

Rapport final

**TRAJECTOIRES DE RÉDUCTION D'ÉMISSIONS
DE GES DU QUÉBEC – HORIZONS 2030 ET 2050**

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

Juin 2019

Financé par

**Fondsvert** Québec 

Trajectoires de réduction d'émissions de GES du Québec – Horizons 2030 et 2050

Rapport final

Préparé pour le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

Financé par



www.environnement.gouv.qc.ca

PRÉPARÉ PAR:



www.dunsky.com

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



Directeur de projet : Philippe Dunsky
Auteurs principaux : Martin Poirier, Kathleen Vaillancourt et Elsa Joly

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

AU SUJET DE DUNSKY

Dunsky expertise en énergie est une société de conseils stratégiques œuvrant depuis 2004 dans les domaines de l'efficacité énergétique, des énergies renouvelables et de la mobilité durable. Basée à Montréal, Dunsky appuie une clientèle nord-américaine par le biais de 3 services clés : quantifier l'opportunité (technique, économique et de marché), concevoir les stratégies (politiques, programmes et réglementation) et en évaluer la performance. Forte d'une équipe de 30 professionnels chevronnés et d'une feuille de route comprenant plus de 300 projets, Dunsky est vouée à accélérer la transition énergétique avec rigueur et objectivité.

SURVOL

EXPERTISE

Efficacité énergétique

Énergies renouvelables

Mobilité durable

SERVICES

Quantifier le potentiel

Concevoir les stratégies

Évaluer la performance

CLIENTS

TABLE DES MATIÈRES

GLOSSAIRE

AVANT-PROPOS

SOMMAIRE..... I

LA MÉTHODOLOGIE EN BREF	III
RÉSULTATS DE L'ANALYSE.....	IV
IMPLICATIONS POUR LE QUÉBEC	IX
RISQUES ET INCERTITUDES	XIV
PERSPECTIVES POUR LE QUÉBEC.....	XVII

INTRODUCTION1

CONTEXTE.....1

REMERCIEMENTS1

MÉTHODOLOGIE.....2

DESCRIPTION DU MODÈLE NATEM.....2

SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE4

SCÉNARIOS DE RÉDUCTION5

SCÉNARIO DE BASE.....5

ANALYSE DE SENSIBILITÉ5

SCÉNARIOS ALTERNATIFS6

MOBILITÉ DURABLE / AMÉNAGEMENT URBAIN (1)..... 7

TISSU INDUSTRIEL (2) 8

AJUSTEMENT DU SYSTÈME ALIMENTAIRE (3)..... 9

DEMANDES (4)..... 10

RISQUES TECHNOLOGIQUES (5) 10

CAPTAGE ET SÉQUESTRATION DU CARBONE (6) 11

BIOMASSE (7) 11

COMBINAISON DES SCÉNARIOS FAVORABLES (8)..... 11

RÉCAPITULATIF DES SCÉNARIOS11

AUTRES PRÉCISIONS MÉTHODOLOGIQUES.....12

EXPORTATIONS D'ÉLECTRICITÉ 12

CAPTAGE ET SÉQUESTRATION DU CARBONE 13

DEMANDES UTILES ET ÉLASTICITÉS-PRIX 14

VISION PARFAITE DU FUTUR ET ADOPTION DES MESURES..... 15

ÉMISSIONS CONSIDÉRÉES PAR LE MODÈLE 15

CONCURRENCE INTERNATIONALE 16

ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES 16

CHAPITRE 1 : SCÉNARIO DE BASE	17
FAITS SAILLANTS	17
STRUCTURE DU CHAPITRE	19
RAPPEL DES SCÉNARIOS DE RÉDUCTION	20
TRAJECTOIRES GLOBALES ET SECTORIELLES	20
TRAJECTOIRES GLOBALES.....	20
TRAJECTOIRES SECTORIELLES – SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE	21
TRAJECTOIRES SECTORIELLES – SCÉNARIO C.....	22
SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET ANALYSE DES MESURES DE RÉDUCTION.....	23
ANALYSE ÉNERGÉTIQUE ET TECHNOLOGIQUE	25
ANALYSE ÉNERGÉTIQUE.....	25
BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS, COMMERCIAUX ET INSTITUTIONNELS.....	31
SECTEUR INDUSTRIEL	33
TRANSPORTS.....	34
SECTEURS NON ÉNERGÉTIQUES (DÉCHETS, AGRICOLE)	40
ANALYSE ÉCONOMIQUE	42
COURBES DE COÛTS MARGINAUX.....	42
COUTS MARGINAUX, MOYENS ET TOTAUX	45
ANALYSE DE SENSIBILITÉ – PRIX DU CARBONE	46
 CHAPITRE 2 : SCÉNARIOS ALTERNATIFS	 48
FAITS SAILLANTS	48
STRUCTURE DU CHAPITRE	50
ANALYSE ÉNERGÉTIQUE ET TECHNOLOGIQUE	51
MOBILITÉ DURABLE / AMÉNAGEMENT URBAIN (SCÉNARIO ALTERNATIF 1)	52
TISSU INDUSTRIEL (SCÉNARIO ALTERNATIF 2)	57
AJUSTEMENT DU SYSTÈME ALIMENTAIRE (SCÉNARIO ALTERNATIF 3)	61
DEMANDES (SCÉNARIO ALTERNATIF 4)	63
RISQUES TECHNOLOGIQUES (SCÉNARIO ALTERNATIF 5).....	64
CAPTAGE ET SÉQUESTRATION DU CARBONE (SCÉNARIO ALTERNATIF 6).....	65
BIOMASSE (SCÉNARIO ALTERNATIF 7).....	69
COMBINAISON DES SCÉNARIOS FAVORABLES (SCÉNARIO ALTERNATIF 8)	72
ANALYSE ÉCONOMIQUE	75
 PRIORISATION DES MESURES ET IMPACTS POUR LE QUÉBEC	 79
PRIORISATION DES MESURES	79
IMPACTS SUR L'EMPLOI ET L'ÉCONOMIE	85
AXES DE RECHERCHE	87
 CONCLUSION	 89
RAPPEL DES PRINCIPAUX RÉSULTATS	89
PERSPECTIVES POUR LE QUÉBEC	90

ANNEXE – GRAPHIQUES SUPPLÉMENTAIRES (ÉMISSIONS DE GES PAR SECTEUR POUR L'ENSEMBLE DES SCÉNARIOS)92

GLOSSAIRE

Bioénergie avec captage et séquestration de carbone (BECSC)

Combinaison d'une bioénergie carbon neutre (p. ex., biomasse) 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 capturé 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 et séquestration du carbone (CSC)

Technologie 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 ($\$/\text{tCO}_2\text{éq}$).

Coûts totaux

Somme de tous les coûts d'un scénario qui sont requis pour l'ensemble des réductions d'émissions de **GES**.

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).

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).

Trinitrooxypropanol ou 3-Nitrooxypropanol (3-NOP)

Composé organique qui, lorsqu'ajouté à la diète des ruminants, inhibe l'enzyme responsable de la production de méthane.

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 acronymes sont utilisés en français : UTCF, UTCATF, ATCATF, ARSS... Afin d'éviter toute confusion, nous avons utilisé l'acronyme 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 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 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, d'investir davantage dans le stockage ou la gestion de la pointe et produire plus d'énergie variable, ou encore 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 avec le temps. Ces derniers, bien que reflétant les meilleures connaissances et prévisions d'aujourd'hui, pourront encore 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 30 ans 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

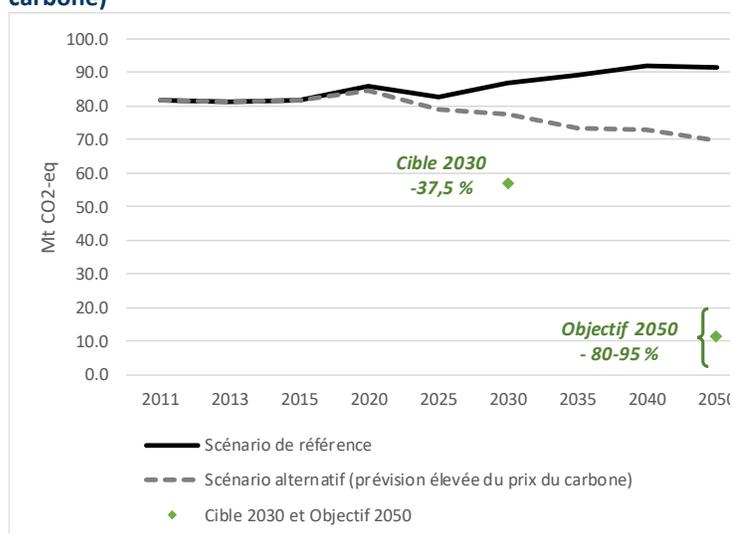
INTRODUCTION

En 2015, dans le contexte de la Conférence de Paris sur le climat, le Québec s’est doté d’une cible ambitieuse de réduction de ses émissions de gaz à effet de serre (GES), soit une réduction de 37,5 % à l’horizon 2030 par rapport à 1990. Le Québec s’est également donné pour objectif de réduire ses émissions de 80 à 95 % d’ici 2050.

Ces engagements, s’ils sont réussis, 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 sans changement aux politiques actuelles (selon différentes prévisions du prix du carbone)



La ligne pleine représente la situation avec un prix du carbone indexé annuellement (5 % plus l’inflation), tandis que la ligne en pointillé s’appuie sur un scénario de prix élevé (un prix multiplié environ par 4).

Pourquoi établir des trajectoires ?

C’est dans le cadre de la 22^e conférence des parties de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (COP22), tenue en novembre 2016, que le Gouvernement du Québec a adhéré à la Coalition Under 2. Cette adhésion engage le Québec à réduire ses émissions de GES de 80 % à 95 % d’ici 2050, soit un niveau de réduction qui ramènerait les émissions à un équivalent de deux tCO₂éq par habitant.

L’atteinte de cet objectif 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 d’atteindre non seulement cet objectif de 2050, mais également sa cible de 2030 qui vise une réduction de 37,5 %.

LA MÉTHODOLOGIE EN BREF

La présente étude comprend trois grands volets. D’abord, quatre scénarios de réduction des émissions québécoises de GES, dont certains atteignent la cible de 2030 et l’objectif de 2050, ont été testés à l’aide du modèle NATEM en considérant les différentes solutions technologiques disponibles (voir tableau S-1).

Tableau S-1 – Scénarios de réduction

	Scénario A	Scénario B	Scénario C	Scénario D
En pourcentage de réduction par rapport aux émissions de 1990				
Horizon 2030	-25 %	-30 %	-37,5 %	-37,5 %
Horizon 2050	-65 %	-70 %	-75 %	-87,5 %
En émissions totales annuelles permises (MtCO ₂ éq) ¹				
Horizon 2030	68,2	63,7	56,9	56,9
Horizon 2050	31,8	27,3	22,7	11,4

Puis, huit scénarios alternatifs agissant sur les demandes, sur les risques technologiques ou des contraintes d’acceptabilité sociale ont également été modélisés afin d’évaluer leurs effets sur les émissions de GES, le système énergétique, les coûts, etc. Plus spécifiquement, ces scénarios sont les suivants : un aménagement urbain orienté vers la mobilité durable ; une transition vers des industries vertes ; un ajustement du système alimentaire ; une combinaison de ces trois premiers scénarios ; un retrait des options technologiques les plus risquées ; un captage et une séquestration du carbone correspondant au potentiel géologique ; une utilisation accrue de la biomasse ; et la combinaison de tous les scénarios favorables précédents.

Enfin, une analyse économique a été réalisée pour chacun des secteurs à l’étude (transport, industrie, bâtiments, électricité, agriculture et matières résiduelles) afin d’évaluer les coûts marginaux, moyens et totaux liés à l’instauration de ces technologies afin de réduire les émissions de GES. L’évaluation de ces coûts a aussi été effectuée pour les huit scénarios alternatifs.

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).

Ici, notre modélisation est de type technico-économique, ce qui signifie qu’elle ne tient pas compte des barrières de marché. Nous invitons donc le lecteur à garder cela en tête lors de l’interprétation des résultats, notamment en ce qui a trait à :

- **Efficacité énergétique** : Puisqu’il s’agit d’une mesure rentable, le modèle présume que son adoption se fera naturellement. Or, l’efficacité énergétique fait face à de multiples barrières autres qu’économiques, limitant ainsi sa contribution réelle. Il faudra donc s’attaquer à ces barrières pour bénéficier du plein potentiel de l’efficacité énergétique.
- **Autres solutions technologiques** : Pour accélérer l’adoption des technologies sobres en carbone, il sera nécessaire de s’attaquer non seulement aux coûts, mais également aux autres barrières de marché qui pourraient ralentir leur diffusion.

¹ MtCO₂éq = millions de tCO₂éq.

L'étude menée par l'équipe Dunsky est le fruit d'une modélisation détaillée de l'ensemble des solutions, technologiques et autres, connues ou prévisibles en date de 2018. 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 réalisables, et ce, sur son propre territoire (c'est-à-dire sans recourir à l'achat de crédits de carbone à l'extérieur). Cela étant dit, cela 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/ COMPORTEMENTS² : 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. 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.

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

Les solutions de rechange technologique et les changements de comportement demeurent les meilleurs outils pour transitionner vers un Québec sobre en carbone, entre autres parce qu'ils procurent des cobénéfices 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. En quelque sorte, le CSC peut être vu comme une police d'assurance.

² 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 :

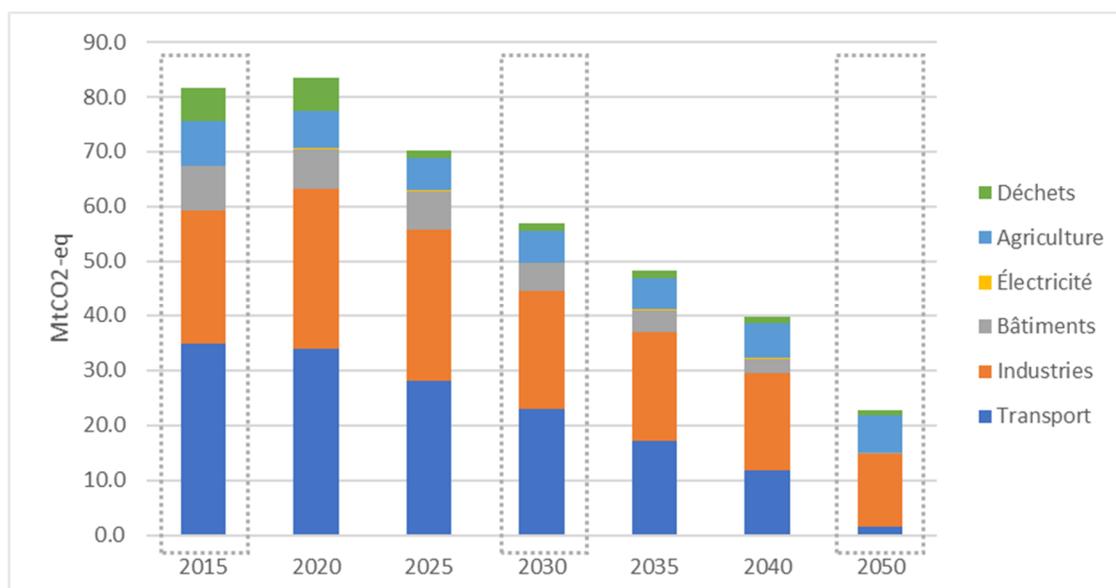
- Les enjeux de concurrence internationale ;
- Les effets des changements climatiques (p. ex. le réchauffement des températures et leur impact sur le chauffage des bâtiments) ;
- Les émissions non comprises dans l'inventaire du Québec, par exemple les mesures touchant l'utilisation des terres, le changement 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 ;

Pour plus de détails, nous invitons le lecteur à se référer au chapitre 2 du rapport.

