacités technologiques ainsi que les niveaux d'activités annuelles, et ce, à chaque période de temps. Parmi les autres extrants importants de ces modèles figure le prix implicite (valeur marginale) de chaque forme d'énergie et d'émission, permettant ainsi de construire des courbes de coûts marginaux de réduction des GES.

Un des avantages du modèle NATEM – Canada est qu'il permet d'analyser un grand nombre de scénarios. Ainsi, afin d'explorer des trajectoires optimisées d'émissions de GES permettant d'atteindre les objectifs du Québec, la démarche suivante a été réalisée à l'aide de NATEM :

1. **Établissement des scénarios de référence** : les scénarios de référence représentent l'évolution du système énergétique du Québec selon le cours normal des affaires (CNA), sans cibles sur les émissions de GES (voir détails dans la section suivante).
2. **Modélisation de trajectoires de réduction de GES pour 2030** : en établissant une contrainte sur les émissions de GES maximales pouvant être émises en 2030, le modèle est en mesure de déterminer plusieurs scénarios optimisés d'un point de vue technico-économique. Ces scénarios reposent sur des substitutions de technologies et carburants, des améliorations d'efficacité énergétique, le captage et la séquestration de carbone et des réductions exogènes et endogènes de certaines demandes utiles.
3. **Modélisation de trajectoires de GES pour 2050** : le modèle permet d'élaborer des scénarios optimisés visant à atteindre un objectif de réduction en 2050. Différents niveaux de réduction sont modélisés par pas de 2% pour chaque trajectoire jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible d'obtenir des réductions additionnelles ou que la carboneutralité soit atteinte.

L'ensemble du modèle NATEM a été revu en profondeur depuis la modélisation de 2019. Beaucoup plus qu'une simple mise à jour annuelle, l'exercice a mené à une restructuration du modèle lui-même ainsi qu'une mise à jour générale des données. Dans les circonstances, il est impossible de lister l'ensemble des hypothèses et données modifiées depuis 2019. Nous avons toutefois tenté de documenter les principaux changements dans ce rapport.

Les trois sections suivantes fournissent davantage de détails sur le scénario de référence et les trajectoires de réduction explorés dans l'étude.

SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE

Le scénario de référence (également appelé cours normal des affaires) représente ce qui aurait lieu en l'absence de cibles ou d'interventions additionnelles à ce qui est déjà annoncé visant à réduire les émissions de GES. Il s'agit d'un scénario optimisé d'un point de vue économique en fonction des technologies disponibles. Il inclut la plupart des mesures gouvernementales déjà en vigueur :

- Prix carbone¹⁷ : prix plancher ou prix maximal de la réserve ;
- Minimum 5 % éthanol dans l'essence en 2019 et 15% en 2030 ;
- Minimum 4 % biodiesel dans le diesel en 2030 ;
- Mandat VZE renforcé : minimum de véhicules électrique et hybride branchable (croissant pour atteindre 1 500 000 en 2030 pour les voitures) ;
- Minimum de gaz naturel renouvelables pour les secteurs Industrie, Production d'énergie et Commercial : 1 % en 2020, 2 % en 2023, 5 % en 2025 ;
- Minimum de 65 % d'autobus scolaires électriques en 2030 ;
- Minimum de 55 % d'autobus urbains électriques en 2030 ;
- Norme CAFE sur le transport ;
- Part minimum de véhicules hybrides par rapport aux véhicules conventionnels (1.5% en 2030).

¹⁷ Le marché du carbone auquel le Québec adhère est modélisé comme une taxe sur le carbone, dont le niveau est établi de manière exogène.

Pour des politiques telles que le Plan pour une économie verte 2030, nous ne tenons pas compte des budgets, mais de leurs effets prévus (p. ex., électrification). Certaines mesures budgétées, telles qu'Écoperformance par exemple, ne sont donc pas directement pris en compte dans le scénario de référence.

Nous supposons qu'il n'y a pas de retour en arrière (p. ex., retrait de l'électrification), mais nous ne tenons pas compte de nouvelles initiatives qui pourraient être mises en place pour pousser les mesures plus loin.

Enfin, comme l'amendement de Kigali au Protocole de Montréal inclut la réduction des halocarbures, cette réduction est incluse dans le scénario de référence du modèle.

Le scénario de référence est influencé par plusieurs hypothèses, notamment celles portant sur les prix de l'énergie et les projections de croissance économique sectorielles. Ces hypothèses ont évolué par rapport à celles utilisées dans le rapport de 2019 et elles peuvent varier par rapport à celles issues d'autres sources, n'ayant pas été établies au même moment ou sur des bases directement comparables.

Dans ce projet, nous avons en outre défini et modélisé deux scénarios de référence distincts, soit un scénario utilisant le prix plancher pour le marché du carbone, et un autre utilisant le prix le plus élevé de la réserve du Ministre (prix maximal de la réserve). Ceci permet de modéliser l'étendue de possibilités de prix futurs pour le SPEDE. Il est important de noter que le gouvernement du Québec n'émet aucune prévision de prix pour le marché du carbone, incluant les projections incluses dans ce rapport.

TRAJECTOIRES DE RÉDUCTION

Nous avons défini, en collaboration avec le MELCC, quatre trajectoires de réduction d'émissions de GES (tableau M1). Le niveau de réduction cible des émissions domestiques pour 2050 a été établi selon le niveau de réductions maximal que le modèle est en mesure d'atteindre, jusqu'à la carboneutralité.

Pour chaque trajectoire, la modélisation cumule les mesures des trajectoires précédentes et inclut davantage de solutions de réduction de GES pour pousser le modèle à maximiser les réductions à l'horizon 2050, jusqu'à atteindre la carboneutralité si cela est possible. La trajectoire C, par exemple, inclut les mesures technologiques de réduction de GES et les réductions de demandes utiles des scénarios précédents, en y ajoutant le captage et la séquestration du carbone.

L'inclusion des mesures va du plus simple au plus complexe et des co-bénéfices importants aux co-bénéfices faibles ou nuls :

- **Trajectoire A (mesures technologiques de réduction de GES) :** génèrent des co-bénéfices importants et peuvent être mises en place relativement rapidement.
- **Trajectoire B (réduction des demandes utiles) :** génèrent des co-bénéfices importants mais sont plus complexes à mettre en place, demandent des changements de comportements importants et nécessitent un horizon de temps plus long.
- **Trajectoire C (captage et séquestration du carbone) :** génère peu ou pas de co-bénéfices, technologie peu mature et relativement énergivore.
- **Trajectoire D (émissions négatives) :** génère peu ou pas de co-bénéfices, technologie risquée et énergivore.

Tableau M1 – Trajectoires de réduction des émissions de GES¹⁸

	Trajectoire A	Trajectoire B	Trajectoire C	Trajectoire D
Réductions ciblées¹⁹				
Horizon 2030	-37,5 %	-37,5 %	-37,5 %	-37,5 %
Horizon 2050	Maximum possible, jusqu'à la carboneutralité			
Réductions atteintes par le modèle				
Horizon 2030	-37,5 %	-37,5 %	-37,5 %	-37,5 %
Horizon 2050	-80 %	-82 %	-86 %	-100 %
Types de moyens (par rapport au scénario précédent ou à la référence)	Mesures technologiques de réduction des émissions de GES²⁰	Réduction des demandes utiles²¹	Captage et séquestration du carbone (CSC)²²	Émissions négatives (BECSC, CAD)

L'ensemble des trajectoires sont alignées sur les cibles et objectifs de réduction du Québec d'ici 2030 et 2050. Aucun achat de crédits de carbone internationaux n'a été utilisé pour l'atteinte de ces réductions. En effet, les réductions d'émissions atteintes présentés au tableau M-1 réfèrent exclusivement aux réductions locales et par conséquent, n'incluent pas les achats potentiels de crédits de carbone qui pourraient être effectués par les entreprises assujetties au système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de GES dans le cadre du marché lié du carbone du Québec et de la Californie ou d'autres types de crédits de carbone internationaux.

Les trajectoires de réduction utilisent le prix maximal de la réserve pour le marché du carbone²³.

¹⁸ Calculé à PRP de 28 pour le méthane.

¹⁹ En pourcentage de réduction par rapport aux émissions de 1990. Il s'agit ici de réductions nettes au Québec, sans achats de crédits ou de solutions climatiques naturelles.

²⁰ Dans les faits, les mesures technologiques sont déjà disponibles dans les scénarios de référence, mais leur adoption est poussée par l'ajout d'une contrainte de réduction des émissions de GES dans les trajectoires de réduction.

²¹ Les hypothèses de réduction des demandes utiles sont présentées à l'annexe 1 de ce rapport. L'impact marginal relativement petit (2% de réductions additionnelles) peut surprendre, mais il est le résultat méthodologique de l'application en premier lieu de l'ensemble des mesures technologiques (Trajectoire A) dans le modèle. Si les mesures de réduction des demandes utiles avaient d'abord été appliquées, elles auraient conduit à une baisse d'environ 20 % des émissions de GES.

²² Les quantités disponibles pour la séquestration géologique sont précisées à l'annexe 1, sous-section « Captage et séquestration du carbone »

²³ Le prix carbone s'ajoute à la contrainte de réduction du carbone et l'optimisation par le modèle se fait sur l'ensemble de ces contraintes, même si en pratique, c'est la contrainte de réduction du carbone qui domine dans les résultats. Le prix carbone peut toutefois théoriquement avoir de légers effets dans les trajectoires de réduction, mais nous avons validé que ces effets étaient négligeables.

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET ANALYSES

TRAJECTOIRES GLOBALES ET SECTORIELLES

Cette section présente les trajectoires globales et sectorielles de réduction de GES, examine plus en détail le scénario le plus contraignant en réductions réalisables sans émissions négatives (C), puis présente une analyse macro des mesures de réduction.

TRAJECTOIRES GLOBALES

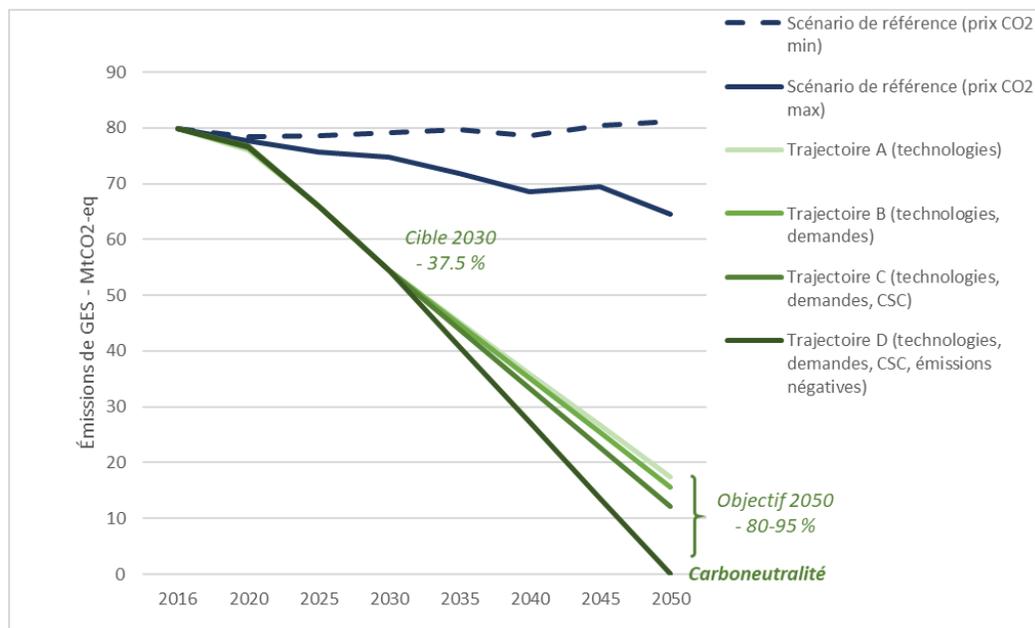
Le Graphique 1-1 présente les trajectoires globales des scénarios de références et des quatre trajectoires de réduction des émissions de GES.

Les politiques publiques déjà en place permettent de stabiliser les émissions de GES à l'horizon 2050, voire de les diminuer selon l'hypothèse de prix du CO₂ sur le marché du carbone qui est retenu. Cette situation contraste avec les résultats de la première modélisation en 2019 qui prévoyait une hausse des émissions à long terme dans le scénario de référence. Outre l'amélioration des coûts et efficacités des options de réduction et l'adoption de nouvelles politiques plus contraignantes, le principal facteur est la révision à la baisse du taux d'augmentation de la demande industrielle à long terme.

Pour atteindre les cibles et objectifs du Québec, le constat demeure; il faudra accélérer la cadence. Nos quatre trajectoires de réduction permettent des réductions de 80 % ou plus en 2050 par rapport à 1990, rencontrant ainsi les objectifs à long terme du gouvernement identifiés en 2015 (réductions de 80 % à 95 %), bien qu'il apparaisse risqué de faire reposer l'atteinte de l'objectif minimal de réduction uniquement sur les mesures technologiques de réduction. Par contre, seule la Trajectoire D permet l'atteinte de la carboneutralité.

Toutes les trajectoires parviennent également à réduire les émissions de 37,5 % d'ici 2030, rencontrant ainsi la cible du Québec.

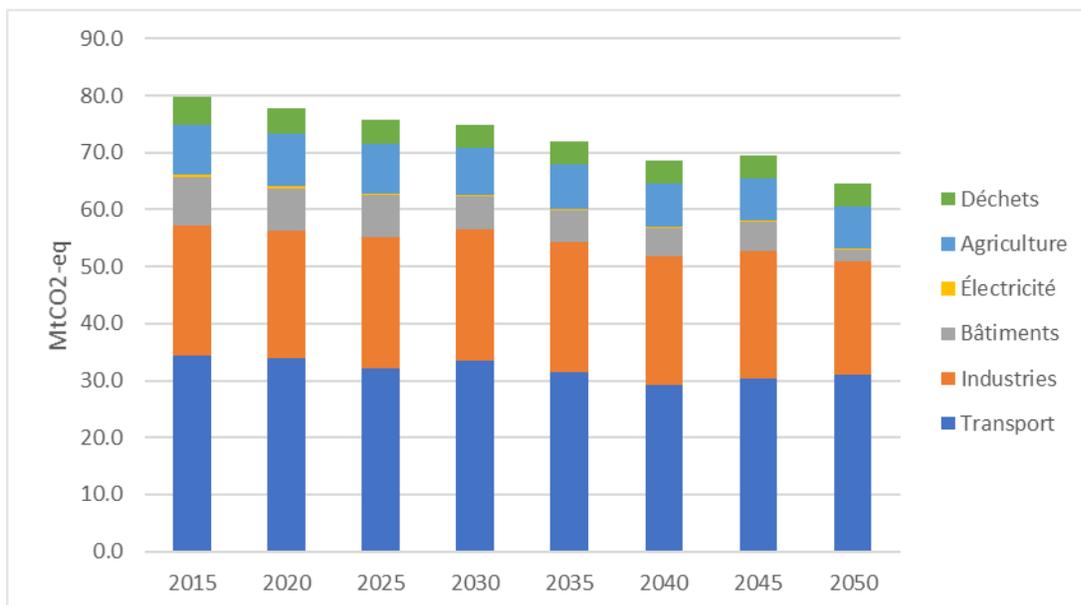
Graphique 1-1 – Trajectoires globales (scénario de référence et trajectoires de réduction)



TRAJECTOIRES SECTORIELLES – SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE (PRIX DU CARBONE MAXIMUM)

Le graphique 1-2 présente le scénario de référence et ses composantes sectorielles. On y note une décroissance des émissions, notamment dans le secteur du bâtiment qui connaît une électrification importante. Les légers mouvements contraires qui s’observent parfois à travers le temps pour un secteur donné peuvent être expliqués par des tendances au niveau des sous-secteurs. En transport, par exemple, l’électrification des véhicules pour passagers amène une baisse des émissions à court terme, laquelle est suivie d’une légère hausse en raison du transport des marchandises qui connaît une croissance et qui s’électrifie plus lentement.

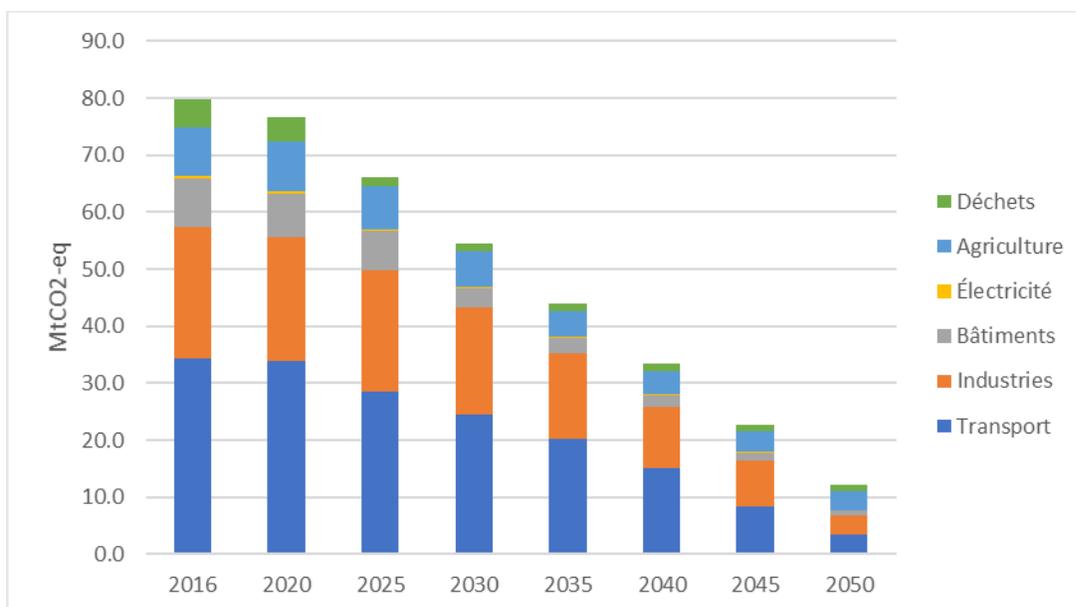
Graphique 1-2 – Composantes sectorielles du scénario de référence (PRP 28 pour le méthane)



TRAJECTOIRES SECTORIELLES – TRAJECTOIRE C

Nous présentons dans cette sous-section une analyse de la trajectoire C, qui est le scénario le plus contraignant en termes de réductions d'émissions de GES (sans BECSC/CAD) et le plus directement comparable au scénario principal du rapport de 2019. Cette trajectoire donne un aperçu des réductions d'émissions requises pour l'atteinte des cibles et objectifs. Le graphique 1-3 présente les émissions globales et sectorielles de ce scénario.

Graphique 1-3 – Émissions sectorielles, Trajectoire C



Les réductions d'émissions atteignent plus de 80 % en 2050 par rapport au scénario de référence dans les secteurs Transport (89 %) et Industries (83 %) ²⁴. Les autres secteurs atteignent tous des réductions de plus de 50% (voir graphique 1-3).

Il faut préciser que pour l'ensemble des secteurs, de nombreuses mesures font déjà leur apparition dans le scénario de référence en raison des politiques mises en place, notamment le prix du carbone. Il convient également de noter que le modèle ne présume pas de bio-compostage de la matière putrescible au-delà des niveaux actuels dans le scénario de référence, ce qui a pour effet de rendre cette matière disponible à la valorisation (par exemple, production de biocarburants ou de GNR) dans les trajectoires de réduction.