1/ ACCÉLÉRER LES TECHNOLOGIES SOBRES EN CARBONE

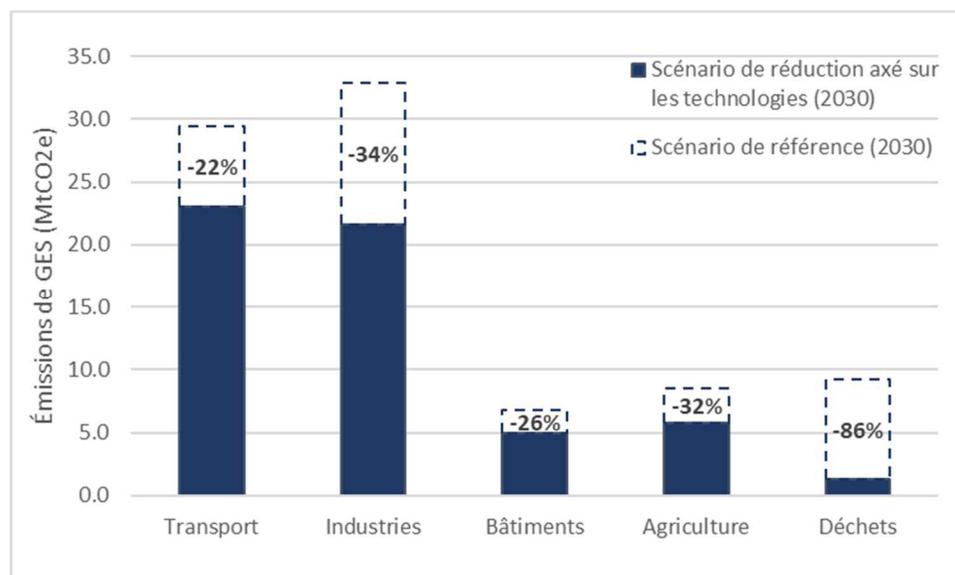
L'ampleur du défi à surmonter pour atteindre les cibles et objectifs de réduction du Québec, surtout à l'horizon 2050, ne laisse pas la possibilité d'écarter quelque option que ce soit. Chaque secteur d'émissions doit être sollicité pour réduire son empreinte carbone. C'est aussi vrai pour 2030, même si la barre est moins haute (graphique S2).

Graphique S2 : Les émissions par secteur, selon le scénario technologique de réduction réalisable le plus ambitieux (scénario C), sans changement de comportements (demandes).



Pour 2030, en comparaison aux émissions de 2015, les réductions proviennent surtout du transport et des déchets, et dans une moindre mesure, de l'agriculture et des bâtiments. Les émissions industrielles restent relativement stables, reflétant le fait que les réductions tout de même substantielles obtenues (34 % par rapport au scénario de référence de 2030) viennent essentiellement compenser l'effet de la croissance prévue de la production. Ce constat souligne l'importance d'agir également dans le secteur industriel afin de compenser les effets prévus de la croissance.

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



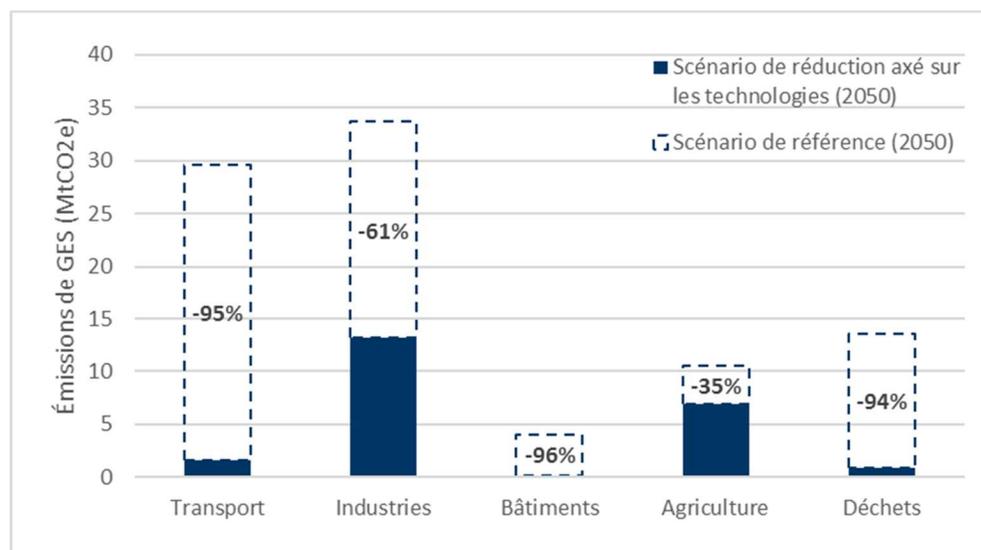
En 2050, le portrait est quelque peu différent et la variation entre les secteurs s'accroît. Pour certains secteurs, il serait possible d'atteindre une très grande réduction (au-delà de 90 %) :

- Les **transports** pourront être largement électrifiés (environ 50 % de la consommation totale d'énergie) et, pour les segments où ce n'est pas possible, être alimentés à la bioénergie (biocarburants) (près d'un tiers de la consommation totale d'énergie).
- Les **bâtiments** pourront eux aussi être électrifiés (ceux qui chauffent aujourd'hui au gaz naturel et au mazout) ou se tourner vers la bioénergie (chauffage à la biomasse et gaz naturel renouvelable (GNR) par exemple).
- Les **déchets** pourront être traités de façon à pratiquement éliminer leurs émissions (jusqu'à 94 %, 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 plafond à 61 % de réduction des émissions de GES à l'horizon 2050 (par rapport au scénario de référence de 2050). Malgré une forte électrification et un usage accru de la bioénergie (qui s'attaque directement aux émissions de combustion seulement), les émissions de procédé demeurent largement présentes en 2050. 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 35 % à l'horizon 2050. La majorité des émissions du secteur agricole provient de l'utilisation d'engrais pour les sols, de la gestion du fumier et des animaux destinés à la consommation alimentaire, des activités où la technologie existante ne permet pas d'atteindre des niveaux de réduction élevés.

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



Ainsi, 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, le recours aux technologies ne suffit pas à lui seul à atteindre l'objectif à plus long terme qui pourrait donc nécessiter des mesures additionnelles axées notamment sur la réduction des demandes ou encore l'achat de crédits de carbone internationaux. En jouant uniquement sur des changements de technologie, avec un recours limité au captage et séquestration du carbone (CSC)³, notre modélisation montre qu'on peut atteindre 75 % de réduction en 2050, ce qui s'avère insuffisant pour atteindre le minimum de 80 % nécessaire pour respecter l'objectif du Québec. Atteindre 80 % et plus de réduction des émissions québécoises d'ici 2050 nécessitera donc soit de développer de nouvelles technologies, soit de jouer sur d'autres facteurs, comme les choix qui influencent la demande énergétique.

2/ AGIR POUR RÉDUIRE LES DEMANDES

Pour atteindre l'objectif 2050, il sera incontournable de jouer sur les 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 85 % sous le niveau de 1990 sont possibles en 2050. Ceci nous indique que les objectifs du Québec sont atteignables à la condition de miser, non seulement sur les technologies, mais également sur la réduction des demandes anticipées découlant de tendances actuelles et de politiques publiques (p. ex., aménagement du territoire). En outre, cela permettra de diminuer la

³ Pour tenir compte des enjeux d'acceptabilité sociale, de fiabilité de la séquestration géologique et de maturité de la technologie de CSC, le recours au CSC a été limité à un niveau de 2,5 MtCO₂éq/an. En outre, la génération d'émissions négatives (utilisation conjointe de bioénergie et de CSC ou BECSC) n'a pas été considérée dans le scénario présenté ici.

facture totale, puisqu'une diminution des demandes amènerait une baisse du coût marginal de plus de 40 % à l'horizon 2050.

Pour cela, 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 circulaire⁴.

- **Système alimentaire**

Diminution du gaspillage alimentaire et diversification des sources de protéines du régime alimentaire⁵.

3/ CAPTER ET SÉQUESTERER CE QU'IL RESTE

Étant donné l'incertitude entourant le changement de comportements lié à la réduction des demandes et le développement des technologies dans le temps, ou pour aller au-delà de 85 % en 2050, le captage et séquestration de carbone (CSC)⁶ pourrait s'avérer nécessaire. Cette technologie consiste à capter une quantité de carbone pour le séquestrer dans le sol. Elle est donc une option complémentaire, mais qui doit être prévue en parallèle dès maintenant pour assurer la possibilité d'y avoir recours au besoin.

Notre analyse montre qu'une fois les besoins réduits (#2 ci-haut) et les technologies sobres en carbone adoptées (#1 ci-haut), les émissions de GES qui subsistent sont principalement issues des procédés industriels ainsi que de l'agriculture (émissions non énergétiques). Il est possible 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, le CSC pourrait combler la différence.

⁴ 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.

⁵ 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).

⁶ Il existe plusieurs variantes du captage et séquestration de carbone (CSC) : (1) le CSC « traditionnel » qui 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 ; et (2) la bioénergie avec CSC (BECS), qui consiste à produire de l'électricité 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. Il existe aussi quelques avenues de valorisation du carbone, La séquestration dans des formations géologiques adéquates est la seule variante exploitée à grande échelle présentement.

Soulignons que l'objectif 2050 pourrait être atteint à un coût moindre en ayant davantage recours au CSC que ce qui a été envisagé ici (plafond de 2,5 MtCO₂éq par an). Toutefois, ce faisant, le Québec laisserait de côté d'importants cobénéfices que les mesures de réduction à la source offrent (qualité de l'air, santé humaine, indépendance par rapport aux produits pétroliers et balance commerciale).

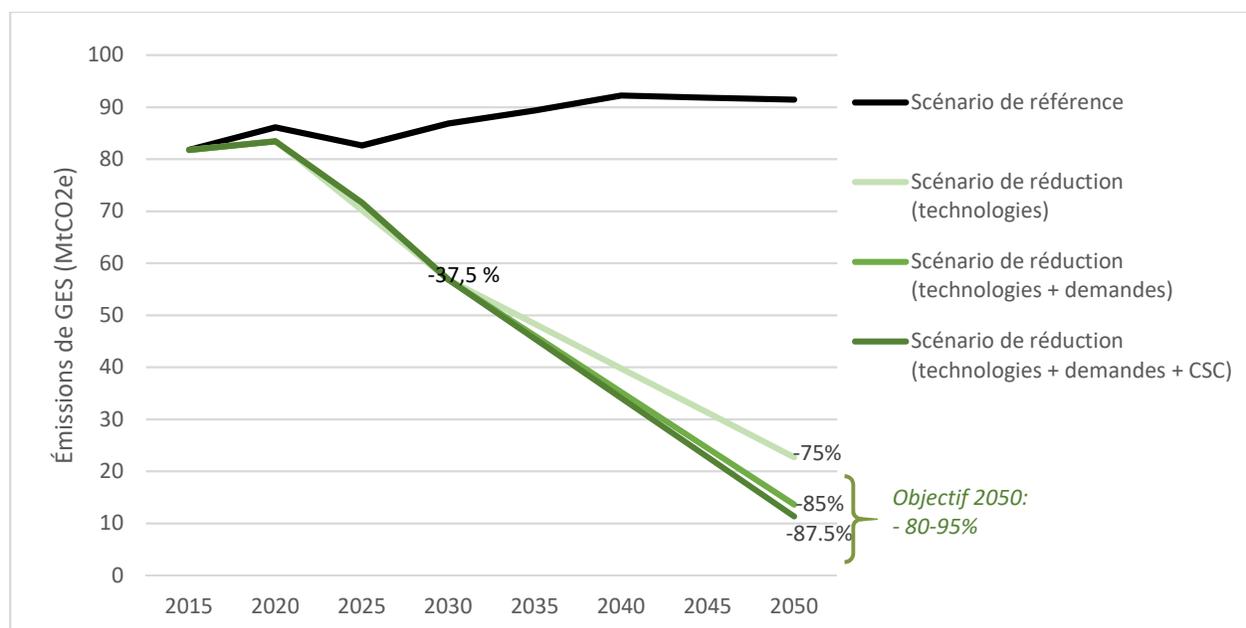
Dans cette optique, les technologies de CSC offrent une relative marge de manœuvre pour atteindre l'objectif à l'horizon 2050, advenant que les mesures de réduction s'avèrent insuffisantes.

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

Dans le cas où le Québec n'arriverait pas à atteindre sa cible de 2030 ou son objectif de 2050 sur son territoire, l'achat de crédits de carbone internationaux, notamment sur le marché du carbone, demeurerait une possibilité pour combler la différence. Toutefois, cette option est risquée, car le prix et la rareté des crédits de carbone pourraient augmenter significativement dans le temps. Réduire les émissions au Québec viendrait donc diminuer le risque financier associé à l'achat de crédits carbone, tout en investissant dans son économie et en améliorant à la fois la qualité de l'air et la balance

Graphique S5 : La réduction des émissions en jouant sur trois leviers : l'optimisation technologique, la réduction de demandes et le CSC.



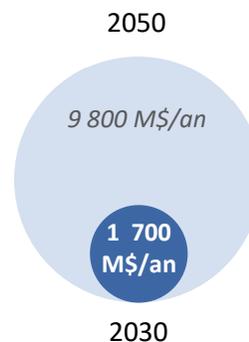
IMPLICATIONS POUR LE QUÉBEC

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/ INVESTISSEMENTS ET COÛTS

Tout d'abord, pour mettre en œuvre les solutions technologiques nécessaires à l'atteinte des objectifs du Québec, des investissements significatifs seront requis. Pour atteindre la cible de 2030, on estime qu'avec des solutions technologiques uniquement, des investissements moyens de 1,7 milliard de dollars par année (sur la période 2021-2030)⁷ seront nécessaires en sus des investissements déjà prévus dans le scénario de référence. Ces investissements pourraient être réduits en privilégiant des mesures en lien avec la réduction de demandes.

Le coût net⁸ moyen annuel 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, sans tenir compte de nouveaux progrès technologiques présentement inconnues). Ces coûts correspondent à un coût moyen de 87 \$/tCO₂éq à l'horizon 2030 (et de 220 \$/tCO₂éq à l'horizon 2050) - voir les graphiques 1-29 et 1-30).



Faits à noter :

- Seule une partie de ces coûts serait assumée par le gouvernement du Québec. Le reste sera absorbé par les industries, entreprises et ménages sur le territoire du Québec. Le gouvernement pourra intervenir, par exemple, dans la recherche et développement de solutions, en offrant des aides financières pour encourager l'adoption de technologies propres ou encore en mettant sur pied des mesures, des politiques et des réglementations pour changer les comportements.
- 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 en meilleure santé (grâce à l'amélioration de la qualité de l'air et les transports actifs). En ce sens, le coût net sera assurément moins élevé.
- Rappelons également que des innovations futures imprévisibles actuellement pourraient venir diminuer la facture totale pour le Québec.

⁷ L'ensemble des valeurs monétaires indiquées dans ce rapport sont exprimées en dollars constants de 2018.

⁸ Les coûts incluent l'ensemble des coûts incrémentaux (c.-à-d. les coûts additionnels des technologies propres par rapport aux technologies de base), ainsi que les économies d'énergie et autres coûts et économies d'opération pour l'ensemble des secteurs économiques (particuliers, entreprises, administrations publiques). Ils tiennent compte également de la valeur résiduelle des actifs à la fin de l'horizon temporel de modélisation. Il existe de grandes incertitudes sur ces estimés en raison des hypothèses nécessaires à leur calcul. Nous invitons le lecteur à se référer au chapitre 1 du rapport pour plus de détails.

2/ BALANCE COMMERCIALE ÉNERGÉTIQUE

2030
+
2 milliards \$/an



2050
+ 5 milliards \$/an

Avec la décarbonisation de l'économie, le portrait énergétique du Québec opérera un changement sans précédent. On assistera à une forte diminution de la dépendance au pétrole et au gaz naturel importés, au profit de l'électricité et des bioénergies produites au Québec. En rapatriant ces capitaux présentement dédiés aux importations d'énergie fossile, le Québec pourra les réinvestir dans des projets de production d'électricité renouvelable.

En 2030, la balance commerciale interprovinciale et internationale du Québec pour l'énergie s'améliorera de près de 2 milliards de dollars par an grâce à une réduction substantielle des importations de pétrole brut et, dans une moindre mesure, de gaz naturel. D'ici 2050, ce gain se porte à près de 5 milliards de dollars par an⁹.

3/ 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 2030¹⁰. 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).

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 mondiale¹¹.

↗ Exportations



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

⁹ Chiffres obtenus en comparant les importations et exportations de l'énergie du scénario de réduction par rapport au scénario de référence en 2030 et 2050. Notons que le scénario de référence lui-même inclut déjà une amélioration substantielle de la balance commerciale énergétique en 2050.

¹⁰ 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*.

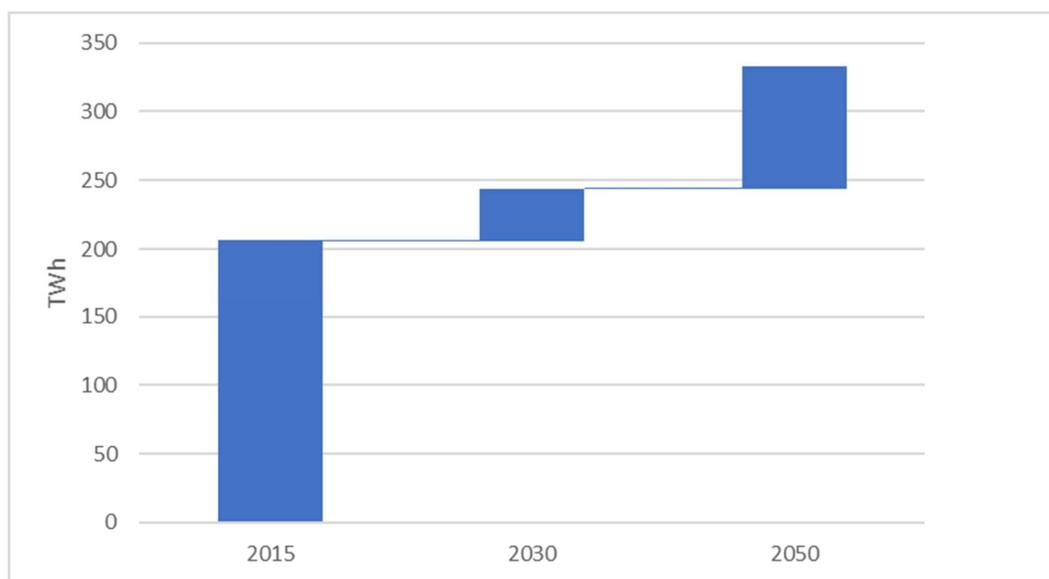
¹¹ Basé sur une étude de The Global Commission on the Economy and Climate (2015) "*Seizing the Global Opportunity*". Selon cette étude, le marché mondial des technologies sobres en carbone s'élevait à 5 500 milliards de dollars américains en 2011, et bénéficie d'une croissance annuelle de 3 %.

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.

4/ GÉNÉRATION D'ÉLECTRICITÉ

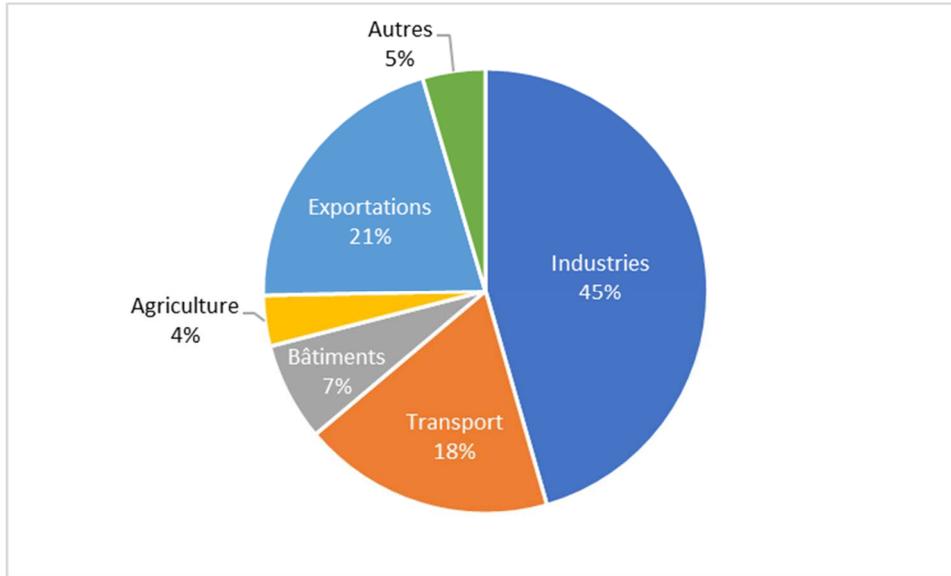
Pour répondre à l'électrification croissante des systèmes (dans les transports, les bâtiments et l'industrie), il sera nécessaire, tout d'abord, de consommer l'électricité plus efficacement (en privilégiant l'efficacité énergétique), mais également d'augmenter la production d'électricité, à partir de sources propres comme l'éolien, l'hydroélectricité et le solaire (graphique S6).

Graphique S6 : L'électricité additionnelle requise pour répondre à l'électrification croissante des systèmes, (selon le scénario de réduction alternatif sur les technologies et la réduction des demandes).



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). Considérant que la grande majorité de l'électricité additionnelle à l'horizon 2050 est utilisée dans le secteur industriel (graphique S7), l'accent pourra être mis sur ce secteur. Cela aurait notamment pour effet d'améliorer la productivité énergétique de nos industries, améliorant ainsi leur compétitivité.

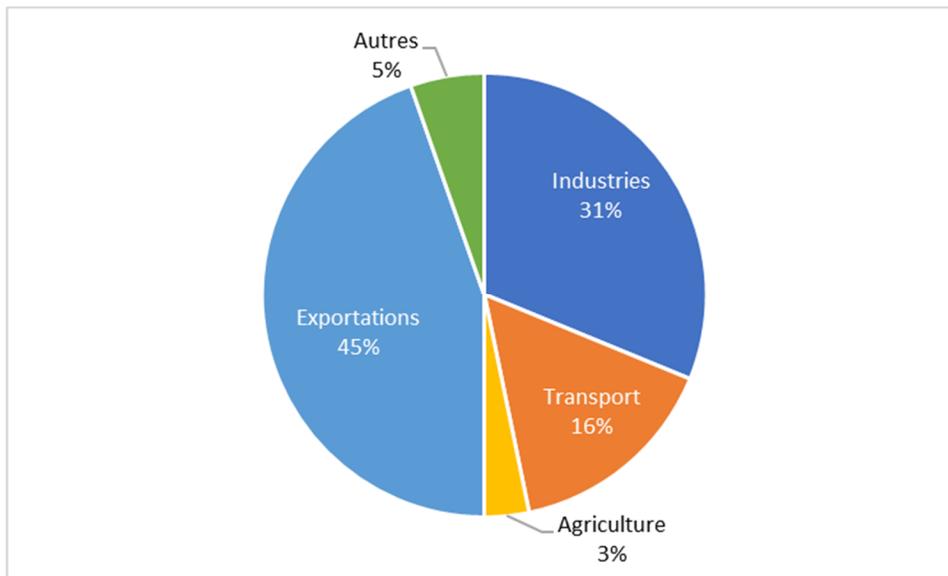
Graphique S7 : La répartition de la consommation additionnelle d'électricité à l'horizon 2050.



Mis à part l'électrification au Québec des transports, de l'industrie et du bâtiment, 21 % de cette nouvelle production vient augmenter les exportations vers les autres provinces pour les appuyer dans l'atteinte de leur propre cible. Ce pourcentage serait vraisemblablement beaucoup plus élevé sans la contrainte sur les exportations d'électricité imposée au modèle.

À l'horizon 2030, les tendances sont sensiblement les mêmes, avec toutefois une importance accrue pour les exportations (45 % de la consommation additionnelle d'électricité) et moindre pour les industries (31 %). Le secteur des Bâtiments n'apparaît pas dans ce graphique, car sa consommation totale d'électricité à l'horizon 2030 décroît, l'efficacité énergétique compensant les besoins accrus dus à l'électrification et à la croissance démographique dans ce secteur.

Graphique S8 : La répartition de la consommation additionnelle d'électricité à l'horizon 2030.



5/ 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 et de l'endroit où elle sera utilisée (particulièrement dans les grands centres urbains).



Les besoins supplémentaires en électricité nécessiteront de construire davantage de barrages hydroélectriques, de parcs éoliens ou de parcs solaires. 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 pourrait investir davantage dans l'efficacité énergétique, ou encore favoriser les secteurs industriels peu énergivores.

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

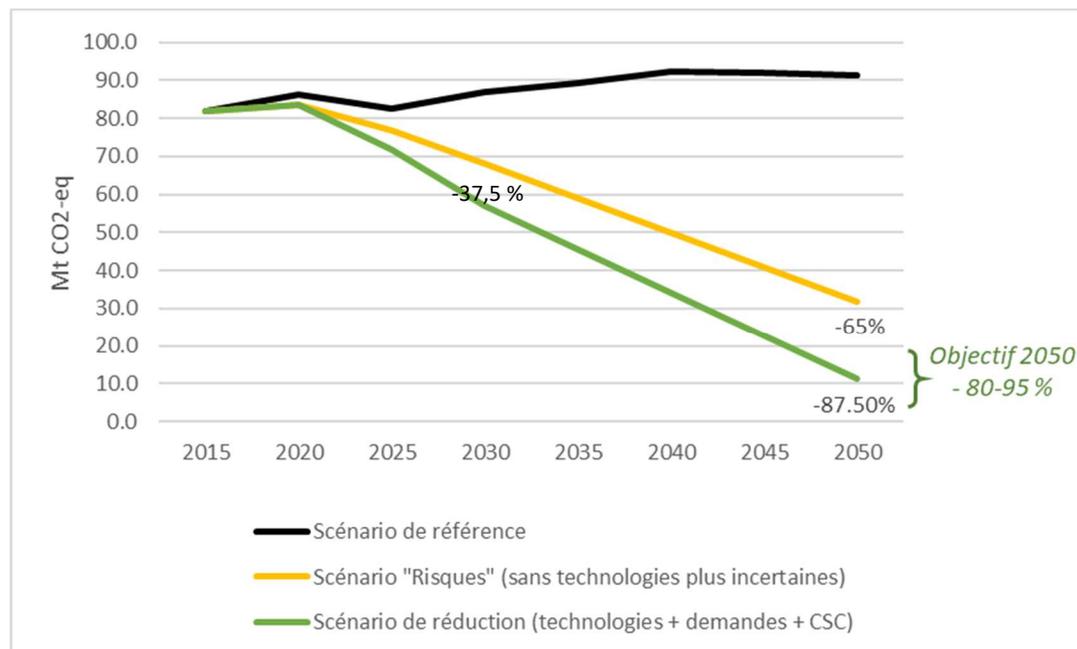
Nous réitérons que notre analyse tient seulement compte des technologies connues à ce jour, qu'elles soient commercialisées ou en développement. Considérant le rythme des innovations dans les dernières décennies, il est probable que de nouvelles technologies fassent leur apparition d'ici 2030 et encore 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 pour cela modélisé un scénario excluant le recours aux technologies les moins certaines¹². Dans ce cas, les réductions maximales pouvant être atteintes seraient de l'ordre de 65 % en 2050, loin de l'objectif minimal de 80 % (graphique S9)¹³. 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.

¹² 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 limitée à une faible utilisation et la substitution limitée du clinker dans la production de ciment.

¹³ Comme l'impact du retrait de ces technologies est beaucoup plus important à l'horizon 2050 qu'en 2030 et que l'objectif de réduction de 2050 est plus difficilement atteignable que la cible de réduction de 2030, nous avons fait porter l'analyse du risque sur l'année 2050 qui nous apparaît plus pertinente. De plus, bien que le scénario A établisse la cible de 2030 à 25 %, il est fort possible que des réductions additionnelles puissent être atteintes malgré le retrait des technologies risquées.

Graphique S9 : L'impact du retrait des technologies plus risquées sur l'atteinte des cibles et objectifs.



2/ ACCEPTABILITÉ SOCIALE



Notre analyse montre que, d'ici 2050, un virage devra s'effectuer pour délaisser les énergies fossiles, 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 125 à 185 TWh de plus à l'horizon 2050 par rapport à 2015¹⁴. L'ajout de nouveaux barrages, parcs éoliens ou panneaux solaires 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.



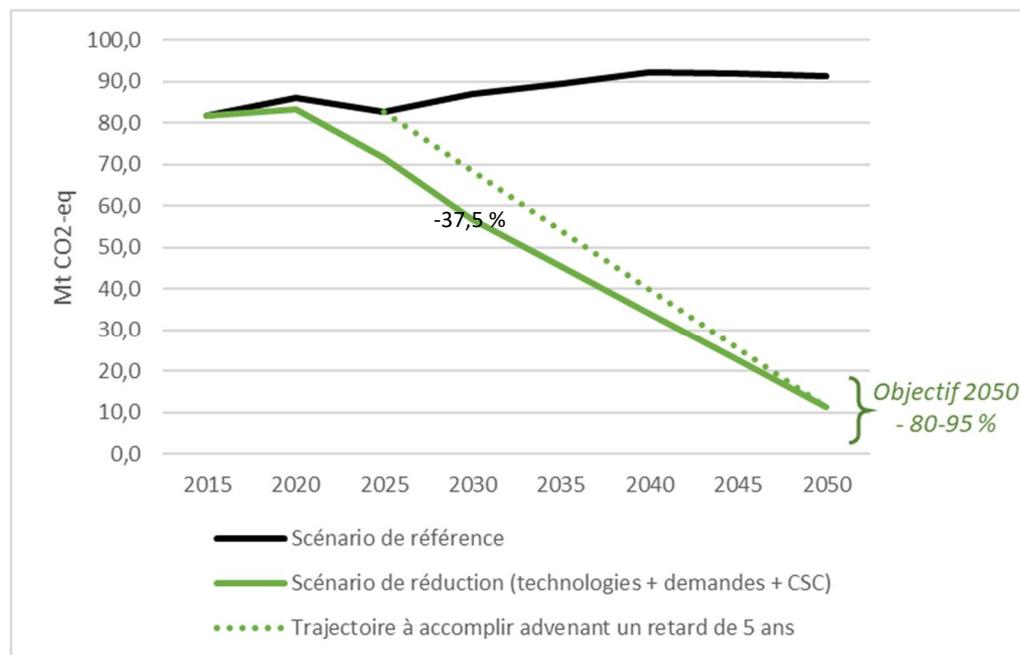
Finalement, le recours au CSC pourrait également soulever des enjeux d'acceptabilité liés notamment aux craintes à propos de l'injection aux sites de séquestration, même pour les premières tonnes séquestrées, bien que nous ayons par ailleurs sévèrement limité cette option dans le scénario de base.

¹⁴ 125 TWh dans le scénario de réduction axé sur la réduction des demandes et 185 TWh dans le scénario de réduction sans changement aux demandes. En comparaison, la production totale d'électricité était de 206 TWh en 2015.

3/ RETARDS DANS LA RÉDUCTION DES GES

L'atteinte des cibles et objectifs implique une transformation majeure. Cela va nécessiter d'importants changements dans nos façons de faire, ainsi que des investissements conséquents. Advenant que le Québec tarde à infléchir la tendance actuelle, l'effort sera encore plus grand et le temps pour y arriver plus court (graphique S10). Le changement de cap sera donc encore plus difficile à opérer et les coûts pour s'y rendre inévitablement plus grands.

Graphique S10 : L'impact d'un retard dans la mise en œuvre de solutions de réduction des émissions de GES.



4/ ALLER AU-DELÀ DE LA CIBLE 2030 ?

Cette sous-section présente une brève analyse de la possibilité de dépasser la cible de 37,5 % de réduction de GES pour 2030.