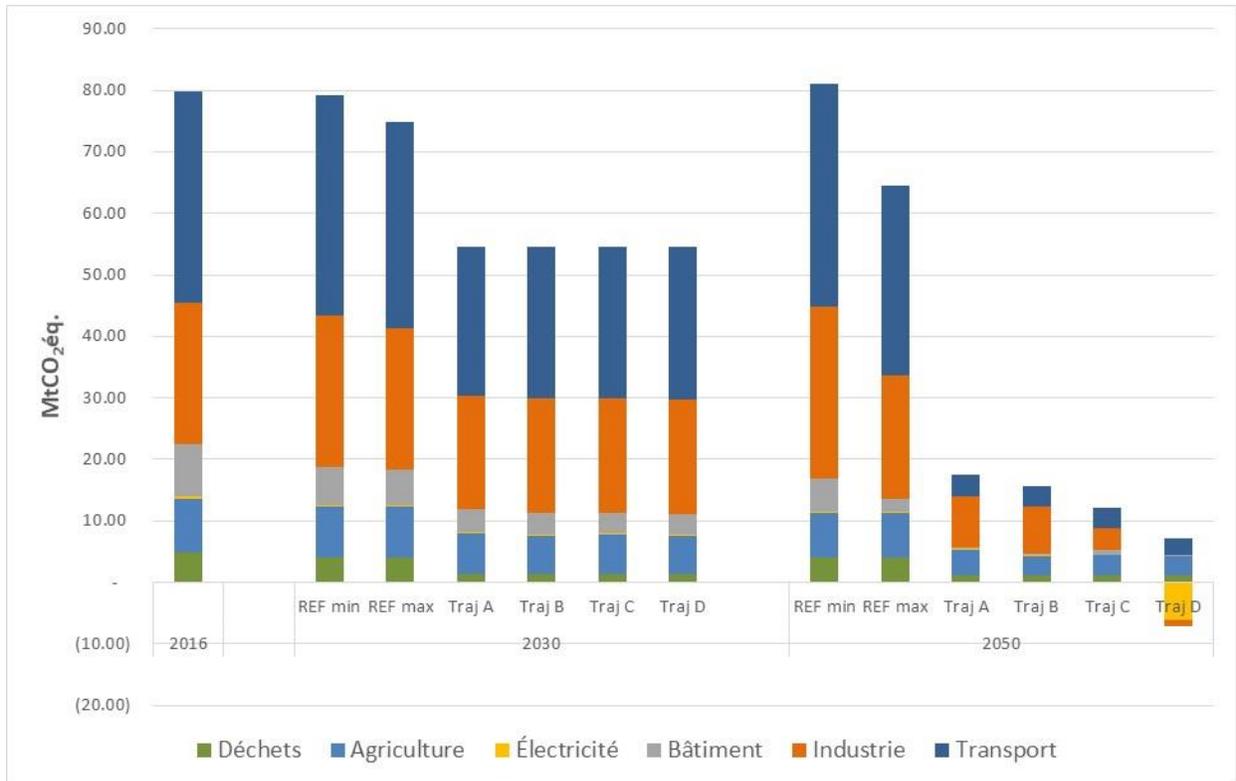
Les secteurs qui émettent encore une quantité substantielle de GES à l'horizon 2050 sont le secteur Transport, le secteur Industries, et le secteur Agriculture, en raison de la plus grande difficulté à réduire les émissions dans ces secteurs (notamment pour le transport aérien, les émissions de procédés industriels, des émissions entériques et des émissions liées à la gestion des sols - application d'engrais). Il subsiste également quelques émissions de méthane du secteur des déchets qui ne sont pas captées (le captage au site d'enfouissement n'est pas efficace à 100%).

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET ANALYSE DES MESURES DE RÉDUCTION

Le graphique 1-4 présente les trajectoires sectorielles à l'horizon 2030 et 2050 pour le scénario de référence et pour les trajectoires de réduction, ainsi que pour l'année 2016 à titre comparatif. Le modèle est en mesure de trouver une solution optimale pour l'ensemble des scénarios.

²⁴ Dans l'analyse des scénarios, nous notons les réductions d'émissions sectorielles en pourcentage des émissions du scénario de référence pour l'année 2050, ce qui permet de mieux mesurer le niveau d'effort de chaque secteur en normalisant l'impact de la croissance. Par exemple, un secteur qui émet 10 MtCO₂éq et connaît une croissance de 50 % de ses émissions dans le scénario de référence, mais qui réduit ses émissions de moitié par rapport à 2020 fournit un effort de réduction aussi important qu'un secteur qui n'est pas en croissance et qui réduit ses émissions des deux tiers (10 MtCO₂éq /15 MtCO₂éq ou 6,7 MtCO₂éq /10 MtCO₂éq = 67 %).

Graphique 1-4 – Trajectoires sectorielles à l’horizon 2030 et 2050



La trajectoire D atteint la carboneutralité en produisant suffisamment d’émissions négatives pour compenser les sous-secteurs où les émissions résiduelles ne peuvent être éliminées. On note également que le secteur industriel produit une légère quantité d’émissions négatives, car de la bioénergie est utilisée conjointement à du CSC, excédant les émissions (principalement de procédé) qui ne peuvent être éliminées.

La prochaine section présente une analyse énergétique et technologique détaillée de ces résultats.

ANALYSE ÉNERGÉTIQUE ET TECHNOLOGIQUE

Cette section débute par une analyse énergétique (consommation d'énergie primaire et finale²⁵, production et importation/exportation d'énergie), puis présente tour à tour une analyse détaillée de chacun des secteurs d'émission.

ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

Pour l'ensemble des secteurs, la consommation d'électricité croît, par rapport au scénario de référence, en raison de l'électrification dans les secteurs des bâtiments, des industries et du transport (graphique 1-5), et ce au détriment du gaz naturel et des produits pétroliers.

Le recours à la bioénergie augmente également, mais l'utilisation finale de la bioénergie diminue car elle est davantage transformée, ce qui augmente les pertes (surtout dans la trajectoire D, où une grande quantité est utilisée par la BECSC pour produire de l'électricité et des émissions négatives).

La quantité totale d'énergie utilisée croît dans la référence mais décroît légèrement dans les trajectoires de réduction, principalement en raison du gain d'efficacité lié à l'électrification des transports.

Le pétrole et le gaz naturel non renouvelable sont graduellement remplacés par de l'électricité (principalement de source éolienne et solaire), ainsi que par différentes formes de bioénergie. À l'horizon 2050, les énergies fossiles ne disparaissent pas complètement, mais deviennent relativement marginales dans le bilan des trajectoires de réduction de GES.

Finalement, l'hydrogène se développe rapidement dans la Trajectoire D à l'horizon 2050, mais demeure tout de même une portion relativement petite de l'ensemble du bilan énergétique (environ 3 % de la consommation totale).

²⁵ L'énergie primaire réfère aux sources d'énergie présentes dans la nature, n'ayant pas subi de transformations (p. ex., l'hydroélectricité, l'énergie éolienne, le gaz naturel, le charbon, le pétrole brut et le bois de chauffage). L'énergie finale (parfois dite secondaire) représente l'énergie consommée par l'utilisateur final. Elle peut être dérivée de l'énergie primaire et avoir subi des transformations pour arriver à la forme destinée à la consommation finale. C'est le cas notamment de l'essence, du diesel et du mazout, qui proviennent du pétrole brut, ou encore des biocarburants fabriqués à partir de biomasse. À noter qu'en raison des pertes d'énergie associées à la transformation, la quantité d'énergie finale est toujours inférieure à celle d'énergie primaire. L'Office national de l'énergie (ONÉ) emploie également le terme « demande primaire », qui inclut, en plus de la consommation d'énergie finale, l'énergie utilisée pour produire de l'électricité. Ce terme n'est toutefois pas utilisé dans la présente étude.

Graphique 1-5 - Consommation d'énergie finale – Ensemble des secteurs (TJ)

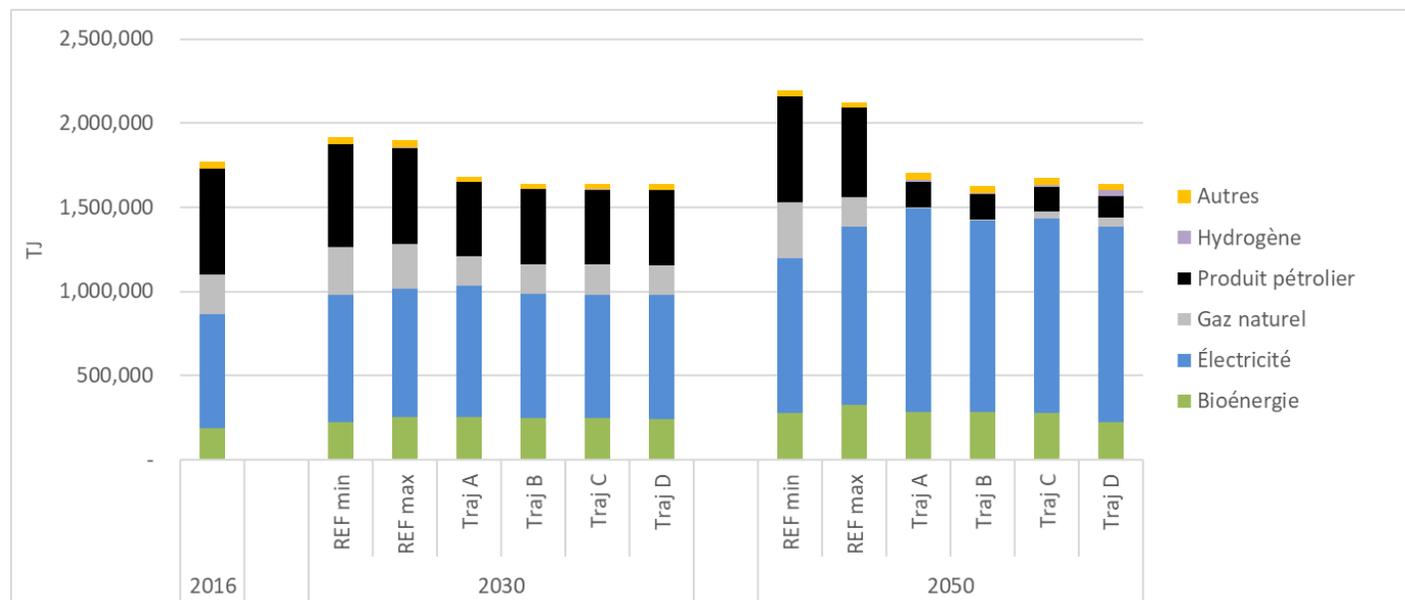
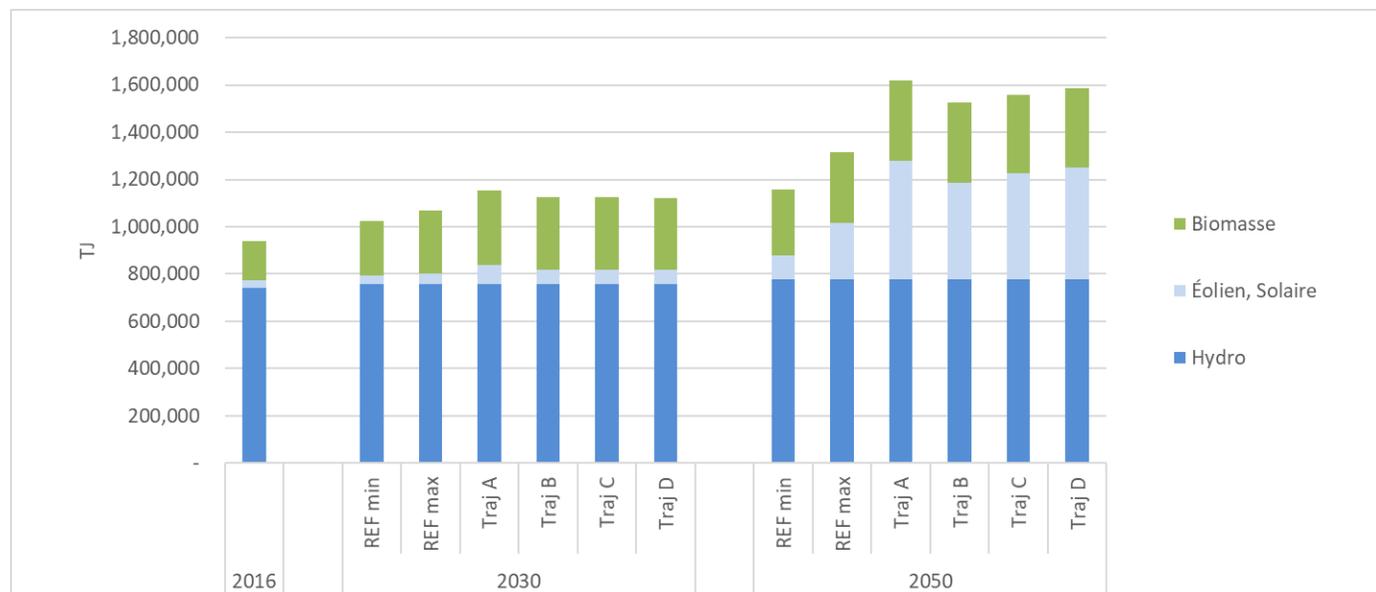


Tableau 1-1 – Consommation d'énergie finale – Ensemble des secteurs (PJ)

	2030				2050			
	Référence	Trajectoire D	Réf. %	Traj. D %	Référence	Trajectoire D	Réf. %	Traj. D %
Bioénergie	254,0	240,9	13 %	15 %	327,6	221,9	15 %	14 %
Électricité	763,8	740,6	40 %	45 %	1 055,7	1 165,2	50 %	71 %
Gaz naturel	266,6	172,7	14 %	11 %	174,8	49,3	8 %	3 %
Produit pétrolier	568,4	446,9	30 %	27 %	533,7	127,7	25 %	8 %
Hydrogène	3,9	3,0	0 %	0 %	2,0	41,1	0 %	3 %
Autres	39,1	33,0	2 %	2 %	27,7	33,5	1 %	2 %
Total	1 895,8	1 637,1	100 %	100 %	2 121,4	1 638,7	100 %	100 %

Graphique 1-6 – Production d'énergie primaire (TJ)



La production d'électricité connaît une forte augmentation après 2030, surtout par la croissance des filières éolienne et solaire (graphique 1-6 – production d'énergie primaire, graphique 1-7 - énergie produite - et graphique 1-8 - puissance installée -). Ces quantités d'énergie additionnelles sont basées strictement sur une optimisation des coûts, sans égard à l'acceptabilité sociale ou à d'autres critères.

Contrairement à l'exercice de modélisation de 2019, la filière hydroélectrique est plutôt stable, mis à part l'ajout de projets déjà en cours qui ont peu d'impact sur la production totale. Plusieurs modifications apportées au modèle ont pu influencer ce résultat, notamment l'ajout de contraintes au niveau des délais de construction (voir section « Méthodologie »), l'ajout de programmes de gestion de la pointe, ainsi que la baisse des coûts de stockage, qui ont toutes pour effet de favoriser les énergies intermittentes par rapport à l'hydroélectricité.

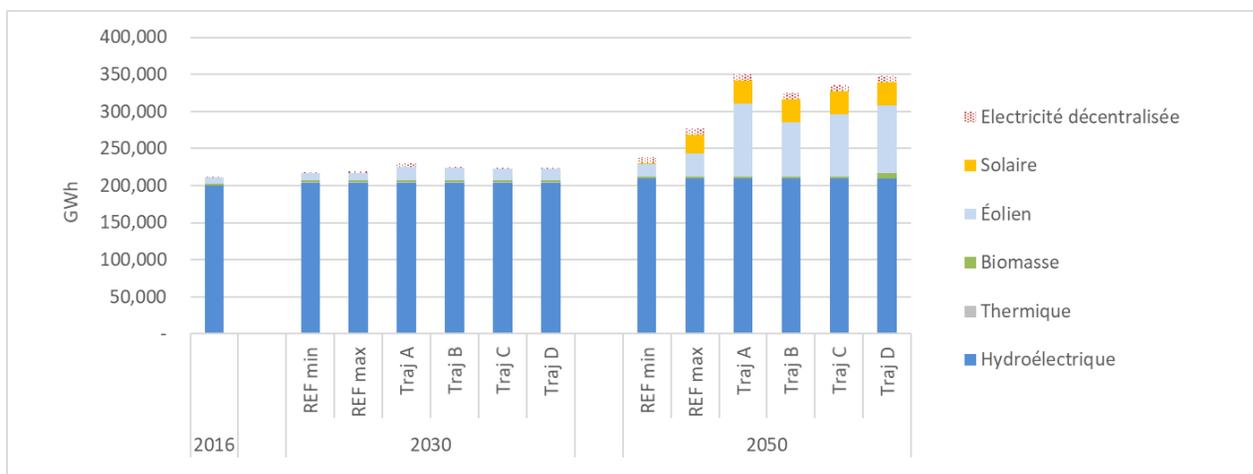
Notons que le modèle ne tient pas compte de la capacité des fournisseurs à répondre à une croissance importante de la demande pour de la nouvelle production. En réalité, de telles contraintes pourraient mener à diversifier davantage les nouvelles sources d'approvisionnement, en incluant de l'hydroélectricité par exemple.

De plus, comme les besoins en électricité additionnelle sont moindres en raison notamment de la réduction des projections de production industrielle à long terme par rapport aux travaux précédents, la production d'électricité additionnelle de source intermittente peut plus facilement être intégrée au parc hydroélectrique existant.

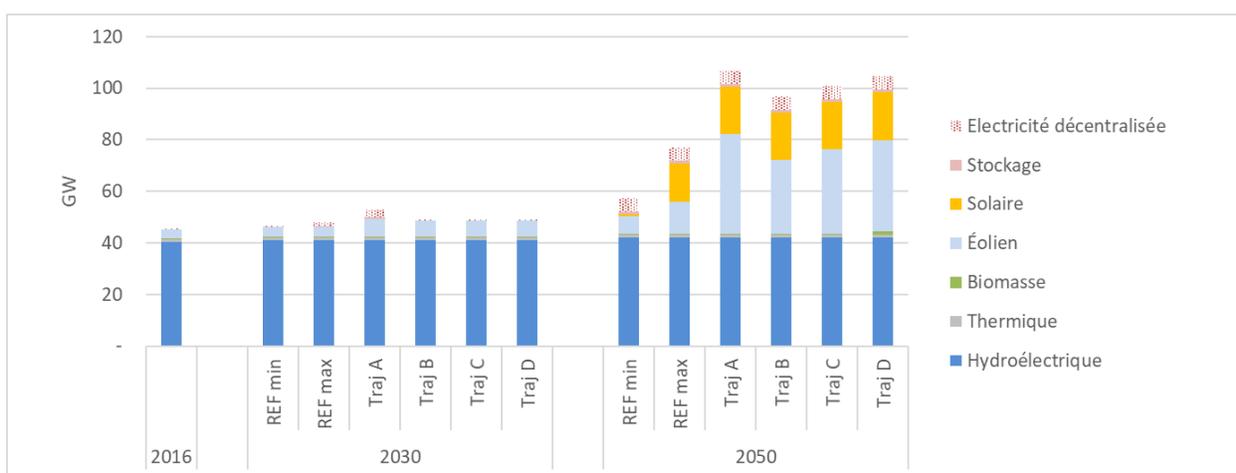
Pour le scénario de référence et chacune des trajectoires de réduction de GES, les équipements de production permettent de satisfaire les besoins en puissance à la pointe du réseau. Il y a suffisamment de capacité de base fiable (« *dependable capacity* » - GW) pour répondre à la demande. Comme la contribution au besoin de puissance des énergies intermittentes est limitée dans la modélisation à 5 % de

leur capacité installée²⁶, leur contribution à la capacité de base fiable est relativement modeste. En énergie (TWh) toutefois, le taux de pénétration des énergies intermittentes est très élevé (37 %), ce qui peut représenter des défis importants pour le réseau²⁷.

Graphique 1-7 - Production d'électricité par type (énergie en GWh)



Graphique 1-8 - Capacité installée pour la production d'électricité par type (puissance en GW)

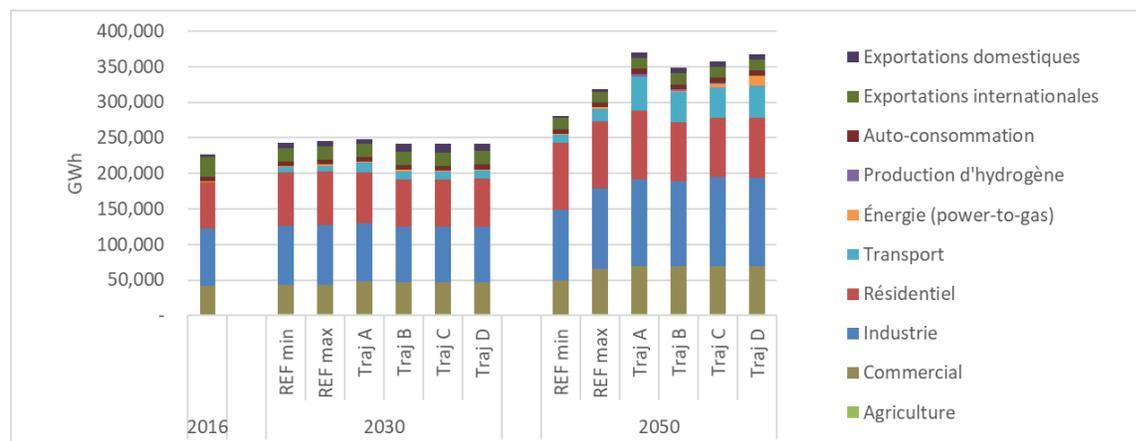


²⁶ Cette hypothèse de contribution en puissance des énergies renouvelables variables est très prudente, surtout étant donné la part importante de l'éolien dans le mix énergétique.

²⁷ Outre leur contribution moindre en puissance, les énergies renouvelables de source variable sont caractérisées par des fluctuations de production rapides et difficilement prévisibles, ce qui nécessite des moyens additionnels en soutien de la fréquence, suivi de la charge et maintien de la tension. Ces moyens additionnels peuvent consister en des équipements de production (p. ex. réponse inertielle d'une centrale hydroélectrique) ou en équipements sur le réseau (p. ex. compensateurs). Notons que les installations hydroélectriques avec stockage peuvent offrir l'ensemble des services requis pour maintenir la fiabilité du réseau, ce qui en fait un excellent complément aux sources d'énergie variables.

Cette nouvelle électricité permet l'électrification au Québec des transports, de l'industrie et du bâtiment. Une petite partie de l'accroissement de l'utilisation d'électricité est rendu possible grâce à une baisse des exportations vers les autres juridictions, rendant ainsi d'énergie disponible pour le Québec (graphique 1-9). Cette situation est inversée par rapport à la modélisation de 2019, où les exportations d'électricité augmentaient dans le temps.

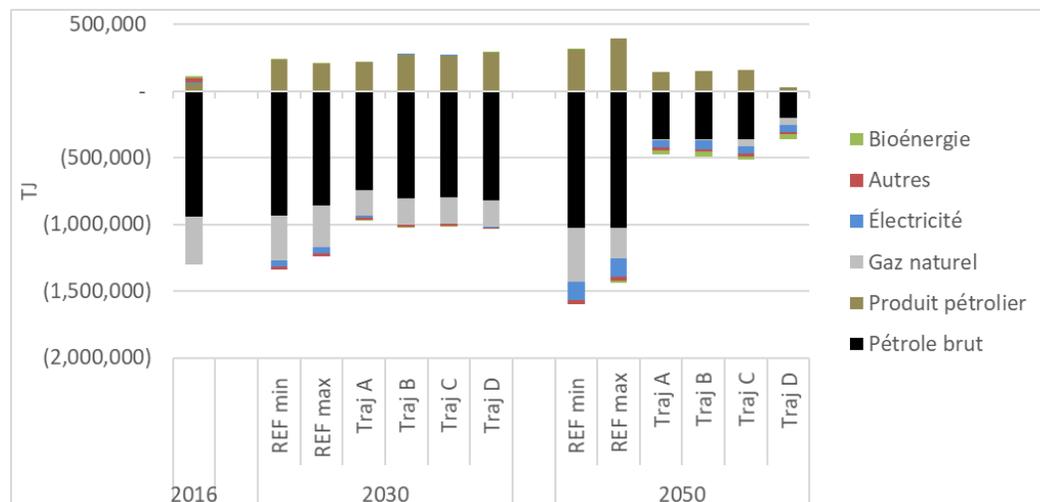
Graphique 1-9 - Consommation d'électricité par secteur



On observe également une réduction importante des importations de pétrole et de gaz naturel²⁸, surtout à l'horizon 2050, ce qui est en ligne avec les résultats de la modélisation précédente (graphique 1-10). En 2030 (pour l'ensemble des scénarios) et dans les scénarios de référence en 2050, le modèle conserve l'essentiel des capacités de raffinage et exporte les produits pétroliers raffinés excédentaires dégagés grâce à l'électrification des transports et des bâtiments. Dans les trajectoires A à C en 2050, cette capacité de raffinage est grandement diminuée, puis n'est presque plus utilisée dans la trajectoire D. De petites importations d'électricité apparaissent dans certains scénarios, surtout en 2050, car Churchill Falls est traitée comme une importation et le Québec réduit ses exportations vers les autres provinces en bas de ce niveau. Contrairement aux résultats obtenus en 2019, le Québec se tourne beaucoup moins vers l'exportation de son électricité.

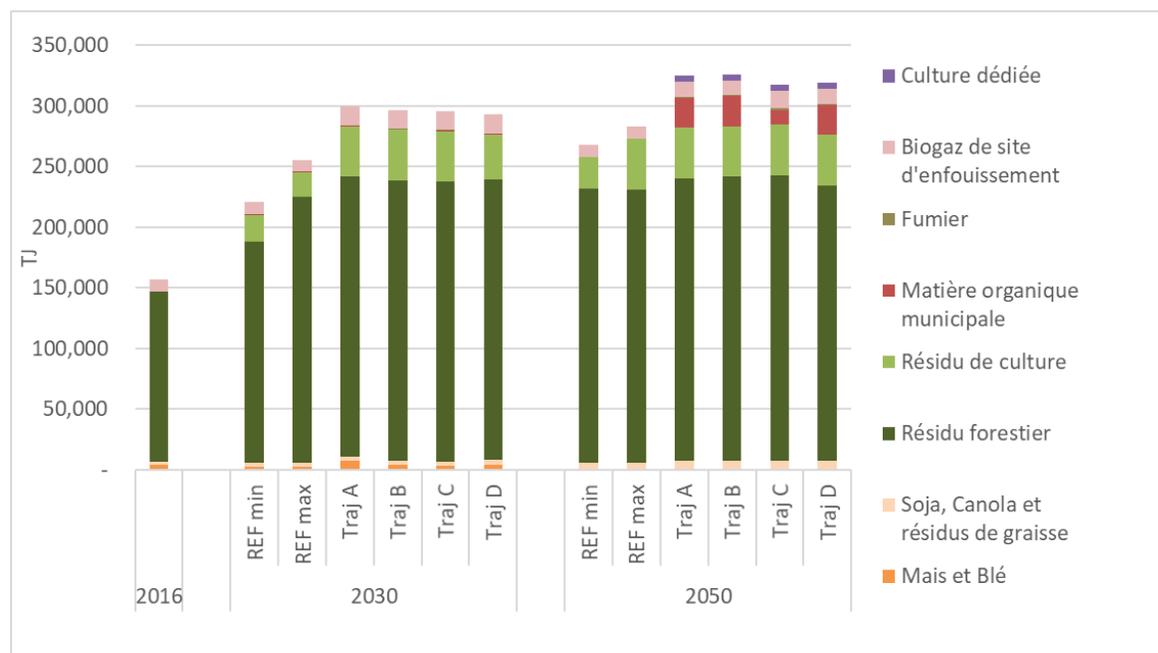
²⁸ Afin d'améliorer la lisibilité du graphique, le gaz naturel liquéfié (6 % des importations de gaz naturel en 2016) a été regroupé avec le reste du gaz naturel.

Graphique 1-10 - Exportations nettes (interprovincial et international)



Note : Les données négatives représentent des importations d'énergie.

Graphique 1-11 – Provenance de la bioénergie



Dans tous les scénarios, la bioénergie utilisée provient essentiellement de résidus forestiers (graphique 1-11). Le modèle utilise également des résidus de culture (2030+), du biogaz de site d'enfouissement, ainsi que de la matière organique municipale (surtout en 2050). L'utilisation de grains (dès 2016) et de cultures dédiées (2050) demeure très limitée pour l'ensemble des scénarios.

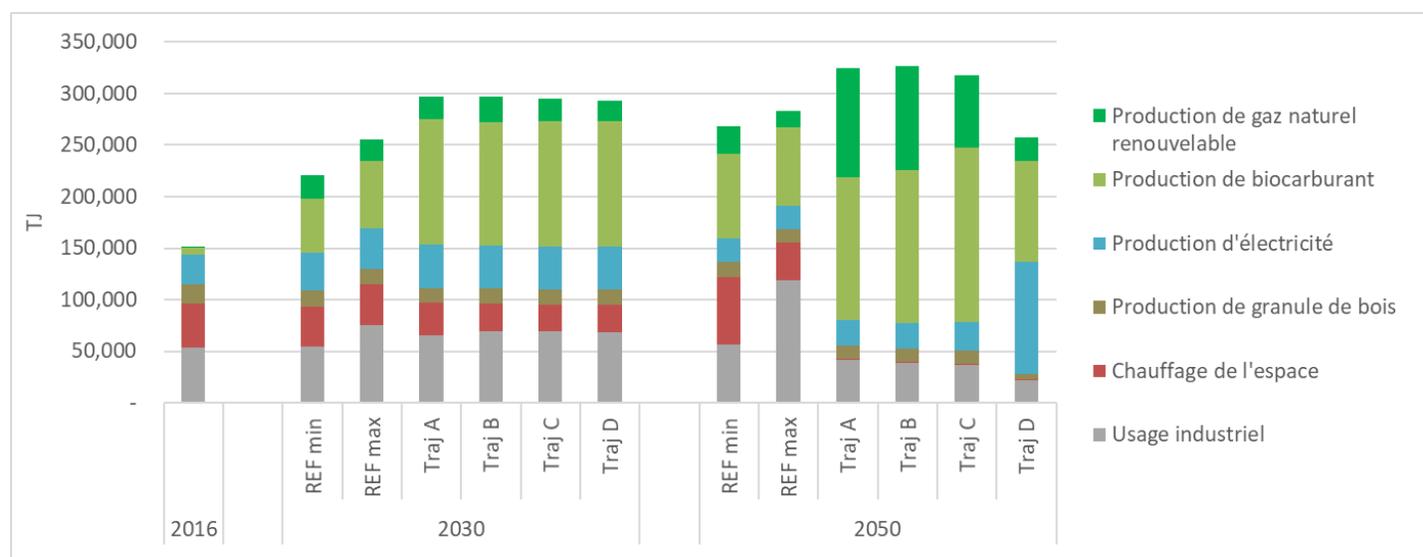
Dans le scénario de référence, la bioénergie est utilisée pour la production de biocarburants, le chauffage des bâtiments, la production d'électricité et des usages industriels (graphique 1-12). Le chauffage des bâtiments à la biomasse disparaît presque complètement dans les trajectoires de réduction à l'horizon 2050 car le modèle privilégie davantage l'électrification. À quantité limitée de biomasse, celle-ci est dirigée vers des usages qu'il est moins facile ou rentable d'électrifier. On voit apparaître dans les

trajectoires A à C une quantité beaucoup plus grande de biocarburants ainsi que de gaz naturel renouvelable (biométhane).

Le gaz naturel renouvelable (GNR) est d'abord dirigé vers les processus industriels pour lesquels la substitution vers une autre source d'énergie présente des barrières techniques importantes. Pour les applications qui ne présentent pas de contraintes techniques particulières, comme le chauffage des bâtiments ou la plupart des procédés industriels, le modèle préfère généralement une utilisation plus directe de la bioénergie (granules, copeaux, etc.) afin de réduire les coûts et améliorer le rendement énergétique global.

Dans la trajectoire D, la bioénergie est surtout utilisée pour la production d'électricité avec CSC (BECS) au détriment de tous les autres usages, car le modèle cherche à générer des émissions négatives, mais une quantité substantielle de biocarburants demeure.

Graphique 1-12 - Utilisation primaire de bioénergie par type (PJ)



Les principaux types, usages et secteurs pour la bioénergie à l'horizon 2050 sont les suivants :

Pour la trajectoire C :

- Carburants pour transport – diesel, kérosène pour avion, éthanol, méthanol (120 PJ)
- Liqueur de cuisson, procédés industriels (87 PJ)
- Biométhane, procédés industriels (39 PJ)
- Biomasse solide, procédés industriels (30 PJ)
- Production d'électricité (28 PJ)
- Autres types, secteurs et usages (3 PJ)

Pour la trajectoire D :

- Production d'électricité (109 PJ)
- Carburants pour transport – diesel, kérosène pour avion, éthanol, méthanol (99 PJ)
- Liqueur de cuisson, procédés industriels (92 PJ)
- Biomasse solide, procédés industriels (18 PJ)

- Biométhane, procédés industriels (11 PJ)
- Autres types, secteurs et usages (2 PJ)

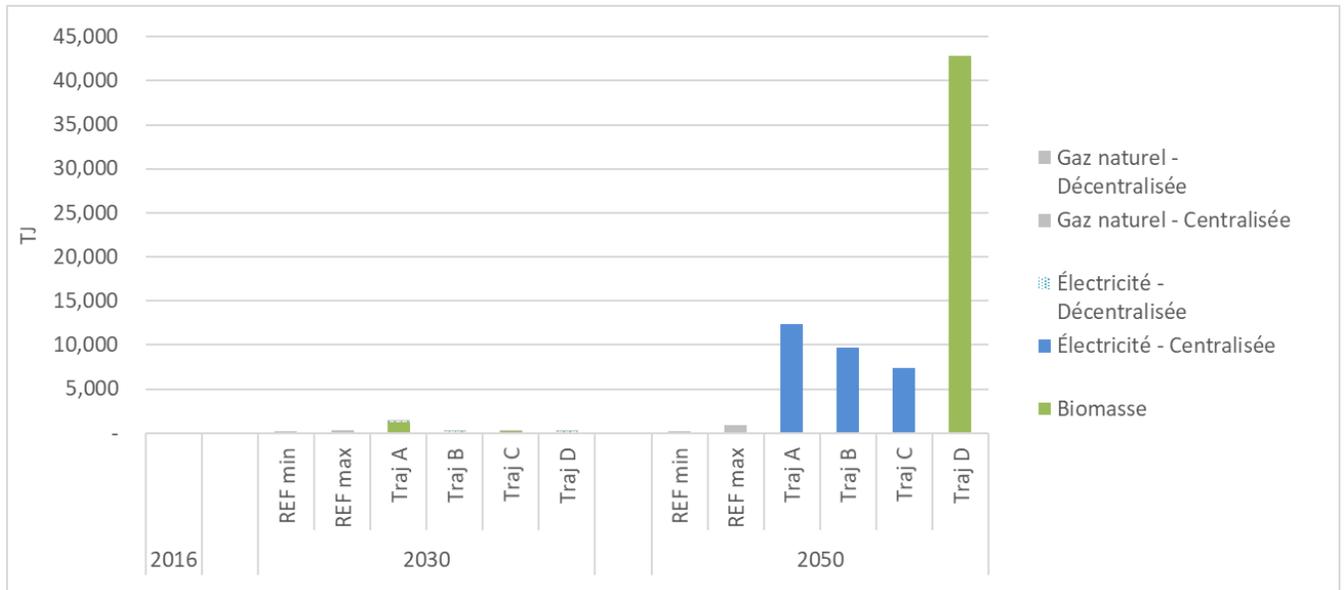
On note l'importance de la production d'électricité dans la trajectoire D afin de produire des émissions négatives (BECSC). Les autres secteurs où l'utilisation de la bioénergie est prédominante sont l'industrie, qui l'utilise sous presque toutes ses formes, et le secteur des transports qui utilise surtout différentes formes de biocarburants. L'essentiel du biométhane est utilisé en industrie, avec de petites quantités également en transport.

Pour clore cette sous-section, nous allons aborder la production et l'utilisation de l'hydrogène. Le graphique 1-13 présente la production d'hydrogène par type de production. Dans l'ensemble des scénarios, de l'hydrogène est produit, mais les quantités demeurent très faibles dans la majorité des cas. Les quantités deviennent plus importantes à l'horizon 2050 dans les trajectoires de réduction, mais néanmoins peu significatives dans le portrait énergétique total (3% dans la Trajectoire D). Les trajectoires A, B et C produisent de 7 à 12 PJ d'hydrogène par électrolyse, alors que la trajectoire D produit des quantités beaucoup plus importantes (43 PJ) en utilisant de la biomasse, un procédé qui permet de générer des émissions négatives lorsque le CO₂ issu de la méthanisation de la biomasse est capté et séquestré (méthanisation-reformage-captage).

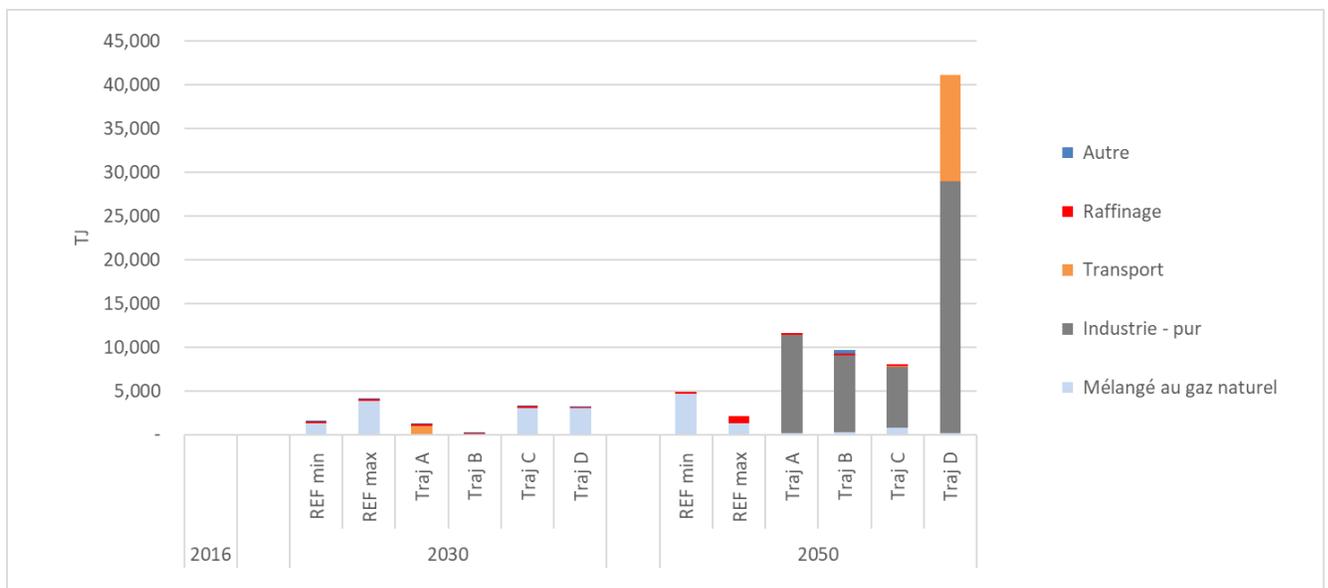
De façon générale, la production d'hydrogène à partir d'électricité est peu intéressante dans un contexte d'optimisation économique en raison de l'inefficacité énergétique de ce procédé, sauf lorsque de l'électricité excédentaire à faible coût est disponible, ce qui est rarement le cas au Québec en raison de la capacité de stockage des barrages hydroélectriques. Son usage comme énergie finale, par opposition à certains usages de l'hydrogène comme matière première (production de biocarburant, chimie verte, etc.), pourrait donc être relativement niché. D'autres moyens de production d'hydrogène sont toutefois à l'étude et pourraient changer la donne si des percées technologiques sont réalisées. Dans un contexte où des émissions négatives devraient être générées pour atteindre la carboneutralité sur le territoire du Québec, la méthanisation de la biomasse avec reformage et captage du CO₂ est une avenue intéressante, mais l'hydrogène se heurte alors à la compétition des autres usages de la biomasse et les quantités restent limitées. Une augmentation de la biomasse disponible pourrait toutefois favoriser cette forme d'hydrogène.