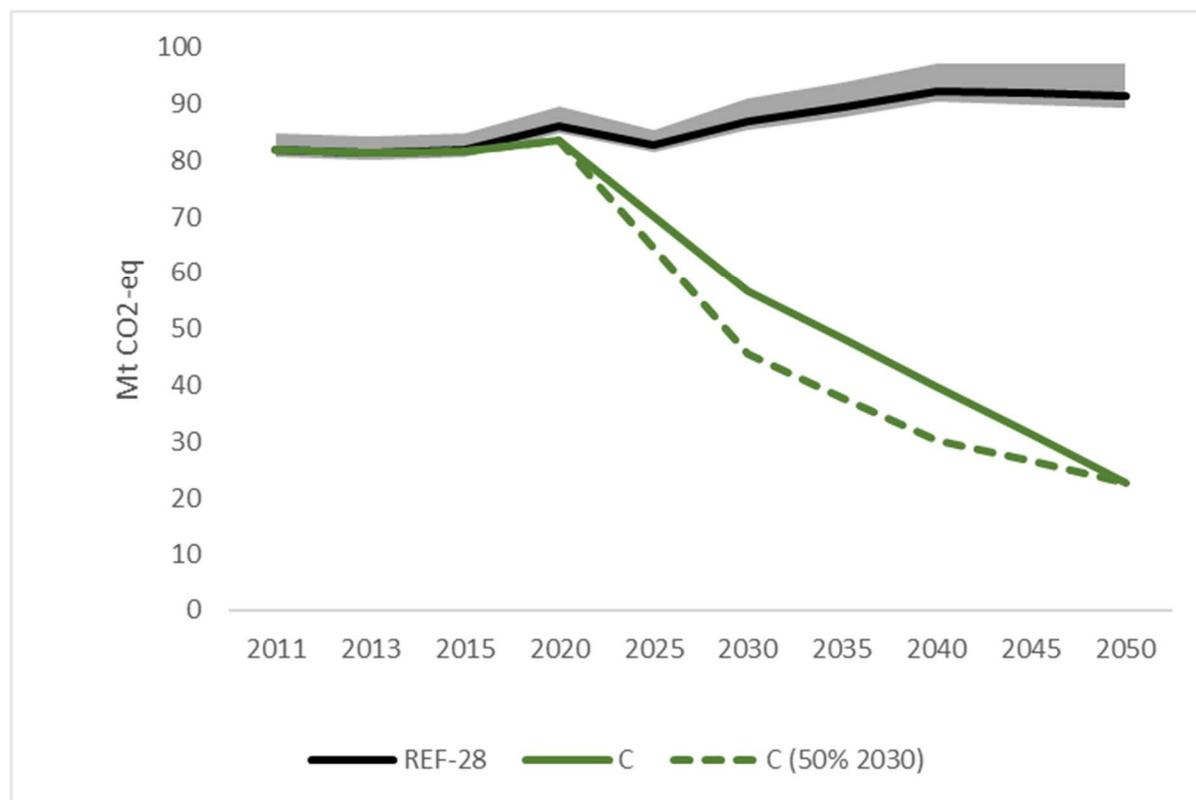
Les travaux de modélisation indiquent qu'il serait possible d'atteindre la cible de réduction des émissions de GES de 37,5 % en s'appuyant sur des solutions technologiques (scénario C). Ces modélisations nous indiquent aussi qu'il serait vraisemblablement nécessaire¹⁵, pour tendre vers une réduction de 50 % des émissions de GES, non seulement de mettre en œuvre le plein potentiel de solutions technologiques, mais également d'agir sur les comportements permettant de réduire la demande totale en énergie et de miser sur un recours accru au CSC.

Les coûts marginaux augmentent substantiellement au-delà de la cible de 37,5 % de réduction de GES. Pour des réductions de GES de l'ordre de 45 % à 50 % par rapport à 1990, des coûts marginaux de l'ordre de 500 \$/tCO₂éq sont à prévoir.

¹⁵ Selon les scénarios modélisés, le niveau de réductions de 50 % en 2030 ne peut être atteint avec les niveaux de taxe ayant été testés dans le modèle. Des analyses supplémentaires seraient requises pour évaluer les conditions permettant l'atteinte d'un tel niveau de réduction.

Le scénario de réduction C représente un changement de cap majeur et un défi par rapport au scénario de référence, lequel inclut déjà les politiques gouvernementales en vigueur (voir graphique S11). Beaucoup d'incertitude prévaut, tant sur la capacité et la disposition de l'ensemble des parties prenantes de la société d'agir pour réduire les émissions de GES, que sur l'acceptabilité face au recours accru à certaines mesures dont le CSC. Accroître le niveau de réduction d'émissions de GES visé implique également une exposition accrue au risque par rapport aux nouvelles technologies non encore éprouvées, car la marge de manœuvre des options disponibles est réduite.

Graphique S11 : L'impact d'un dépassement de la cible de 2030



PERSPECTIVES POUR LE QUÉBEC

Ce qu'on peut retenir de toute cette analyse, c'est que le défi climatique est d'ampleur. 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 (que ce soit hydroélectrique, éolienne ou 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 pour le CSC.

Au regard de cette analyse, voici les priorités qui émergent en vue de la cible de 2030 :

Si le Québec souhaite tirer le maximum de cobénéfices 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 (ceux-ci représentent 60 % des réductions attendues en 2030).

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 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. Le CSC peut également contribuer à réduire les coûts de la transition. Les scénarios qui ne placent pas de limite au CSC sont en effet les moins coûteux. Il faut toutefois rappeler que ces mesures sont peu efficaces d'un point de vue énergétique et n'apportent pas les cobénéfices des autres options de réductions. Le recours au CSC peut aussi comporter des enjeux d'acceptabilité sociale.

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.



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 comporte deux principaux chapitres : le premier porte sur les trajectoires de réduction d'émissions de GES qu'il est possible d'atteindre en adoptant des technologies sobres en carbone (Chapitre 1), tandis que le second analyse la sensibilité de ces trajectoires à des facteurs tels que la réduction de demandes, les risques technologiques ou la disponibilité des ressources (Chapitre 2).

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, le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, ainsi que le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation 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 le scénario de référence puis plusieurs scénarios de réduction des émissions de GES.

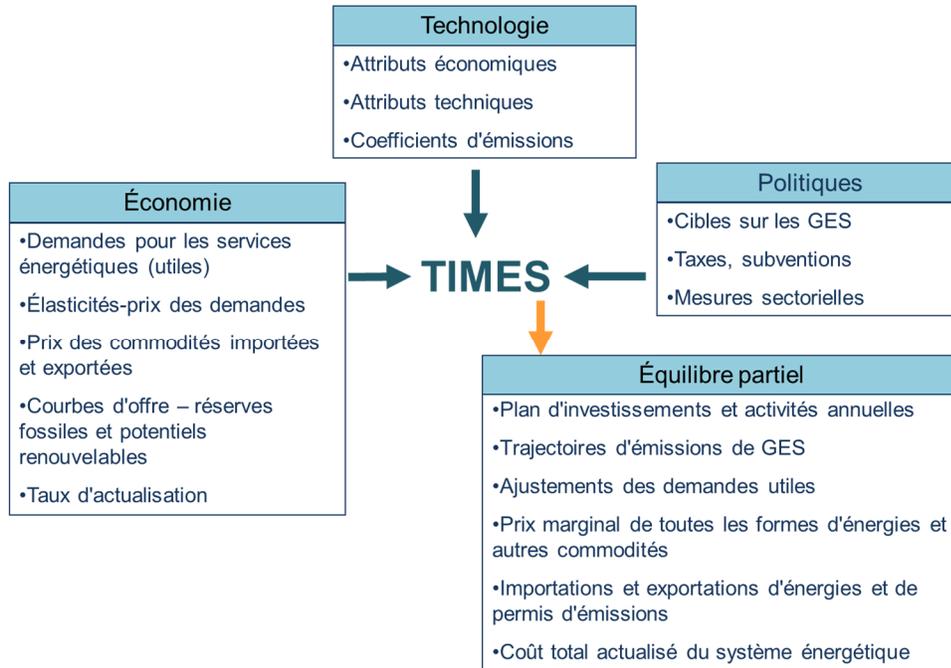
DESCRIPTION DU MODÈLE NATEM

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 du système énergétique pour la société, 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 du scénario de référence** : le scénario de référence représente 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 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 endogènes de certaines demandes utiles (sous l'effet d'élasticité-prix, tel qu'expliqué dans les précisions méthodologiques).
3. **Modélisation de trajectoires de GES pour 2050** : de la même façon que pour les trajectoires 2030, le modèle permet d'élaborer des scénarios optimisés visant à atteindre un objectif de réduction prédéfini en 2050.
4. **Modélisation de scénarios alternatifs** : des contraintes exogènes au modèle (réduction des projections de demandes utiles, risques technologiques, ressources disponibles) ont été ajoutées dans des scénarios alternatifs, pour évaluer leur impact sur les trajectoires.

Les trois sections suivantes fournissent davantage de détails sur le scénario de référence, les scénarios de réduction ainsi que les scénarios alternatifs 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 visant à réduire les émissions de GES. Il inclut toutefois les politiques gouvernementales déjà en vigueur, telles que les mesures du *Plan d'action en électrification des transports* (MTQ, 2015), la réglementation fédérale sur la teneur minimale en contenu renouvelable dans l'essence et le diesel vendu au Canada, le marché du carbone¹⁶, les mesures du *Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques* (MDDELCC, 2012), etc.

Pour des politiques telles que le Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC 2013 -2020), nous ne tenons pas compte des budgets, mais de leurs effets prévus (p. ex., électrification). Nous supposons qu'il n'y a pas de retour en arrière (p. ex., retrait de l'électrification), mais nous ne supposons pas non plus que de nouvelles initiatives sont mises en place à la fin de la période d'un plan pour pousser les mesures plus loin.

Le scénario de référence a été validé avec le MELCC.

¹⁶ Le marché du carbone auquel le Québec adhère est modélisé comme une taxe sur le carbone. Le niveau de « taxe » est établi de manière exogène. Le niveau de prix utilisé dans le scénario de référence est de 25 \$ en 2030 et 67 \$ en 2050 en dollars constants de 2018.

SCÉNARIOS DE RÉDUCTION

Nous avons défini, en collaboration avec le MELCC, quatre scénarios de réduction d'émissions de GES (tableau M-1). Notons que le niveau de réduction cible des émissions domestiques du scénario C pour 2050 a été établi selon le niveau de réductions maximal que le modèle est en mesure d'atteindre sans changement de comportements (demandes).

Tableau M-1 – Scénarios de réduction¹⁷

	Scénario A	Scénario B	Scénario C	Scénario D
En pourcentage de réduction par rapport aux émissions de 1990				
Horizon 2030	-25 %	-30 %	-37,5 %	-37,5 %
Horizon 2050	-65 %	-70 %	-75 %	-87,5 %
En émissions totales annuelles permises (MtCO₂éq)				
Horizon 2030	68,2	63,7	56,9	56,9
Horizon 2050	31,8	27,3	22,7	11,4

Le scénario D est aligné sur les cibles et objectifs de réduction du Québec d'ici 2030 et 2050. Bien que les scénarios A, B et C soient moins contraignants que le scénario D, cela ne signifie pas nécessairement que les cibles du Québec ne seraient pas atteintes, car l'achat de crédits de carbone internationaux est possible pour combler la différence. En effet, les cibles et objectifs 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.

SCÉNARIO DE BASE

Le scénario de base reflète une économie caractérisée par des demandes qui suivent les tendances actuelles. La demande de transport de passagers urbains, par exemple, suit l'aménagement urbain actuel. Le scénario de base est composé d'un scénario de référence et de plusieurs scénarios de réduction (voir la figure M-3).

Dans le scénario de base, le modèle ne trouve pas de solution pour atteindre l'objectif de réduction du scénario de réduction D en 2050. Dans les graphiques, nous ne présenterons donc que les scénarios de réduction A à C. Le scénario C, notamment, pousse les réductions au maximum réalisable en 2050 tout en atteignant la cible à l'horizon 2030.

ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Pour explorer la sensibilité du scénario de base à certains paramètres de l'économie, deux analyses de sensibilité ont été construites. Elles reflètent une économie semblable à celle du scénario de base dont le seul paramètre qui change est l'évolution du prix du carbone. Chaque analyse de sensibilité est composée

¹⁷ Calculé à PRP de 28 pour le méthane.

d'un scénario de référence et de scénarios de réduction (scénario C, celui qui atteint le plus haut niveau de réduction). Voir la figure M-3.

SCÉNARIOS ALTERNATIFS

Les scénarios alternatifs reflètent une économie ayant des demandes énergétiques moindres, une biomasse plus disponible, des technologies à risque non disponibles ou un recours sans contrainte à la séquestration du carbone. Chaque scénario alternatif est composé d'un scénario de référence et de plusieurs scénarios de réduction (voir les figures M-2 et M-3).

Nous avons défini, en collaboration avec le MELCC, huit scénarios alternatifs (tableau M-2). Ces scénarios ont pour objectif de tester la sensibilité des résultats face à différents facteurs tels que les projections de demandes, les risques technologiques, les ressources disponibles ou les contraintes d'acceptabilité sociale. Bien qu'un effort important ait été consacré à la définition de ces scénarios afin de poser des paramètres cohérents et raisonnables, ils ne doivent pas être interprétés hors de ce contexte. Par exemple, le scénario de réduction des demandes de transport et de besoins énergétiques des bâtiments par la mobilité durable et l'aménagement urbain (scénario 1) ne représente pas nécessairement un niveau optimal de réductions ni un potentiel maximal.

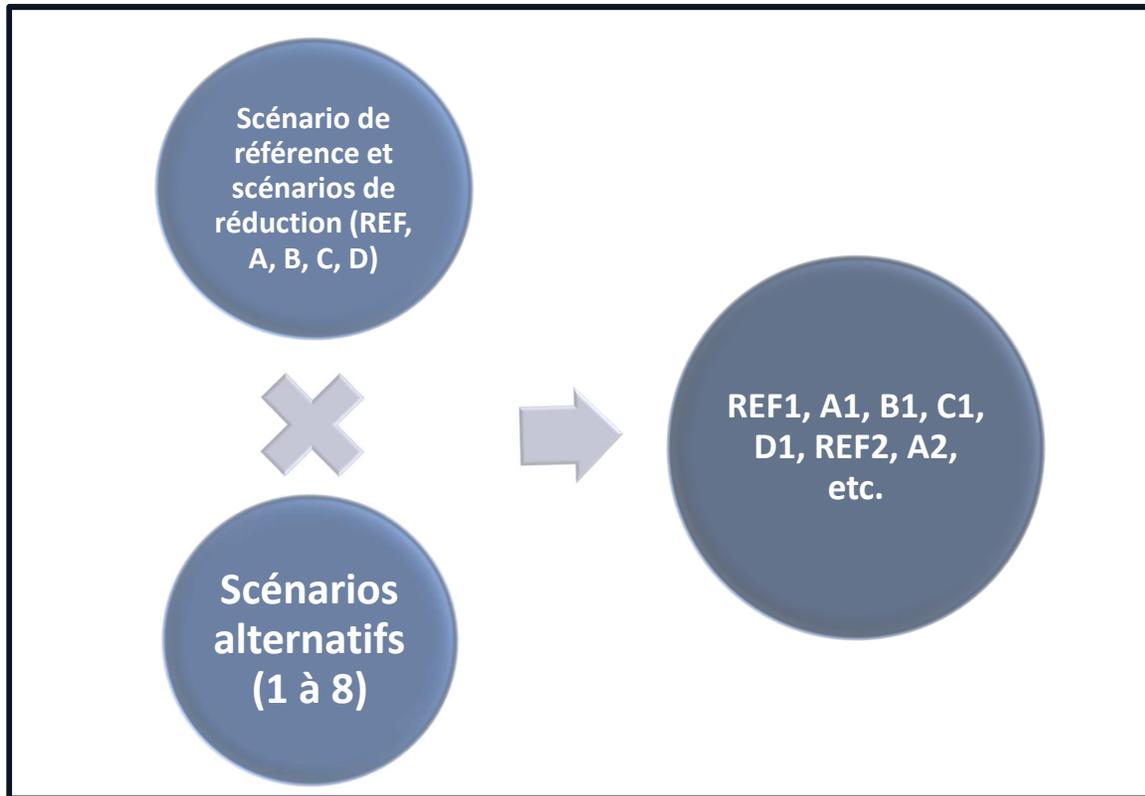
Par ailleurs, les réductions de demandes ne présupposent pas que ces réductions découlent exclusivement de réductions de la consommation au Québec ou d'interventions gouvernementales, mais pourraient également provenir de tendances mondiales affectant la production québécoise vouée à l'exportation.