C'est à partir de 2040 que des quantités plus importantes d'hydrogène apparaissent pour les trajectoires A, B et C, et à partir de 2035 pour la Trajectoire D.

Graphique 1-13 – Production d’hydrogène par type (TJ)



Graphique 1-14 – Utilisation d’Hydrogène par type (TJ)

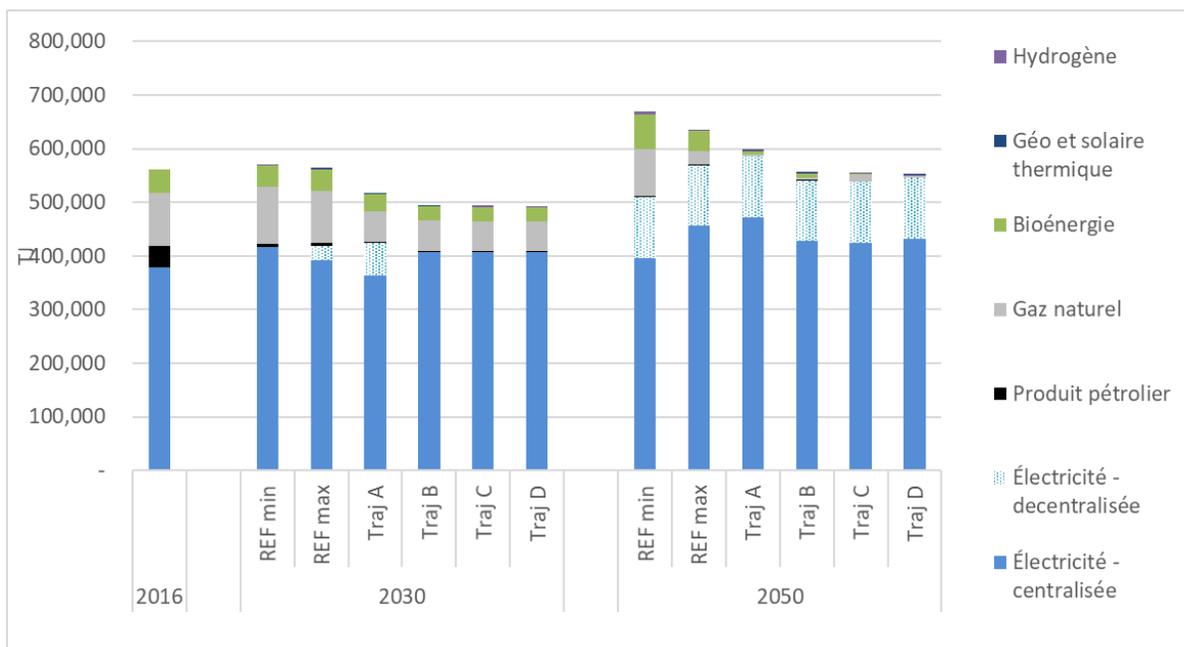


Dans les scénarios de référence (et dans les trajectoires de réduction avant 2050), l’hydrogène est surtout mélangé au gaz naturel de réseau (graphique 1-14). L’utilisation sous sa forme pure, comme énergie finale, apparaît surtout dans les trajectoires de réduction à l’horizon 2050, d’abord pour les procédés industriels, puis pour les transports dans la trajectoire D. Les deux sous-secteurs des transports où l’hydrogène effectue une percée sont le transport maritime domestique (6 500 TJ en 2050) et les camions lourds pour le transport des marchandises (5 500 TJ en 2050). Ces résultats sont le fruit du calcul d’optimisation du modèle en fonction des hypothèses économiques et technologiques actuelles et sont appelés à se modifier avec l’évolution des technologies de l’hydrogène et des solutions concurrentes (notamment l’électrification et les biocarburants).

BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS, COMMERCIAUX ET INSTITUTIONNELS

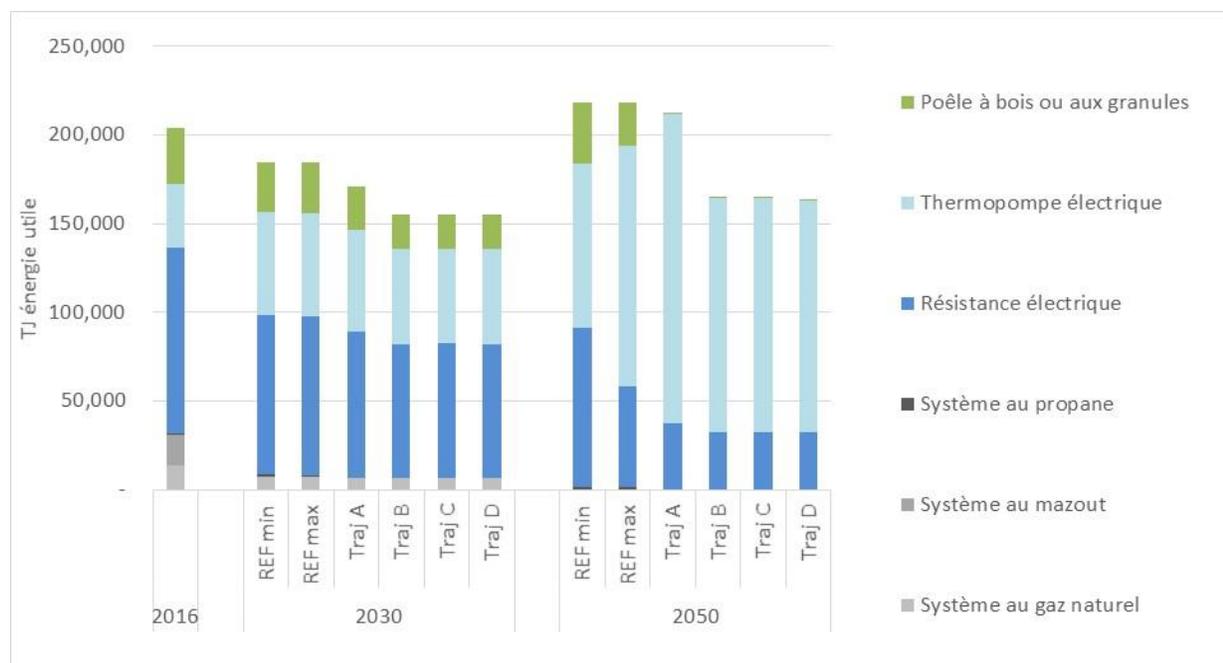
Contrairement à la dernière modélisation, qui montrait une baisse de consommation énergétique des bâtiments, la consommation d'énergie de ce secteur est maintenant en hausse dans le scénario de référence, surtout à l'horizon 2050 (graphique 1-15). Une bonne proportion de l'électricité utilisée dans ce secteur est toutefois de source décentralisée à l'horizon 2050. Déjà en diminution notable, les produits pétroliers et le gaz naturel non renouvelable disparaissent à toutes fins pratiques du bilan énergétique de ce secteur avec l'application de contraintes de réduction des GES à l'horizon 2050. La biomasse solide utilisée pour le chauffage des bâtiments est également en forte décroissance car redirigée vers les transports et le secteur industriel.

Graphique 1-15 - Consommation d'énergie finale – Secteurs résidentiel, commercial et institutionnel (PJ)



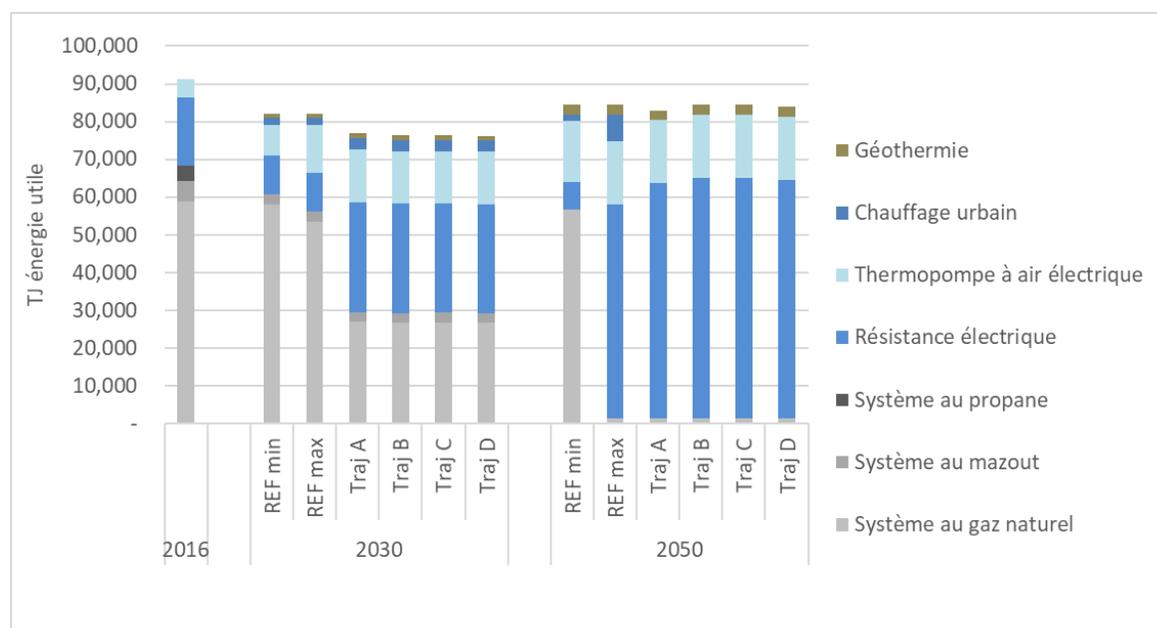
Le secteur résidentiel (graphique 1-16), en fort contraste avec les résultats de 2019, est profondément marqué par la pénétration des thermopompes qui deviennent à l'horizon 2050 le système de chauffage dominant, même dans la référence. Cette pénétration des thermopompes permet de contenir la croissance de la consommation d'électricité malgré l'électrification des bâtiments.

Graphique 1-16 - Systèmes de chauffage dans le secteur résidentiel



Dans le secteur commercial et institutionnel (graphique 1-17), le chauffage au gaz naturel qui est prédominant à l’heure actuelle est remplacé par le chauffage électrique, y compris dans le scénario de référence. Ceci s’explique notamment par l’augmentation de la tarification carbone qui s’applique au gaz naturel, alors qu’à l’inverse, les coûts marginaux de production de l’électricité diminuent en raison de la baisse des coûts de l’énergie solaire et éolienne. Dans les trajectoires de réduction, la pénétration de l’électricité devient très forte en 2050. La résistance électrique domine, mais les thermopompes se taillent tout de même une part de marché appréciable. On voit également poindre à l’horizon 2050 une quantité non négligeable de systèmes géothermiques.

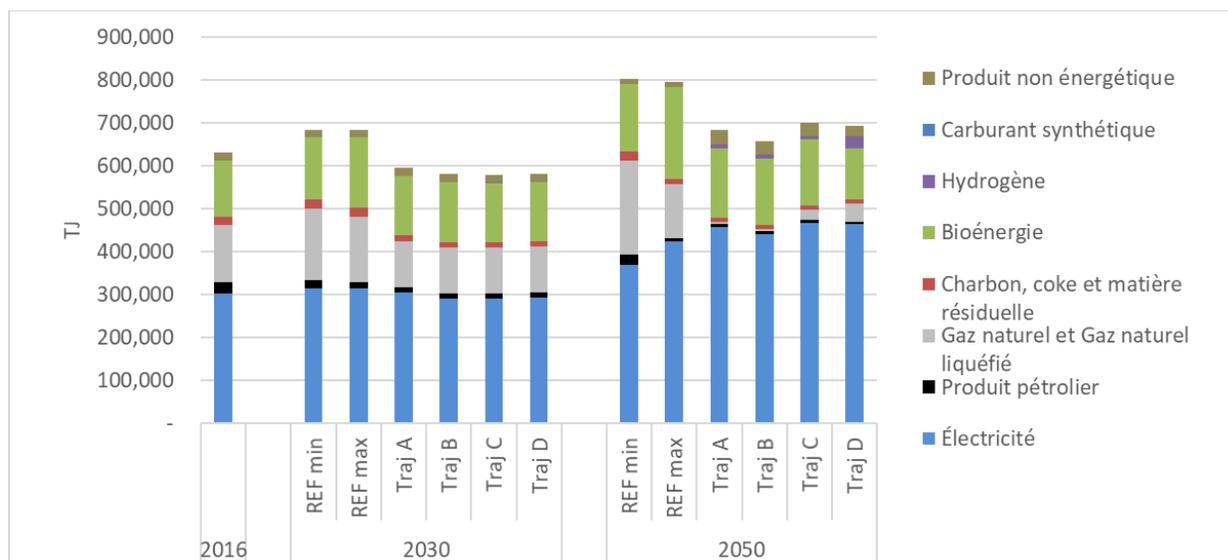
Graphique 1-17 - Systèmes de chauffage dans le secteur commercial et institutionnel



SECTEUR INDUSTRIEL

La consommation énergétique du secteur industriel dans le scénario de référence est en croissance jusqu'en 2050 (graphique 1-18). L'application de contraintes de réduction fait légèrement augmenter la part de l'électricité au détriment du gaz naturel, surtout à l'horizon 2050. La consommation totale d'énergie diminue aussi dans les trajectoires de réduction.

Graphique 1-18 - Consommation d'énergie finale – Secteur industriel et agricole (PJ)



Les émissions de procédé du secteur industriel (graphique 1-19) bénéficient du nouveau procédé de production d'aluminium avec anodes inertes (sous-secteur des métaux non ferreux). Cette technologie est graduellement incluse dans le scénario de référence à compter de 2030.

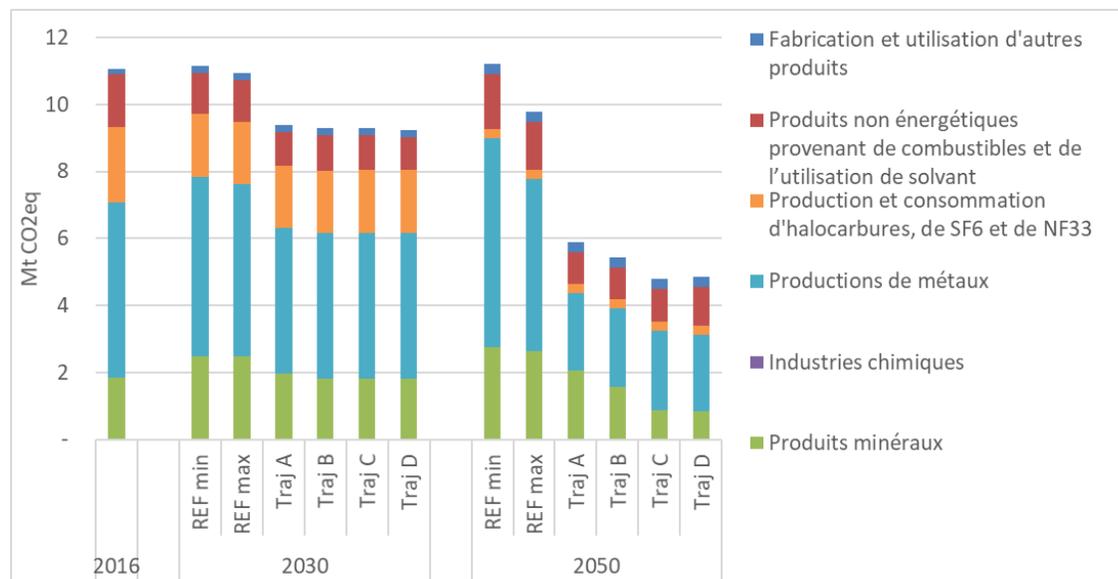
La fabrication du ciment offre la possibilité de remplacer le clinker par d'autres composantes, par exemple des sous-produits industriels (p. ex., scories) ou des polymères. De ce fait, les produits minéraux (ciment et chaux) connaissent une réduction substantielle de leurs émissions dans les scénarios plus contraignants. Les possibilités techniques de substitution ont toutefois été revues à la baisse depuis la modélisation de 2019 pour mieux tenir compte, notamment, des disponibilités des ajouts cimentaires, et ce sous-secteur affiche des réductions de GES moindres qu'antérieurement.

Les autres mesures incluent l'efficacité énergétique, la bioénergie (dont une utilisation moindre pour les pâtes et papiers qui permet une substitution du charbon dans d'autres sous-secteurs), le gaz liquide de source renouvelable (pour les sites éloignés tels que les mines), l'hydrogène, etc.

fe

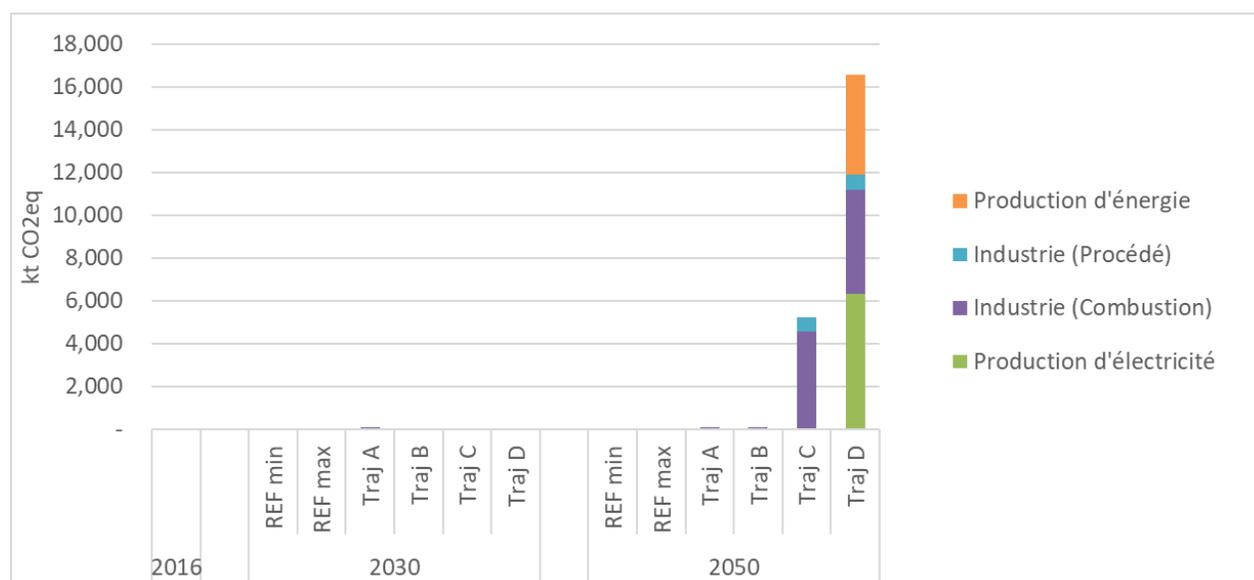
Rappelons que la réduction des halocarbures est incluse dans le scénario de référence du modèle.