Chacun des scénarios alternatifs a été modélisé avec nos quatre scénarios de réduction présentés à la sous-section précédente, ainsi que le scénario de référence (5 x 8 = 40 modélisations au total). La figure M-2 présente les combinaisons de scénarios ainsi que la nomenclature utilisée dans le présent rapport.

Tableau M-2 – Scénarios alternatifs

SCÉNARIO	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
4. Demandes	<ul style="list-style-type: none"> • Combinaison des scénarios 1, 2 et 3
5. Analyse de risques	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction ou retrait des options technologiques jugées les plus risquées
6. Captage et séquestration du carbone	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune limite externe imposée au captage et à la séquestration du carbone (sauf la contrainte géologique de séquestration) ou aux émissions négatives dans le secteur de l'électricité (« BECSC »).
7. Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la quantité de biomasse disponible
8. Demandes, biomasse et séquestration du carbone	<ul style="list-style-type: none"> • Combinaison de l'ensemble des scénarios favorables, soit les scénarios 1, 2, 3, 6 (sauf la BECSC) et 7.

Figure M-2 – Combinaisons de scénarios alternatifs



Les sous-sections suivantes précisent les définitions de chacun des scénarios alternatifs. Les réductions ou augmentations des demandes présentées ci-après sont estimées par rapport à la même année du scénario de base.

MOBILITÉ DURABLE / AMÉNAGEMENT URBAIN (1)

Ce scénario 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 utiles¹⁸) et la mise en place d'autres moyens visant à diminuer la demande en transport individuel. Ces ajustements

¹⁸ L'avènement des véhicules autonomes a été considéré dans l'analyse. Selon plusieurs experts, le véhicule autonome facilitera l'autopartage, réduira l'utilisation de la voiture en solo et favorisera l'utilisation du transport en commun. Toutefois, il y a également un risque que le véhicule autonome augmente le recours à la voiture en solo en rendant son utilisation plus conviviale. L'effet global découlant de l'ensemble de ces facteurs est encore très incertain.

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 scénario, les demandes utiles pour le transport des passagers urbains sont graduellement réduites¹⁹ pour atteindre 20 % de réduction en 2030 et 30 % (total) en 2050 par rapport aux mêmes années du scénario de base. Un transfert modal de 8 % en 2030 (25 % en 2050) des demandes résiduelles²⁰ des automobiles, motos et camions légers s'effectue 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 intermédiaires²¹.

Pour le transport interurbain des passagers, un transfert modal de 25 % sur la demande prévue pour le transport sur route (automobiles et camions légers) s'effectue vers l'autobus et le train d'ici 2050²². L'utilisation de l'avion pour le transport des passagers (vols internes) est également réduite de 50 % d'ici 2050 au bénéfice du train.

Les nouveaux bâtiments en RMR sont de type appartement/condo, avec une réduction de la demande en énergie de 50 % pour un appartement moyen par rapport à une maison unifamiliale détachée. Des interventions plus limitées s'effectuent également en milieu rural. Globalement, nous avons posé l'hypothèse d'une réduction de 12,5 % à l'horizon 2050 de la demande totale énergétique des bâtiments résidentiels due à la densification des quartiers, incluant la densification de quartiers existants et le développement de nouveaux quartiers densifiés. Cette réduction des demandes énergétiques est différenciée selon l'usage final (sur la base des consommations moyennes par usage et type de bâtiment) et s'applique surtout au chauffage des locaux, à l'éclairage et à la climatisation.

Pour les marchandises, le transport par rail 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.

TISSU INDUSTRIEL (2)

Ce scénario 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),

¹⁹ Notons que pour l'ensemble des ajustements apportés aux demandes utiles dans les scénarios alternatifs, 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.

²⁰ C'est-à-dire après ajustement des demandes utiles ci-haut mentionnées.

²¹ À moins d'indication dans le texte, tous les ajustements de demandes pour les scénarios alternatifs 1, 2 et 3 s'appliquent graduellement et linéairement à compter de 2021 pour atteindre leur effet maximal en 2050.

²² Lorsque l'ajustement pour 2030 n'est pas spécifié, cela signifie que l'ajustement progresse linéairement de 2020 à 2050. L'ajustement pour 2030 représente donc le tiers de l'ajustement pour 2050.

des préférences des consommateurs pour des produits verts, de la mise en œuvre de politiques favorisant une économie circulaire²³, etc.

Pour tous les secteurs sauf la pétrochimie, le lithium et les pâtes et papiers, la production est réduite de 8 % par rapport au scénario de base à l'horizon 2030 et de 25 % à l'horizon 2050. Il est à noter que malgré ces réductions de production, une forte majorité des secteurs continuent de connaître une croissance de leur production prévue d'ici 2050, car les réductions sont appliquées par rapport à la même année du scénario de base et non par rapport au niveau de la production actuelle.

Pour l'industrie pétrochimique²⁴, 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-secteur de l'industrie pétrochimique est probablement celui pour lequel « les répercussions de la transition énergétique seront les plus négatives »²⁵.

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

Le lithium étant identifié comme une opportunité dans le cadre de la transition énergétique en raison de son utilisation comme composante pour les batteries, aucun ajustement n'est apporté à la production prévue même si le secteur comporte un fort facteur d'émission.

Finalement, comme une forte décroissance est déjà prévue pour le secteur des pâtes et papiers dans le scénario de base, aucun ajustement additionnel n'a été apporté.

AJUSTEMENT DU SYSTÈME ALIMENTAIRE (3)

Ce scénario 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. Nous avons donc 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.

²³ 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.

²⁴ 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.)

²⁵ 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.

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.

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 18 % 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.

DEMANDES (4)

Ce scénario regroupe l'ensemble des modifications de demandes des scénarios 1, 2 et 3.

RISQUES TECHNOLOGIQUES (5)

Les mesures technologiques récentes, en développement ou en processus d'homologation qui peuvent présenter un certain risque sont retirées, soit 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 et les procédés de réduction directe à l'hydrogène.

La substitution du clinker est limitée à 25 % de la production totale de ciment, contre 100 % dans le scénario de base²⁶.

Précisons par ailleurs que l'adoption d'hypothèses plus optimistes pour des technologies précises se justifie également du fait qu'aucune hypothèse d'avancées technologiques « arbitraires », comme une baisse des coûts ou une amélioration générale de l'efficacité des technologies, n'a été intégrée au modèle. Le scénario « Risques technologiques » permet d'évaluer l'impact du retrait de ces technologies.

Bien que la technologie pour le CSC soit encore en développement, nous n'avons pas ajouté de contrainte additionnelle pour le CSC dans ce scénario, car les hypothèses sur le potentiel géologique du scénario de référence sont très prudentes et le captage annuel maximal a été sévèrement limité (2,5 MtCO₂éq/an). Le risque est donc très faible que ce niveau ne puisse pas être atteint. Si le CSC avait été retiré dans ce

²⁶ Une limite plus conservatrice de 50 % pour le scénario de base a également été considérée. L'absence de limite pour la substitution est résolument optimiste et fait écho à l'importante recherche en cours pour développer de nouveaux procédés, dont certains pourraient permettre le développement de ciments carboneutres ou même de ciments pouvant séquestrer du carbone. L'ajout d'une contrainte de 50 % au scénario de base amène très peu de changements sur la solution (très légers effets de substitution entre les secteurs) et n'empêche pas l'atteinte des réductions du scénario C.

scénario « Risques technologiques », les réductions de GES auraient été amputées d'un 2,5 MtCO₂éq/an additionnel.

CAPTAGE ET SÉQUESTRATION DU CARBONE (6)

La contrainte exogène sur le captage et la séquestration du carbone (CSC), de 2,5 millions de tCO₂éq par an, est levée. Seule la contrainte du potentiel géologique de séquestration demeure dans ce scénario.

De plus, la production électrique avec bioénergie et CSC (« BECSC »), qui génère des « émissions négatives » en utilisant un combustible considéré carboneutre par le modèle et en capturant ses émissions, est permise (elle est exclue dans le scénario de base). La très grande majorité du potentiel de pénétration de cette technologie se situe dans le secteur de production d'électricité. Il y a peu de potentiel dans l'industrie, car il est nécessaire de combiner un potentiel d'utilisation de la biomasse et un potentiel de captage des émissions de GES au même site²⁷.

BIOMASSE (7)

Ce scénario élargit l'étendue de la biomasse disponible.

Le scénario de base inclut, dans la biomasse forestière résiduelle, les résidus de coupe les plus intéressants (économiquement) à récupérer. Ce potentiel peut être élargi, tout en respectant des critères de protection de la biodiversité et des sols forestiers, ce qui représente une augmentation de 45 % de la biomasse totale disponible. Le coût de cette biomasse additionnelle n'étant pas connu, nous avons posé l'hypothèse d'un surcoût de 25 % par rapport aux résidus de coupe déjà inclus dans le modèle.

COMBINAISON DES SCÉNARIOS FAVORABLES (8)

Ce scénario combine l'ensemble des scénarios favorables, soit :

- Mobilité durable / aménagement urbain (1)
- Tissu industriel (2)
- Régime alimentaire (3)
- Captage et séquestration du carbone (6) - sauf la BECSC qui n'est pas incluse
- Biomasse (7)

RÉCAPITULATIF DES SCÉNARIOS

La figure M-3 ci-dessous récapitule l'ensemble des scénarios analysés, ainsi que leur dénomination dans les graphiques et tableaux présentés dans ce rapport.

²⁷ Certaines contraintes de modélisation limitent également la BECSC en industrie, notamment dans le sous-secteur des pâtes et papiers, car il est difficile d'intégrer la BECSC et le recyclage de résidus de l'industrie sans risque de double comptage.

Figure M-3 – Dénomination des scénarios dans les graphiques et tableaux

BASE (référence et réduct.)	SENSIBILITÉ (référence et réduct.)	ALTERNATIFS (référence et réduct.)
<ul style="list-style-type: none"> • REF, A, B, C, D 	<ul style="list-style-type: none"> • Prix du carbone (↗) • REF(s1), C(s1) • Prix du carbone (↗↗) • REF(s2), C(s2) 	<ul style="list-style-type: none"> • Scénario alt. 1 <ul style="list-style-type: none"> • REF1, A1, B1, C1, D1 • Scénario alt. 2 <ul style="list-style-type: none"> • REF2, A2, B2, C2, D2 • Scénario alt. 3 <ul style="list-style-type: none"> • REF3, A3, B3, C3, D3 • Scénario alt. 4 <ul style="list-style-type: none"> • REF4, A4, B4, C4, D4 • Scénario alt. 5 <ul style="list-style-type: none"> • REF5, A5, B5, C5, D5 • Scénario alt. 6 <ul style="list-style-type: none"> • REF6, A6, B6, C6, D6 • Scénario alt. 7 <ul style="list-style-type: none"> • REF7, A7, B7, C7, D7 • Scénario alt. 8 <ul style="list-style-type: none"> • REF8, A8, B8, C8, D8

AUTRES PRÉCISIONS MÉTHODOLOGIQUES

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

EXPORTATIONS D'ÉLECTRICITÉ

À la demande du MELCC, une analyse de sensibilité a été réalisée sur les exportations d'électricité au tout début du projet. La modélisation initiale montrait des exportations massives d'électricité hors-Québec, principalement vers l'Ontario. L'analyse de sensibilité visait à voir dans quelle mesure une limitation de ces exportations modifierait la solution pour le Québec et s'il était souhaitable d'imposer une limite sur ces exportations pour le reste du projet.

L'analyse de sensibilité a limité la capacité d'exportation vers l'Ontario aux interconnexions existantes²⁸ d'ici 2030 et à près du double de cette capacité d'ici 2050. En incluant les autres provinces et les États-Unis, les capacités d'interconnexion pour l'exportation ont été fixées à 8,6 GW en 2030 et 9,9 GW en 2050, contre 7,7 GW en 2015.

²⁸ Comme les interconnexions sont présentement sous-utilisées, ce scénario d'exportation d'électricité permet tout de même une croissance des exportations à l'horizon 2030.

Globalement, les exportations d'électricité domestique ont diminué en raison de la contrainte appliquée au modèle, affectant à la baisse l'ajout de capacité et la production de source éolienne. Les échanges internationaux d'énergie n'étaient pas affectés. Mis à part la production éolienne, nous avons décelé très peu de différences sur la solution pour le Québec suite à l'ajout de la contrainte. Les mesures de réduction de GES, les parts de marché des technologies et des sources d'énergie, ainsi que les autres résultats sont demeurés essentiellement inchangés, mis à part quelques rares exceptions qui ont connu de très légères fluctuations. Pour l'Ontario, la limitation des importations d'électricité québécoise a forcé l'adoption de mesures de réduction de GES et de production d'électricité additionnelle, mais les cibles de réduction de l'Ontario ont tout de même été atteintes. Au total, le Québec exporte maintenant 77 TWh en 2050 contre 67 TWh en 2030 et 35 TWh en 2015 (scénario C).

Suite à l'analyse de ces résultats, il a été décidé de conserver cette contrainte sur le niveau des exportations d'électricité pour le reste du projet.

CAPTAGE ET SÉQUESTRATION DU CARBONE

Le modèle avec captage et séquestration de carbone sans contrainte exogène est en mesure de trouver une solution pour chacune des cibles de réduction d'émissions de GES de nos scénarios, notamment par la génération d'émissions négatives (utilisation conjointe de bioénergie et de CSC). Cet élément est particulièrement important pour le Québec en raison de l'abondance de la biomasse, qui permet de produire de l'électricité avec émissions négatives. Le CSC traditionnel (émissions du secteur industriel) est également abondamment utilisé.

Toutefois, l'ampleur du recours au CSC soulève des questionnements d'acceptabilité sociale, surtout dans un contexte où les secteurs sans CSC étaient 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 et de ne pas permettre les émissions négatives dans le scénario de base. Un recours accru au CSC est également exploré dans certains scénarios alternatifs.

Mises à part les contraintes sur le CSC et sur les exportations d'électricité, les résultats présentés dans ce rapport sont optimisés d'un point de vue économique par le modèle sans aucune contrainte sociale ou politique.

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 énergétique²⁹ 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

²⁹ 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.

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 exclue, 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.

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 scénarios de réduction de GES principaux (scénarios A à D).

Des élasticités-prix propres à chaque demande utile permettent toutefois 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.

La réduction d'une demande utile ne signifie pas forcément une privation ou un recul social, mais peut représenter une adaptation de l'économie à des cibles de réduction de GES ambitieuses. Pour le transport des personnes, par exemple, une baisse de la demande de transport peut refléter le recours accru au télétravail ou à des moyens de transport alternatifs (p. ex., vélo ou covoiturage).

À noter que le scénario de référence prévoit déjà des transferts modaux, mais que les scénarios de réduction A, B, C et D ne contiennent pas de mesures additionnelles visant le transfert modal. Des scénarios de réduction exogènes de demandes utiles, incluant notamment la densification urbaine, les transferts modaux, ou encore l'arrivée de technologies de rupture (notamment les véhicules autonomes et leur impact sur les services de taxi ou de covoiturage) sont modélisés dans le scénario de mobilité durable / aménagement urbain notamment.

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. En supposant un délai moyen de 10 ans pour les barrages hydroélectriques, il serait toutefois possible de réaliser de nouveaux projets pour une mise en service avant 2030.

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, dont l'atteinte des cibles et objectifs de réduction de GES. Pour cette étude, aucune contrainte additionnelle visant à favoriser l'adoption des mesures de réduction de GES n'a été incluse. Des programmes, incitatifs et réglementations devront 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 québécois³⁰;
- 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 la réduction de certaines demandes utiles sous l'effet des élasticités-prix dans un scénario de réduction des émissions (p. ex., lorsqu'une demande devient trop coûteuse à satisfaire suite à l'augmentation du prix d'un combustible donné), il ne détermine pas les changements structuraux entre les différents segments de demandes. Par exemple, l'électrification amène la construction de nouveaux barrages hydroélectriques, mais la production prévue de béton n'est pas ajustée à la hausse. Ces impacts sont relativement minimes. Nous avons par exemple estimé, par un calcul à haut niveau, que les émissions additionnelles pour le béton additionnel requis afin de construire les barrages hydroélectriques d'ici 2050 représenteraient une hausse des émissions annuelles d'environ 0,2 %.