Graphique 1-19 – Émissions de procédé (MtCO₂éq)



À l’horizon 2050, la CSC apparaît dans le secteur industriel, surtout en combustion (graphique 1-20). Les cimenteries captent également des émissions de procédé. Dans la trajectoire D, la CSC est également utilisée pour produire des émissions négatives en production d’électricité (à partir de la biomasse) et en production d’énergie (hydrogène, méthane).

Graphique 1-20 – Émissions de CO₂ captées par secteur / usage



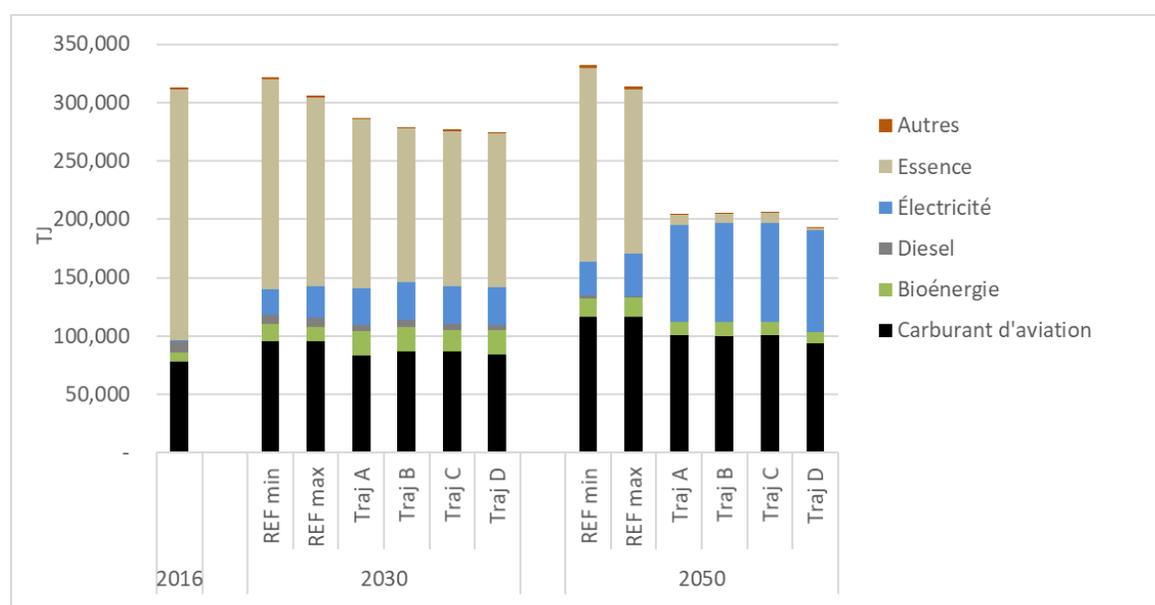
TRANSPORTS

Le transport des passagers s'électrifie graduellement dans le scénario de référence (graphique 1-21). Les contraintes de réduction augmentent la part du transport électrifié, surtout à l'horizon 2050. Comme les moteurs électriques sont beaucoup plus efficaces que les moteurs conventionnels, il s'ensuit une baisse considérable de l'énergie totale consommée pour ce sous-secteur.

Seul le carburant d'aviation diminue très peu et celui-ci constitue l'essentiel de la consommation de carburant d'origine fossile à l'horizon 2050.

L'hydrogène est peu sollicité, car des options d'électrification moins coûteuses et plus efficaces d'un point de vue énergétique sont disponibles pour l'ensemble des sous-secteurs importants.

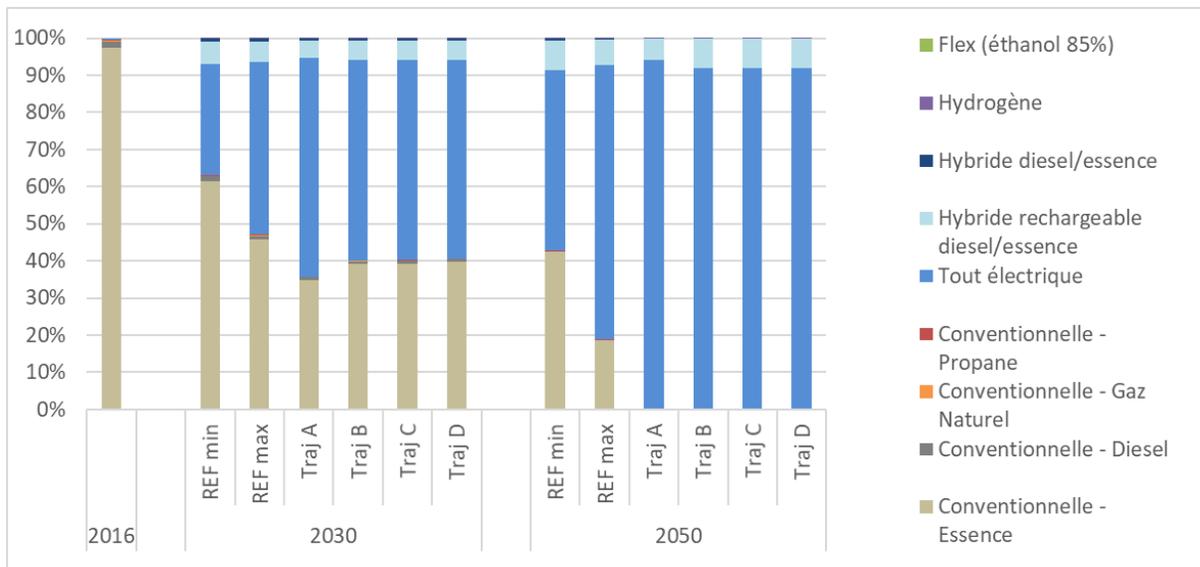
Graphique 1-21 - Consommation d'énergie finale – Transport des passagers, par source (PJ)



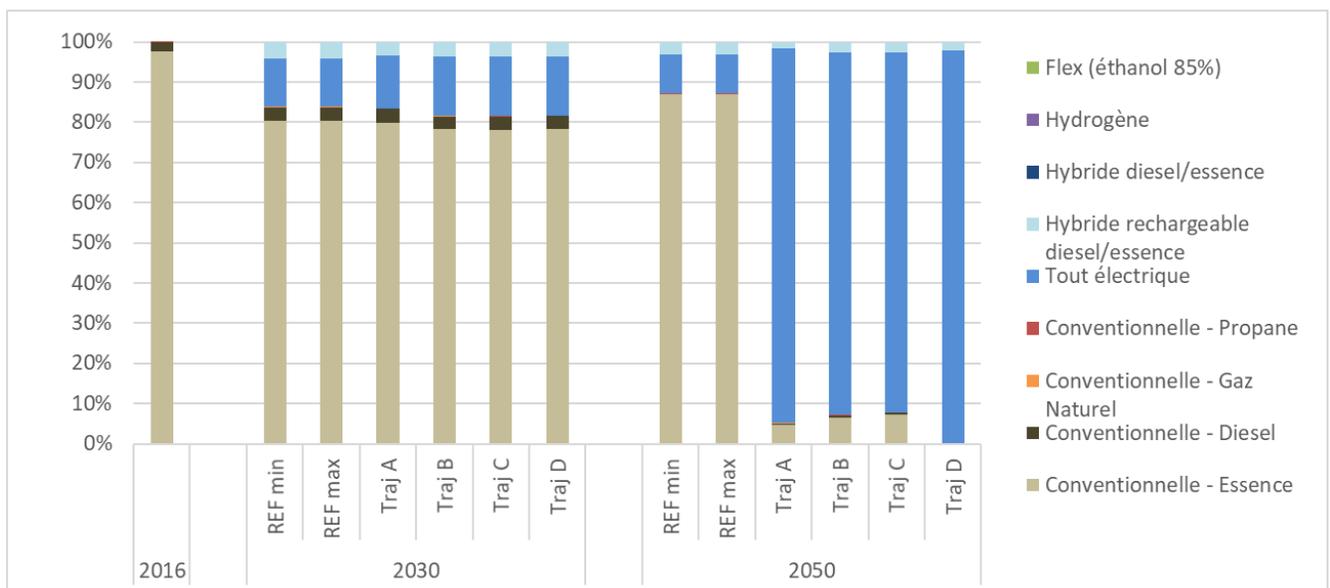
Le graphique 1-22 montre les parts de marché pour les automobiles utilisés dans le transport des passagers. Il s'agit des parts de la demande totale en personnes-kilomètres pour une année qui sont satisfaites par les différents types de transport. Ces parts sont liées en théorie au parc de véhicules et à la quantité moyenne de personnes-kilomètres par véhicule. On y voit la transition graduelle des moteurs à essence vers les moteurs électriques. À l'horizon 2050, presque tout le parc automobile est électrifié dans les trajectoires de réduction. Contrairement à la modélisation de 2019, les autres options, dont les voitures à l'éthanol, jouent un rôle négligeable. Cela peut être dû à la baisse du surcoût pour les véhicules électriques. L'éthanol peut toutefois être utilisé en petite quantité en mélange avec de l'essence dans des moteurs conventionnels.

Du côté des camions légers pour passagers (graphique 1-23), la même tendance à l'électrification apparaît, mais plus lentement. Le parc n'est réellement électrifié qu'à l'horizon 2050 dans les trajectoires de réduction. Le diesel est le premier carburant fossile à disparaître (il n'y en a presque plus dans la référence en 2050), suivi de l'essence.

Graphique 1-22 - Parts de marché (composition du parc) des technologies de transport des passagers – autos (millions de personnes-kilomètres)



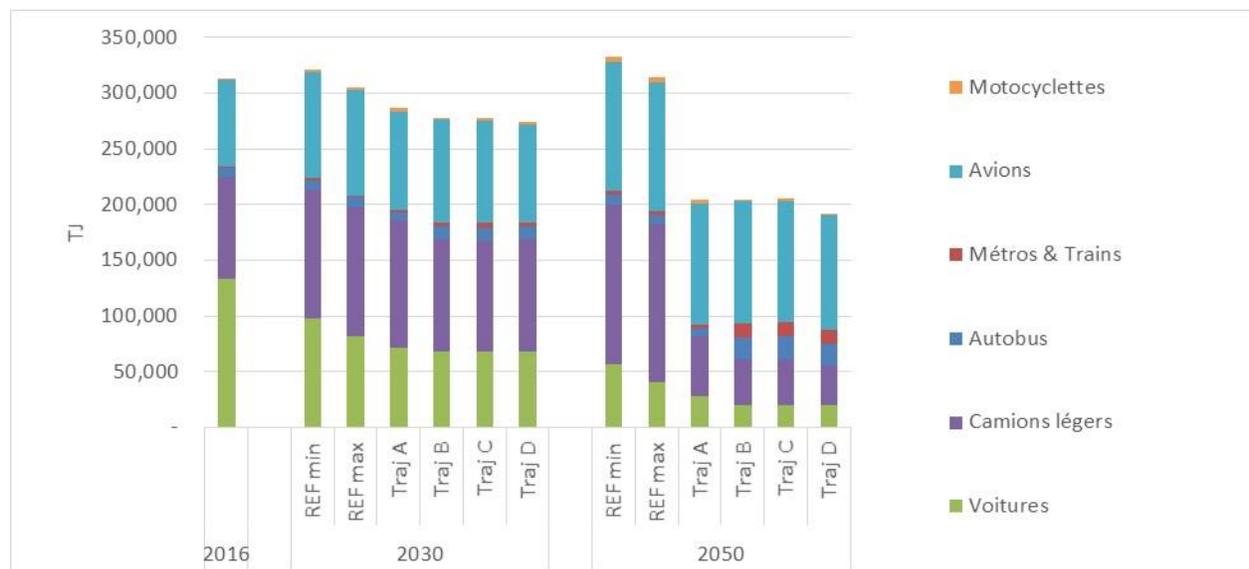
Graphique 1-23 - Parts de marché (composition du parc) des technologies de transport des passagers – camions légers (millions de personnes-kilomètres)



Le graphique 1-24 présente la consommation énergétique par mode pour le transport des passagers. Il est à noter que le modèle ne suppose pas de transferts modaux, sauf de manière exogène pour les trajectoires B à D. Les variations de consommation par mode s'expliquent donc surtout par l'application de mesures technologiques (efficacité des moteurs, électrification).

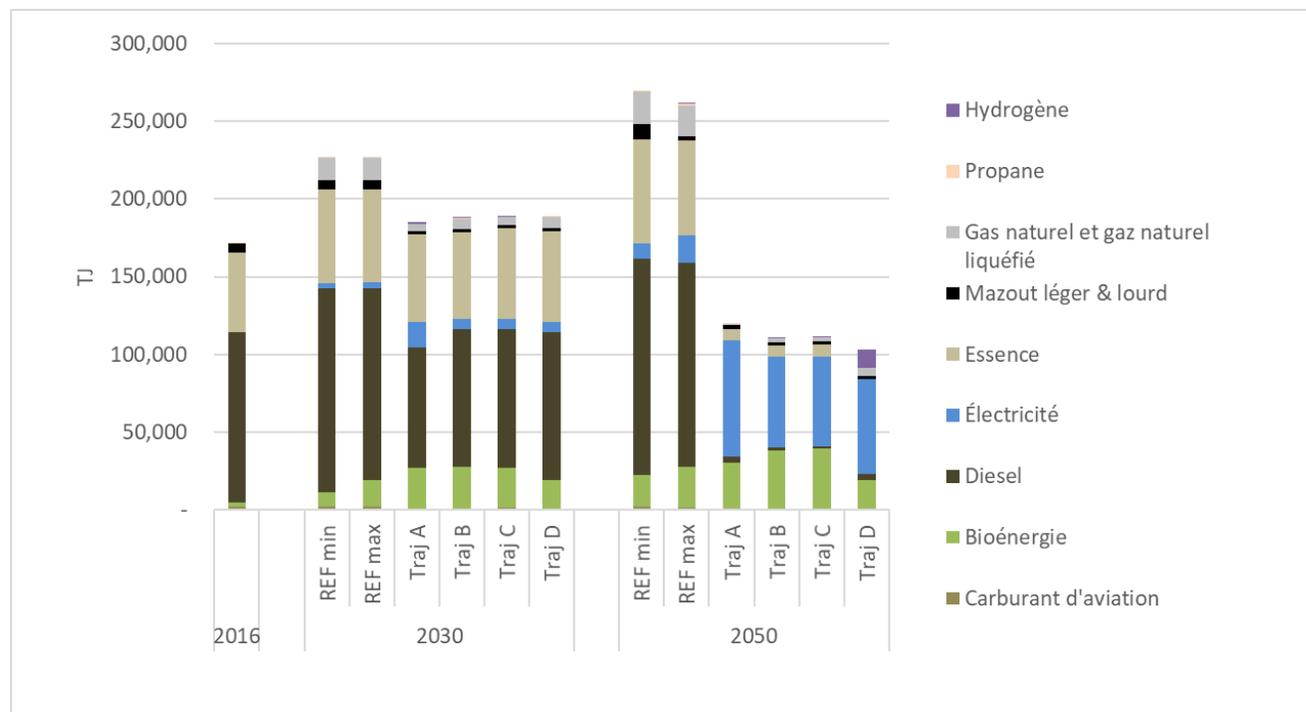
L'énergie consommée par les voitures et camions légers diminue de manière importante en raison de l'électrification du parc automobile qui améliore grandement l'efficacité des moteurs. On note également une légère baisse à partir de la trajectoire B, surtout en 2050, en raison d'un transfert modal vers les transports en commun, ce qui augmente la consommation des métros, trains et autobus. La consommation énergétique des avions est relativement incompressible dans le modèle, d'une part parce que le taux de substitution technique maximal du carburant fossile par du biocarburant est établi à 50 %, mais surtout parce que la bioénergie disponible est limitée et utilisée d'abord dans d'autres secteurs.

Graphique 1-24 - Consommation d'énergie finale – Transport des passagers, par mode (PJ)



Pour le transport des marchandises, l'électrification connaît une percée importante après l'application des contraintes de réduction (graphique 1-25). L'électricité apparaît dès 2025 et augmente progressivement jusqu'à dominer ce secteur comme source d'énergie à l'horizon 2050. L'électrification vient surtout réduire la consommation de diesel et de gaz naturel par rapport au scénario de référence. Les biocarburants sont également en croissance.

Graphique 1-25 - Consommation d'énergie finale – Transport des marchandises, par source (PJ)

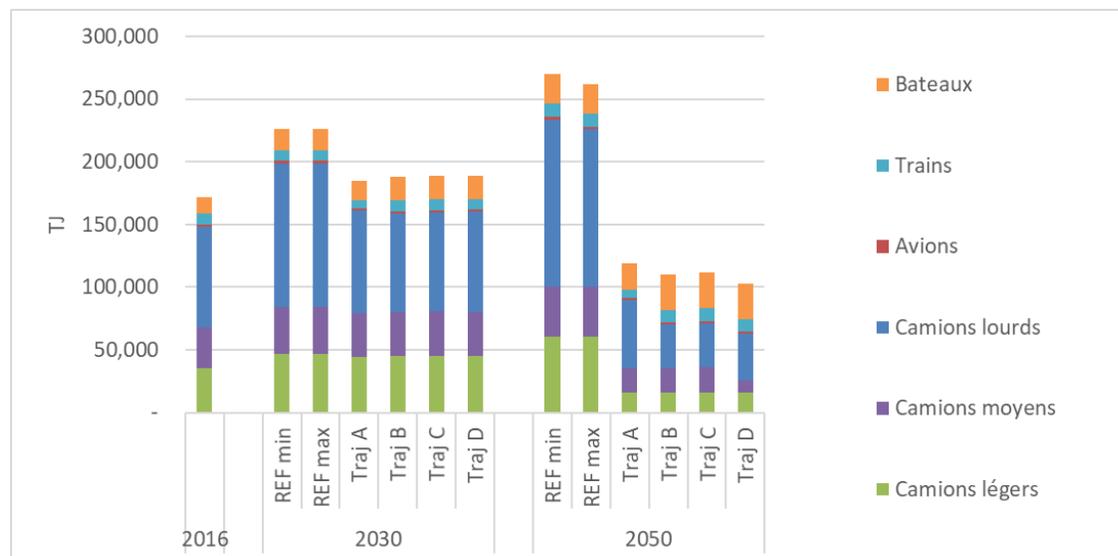


L'hydrogène occupe un marché de niche, mais devient plus significatif dans la trajectoire D, alors que sa production permet de générer des émissions négatives pour atteindre la carboneutralité²⁹. L'utilisation de carburants à base de bioénergie en est diminuée d'autant dans ce même scénario en raison des contraintes sur la disponibilité de la bioénergie.

Comme le montre le graphique 1-26, la substitution vers les sources d'énergie propres s'effectue surtout dans les sous-secteurs du camionnage. Il n'y a pas de mesures de transferts modaux entre le scénario de référence et la Trajectoire A, la différence d'énergie consommée entre les deux s'expliquant essentiellement par l'efficacité des moteurs électriques.

²⁹ La méthanisation de la bioénergie et le reformage du méthane ainsi obtenu permettent d'obtenir de l'hydrogène et du CO₂. Ce CO₂ est ensuite capté et séquestré. Comme du CO₂ atmosphérique a été retiré auparavant lors de l'étape de croissance de bioénergie et que ce CO₂ n'est pas émis de nouveau, il s'ensuit une réduction nette des concentrations atmosphériques de CO₂ sur l'ensemble du cycle.