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).

³⁰ 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.

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.

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. Ces effets n'ont pas été considérés dans le modèle, étant donné l'ampleur relativement mineure de ces variations, ainsi que l'incertitude qui les entoure³¹.

³¹ Selon la Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec - Édition 2015 d'Ouranos (partie 2, p. 46. Disponible à : <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/SynthesePartie2.pdf>), une augmentation des températures en hiver aura pour conséquence une baisse de la demande en énergie pour le chauffage, qui ne sera compensée que partiellement en été par une augmentation de la demande pour la climatisation. Globalement, la demande en énergie dans l'ensemble des secteurs (Industrie et Résidentiel, commercial et institutionnel) serait réduite selon le scénario médian à l'horizon 2050 de 2,7 % par rapport à ce qu'elle serait sans changement climatique.

CHAPITRE 1 : SCÉNARIO DE BASE

FAITS SAILLANTS

Le chapitre qui suit est le fruit du premier volet de l'étude. Celui-ci visait à déterminer par quels moyens technologiques le Québec pourrait atteindre ses cibles et objectifs de réduction des émissions de GES aux horizons 2030 et 2050.

Pour cela, quatre scénarios ont été définis, du moins ambitieux (scénario A : -25 % en 2030, -65 % en 2050), au plus ambitieux, soit celui permettant d'atteindre les objectifs que s'est fixés le Québec (scénario D : -37,5 % en 2030, -87,5 % en 2050)³². Le modèle NATEM a ensuite cherché à atteindre chacun des scénarios à l'aide de solutions technologiques de réduction des émissions de GES. Le modèle fournit également les coûts associés à chacun des scénarios.

Voici les grands constats qui se dégagent de ce chapitre :

- **Le Québec pourrait, à lui seul, réaliser l'essentiel de ses cibles et objectifs globaux (37,5 % à l'horizon 2030 et 75 % ou plus d'ici 2050).**

Le modèle est en mesure de trouver une solution optimale d'un point de vue économique pour les scénarios A à C de réduction de GES, C étant le scénario le plus ambitieux que le modèle a été capable d'atteindre avec des solutions technologiques (-37,5 % en 2030 et -75 % en 2050). Le modèle n'est pas en mesure d'atteindre une solution optimale d'un point de vue économique pour le scénario D (-87,5 % en 2050)³³. Ceci s'explique notamment par le fait que les secteurs industriel et agricole continuent d'émettre une quantité substantielle de GES à l'horizon 2050.

Par conséquent, pour atteindre une réduction de -87,5 % en 2050 au Québec sans achats de crédits du carbone internationaux, il sera nécessaire de lever certaines contraintes, d'utiliser de nouvelles technologies, ou encore de jouer sur les changements de comportement (afin notamment de réduire les demandes utiles).

- **Il est important de s'attaquer rapidement à l'ensemble des secteurs et des opportunités.**

L'ampleur du défi à surmonter pour atteindre les cibles 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.).

- **Les réductions passent par une électrification massive des besoins en transport et en chauffage, ainsi que par une pénétration accrue de l'électricité dans le secteur industriel, avec un apport important des bioénergies en sus.**

³² Les pourcentages de réduction sont exprimés par rapport aux émissions de 1990. Le Québec s'est engagé à réduire ses émissions de 37,5 % par rapport à 1990 d'ici 2030, et entre 80 et 95 % d'ici 2050.

³³ Il est à noter que, dans cette première partie de l'étude, une limite annuelle stricte a été imposée au captage et à la séquestration de carbone (CSC) et que la production d'électricité à la biomasse avec CSC (retrait de carbone de l'atmosphère) a été exclue. Le potentiel de ces technologies a été examiné dans la deuxième partie de l'étude.

Pour l'ensemble des secteurs, la consommation d'électricité croit, par rapport au scénario de référence, en raison de l'électrification, favorisée par rapport au gaz naturel et aux produits pétroliers. Le recours à la bioénergie augmente également.

- Cette substitution massive, combinée à une efficacité énergétique accrue, **permet au Québec de doubler sa production domestique tout en stabilisant la demande totale en énergie.**
- **Le gaz naturel conventionnel est nettement moins utilisé**, bien que le gaz naturel renouvelable (GNR) remplace une bonne partie des volumes perdus. **Les importations de produits pétroliers sont considérablement réduites**, améliorant drastiquement la balance commerciale du Québec.

Le pétrole et le gaz naturel non renouvelable sont graduellement remplacés par de l'électricité (principalement de source hydroélectrique, 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 les scénarios de réduction de GES.

- **L'hydroélectricité, les sources variables (éolien et solaire) ainsi que la biomasse sont les grands gagnants**, à parts presque égales.

La production d'électricité connaît une forte augmentation après 2030, surtout par la croissance des filières hydroélectrique et éolienne, mais également avec une plus modeste contribution de la production solaire. Mise à part l'électrification au Québec des transports, de l'industrie et du bâtiment, une portion non négligeable de cette nouvelle production (21 %) est destinée à l'exportation vers les autres provinces pour les appuyer dans l'atteinte de leur propre cible.

- **Les coûts moyens**, qui se définissent comme le coût d'une tCO₂éq réduite obtenu en divisant les coûts totaux par le nombre de tCO₂éq réduites, **s'élèvent à environ 87 \$/tCO₂éq à l'horizon 2030 pour le scénario le plus ambitieux (scénario C) et à 220 \$/tCO₂éq à l'horizon 2050.**
- **Les coûts marginaux**, qui se définissent comme le coût pour réduire la dernière tCO₂éq nécessaire à l'atteinte de la cible ou de l'objectif de réduction, **s'élèvent à environ 302 \$/tCO₂éq à l'horizon 2030 pour le scénario le plus ambitieux (scénario C) et à 1 179 \$/tCO₂éq à l'horizon 2050.**

STRUCTURE DU CHAPITRE

Ce chapitre présente l'analyse technologique et énergétique détaillée de scénarios de réduction des GES, accompagnée de deux courbes de coûts marginaux (2030 et 2050) et d'une analyse de sensibilité sur le scénario de prix sur le marché du carbone. Il est structuré comme suit :

RAPPEL DES SCÉNARIOS DE RÉDUCTION

Un sommaire des scénarios de réduction d'émissions de GES retenus.

TRAJECTOIRES GLOBALES ET SECTORIELLES

Une présentation des résultats globaux et sectoriels pour le scénario de référence (cours normal des affaires) et les trajectoires de réduction d'émissions de GES.

ANALYSE ÉNERGÉTIQUE ET TECHNOLOGIQUE

Une analyse détaillée des impacts énergétiques (consommation, production et importation/exportation d'énergie) et de chacun des secteurs d'émission.

ANALYSE ÉCONOMIQUE

Courbes de coûts marginaux et principales mesures de réduction. Coûts moyens et totaux. Analyse de sensibilité sur les prix du marché du carbone.

RAPPEL DES SCÉNARIOS DE RÉDUCTION

Les quatre scénarios de réduction suivants (Tableau 1-1) ont été modélisés. Notons que l'objectif de réduction du scénario C pour 2050 a été établi selon le niveau de réduction maximal que le modèle est en mesure d'atteindre avec les hypothèses et contraintes définies dans la première partie de l'analyse.

Tableau 1-1 – Scénarios de réduction

	Scénario A	Scénario B	Scénario C	Scénario D
En pourcentage de réduction par rapport aux émissions de 1990				
Horizon 2030	-25 %	-30 %	-37,5 %	-37,5 %
Horizon 2050	-65 %	-70 %	-75 %	-87,5 %
En émissions totales annuelles permises (MtCO₂éq)				
Horizon 2030	68,2	63,7	56,9	56,9
Horizon 2050	31,8	27,3	22,7	11,4

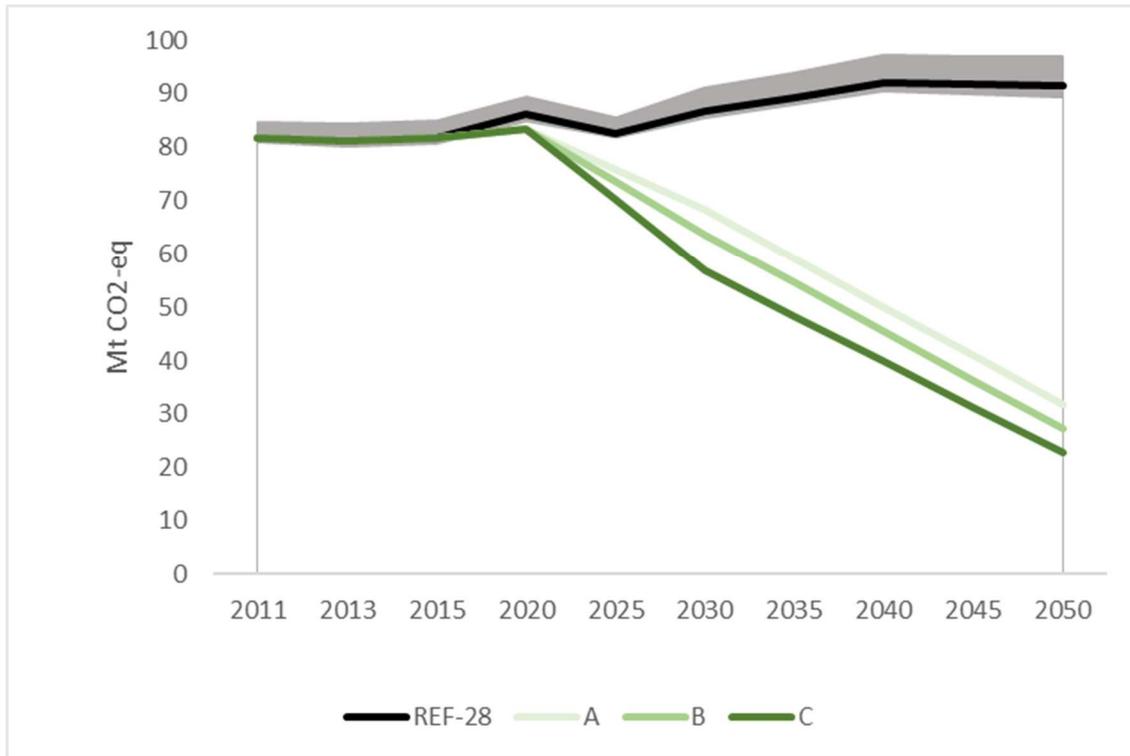
TRAJECTOIRES GLOBALES ET SECTORIELLES

Cette section présente les trajectoires globales et sectorielles pour les scénarios de réduction de GES, examine plus en détail le scénario le plus contraignant réalisable (C), puis présente une analyse macro des mesures de réduction.

TRAJECTOIRES GLOBALES

Le Graphique 1-1 présente les trajectoires globales du scénario de référence et des trois scénarios de réduction des émissions de GES. Pour l'établissement du scénario de référence et des trajectoires de réduction, un potentiel de réchauffement planétaire (PRP) de 28 a été retenu pour le méthane, mais une bande représentant les scénarios de référence à PRP de 25 et de 36 est également présentée à titre comparatif.

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



Nous notons à court terme (2020-2025) une diminution des émissions dans le scénario de référence. Selon nos analyses, la diminution à court terme est due à l'effet des politiques (normes VZE³⁴, normes fédérales sur les carburants propres, normes CAFE³⁵), ainsi qu'une augmentation de la valorisation des déchets et une réduction de l'enfouissement. La tendance à long terme est toutefois une forte progression des émissions en raison de la croissance économique.

Pour les scénarios de réduction, la baisse des émissions s'accélère nettement à compter de 2020 par rapport aux réductions antérieures pour permettre l'atteinte des cibles et objectifs de réduction. Bien qu'on observe de légères variations de pente à quelques endroits, les réductions d'émissions de GES sont relativement soutenues tout au long de la période étudiée pour chacun des scénarios.

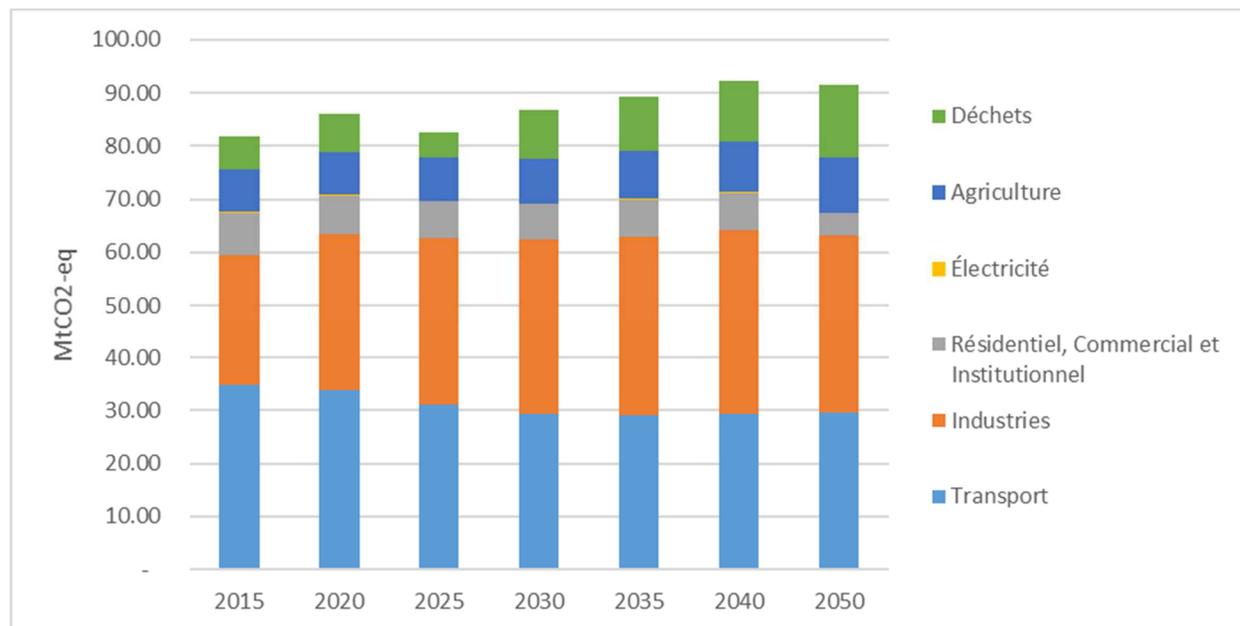
TRAJECTOIRES SECTORIELLES – SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE

Le graphique 1-2 présente le scénario de référence et ses composantes sectorielles. On y note une croissance des émissions, notamment dans les secteurs des déchets, de l'industrie et de l'agriculture. Comme mentionné précédemment, le secteur des déchets connaît une légère décroissance de ses émissions de GES à court terme, mais une croissance à long terme.

³⁴ Véhicules zéro émission (voir glossaire).

³⁵ « Corporate Average Fuel Economy » (voir glossaire).

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



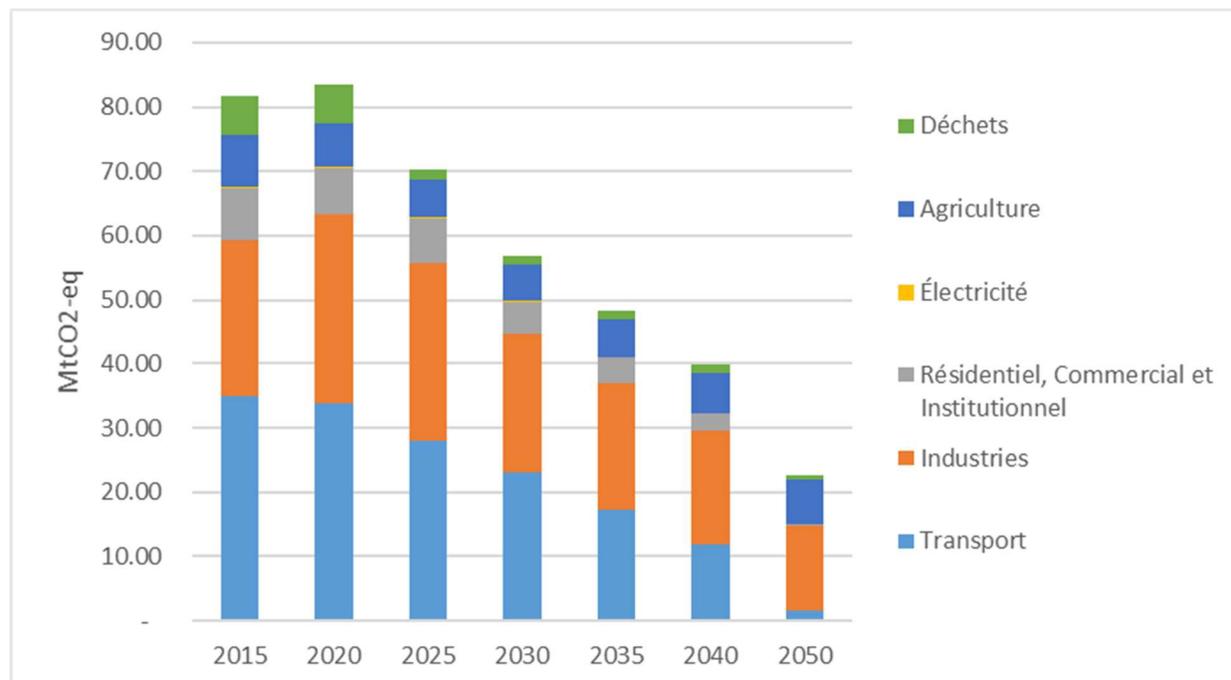
La croissance des émissions liées aux déchets ne présente pas de problème majeur, car ces émissions disparaissent rapidement dans les scénarios de réduction, en grande partie grâce aux mesures de compostage/valorisation des déchets et de captage du méthane aux sites d'enfouissement. Par contre, les secteurs industriel et surtout agricole sont plus difficilement compressibles.

Le scénario de référence présente déjà une décroissance dans le secteur du transport (électrification et biocarburants) et dans le secteur résidentiel, commercial et institutionnel.

TRAJECTOIRES SECTORIELLES – SCÉNARIO C

Nous présentons dans cette sous-section une analyse du scénario C, qui est le scénario réalisable le plus contraignant en termes de réductions d'émissions de GES, afin de donner 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, scénario C



Les réductions d'émissions atteignent plus de 90 % en 2050 par rapport au scénario de référence dans chacun des secteurs³⁶ à l'exception du secteur agricole (35 %) et des industries (61 %) (voir graphique S4). Pour la production d'électricité, des réductions de l'ordre de 75 % sont déjà atteintes en 2050 par rapport à 2020 dans le scénario de référence. En 2030, la plupart des secteurs atteignent des réductions de 22 % à 34 % par rapport au scénario de référence, à l'exception du secteur des déchets qui réussit à réduire ses émissions de manière beaucoup plus substantielle (-86 %). Il convient toutefois de noter que le modèle ne présume pas de biocompostage de la matière putrescible au-delà des niveaux actuels dans le scénario de référence afin de rendre cette matière disponible à la valorisation (par exemple, production de biocarburants ou de GNR), ce qui a pour effet d'accroître les émissions du scénario de référence et les réductions observées pour le scénario C.

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET ANALYSE DES MESURES DE RÉDUCTION

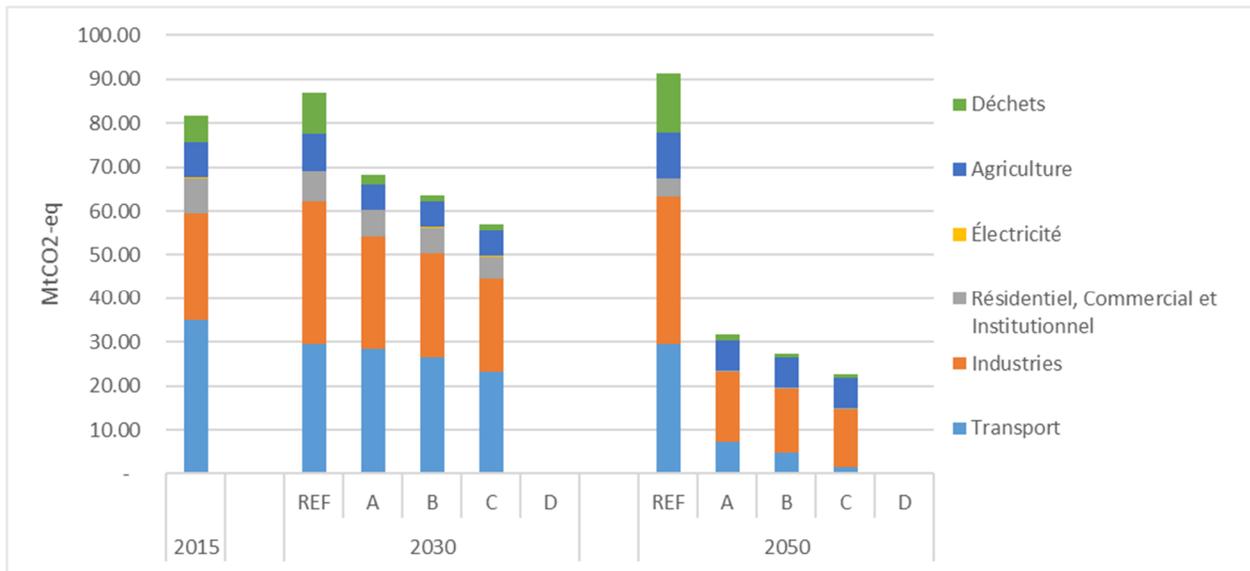
Le graphique 1-4 présente les trajectoires sectorielles à l'horizon 2030 et 2050 pour le scénario de référence et pour les scénarios de réduction, ainsi que pour l'année 2015 à titre comparatif.

Le modèle est en mesure de trouver une solution optimale pour les scénarios de réduction de GES A à C. Les secteurs qui émettent une quantité substantielle de GES à l'horizon 2050 sont le secteur industriel et

³⁶ 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 %).

le secteur agricole, en raison de la plus grande difficulté à réduire les émissions dans ces secteurs (notamment pour les émissions de procédés industriels, des émissions entériques et des émissions liées à la gestion des sols - application d'engrais).

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



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

ANALYSE ÉNERGÉTIQUE ET TECHNOLOGIQUE

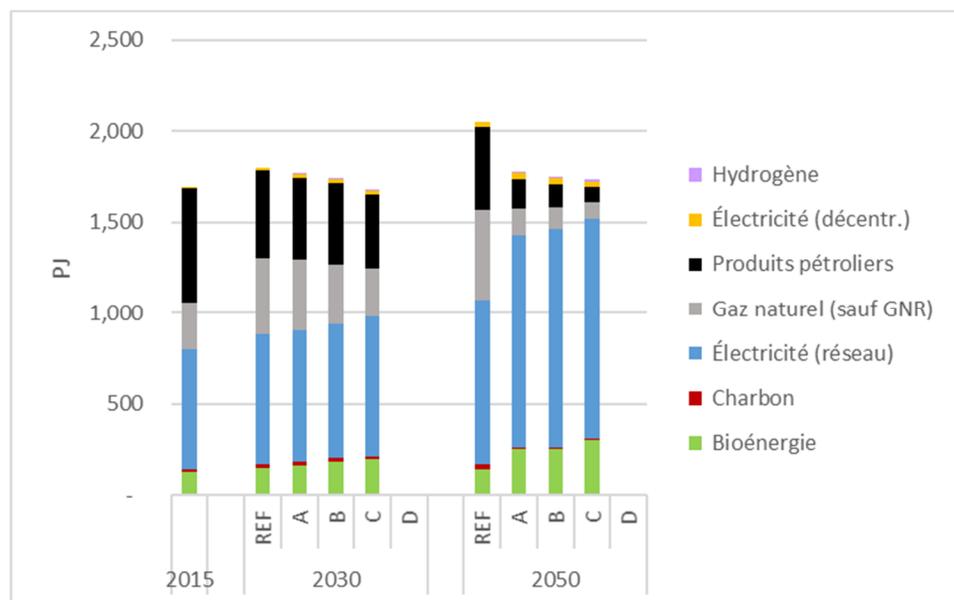
Cette section débute par une analyse énergétique (consommation d'énergie primaire et finale³⁷, production et importation/exportation d'énergie), puis présente tour à tour une analyse détaillée de chacun des secteurs d'émission.

Notons qu'aucun résultat n'est présenté pour le scénario de réduction D puisque le modèle n'est pas en mesure de trouver une solution pour ce niveau de réductions de GES.

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.

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

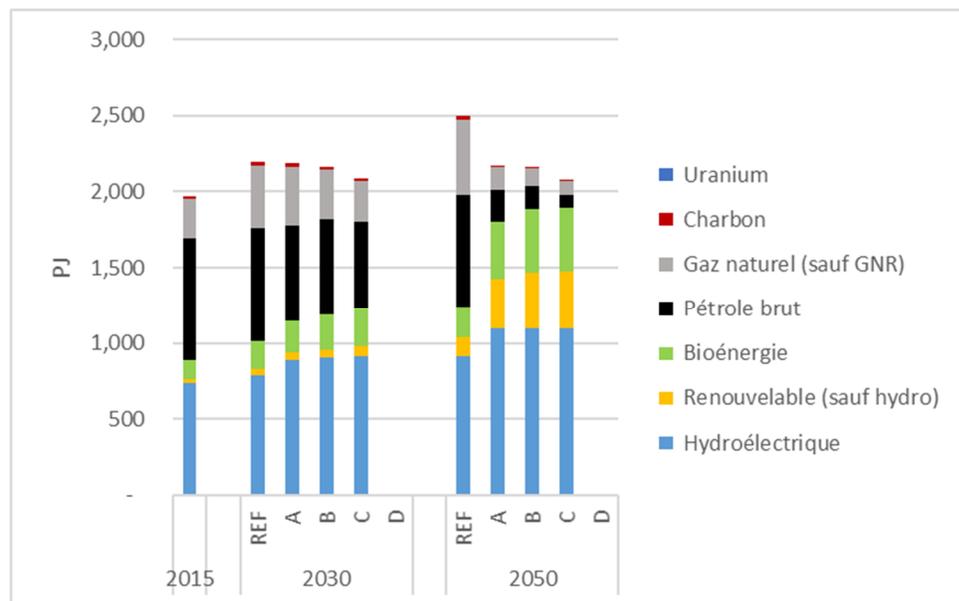


Le pétrole et le gaz naturel non renouvelable sont graduellement remplacés par de l'électricité (principalement de source hydroélectrique, éolienne et solaire), ainsi que par différentes formes de

³⁷ 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.

bioénergie (graphique 1-6). À l’horizon 2050, les énergies fossiles ne disparaissent pas complètement, mais deviennent relativement marginales dans les scénarios de réduction de GES. L’énergie primaire produite au Québec est entièrement renouvelable et consiste, pour plus de la moitié, en hydroélectricité (graphique 1-7), le reste provenant de la bioénergie et des autres sources renouvelables.³⁸

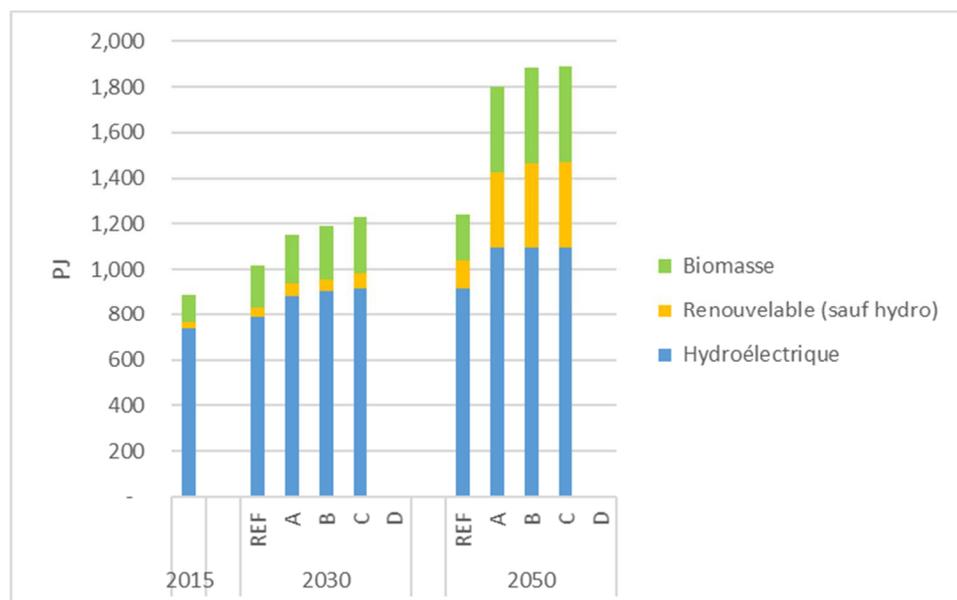
Graphique 1-6 - Consommation d’énergie primaire (PJ)³⁹



³⁸ La répartition modélisée entre hydro et énergie éolienne, en particulier, pourrait être revue en fonction d’une analyse plus raffinée des projets hydroélectriques, pour lesquels les estimés de coûts et les défis d’acceptabilité sociale pourraient s’avérer sous-estimés. Dans ce cas, le potentiel d’énergie éolienne jouerait un plus grand rôle à court et moyen terme.

³⁹ La catégorie « Renouvelable (sauf hydro) » inclut les énergies éolienne, solaire et thermique (chaleur extraite du sol ou de l’air au moyen de pompes à chaleur). Même si l’énergie thermique extraite au moyen d’une pompe à chaleur est utilisée directement dans le bâtiment où elle est produite (aucune distribution ou transformation), elle est tout de même présentée à titre de production d’énergie primaire dans ce graphique.

Graphique 1-7 – Production d'énergie primaire (PJ)



La production d'électricité connaît une forte augmentation après 2030, surtout par la croissance des filières hydroélectrique et éolienne, mais également avec une plus modeste contribution de la production solaire (graphique 1-8 - énergie produite - et graphique 1-9 - puissance installée -). Ces quantités d'énergie additionnelles sont basées pour l'instant strictement sur une optimisation des coûts, sans égard à l'acceptabilité sociale ou à d'autres critères.

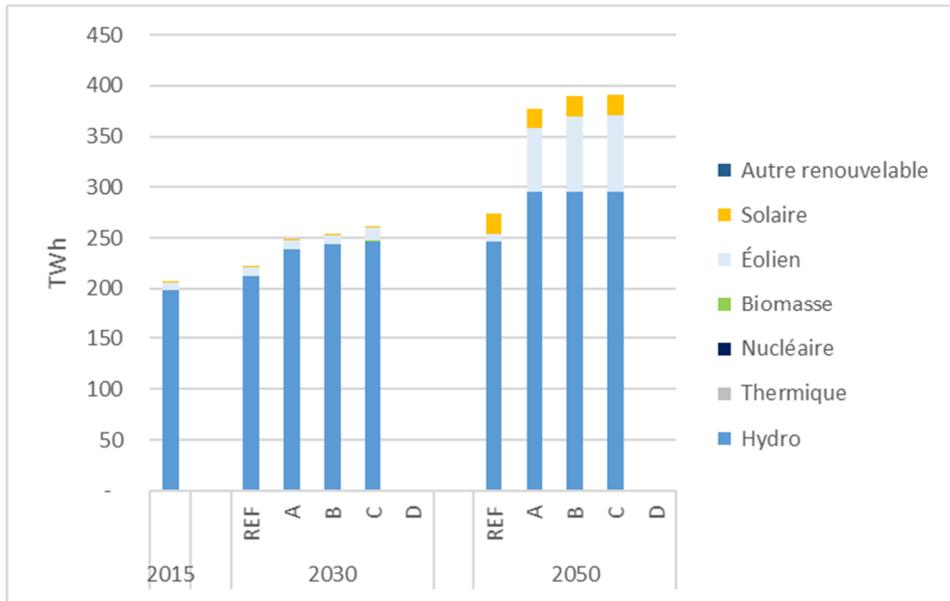
Notons de plus que le secteur de la production d'électricité (0,2 % des émissions du Québec en 2015) élimine ses émissions par le recours aux énergies renouvelables (éolien et un peu de solaire centralisé) dans le scénario de référence. La production d'origine thermique (autre que biomasse, soit à base d'hydrocarbures) est ainsi éliminée.