Graphique 1-26 - Consommation d'énergie finale – Transport des marchandises, par mode (TJ)

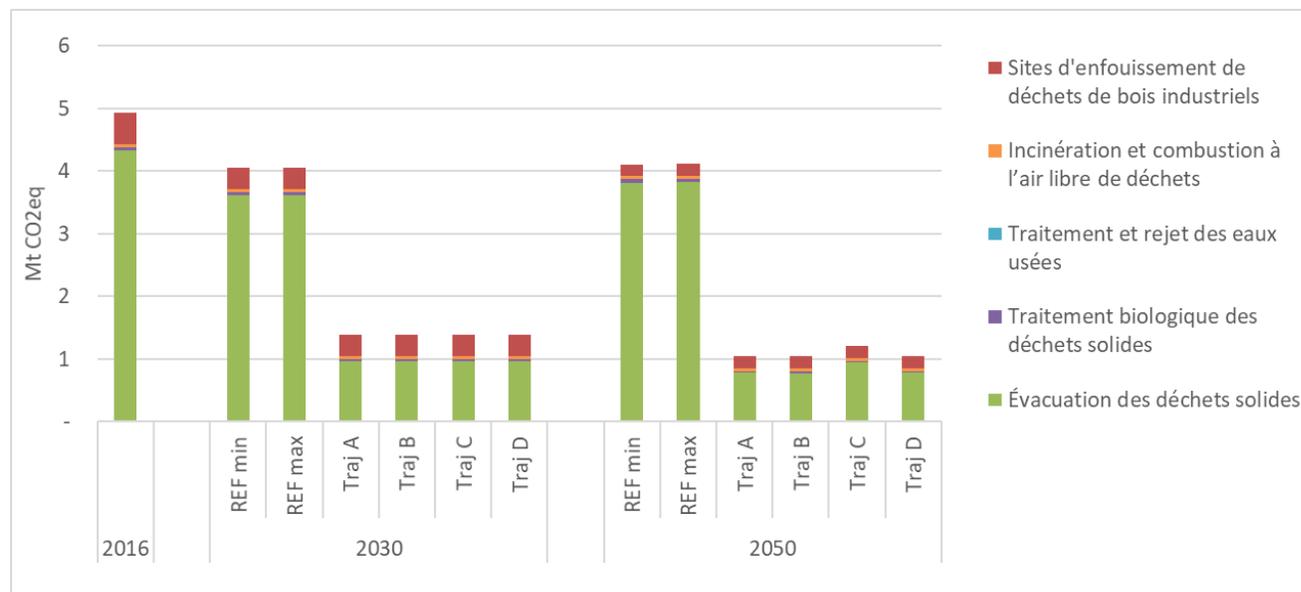


SECTEURS NON ÉNERGÉTIQUES (DÉCHETS, AGRICOLE)

Le secteur des déchets est dominé par les émissions provenant des déchets solides. Contrairement à l'exercice de modélisation précédent, qui voyait une croissance importante des émissions de ce secteur, celles-ci sont maintenant décroissantes dans le scénario de référence (graphique 1-27), en raison des mesures existantes visant à limiter les émissions provenant de l'enfouissement (Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles, Programme de traitement de la matière organique par biométhanisation et compostage (PTMOBC)).

Ces émissions sont également réduites davantage dans les trajectoires de réduction de GES. Les mesures considérées dans le modèle pour atteindre ces réductions importantes incluent le captage de biogaz, le compostage ainsi que la valorisation énergétique.

Graphique 1-27 – Émissions du secteur des déchets (MtCO₂eq)



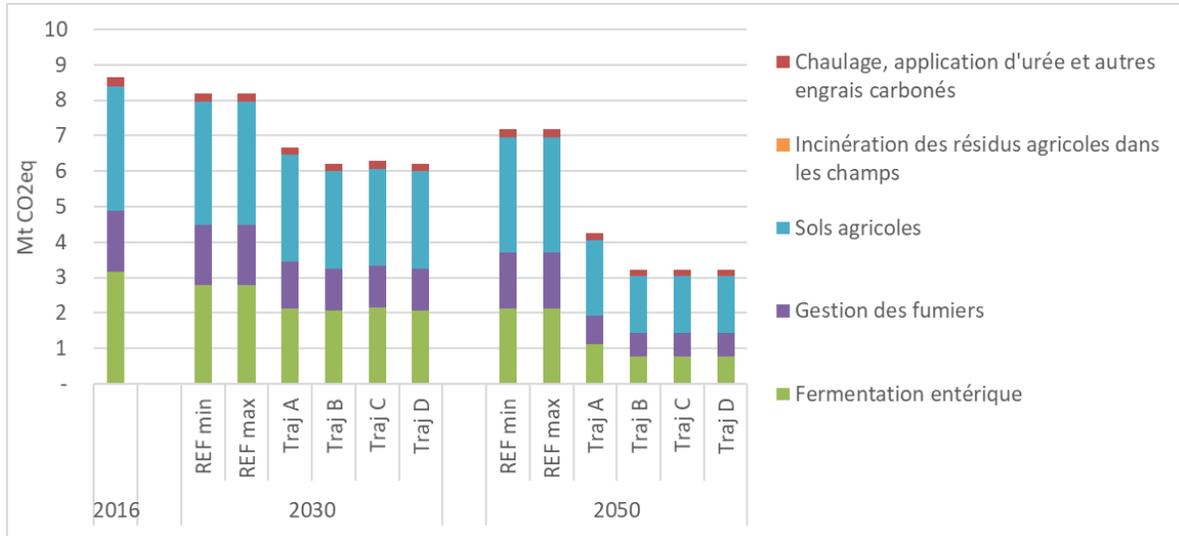
Pour le secteur agricole (graphique 1-28), les mesures de réduction sont appliquées pour l'ensemble des trajectoires de réduction de GES. Notons que les émissions agricoles non énergétiques offrent un potentiel de réduction moins élevé que les autres secteurs. Ce secteur, relativement petit dans le scénario de référence, voit son importance relative dans l'inventaire des émissions croître rapidement au fur et à mesure que des réductions d'émissions de GES sont imposées à l'ensemble des secteurs. Les réductions d'émissions proviennent principalement de la biométhanisation du fumier, mais également d'additifs alimentaires pour réduire la fermentation entérique et d'une meilleure gestion des sols³⁰.

Plusieurs de ces mesures sont relativement peu coûteuses mais comportent des barrières à l'adoption et/ou des composantes comportementales importantes. Pour l'agriculture de précision, par exemple, il ne suffit pas d'installer l'équipement nécessaire, mais également de changer de façon durable les pratiques culturales afin de minimiser l'utilisation d'engrais.

La réduction du gaspillage alimentaire et l'utilisation accrue de protéines de source végétale pour l'alimentation humaine ont un impact important sur les émissions de ce secteur, surtout à l'horizon 2050. Les impacts en termes de réductions de GES se retrouvent non seulement au niveau de la fermentation entérique et de la gestion des fumiers, mais également au niveau des sols agricoles, car il faut cultiver beaucoup moins de grains pour nourrir le bétail.

³⁰ La mesure de gestion des sols exclut les mesures touchant l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie (LULUCF) et notamment la séquestration du carbone dans le sol. Elle vise principalement la réduction des émissions découlant de l'utilisation d'engrais (p. ex., utilisation d'engrais à diffusion lente, agriculture de précision, ciblage des zones où appliquer les engrais, etc.).

Graphique 1-28 – Émissions du secteur agricole



PRIORISATION DES MESURES ET IMPACTS POUR LE QUÉBEC

PRIORISATION DES MESURES

Nous avons présenté, dans l'édition 2019 du rapport, une priorisation des mesures de réduction des GES, sur la base des résultats de la modélisation. Cette priorisation reposait sur un ensemble de facteurs, notamment :

- **LES OPPORTUNITÉS PERDUES** : Il est essentiel de minimiser les opportunités perdues lors d'investissements importants, par exemple la construction de nouveaux bâtiments, la construction ou la réfection majeure d'usines, les infrastructures de transport, etc. Ces investissements auront des répercussions jusqu'en 2050 et au-delà et il est crucial de choisir dès maintenant les meilleures options pour atteindre les objectifs de réduction en 2050.
- **L'IMPORTANCE DE DÉVELOPPER L'ENSEMBLE DES SECTEURS ET DES OPTIONS** : L'ampleur du défi à surmonter pour atteindre les cibles et objectifs de réduction du Québec, surtout à l'horizon 2050, ne laisse pas la possibilité d'écarter quelque option que ce soit a priori. L'ensemble des options et des secteurs devraient être envisagés et développés, à divers niveaux (aide à l'implantation, réglementation, projets pilotes, recherche et développement, etc.).
- **L'ACCEPTABILITÉ SOCIALE** : Certaines options, notamment le CSC et la BECSC, peuvent susciter des enjeux importants d'acceptabilité sociale liés à la construction de gazoducs et aux craintes à propos de l'injection aux sites de séquestration. Pour l'instant, ces options pourraient être mises de l'avant par la réalisation de projets pilotes pour évaluer les éventuels enjeux.
- **LA CONTINUITÉ À COURT TERME** : La plupart des actions proposées à court terme s'inscrivent en continuité avec les actions en cours et prévues par le gouvernement du Québec (p. ex. l'électrification des transports), ou ont déjà été étudiées sérieusement par le passé (p. ex. la cotation obligatoire des bâtiments).
- **LA MATURITÉ TECHNOLOGIQUE** : Les options moins matures nécessitent des études et projets pilotes à court terme avant leur déploiement à large échelle. Cela est particulièrement vrai pour le secteur agricole, où l'impact des mesures et leur applicabilité dépendent d'une multitude de facteurs, dont le climat, les types de sols, de bétail/cultures, d'installations, etc. Les résultats d'études actuellement en cours au Québec permettront de mieux cibler les options les plus adaptées au contexte québécois.

Le tableau de l'annexe 2 présente les options à prioriser pour l'ensemble des secteurs (et certains sous-secteurs) à court terme, moyen terme et long terme.³¹ La mise à jour de la modélisation ne change pas de

³¹ Notons pour terminer que le gaz naturel renouvelable (GNR) n'apparaît pas nommément dans ce tableau, car il rejoint l'ensemble des secteurs. On peut le produire, par exemple, par captage aux sites d'enfouissement et de traitement des eaux, par gazéification des déchets ou de la biomasse (agricole, forestière), ou encore par biométhanisation du fumier et du lisier. On peut l'utiliser dans les bâtiments, dans les transports, dans l'industrie et dans le secteur agricole. Il peut même être utilisé pour produire de l'électricité (bien qu'une utilisation directe, notamment en industrie, soit beaucoup plus probable). Son déploiement dépendra d'une multitude de facteurs, dont l'évolution des technologies de gazéification et le déploiement d'options qui ont besoin des mêmes intrants

manière fondamentale les résultats de l'exercice de priorisation réalisé précédemment en 2019. Nous pouvons toutefois noter quelques différences importantes qui pourraient nuancer certaines recommandations :

- La tendance lourde à l'électrification des transports se confirme et s'accélère. Les biocarburants et l'hydrogène ont quant à eux des parts de marché plus limitées. Le mode de production privilégié par le modèle pour l'hydrogène est à partir de la biomasse, si le CSC est possible, ou par électrolyse dans le cas contraire.
- La forte pénétration des thermopompes dans le résidentiel qui ressort encore plus indique qu'il faut privilégier cette option lors de conversions énergétiques vers l'électricité, ainsi que dans la nouvelle construction. La technologie pourrait également être davantage soutenue pour favoriser les installations dans le parc électrique existant.
- La BECSC et le CAD (qui n'avaient pas été testés précédemment) deviennent importants à l'horizon 2050 pour l'atteinte de la carboneutralité sans recourir à l'achat de réductions à l'étranger. Un projet pilote de BECSC devrait être mis en place afin de développer cette option pour le long terme. La CSC a également sa place pour l'atteinte de niveaux de réduction supérieurs. Quant au CAD, une veille technologique est suffisante pour l'instant. Rappelons que les solutions climatiques naturelles sont exclues de la modélisation mais qu'elles pourraient également contribuer aux émissions négatives requises pour l'atteinte de la carboneutralité.
- Il faut intensifier les efforts pour intégrer les énergies intermittentes (solaire, éolien) par le déploiement de programmes de gestion de la pointe, équipements de stockage, etc. car ces énergies pourraient constituer une part très importante de la nouvelle production électrique.

(p. ex. compostage qui réduit le potentiel de captage aux sites d'enfouissement) ou qui le concurrencent pour l'utilisation finale (p. ex. électrification des transports et des bâtiments).

ATTEINTE DE LA CARBONEUTRALITÉ

La trajectoire D permet d'entrevoir l'atteinte de la carboneutralité au Québec, bien qu'il reste encore beaucoup d'étapes à franchir. Il faudra tout d'abord réduire de manière importante nos émissions de GES, vraisemblablement sous la barre des 20 Mt. Cela pourra se faire principalement à travers le recours à la réduction de la demande et à des technologies de réduction des émissions telles que l'efficacité énergétique, l'électrification, l'utilisation d'énergies renouvelables et des technologies spécifiques aux secteurs non énergétiques (procédés industriels, agriculture, déchets). Le captage et la séquestration d'une partie des émissions résiduelles (CSC), en aval, seront nécessaires selon les travaux réalisés pour aller plus loin et pour atteindre la carboneutralité au Québec.

Pendant que l'économie se décarbonise, il faudra également commencer à déployer, vers 2035, des solutions afin de générer des émissions négatives qui permettront de contrebalancer les émissions des sous-secteurs qui ne peuvent être complètement décarbonisés. On pense entre autres à certains procédés industriels, à l'agriculture (émissions entériques, sols) et à certains sous-secteurs des transports, dont l'aviation. Il est possible de permettre à ces sous-secteurs d'émettre une certaine quantité de GES tout en atteignant la carboneutralité si cette même quantité est retirée de l'atmosphère ailleurs, puis séquestrée de manière permanente.

Les deux technologies les plus discutées dans l'optique de générer des émissions négatives ont été intégrées au modèle : la BECSC et le CAD :

- La **BECSC** est typiquement présentée comme l'utilisation de bioénergie pour générer de l'électricité, avec captage et séquestration des émissions de CO₂. On peut toutefois aussi envisager d'utiliser la bioénergie pour générer de la chaleur, par exemple pour un procédé en industrie, puis capter l'ensemble des GES émis sur le site et les séquestrer. Une troisième option est d'utiliser la même bioénergie pour générer de l'hydrogène et, encore une fois, capter et séquestrer les émissions de GES. Comme la biomasse de laquelle est tirée la bioénergie a absorbé du carbone de l'atmosphère durant sa période de croissance et que ce carbone est séquestré géologiquement à la fin du cycle, l'ensemble du cycle résulte en un retrait net de carbone contenu par l'atmosphère. Technologie très présente dans les modélisations étudiées par le GIEC, la BECSC demeure en développement et, selon l'ampleur du déploiement envisagé, pourrait rencontrer des difficultés d'approvisionnement en bioénergie et compétitionner avec d'autres usages des terres. Rappelons toutefois que le potentiel de bioénergie utilisé pour la modélisation inclut essentiellement de la matière résiduelle.
- Le **CAD** propose de capter le carbone directement dans l'atmosphère, puis de le séquestrer. Le captage se fait au moyen d'un solvant qui absorbe le CO₂ atmosphérique. Comme les concentrations atmosphériques de CO₂ sont très petites par rapport à celles à la sortie de cheminée d'une usine, par exemple, le captage requiert l'utilisation d'un système de ventilation puissant pour qu'un volume suffisant d'air entre en contact avec le solvant. L'application de chaleur permet alors de libérer et capter le CO₂, ce qui régénère le solvant qui peut être réutilisé. Le CAD est une technologie toujours en développement, qui reste aujourd'hui très coûteuse et très énergivore, ce qui en fait une solution de dernier recours.

Mis à part les technologies comme la BECSC et le CAD, les solutions climatiques naturelles pourraient également contribuer aux émissions négatives requises pour l'atteinte de la carboneutralité, sous réserve

de la façon dont les flux négatifs et positifs du secteur LULUCF seront considérés dans leur ensemble. Elles peuvent coûter moins cher que les solutions technologiques, certaines sont déjà matures (p. ex. le boisement) et elles peuvent également amener des co-bénéfices importants. Toutefois, elles peuvent aussi demander beaucoup de temps à mettre en place et soulever des enjeux par rapport à la permanence de la séquestration et la compétition pour l'usage des terres, de même que relativement à la dynamique temporelle du carbone. Le manque de données et d'analyses pour le Québec font en sorte qu'elles ont été exclues de la modélisation dans le cadre des présents travaux.

Outre la séquestration du carbone, il est également possible de le valoriser. Toutefois, les applications sont très limitées et généralement avec des cycles de carbone très courts, ce qui signifie que le carbone est émis à nouveau dans l'atmosphère à plus ou moins brève échéance. La recherche est encore embryonnaire, mais pourrait donner lieu à des applications permettant de fixer le carbone à très long terme en grandes quantités. Pour l'instant, la valorisation du carbone permettant une fixation à long terme se limite à certains ajouts cimentaires dans le modèle.

La séquestration géologique du carbone offre une meilleure assurance de permanence que les solutions climatiques naturelles, mais celle-ci n'est pas nécessairement garantie pour autant. Les caractéristiques des formations géologiques déterminent les quantités de carbone injectables, la facilité d'injection, la proportion du carbone injecté qui sera fixée chimiquement de manière permanente, et les risques d'une migration relativement rapide du carbone vers la surface. Ces éléments devront être surveillés étroitement et les sites d'injection, soigneusement choisis.

Un autre enjeu soulevé par la séquestration est la capacité de stockage géologique. Cependant, même en ne retenant que la limite inférieure du potentiel de séquestration estimé pour le Québec, soit 890 Mt³², le Québec aurait suffisamment de capacité jusqu'en 2100 environ selon la trajectoire D (en supposant une séquestration annuelle au niveau de 2050). La limite supérieure de séquestration, elle, est 10 fois plus élevée. Il pourrait toutefois venir un moment où d'autres solutions devront être mises en œuvre (valorisation durable du carbone, solutions climatiques naturelles, exportation du carbone vers des régions ayant un potentiel géologique beaucoup plus élevé, comme la Saskatchewan), surtout si, au-delà de la carboneutralité, des émissions nettes négatives devaient être visées dans la deuxième moitié du siècle.

Dans les trois principales solutions envisagées dans ce rapport pour l'atteinte de la carboneutralité, soit la BECSC en industrie, la BECSC en production d'énergie (électricité, chaleur ou hydrogène) et le CAD, il apparaît clairement que la BECSC en industrie est la plus souhaitable. La production directe de chaleur est l'utilisation énergétique la plus efficace pour la biomasse et la solution privilégiée par le modèle.

Toutefois, lorsque le plein potentiel est atteint en industrie, des émissions négatives additionnelles sont requises. La production d'électricité ou d'hydrogène à partir de bioénergie est relativement peu efficace, mais permet tout de même de générer de l'énergie en plus des émissions négatives.

Comme nous l'avons mentionné, le CAD requiert des quantités importantes d'énergie pour capter le CO₂ et est vu pour l'instant comme une solution de dernier recours. C'est la plus inefficace des trois options.

³² Voir « Captage et séquestration du carbone » à l'annexe 1.

Notons que chacune de ces trois options requiert également des quantités importantes d'énergie pour le captage et traitement du CO₂, son transport jusqu'au site d'injection et sa séquestration à long terme.

En définitive, bien que l'atteinte de la carboneutralité à l'horizon 2050 représente un important défi pour tous les États, le Québec paraît particulièrement bien positionné pour le relever.

D'abord, son approvisionnement en électricité est déjà décarbonisé à presque 100 %³³, ce qui constitue une des premières étapes vers la carboneutralité. À l'échelle mondiale, près des deux tiers³⁴ de la production électrique reposent encore sur les combustibles fossiles. Ensuite, pour l'électrification de son économie, autre pilier de la carboneutralité, le Québec peut compter sur un approvisionnement en électricité propre qui est à la fois abondant, fiable et abordable. D'ailleurs, l'électrification est relativement avancée au Québec : 38 %³⁵ de l'énergie qui y est consommée prend la forme d'électricité, ce qui représente près du double³⁶ de ce qu'on observe au niveau mondial. Dans l'avenir, à l'électrification directe pourra s'ajouter, pour certains usages, l'utilisation d'hydrogène vert, c'est-à-dire produit à partir d'électricité renouvelable.

Plus largement, l'abandon graduel du recours aux hydrocarbures est aussi plus avancé qu'ailleurs : ceux-ci comptent pour moins de la moitié³⁷ de l'approvisionnement énergétique du Québec, contre plus de 80 %³⁸ au niveau mondial. Cette performance est principalement le fait de la disponibilité de l'électricité renouvelable, mais aussi de celle de la bioénergie.

La carboneutralité est à la portée du Québec. Elle est atteinte dans la modélisation sans l'apport des solutions climatiques naturelles, dont le potentiel de production d'émissions négatives reste à préciser, ni de l'option de recourir en partie à des achats de crédits à l'étranger, option qui s'amenuisera au fil du temps alors que l'ensemble des États devront viser la carboneutralité.

Bien qu'atteignable et source d'opportunités, la carboneutralité exigera des investissements substantiels et des changements profonds et rapides des modes de production et de consommation.

³³ Hydro-Québec (2021) *Rapport de développement durable 2020*, Montréal, Hydro-Québec, p. 68.

³⁴ International Energy Agency (2020) *Key World Energy Statistics 2020*, Paris, IEA, p. 30.

³⁵ Whitmore, J. et P.-O. Pineau (2021) *État de l'énergie au Québec : édition 2021*, Montréal, HEC Montréal, p. 26.

³⁶ International Energy Agency (2020) *Key World Energy Statistics 2020*, Paris, IEA, p. 34.

³⁷ Whitmore, J. et P.-O. Pineau (2021) *État de l'énergie au Québec : édition 2021*, Montréal, HEC Montréal, p. 7.

³⁸ International Energy Agency (2020) *Key World Energy Statistics 2020*, Paris, IEA, p. 6.

Comme nous l'avons vu dans le rapport de 2019 avec la modélisation de scénarios alternatifs, le retrait des technologies risquées limite sérieusement les options de réduction. Il est donc essentiel d'accélérer la recherche et développement ainsi que le transfert technologique afin de sécuriser l'implantation de ces nouvelles technologies et de s'attaquer aux sous-secteurs pour lesquels les réductions sont plus difficiles ou plus coûteuses.

Les résultats démontrent que l'atteinte des cibles et des objectifs dépend de l'adoption des technologies disponibles, des technologies émergentes et de la réduction des demandes. Pour y parvenir, il est nécessaire de mieux comprendre les facteurs qui permettront une meilleure participation et un engagement des différents acteurs. Des travaux de recherche devraient porter sur les transformations sociales dans un contexte de changements climatiques pour favoriser la mise en œuvre des différentes mesures identifiées dans ce rapport et s'attaquer aux multiples barrières à l'adoption de ces mesures.

Parmi les axes de recherche également à prioriser, nous soulignons le secteur industriel et le secteur de l'agriculture. Ces deux secteurs représentent l'essentiel des émissions à l'horizon 2050 et rendent plus difficile l'atteinte des cibles et objectifs de réduction de GES, car les émissions sont plus difficilement compressibles.

Dans le secteur industriel, le gouvernement devrait prioriser le développement de la technologie de production d'aluminium avec anodes inertes et appuyer sa diffusion. Cette technologie s'attaque à des émissions de procédé très importantes pour lesquelles le CSC est une solution particulièrement difficile et coûteuse. La recherche et développement devrait également porter sur les autres procédés industriels à fortes émissions, notamment l'utilisation de produits substitués au clinker dans la production de ciment et la réduction directe à l'hydrogène en métallurgie.

Pour l'agriculture, notamment les émissions liées à la fermentation entérique et la gestion des sols, la recherche et développement devrait être axée sur les technologies et techniques les plus propices aux conditions spécifiques du Québec (climat, types de cultures et élevages, types de sols) et la quantification plus précise des réductions de GES potentielles. Le captage du méthane provenant des fosses à lisier étant une mesure relativement peu coûteuse ayant été instaurée par certaines entreprises, il serait intéressant d'évaluer les barrières à un déploiement élargi de cette technologie. La biométhanisation des résidus agricoles pourrait être une avenue intéressante dans la mesure où le prix du GNR serait suffisamment élevé.

La recherche dans les autres secteurs n'est pas à négliger pour autant, mais ils présentent moins de risques et d'enjeux pour l'atteinte des cibles et objectifs de réduction du Québec. Le secteur des transports, par exemple, pourrait présenter des défis plus importants, surtout dans certains sous-secteurs plus difficiles à électrifier comme le camionnage lourd, mais les technologies nécessaires (batteries, bornes de recharge, etc.) connaissent déjà un développement fulgurant.

En parallèle, le gouvernement devrait poursuivre la recherche visant à définir le potentiel de séquestration géologique du carbone dans les formations salines du Saint-Laurent et possiblement mettre en place des projets pilotes afin de développer cette option. Le CSC, la BECSC et le CAD ne mènent pas à terme à une restructuration et à une décarbonisation de l'économie, mais peuvent servir de solution de dernier recours pour l'atteinte des cibles et objectifs de réduction du Québec. Selon l'état actuel des connaissances, les émissions négatives seraient nécessaires pour atteindre la carboneutralité par des efforts concentrés uniquement sur le territoire québécois. Il faut aussi effectuer des recherches sur le

potentiel de séquestration par les solutions climatiques naturelles, qui n'ont pu être modélisées dans le cadre de cette étude, mais dont on sait qu'elles pourraient contribuer à la production d'émissions négatives et l'atteinte de la carboneutralité, aux côtés des solutions technologiques.

En vue de la forte électrification de l'économie, l'expertise et le savoir-faire du Québec doivent être maintenus, notamment dans le domaine de l'éolien. L'industrie éolienne est relativement récente et doit être en mesure de maximiser les retombées au Québec liées à la fabrication et l'installation d'éoliennes en prévision des investissements massifs qui seront requis pour l'électrification des transports, des bâtiments et de l'industrie. Des projets de production éolienne pourraient être devancés à cet effet.

Par ailleurs, considérant la part grandissante des énergies renouvelables variables (éolienne et solaire), il apparaît essentiel de consacrer de la recherche aux outils de gestion de la demande et notamment aux technologies de stockage.

Au-delà des axes de recherche prioritaires, il est important de maintenir une veille technologique sur certaines mesures qui, bien que non compétitives pour l'instant, pourraient le devenir d'ici 2050 et offrir davantage d'options de réduction dans le futur. C'est le cas notamment de la production de GNR à partir de CO₂ et d'électricité par électrolyse-méthanation (« power-to-gas »), présentement plus coûteuse que la méthanisation, mais qui pourrait être intéressante à plus long terme, ou encore de la CAD qui pourrait être une solution de dernier recours pour générer des émissions négatives et permettre au Québec d'atteindre la carboneutralité.

Étant donné les risques inhérents à toute planification sur un horizon de temps aussi lointain, il est essentiel de garder un œil sur un panier d'options étendu, comprenant des options paraissant actuellement moins prometteuses, mais qui pourraient connaître une évolution importante dans le futur.

CONCLUSION

RAPPEL DES PRINCIPAUX RÉSULTATS

L'analyse est claire : les cibles et objectifs du Québec aux horizons 2030 et 2050, quoique très ambitieux, sont potentiellement réalisables. Le Québec peut même atteindre la carboneutralité d'ici 2050 et ce, sur son propre territoire en incluant dans son panier de mesures des technologies telles que la bioénergie avec captage et séquestration du carbone (BECSC) et le captage atmosphérique direct (CAD). Cela étant dit, l'atteinte des objectifs de réduction de GES nécessitera des investissements importants de l'ensemble des agents économiques et impliquera que le Québec entre dans une profonde réforme économique de façon à accélérer la cadence de ses efforts, et qu'il agisse sur tous les fronts pour y arriver.

L'utilisation seule des technologies de réduction de GES permet de réduire les émissions totales du Québec sous la barre des 20 Mt, ce qui est significatif. Des mesures additionnelles seront toutefois requises pour réduire davantage et neutraliser ces émissions résiduelles de près de 20 Mt (surtout en agriculture, procédés industriels et aviation) et atteindre la carboneutralité.

La gestion des demandes a également un rôle à jouer dans l'atteinte de l'objectif 2050. Cela passera par un examen des choix qui influencent nos façons de consommer, de se déplacer, de construire nos villes ou encore de nous alimenter. En agissant sur ce seul levier, les émissions de GES peuvent être réduites d'emblée de 20 % en 2050 par rapport au scénario de référence. Dans plusieurs secteurs, la gestion des demandes et l'utilisation de technologies peuvent souvent constituer des solutions interchangeables pour réduire les émissions de GES. L'utilisation combinée des technologies et de la gestion des demandes permet d'aller un peu plus loin dans la réduction des émissions de GES que l'utilisation d'un seul type de solutions.

Dans les faits, les interventions technologiques et celles relatives à la gestion des demandes se feront simultanément et de façon combinée, et non pas selon l'ordonnement spécifique aux choix méthodologiques de l'exercice de modélisation qui fût réalisé. Selon ce dernier, une combinaison simultanée d'interventions technologiques et agissant sur la demande permet d'optimiser les efforts de décarbonisation et d'atteindre une réduction de GES de 82 % en 2050. Ainsi, une variété de combinaisons faisant appel simultanément à des solutions technologiques et permettant de réduire les demandes utiles sont possibles et devraient être privilégiées. Qui plus est, les réductions de demandes comportent d'immenses avantages, dont la génération de très intéressants co-bénéfices comme l'amélioration de la qualité de l'air, la diminution du bruit, la diminution de la congestion routière et des pertes de temps, l'amélioration de la qualité de vie en milieu urbain, etc. En outre, cela permettra de réduire de manière substantielle la quantité d'électricité additionnelle qu'il faudra produire et de limiter les nouveaux moyens de production (barrages hydroélectriques, parcs éoliens et solaires).

Pour atteindre la carboneutralité en 2050, le captage et séquestration de carbone (CSC) s'avérera sans doute nécessaire. Cette technologie consiste à capter une quantité de carbone pour le séquestrer dans le sol. Elle est donc une option complémentaire aux réductions d'émissions, mais qui doit être prévue en parallèle dès maintenant pour assurer la possibilité d'y avoir recours au besoin.

Pour répondre à l'électrification croissante des systèmes (dans les transports, les bâtiments et l'industrie), il sera nécessaire, tout d'abord, de consommer l'électricité plus efficacement (en privilégiant l'efficacité

énergétique, le transport en commun, une économie circulaire, etc.), mais également d'augmenter la production d'électricité, à partir de sources propres comme l'éolien, le solaire et l'hydroélectricité.

Atteindre les objectifs de réduction que s'est fixés le Québec nécessitera un changement de cap majeur pour la société québécoise, ce qui aura une incidence sur l'économie du Québec, son environnement et sa population. Le Québec bénéficiera de création d'emplois et de croissance économique dans les secteurs à faible niveau d'émission de GES, chez les fournisseurs de technologies propres et de bioénergie, en efficacité énergétique et en production d'électricité. En revanche, la restructuration de l'économie affectera d'autres secteurs, notamment le secteur pétrolier.

PERSPECTIVES POUR LE QUÉBEC

Au regard de notre analyse, voici les priorités qui émergent :

Si le Québec souhaite tirer le maximum de co-bénéfices de sa transition vers une société sobre en carbone — tant pour l'économie que pour la santé humaine —, il lui faudra prioriser l'électrification des transports, la réduction et la valorisation des déchets, ainsi que la production et l'utilisation de bioénergies.

Les réductions dans les transports sont parmi les plus coûteuses, mais sont probablement celles qui procurent les bénéfices les plus importants (amélioration de la balance commerciale du secteur énergétique, de la qualité de l'air et de la santé des Québécois).

Afin de minimiser les coûts et les risques de cette transition, le Québec devra miser davantage sur l'efficacité énergétique et la réduction des demandes. Des actions en matière d'urbanisme, d'aménagement du territoire, d'économie circulaire ou d'ajustement du système alimentaire rendront la marche moins grande à monter quand viendra le temps de remplacer les technologies actuelles par des solutions de rechange sobres en carbone.

Le captage et la séquestration du carbone (CSC) peuvent avoir un rôle à jouer comme technologie de dernier recours afin de permettre au Québec d'atteindre ses cibles et objectifs sans nécessiter l'achat de crédits. Bien que ces mesures soient risquées, peu efficaces d'un point de vue énergétique et n'apportent pas les co-bénéfices des autres options de réductions, le recours au CSC permet à plus long terme l'atteinte de la carboneutralité lorsque combiné à la bioénergie (BECSC) ou au captage atmosphérique direct (CAD).

Nous concluons que le Québec est particulièrement bien placé pour réussir la décarbonisation de son économie et pour tirer son épingle du jeu sur les plans de l'économie et de la santé humaine. Toutefois, l'effort nécessaire ne doit pas être sous-estimé, et devra viser *toutes les occasions* de réduction sans exception.



ANNEXE

ANNEXE 1 – MÉTHODOLOGIE DÉTAILLÉE

TRAJECTOIRE B – RÉDUCTION DES DEMANDES

La trajectoire B introduit des réductions de demandes dans trois volets touchant quatre secteurs différents (bâtiment, industrie, transport, agriculture). Ces ajustements de demandes sont également apportés aux trajectoires C et D.

Le tableau A-1-1 détaille chacun de ces volets. Les sous-sections suivantes précisent l'ajustement des demandes effectué et les hypothèses sous-jacentes. Ces ajustements de demandes ont fait l'objet d'une mise à jour depuis la modélisation de 2019.

Tableau A-1-1 – Réduction des demandes

Volet	Description
1. Mobilité durable / aménagement urbain	<ul style="list-style-type: none">• Développement urbain orienté vers le transport en commun (« <i>transit-oriented developments</i> » ou « TOD »)• Modification des parts modales• Réduction des besoins énergétiques des bâtiments
2. Tissu industriel	<ul style="list-style-type: none">• Production industrielle axée vers un développement des industries vertes
3. Ajustement du système alimentaire	<ul style="list-style-type: none">• Réduction du gaspillage alimentaire• Diversification des sources de protéines du régime alimentaire

MOBILITÉ DURABLE / AMÉNAGEMENT URBAIN (1)

Ce volet modifie les demandes utiles du modèle NATEM en supposant que l'ensemble des nouveaux ménages en région métropolitaine de recensement (RMR), soit 77 % de la croissance démographique prévue au Québec au cours des prochaines années, seront situés dans des zones de développement densifiées orientées vers le transport en commun (« *Transit-oriented development* – TOD »). Les ajustements globaux tiennent compte de la densification, dont une partie en milieu rural présente un potentiel plus limité et une autre partie en milieu urbain peut permettre de densifier des quartiers existants. Ils supposent également une amélioration générale des infrastructures de transport en commun, une croissance de l'autopartage (simulé à haut niveau par un ajustement des demandes utiles) et la mise en place d'autres moyens visant à diminuer la demande en transport individuel. Ces ajustements globaux ont été établis sur la base d'une analyse de la littérature et d'un jugement professionnel, sans quantifier toutefois chacun des facteurs individuels pouvant affecter les demandes utiles en transport.

Dans ce volet, les demandes utiles pour le transport des passagers urbains sont graduellement réduites³⁹ pour atteindre 20 % de réduction en 2030 et 30 % (total) en 2050 par rapport aux mêmes années du scénario de base. Ensuite, une réduction additionnelle est effectuée en supposant un transfert modal de 8 % en 2030 (25 % en 2050) des demandes des automobiles, motos et camions légers vers le transport en commun. L'ensemble des ajustements de demande se font graduellement à compter de 2021. Par exemple, pour le transport des passagers urbains, la réduction de la demande passe de 0 % en 2020 à 20 % en 2030, avec progression linéaire pour les années intermédiaires.

Pour les marchandises, le transport par rail et par bateau est augmenté de 25 % en 2030 et de 50 % en 2050 par rapport aux mêmes années du scénario de base. Ces augmentations, exprimées en mégatonnes-kilomètres, viennent réduire d'autant l'utilisation des camions lourds. Le transport par avion n'est pas affecté, car on suppose qu'il serait requis pour les régions éloignées, les transports urgents, etc.

Les nouveaux bâtiments en RMR sont de type appartement/condo et des interventions plus limitées s'effectuent également en milieu rural, avec une augmentation du nombre de millions de mètres carrés d'appartements de 39% d'ici 2050 par rapport au scénario de référence, et une baisse du nombre de millions de mètres carrés d'unifamiliales détachées de 43% par rapport au scénario de référence. Globalement, ces hypothèses amènent une réduction de 8 % de la superficie habitable totale à l'horizon 2050 due à la densification des quartiers, incluant la densification de quartiers existants et le développement de nouveaux quartiers densifiés.

TISSU INDUSTRIEL (2)

Ce volet suppose une transition de l'industrie vers des secteurs plus sobres en carbone, en raison d'ajustements de prix favorisant les productions moins polluantes (internalisation du prix du carbone), des préférences des consommateurs pour des produits verts, de la mise en œuvre de politiques favorisant une économie circulaire⁴⁰, etc.

Pour tous les secteurs sauf la pétrochimie, les pâtes et papiers et l'aluminium, la production est réduite de 8 % par rapport au scénario de base à l'horizon 2030 et de 25 % à l'horizon 2050.

Pour l'industrie pétrochimique⁴¹, une réduction de 17 % de la production par rapport au scénario de base est appliquée à l'horizon 2030 (50 % en 2050). On suppose une migration de la main-d'œuvre et des capitaux vers une industrie verte, notamment pour la production de biocarburants. Selon le Groupe de travail sur la main-d'œuvre (issu du Groupe de travail sur l'économie verte et l'économie sociale), le sous-

³⁹ Notons que pour l'ensemble des ajustements apportés aux demandes utiles dans la trajectoire B, la réduction des demandes (ou l'augmentation le cas échéant) est exprimée en pourcentage des demandes de la même année pour le scénario de base.

⁴⁰ Réduction et valorisation des déchets à tous les niveaux de l'économie, ainsi que l'augmentation de la durée de vie et la réutilisation des produits manufacturés.

⁴¹ Ce sous-secteur exclut le raffinage de produits pétroliers pour fins énergétiques. Les activités de raffinage sont traitées de manière endogène par le modèle, notamment en fonction des besoins énergétiques et des sources d'énergie alternatives (électricité, bioénergie, etc.)

secteur de l'industrie pétrochimique est probablement celui pour lequel « les répercussions de la transition énergétique seront les plus négatives »⁴².

L'ensemble de ces ajustements sont appliqués graduellement à compter de 2021.

Finalement, comme une forte décroissance est déjà anticipée pour le secteur des pâtes et papiers dans le scénario de base, aucun ajustement additionnel n'a été apporté. Pour ce qui est de l'aluminium, une demande plus forte pour le produit québécois décarbonisé pourrait compenser une baisse de production au niveau mondial. Aucun ajustement n'a donc été apporté.

AJUSTEMENT DU SYSTÈME ALIMENTAIRE (3)

Ce volet suppose une baisse du gaspillage alimentaire, ainsi qu'une diversification des sources de protéines du régime alimentaire résultant d'une sensibilité croissante des consommateurs pour une alimentation santé et à plus faible empreinte carbone. Bien que la diminution de la consommation de produits d'origine animale ait un effet significatif sur la diminution des émissions de GES (et autres impacts environnementaux), l'impact sur le territoire québécois est limité en raison de l'importance du commerce interprovincial et international (importation et exportation) dans ce secteur si cette tendance ne se manifeste pas à l'extérieur du Québec. Au vu des engagements internationaux en matière de réduction d'émissions de GES, nous avons supposé dans ce scénario que la réduction de la production de produits d'origine animale au Québec découlait d'une tendance à la baisse de la consommation de ces produits à l'échelle mondiale.

Pour ce scénario, les productions animales sont réduites de 7 % en 2030 (20 % en 2050) par rapport à la même année du scénario de base pour les bovidés (viande et lait) et de 3 % en 2030 (10 % en 2050) pour les autres élevages, sauf les œufs et le porc.

Les productions végétales sont ajustées comme suit :

- Les productions végétales destinées aux animaux sont réduites par la moyenne des réductions appliquées aux productions animales, soit 6 % en 2030 et 17 % en 2050 (moyenne pondérée selon les productions projetées en 2050) ;
- Les productions végétales destinées à la consommation humaine sont augmentées d'une quantité équivalente, en million de tonnes, aux réductions appliquées aux productions animales. Ces augmentations sont distribuées au prorata des productions végétales pour consommation humaine prévues en 2050.

Finalement, une réduction du gaspillage amenant une baisse de l'ensemble des productions de 5 % en 2030 (15 % en 2050) par rapport au scénario de base est appliquée à l'ensemble des productions.

⁴² Groupe de travail sur la main-d'œuvre. 2018. « La transition énergétique et la main-d'œuvre québécoise : Promouvoir des transformations durables sur le plan écologique et social dans les secteurs du transport, du bâtiment et de l'énergie », p.59.

AUTRES PRÉCISIONS MÉTHODOLOGIQUES

La section suivante apporte des précisions sur certains choix méthodologiques retenus pour l'étude, hypothèses principales et limites du modèle.

CAPTAGE ET SÉQUESTRATION DU CARBONE

L'ampleur du recours au CSC sans contrainte soulève des questionnements d'acceptabilité sociale, surtout dans un contexte où les secteurs sans CSC sont beaucoup moins amenés à réduire leurs propres émissions. La fiabilité de la séquestration géologique et la maturité de la technologie soulèvent également des questionnements. Il a donc été décidé de restreindre le recours au CSC à un niveau de 2,5 MtCO₂éq/an en 2035 et 5 MtCO₂éq/an en 2040. De plus, la CSC n'est permise que dans les trajectoires C et D et les émissions négatives, dans la trajectoire D seulement. La capacité de séquestration est introduite graduellement à compter de 2035.

Les coûts du CSC et la BECSC incluent la séquestration, le transport en pipeline jusqu'au site d'injection et l'injection elle-même dans le sol. Plusieurs éléments ont été considérés pour établir ces coûts, notamment l'éloignement des sites, la concentration en CO₂, la pénalité énergétique⁴³ et les coûts d'implantation.

Pour le captage, les coûts sont fonction du type de procédé, plus précisément de la concentration en CO₂ des émissions et des possibilités d'ajouter avec plus ou moins de facilité une étape de captage de CO₂ au procédé existant. Les coûts sont particulièrement élevés pour l'aluminium qui se prête peu au captage du carbone en raison de la très faible concentration en CO₂ due à l'air de refroidissement utilisé lors de l'électrolyse. Le modèle considère également la pénalité énergétique, le pourcentage maximal d'émissions capturées selon le type de procédé, ainsi que le pourcentage de sites pour lesquels le CSC pourrait être appliqué (certains sites étant trop petits ou trop éloignés).

Le transport jusqu'au site d'injection serait effectué par pipeline. Le coût de ce transport tient compte des économies d'échelle possibles et de l'éloignement des sites.

Le potentiel de captage géologique des émissions de GES a été établi sur la base de l'Atlas nord-américain de la séquestration du carbone (« The North American Carbon Storage Atlas 2012 »), qui évalue les potentiels géologiques de séquestration, notamment celui des formations salines profondes de la vallée du Saint-Laurent, dont la capacité de séquestration totale est évaluée entre 890 MtCO₂éq et 9 460 MtCO₂éq (l'équivalent d'environ 10 à 100 années d'émissions pour l'ensemble du Québec). Compte tenu de l'incertitude entourant cette évaluation, la valeur inférieure de l'intervalle, soit 890 MtCO₂éq, a été retenue comme contrainte géologique.

Mise à part l'injection dans les formations salines, les autres formes de CSC, notamment le CSC dans des gisements de pétrole et de gaz naturel, sont exclues, car peu applicables au Québec. La valorisation du CO₂ est également très limitée, car la recherche est encore embryonnaire et les solutions proposées réintroduisent généralement le CO₂ dans le cycle du carbone, ce qui ne fait que retarder son émission dans l'atmosphère.

⁴³ La pénalité énergétique est l'accroissement de la demande en énergie dû au processus de CSC, soit l'énergie requise pour capter, traiter, compresser et injecter le gaz.

DEMANDES UTILES ET ÉLASTICITÉS-PRIX

Le modèle NATEM définit un ensemble de demandes utiles (par exemple, besoins de chauffage des bâtiments, besoins de déplacements en voiture, production d'aluminium) auxquelles il tente de répondre tout en respectant les contraintes d'émission de GES en optimisant le portefeuille technologique. De façon générale, les demandes utiles ne sont pas modifiées dans les trajectoires de réduction. Un ajustement est apporté de façon exogène à certaines demandes des trajectoires B, C et D pour simuler des changements structurels dans une économie sobre en carbone.

Des élasticités-prix propres à chaque demande utile permettent une réponse à un changement des prix entre deux scénarios. Elles s'appliquent à l'ensemble des demandes utiles de NATEM, dans tous les secteurs de consommation finale. Il s'agit du principal mécanisme qui permet de capter les effets de l'économie sur le système énergétique.

L'impact est plus important pour les demandes utiles pour lesquelles il y a peu d'options de réductions des GES. Les demandes sont peu élastiques à long terme, c'est-à-dire qu'elles interviennent surtout en dernier recours lorsqu'il n'y a plus d'options de réduction ou que les mesures de réduction sont trop coûteuses.

VISION PARFAITE DU FUTUR ET ADOPTION DES MESURES

Le modèle fonctionne avec une vision considérée parfaite du futur (« *perfect foresight* ») et suppose donc que les projets requis, par exemple la construction de nouveaux barrages hydroélectriques, sont planifiés pour une mise en service en temps opportun. Toutefois, des délais de construction ont été ajoutés pour l'hydroélectricité (sept ans), l'éolien (deux ans) et le solaire (un an) afin de représenter les délais habituels pour les phases de construction et de mise en service. Les délais de planification et d'approbation en amont sont exclus de ces délais.

Par ailleurs, le modèle optimise la solution de manière à minimiser le coût total pour l'ensemble de la société, tout en respectant l'ensemble des contraintes spécifiées, dont l'atteinte des cibles et objectifs de réduction de GES. Pour cette étude, aucune contrainte additionnelle visant l'adoption des mesures de réduction de GES n'a été incluse. Par exemple, des barrières comme le manque d'information, le manque de financement, l'aversion au risque ou l'inertie peuvent freiner l'adoption de certaines technologies dans la réalité. Des programmes, incitatifs et réglementations devront ainsi être mis en place pour assurer la réalisation des investissements et autres modifications nécessaires à l'économie québécoise pour atteindre ces réductions.

ÉMISSIONS CONSIDÉRÉES PAR LE MODÈLE

Le modèle est calibré en fonction de l'Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre. De plus, les émissions sont traitées dans une perspective de réductions liées à l'inventaire. Ainsi, sont notamment exclues de l'analyse :

- Les émissions à l'extérieur du Québec, y compris les émissions liées à la fabrication et à la transformation à l'extérieur du Québec des produits importés sur le territoire québécois⁴⁴;
- Les émissions et mesures touchant l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie (LULUCF), notamment la séquestration du carbone dans les sols agricoles ;
- Les émissions liées aux zones inondées des barrages hydroélectriques.

Les demandes utiles sont déterminées de façon exogène au modèle. Bien que le modèle puisse suggérer l'ajustement de demandes utiles sous l'effet des élasticités-prix (p. ex., lorsque le coût d'une demande est modifié à la suite d'un changement de prix d'un combustible), il ne détermine pas les changements structuraux entre les différents segments de demandes. Par exemple, la construction de nouveaux barrages hydroélectriques n'ajuste pas la production prévue de béton à la hausse. Ces impacts sont cependant minimes et peuvent être ignorés.

Selon les secteurs et les scénarios, ces effets exclus de l'analyse pourraient représenter une hausse des émissions (p. ex., béton et acier pour barrages hydroélectriques et éoliennes) ou une baisse (réduction du nombre de voitures et des infrastructures routières dans les scénarios de mobilité durable).

CONCURRENCE INTERNATIONALE

Il est à noter que le modèle ne tient pas compte des enjeux de concurrence internationale qui pourraient découler des coûts additionnels de l'implantation des technologies de réduction de GES ou des avantages compétitifs positifs de la proactivité du Québec. Les demandes utiles, notamment pour la production industrielle, sont exogènes, ce qui est raisonnable dans un contexte où les concurrents nationaux et internationaux du Québec font également face à des coûts importants pour réduire leurs émissions de GES, préservant ainsi l'avantage concurrentiel des produits québécois. Autrement dit, le coût plus élevé des produits québécois dû aux coûts de mesures de réduction des GES intégrés dans ces produits n'amènera pas de réduction de production en raison de la concurrence internationale, car nous supposons que les produits étrangers font face aux mêmes contraintes. Le modèle pose l'hypothèse que le reste du Canada et les États-Unis maintiennent des efforts importants pour réduire leurs propres émissions de GES.

⁴⁴ Bien que non présentées dans le rapport, l'ensemble des émissions générées au Canada sont toutefois incluses dans le modèle utilisé pour ce projet. Ainsi, le modèle NATEM optimise simultanément tant pour le Québec que pour les autres provinces canadiennes en fonction de leurs cibles de réduction respectives. Seules les émissions propres au Québec sont présentées dans ce rapport.

ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les effets des changements climatiques sont multiples et peuvent affecter certains intrants du modèle, par exemple par une baisse des besoins de chauffage, une hausse des besoins de climatisation et une modification des apports d'eau annuels aux barrages hydroélectriques. Dans cette mise à jour du modèle, nous avons ajouté les effets anticipés du climat sur les besoins futurs de chauffage et de climatisation des bâtiments. Quant aux précipitations et à leurs effets sur la production hydroélectrique, elles n'ont pas été considérées dans le modèle, étant donné l'ampleur relativement mineure de ces variations, ainsi que l'incertitude qui les entoure.

ANNEXE 2 – PRIORISATION DES MESURES

Tableau A-2-1 – Priorisation des mesures par secteur

	COURT TERME (1-5 ans)	MOYEN TERME (vers 2030)	LONG TERME (vers 2040)
TRANSPORTS			
Transport des passagers	<ul style="list-style-type: none"> • Aide financière pour VÉ • Loi VZE • Appui au transport en commun et aux développements urbains densifiés de type TOD 	<ul style="list-style-type: none"> • Loi VZE accélérée • Règlementation – normes minimales d'accès au transport en commun, de densification et de mixité pour les nouveaux développements 	<ul style="list-style-type: none"> • Bannir les moteurs à combustion interne (sauf biocarburants)
Transport des marchandises	<ul style="list-style-type: none"> • Électrification du camionnage • Appui aux transferts modaux • Appui aux biocarburants 	<ul style="list-style-type: none"> • Pénalité au camionnage utilisant du carburant fossile (pour encourager l'électrification, les biocarburants ou les transferts modaux) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pénalité au camionnage utilisant du carburant fossile (pour encourager l'électrification, les biocarburants ou les transferts modaux)

JUSTIFICATION

Les résultats de la modélisation montrent une tendance lourde vers l'électrification et les biocarburants qu'il faudra accélérer pour atteindre des objectifs ambitieux de réduction de GES. L'appui aux développements de type TOD et aux transferts modaux devrait également être priorisé, car ils permettent de réduire les coûts des réductions de GES (à court et moyen terme) et les besoins additionnels en électricité (pour l'ensemble de la période). Dans le transport des marchandises, l'électrification du camionnage léger, voire du camionnage lourd, pourra également être entreprise le plus rapidement possible selon l'évolution de la technologie.

	COURT TERME (1-5 ans)	MOYEN TERME (vers 2030)	LONG TERME (vers 2040)
BÂTIMENTS			
Résidentiel, Commercial et Institutionnel	<ul style="list-style-type: none"> • Aide à la rénovation éconergétique • Code du bâtiment (« step code » et mise à jour rapide du code du bâtiment) • Mise en œuvre de la cotation énergétique obligatoire • Élimination du mazout (remplacement par pompes à chaleur autant que possible) 	<ul style="list-style-type: none"> • Poursuivre les initiatives précédentes • Favoriser substitution vers l'électricité / pompes à chaleur / biomasse 	<ul style="list-style-type: none"> • Poursuivre les initiatives précédentes • Favoriser substitution vers l'électricité / pompes à chaleur / biomasse • Mise à niveau obligatoire des bâtiments inefficaces

JUSTIFICATION

Les bâtiments devront transitionner vers des énergies propres (électricité, bioénergie) par l'élimination du mazout (à court terme) et une importante réduction du gaz naturel d'origine fossile. Le GNR pourrait être utilisé en bâtiment, mais nos analyses montrent qu'il serait d'abord utilisé pour des applications industrielles. Les diverses mesures d'efficacité énergétique sont essentielles pour limiter les coûts et les besoins additionnels en électricité. L'appui aux bâtiments efficaces (aide à la rénovation, code du bâtiment, cotation énergétique obligatoire) est prioritaire à court terme afin de limiter les opportunités perdues.

	COURT TERME (1-5 ans)	MOYEN TERME (vers 2030)	LONG TERME (vers 2040)
INDUSTRIE			
Combustion et procédé	<ul style="list-style-type: none"> • Limiter les opportunités perdues lors des réfections majeures et nouvelles constructions (s'assurer de mettre en place un procédé émettant peu de GES et utilisant de préférence la bioénergie et/ou l'électricité) • Appui aux technologies et industries sobres en carbone selon les opportunités • Continuer d'appuyer les projets en efficacité énergétique en industrie pour lever la barrière du financement 	<ul style="list-style-type: none"> • Poursuivre les initiatives précédentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Poursuivre les initiatives précédentes
CSC	<ul style="list-style-type: none"> • Projet pilote de CSC 	<ul style="list-style-type: none"> • Développer le CSC selon le niveau d'acceptabilité sociale et les besoins en réductions supplémentaires 	<ul style="list-style-type: none"> • Développer le CSC selon le niveau d'acceptabilité sociale et les besoins en réductions supplémentaires

JUSTIFICATION

Divers moyens devraient être mis en place (programmes de subvention, appui à la recherche et développement, écoconditionnalité lors de l'attribution de contrats ou de subventions, etc.) afin de favoriser la transition vers des sources d'énergie propres telles que l'électricité, la biomasse ou le GNR, ainsi que l'adoption de meilleurs procédés. Une attention particulière devrait être portée aux nouvelles constructions et réfections majeures d'usine pour limiter les opportunités perdues. Les résultats de la modélisation montrent également l'importance du CSC pour l'atteinte des cibles et objectifs les plus ambitieux ; cette technologie devrait être développée en parallèle aux initiatives industrielles afin de s'ajouter au panier de mesures potentielles.

	COURT TERME (1-5 ans)	MOYEN TERME (vers 2030)	LONG TERME (vers 2040)
ÉLECTRICITÉ ET ÉMISSIONS NÉGATIVES			
Production	<ul style="list-style-type: none"> Maximiser les efforts en efficacité énergétique afin de dégager une marge de manœuvre énergétique et appuyer l'électrification stratégique des transports, des bâtiments et de l'industrie Poursuivre les projets de production électrique en cours 	<ul style="list-style-type: none"> Développer les filières renouvelables selon les besoins et l'acceptabilité sociale de chaque filière 	<ul style="list-style-type: none"> Développer les filières renouvelables selon les besoins et l'acceptabilité sociale de chaque filière
BECSC	<ul style="list-style-type: none"> Projet pilote de BECSC 	<ul style="list-style-type: none"> Développer la BECSC selon le niveau d'acceptabilité sociale et les besoins en réductions de GES supplémentaires 	<ul style="list-style-type: none"> Développer la BECSC selon le niveau d'acceptabilité sociale et les besoins en réductions de GES supplémentaires
CAD	<ul style="list-style-type: none"> Veille technologique 	<ul style="list-style-type: none"> Veille technologique 	<ul style="list-style-type: none"> Possibilité de projet pilote selon les évolutions de la technologie et du marché

JUSTIFICATION

La modélisation a mis en lumière l'importance des besoins additionnels en électricité, surtout à l'horizon 2050. L'efficacité énergétique peut contribuer de manière importante à réduire les besoins énergétiques (et les effets indésirables de la nouvelle production) ainsi que les coûts. Toutefois, un développement accru des filières d'énergie renouvelable sera requis. Tout comme le CSC, la BECSC (production d'électricité avec bioénergie et captage du carbone) devrait être développée afin de s'ajouter au panier de mesures potentielles. La BECSC peut être utilisée en industrie pour de la chaleur de procédé, mais un projet pilote en production d'électricité serait intéressant pour bien tester la technologie. Pour la CAD, comme il s'agit d'une option très coûteuse et peu efficace d'un point de vue énergétique, nous recommandons simplement d'effectuer une veille technologique pour l'instant. Cette technologie pourrait devenir intéressante lorsqu'elle sera plus mature et que des émissions négatives seront nécessaires pour l'atteinte de la carboneutralité.

	COURT TERME (1-5 ans)	MOYEN TERME (vers 2030)	LONG TERME (vers 2040)
AGRICULTURE			
	<ul style="list-style-type: none"> • Recherche et projets pilotes afin de développer et tester différentes approches pour réduire les GES et obtenir des données dans le contexte québécois • Réduction du gaspillage 	<ul style="list-style-type: none"> • Mettre en œuvre les technologies et pratiques les plus prometteuses à plus large échelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Poursuivre l'implantation de technologies et pratiques prometteuses

JUSTIFICATION

Des études additionnelles sont requises afin de mieux déterminer les mesures les plus efficaces selon les particularités du Québec (climat, types de cultures et d'élevages, sols, barrières à l'implantation, coûts, etc.). Ce secteur est moins prioritaire à court terme, mais devient de plus en plus important à long terme, car les émissions sont très difficiles à réduire au-delà d'un certain seuil. L'implantation de mesures de réduction de GES devrait se faire au fil de l'évolution des connaissances. À court terme, la réduction du gaspillage alimentaire devrait être une priorité. La promotion d'une alimentation basée sur des sources de protéines plus diversifiées serait également à considérer, mais ses effets au Québec seraient moins marqués puisqu'une part importante de la production d'origine animale vise l'exportation hors Québec.

DÉCHETS			
	<ul style="list-style-type: none"> • Captage aux sites d'enfouissement (au-delà de la réglementation) et de traitement des eaux • Compostage et biométhanisation des matières putrescibles 	<ul style="list-style-type: none"> • Valorisation des déchets (p. ex. gazéification) si requis 	<ul style="list-style-type: none"> • Valorisation des déchets (p. ex. gazéification) si requis

JUSTIFICATION

Les émissions de méthane, un puissant GES, peuvent être réduites à coût relativement faible par le captage aux sites d'enfouissement et aux usines de traitement des eaux qui utilisent un procédé anaérobie. La réduction de l'enfouissement, particulièrement des matières putrescibles, contribue également à la baisse des émissions de méthane. À moyen et long terme, les matières résiduelles peuvent être valorisées plutôt qu'enfouies ou compostées afin de répondre aux besoins croissants en énergie renouvelable.