Pour le scénario de référence et chacun des scénarios 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 des sources variables est limitée à 5 % de leur capacité installée⁴⁰, leur contribution à la capacité de base fiable est relativement modeste. En énergie (TWh) toutefois, le taux de pénétration des énergies renouvelables variables est assez élevé (25 %), ce qui peut représenter des défis pour le réseau⁴¹.

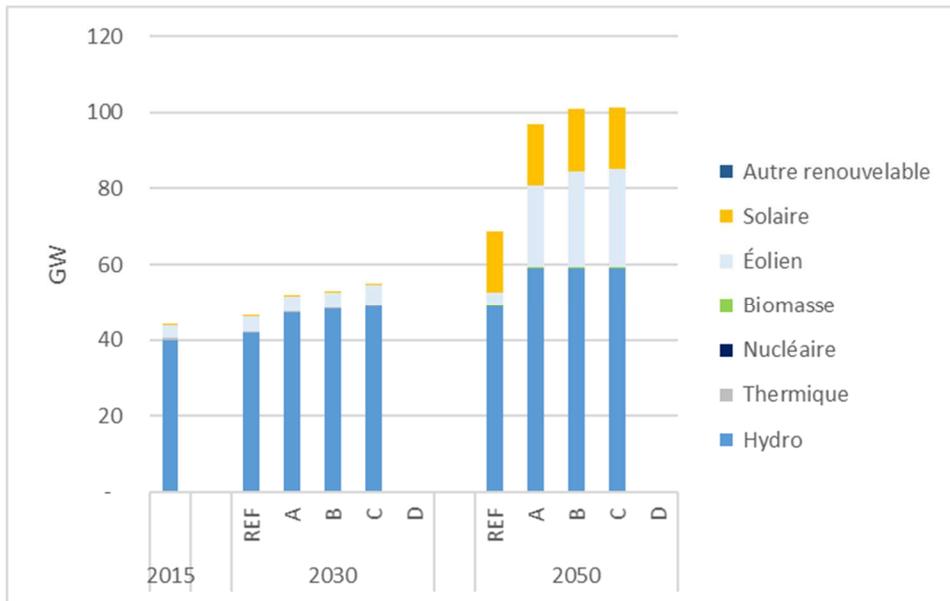
⁴⁰ Cette hypothèse de contribution en puissance des énergies renouvelables variables est très prudente, surtout étant donné la part importante de l'éolien dans le mix énergétique.

⁴¹ 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.

Graphique 1-8 - Production d'électricité par type (énergie en TWh)

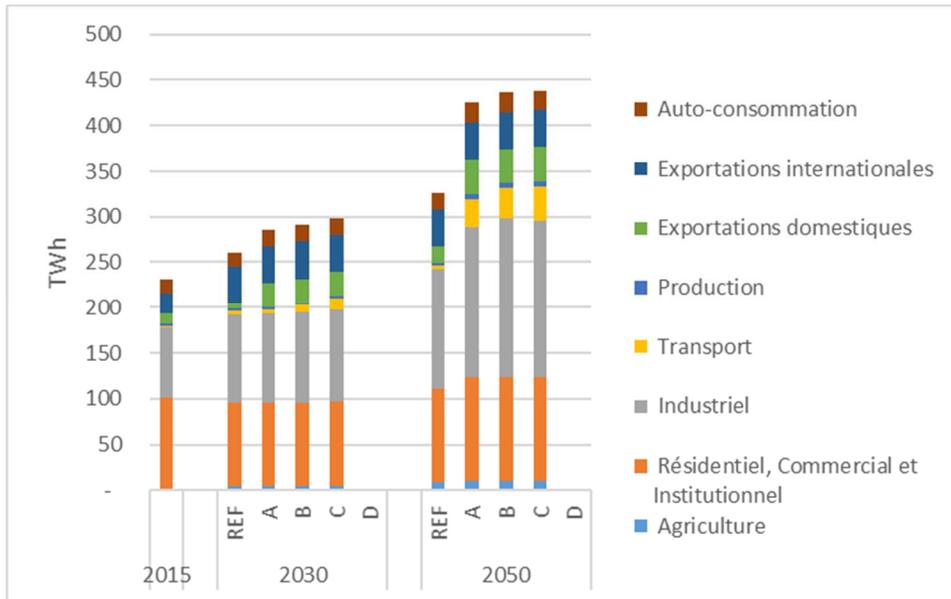


Graphique 1-9 - Capacité installée pour la production d'électricité par type (puissance en GW)



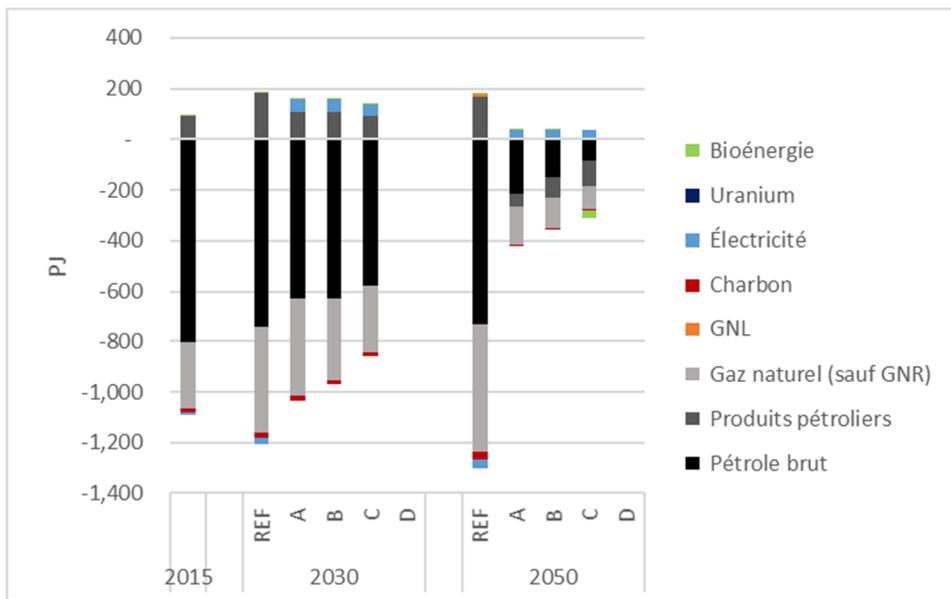
Mise à part l'électrification au Québec des transports, de l'industrie et du bâtiment, 21 % de cette nouvelle production (43 TWh) vient augmenter les exportations vers les autres provinces à l'horizon 2050 pour les appuyer dans l'atteinte de leur propre cible (graphique 1-10). Ce pourcentage serait vraisemblablement beaucoup plus élevé sans la contrainte sur les exportations d'électricité imposée au modèle.

Graphique 1-10 - Consommation d'électricité par secteur



En plus de la croissance des exportations d'électricité, on observe une réduction des importations de pétrole et de gaz naturel, surtout en 2050 (graphique 1-11).

Graphique 1-11 - Exportations nettes (interprovincial et international)

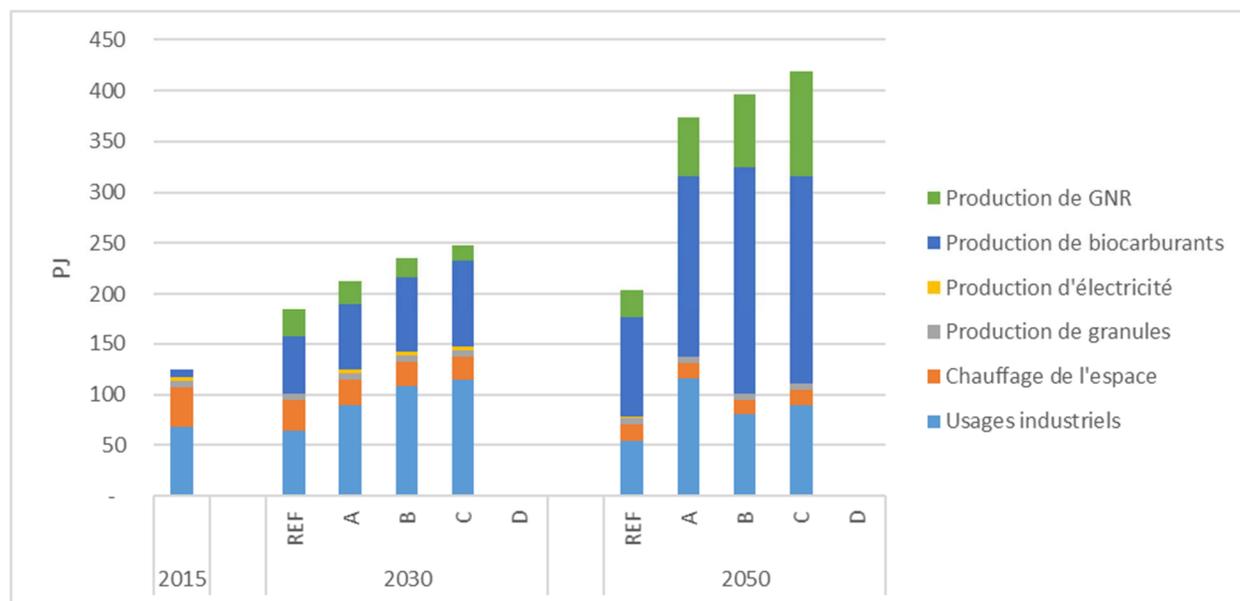


Note : Les données négatives représentent des importations d'énergie.

Dans le scénario de référence, la bioénergie est surtout utilisée pour la production de biocarburants et pour des usages industriels (graphique 1-12). Elle est moins utilisée pour la chauffe des bâtiments qui privilégie davantage l'électrification, tel qu'illustré dans la section suivante. 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 scénarios de réduction de GES une quantité beaucoup plus grande de biocarburants

ainsi que de gaz naturel renouvelable⁴². 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.

Graphique 1-12 - Utilisation primaire de bioénergie par type (PJ)⁴³

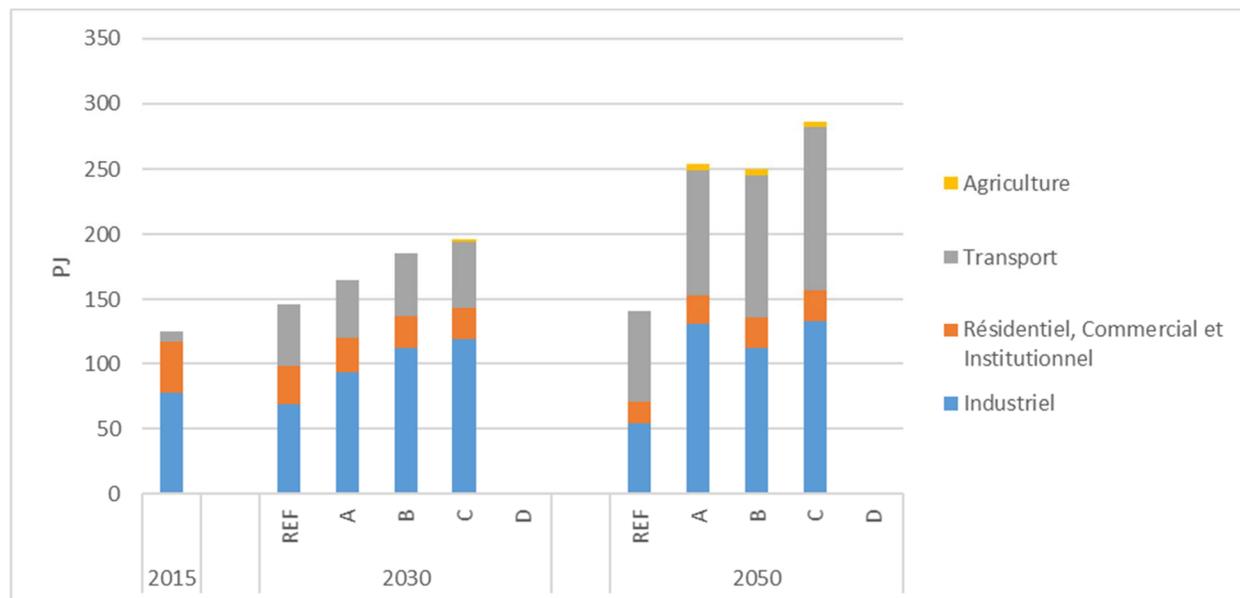


À l’utilisation finale, la bioénergie est surtout utilisée par le secteur industriel, avec une forte croissance du secteur des transports à l’horizon 2050 (graphique 1-13).

⁴² Dans le scénario C (2050), le gaz naturel renouvelable provient des sources suivantes : résidus ligneux autres que forestiers (p. ex., agricoles et industriels) (50 %), résidus forestiers (30 %), biogaz de sites d’enfouissement et fumier (11 %), boues d’épuration (6 %) et déchets municipaux (5 %). La technologie « power-to-gas » utilisant de l’hydrogène et du dioxyde de carbone pour produire du gaz synthétique, n’est pas incluse dans le modèle ; la production marginale d’hydrogène à l’horizon 2050 laisse croire toutefois que cette option serait négligeable.

⁴³ La quantité totale de bioénergie utilisée en 2050 dans le scénario B n’atteint pas le maximum de bioénergie produit en 2050 dans le même scénario (voir Graphique 1-7 – Production d’énergie primaire). Cela est dû au fait qu’une partie de l’énergie générée à partir de matières organiques n’est pas consommée en totalité au moment où elle est produite. Il ne s’agit pas d’une contrainte ajoutée au modèle (par exemple pour tenir compte d’un inventaire physique de biomasse), mais plutôt d’un effet interannuel résultant des calculs d’optimisation du modèle.

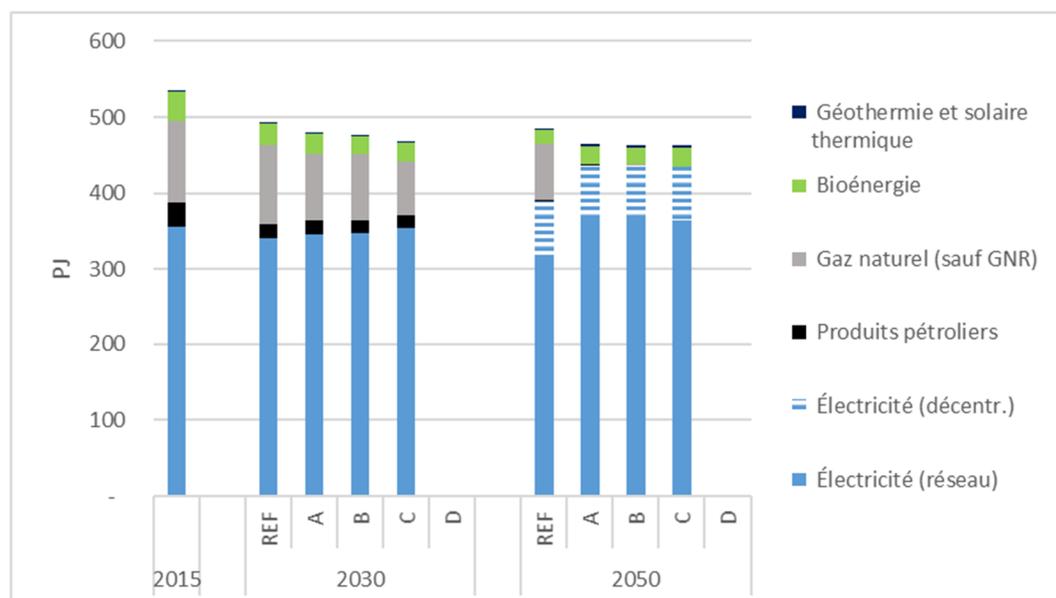
Graphique 1-13 - Utilisation finale de bioénergie par secteur (PJ)



BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS, COMMERCIAUX ET INSTITUTIONNELS

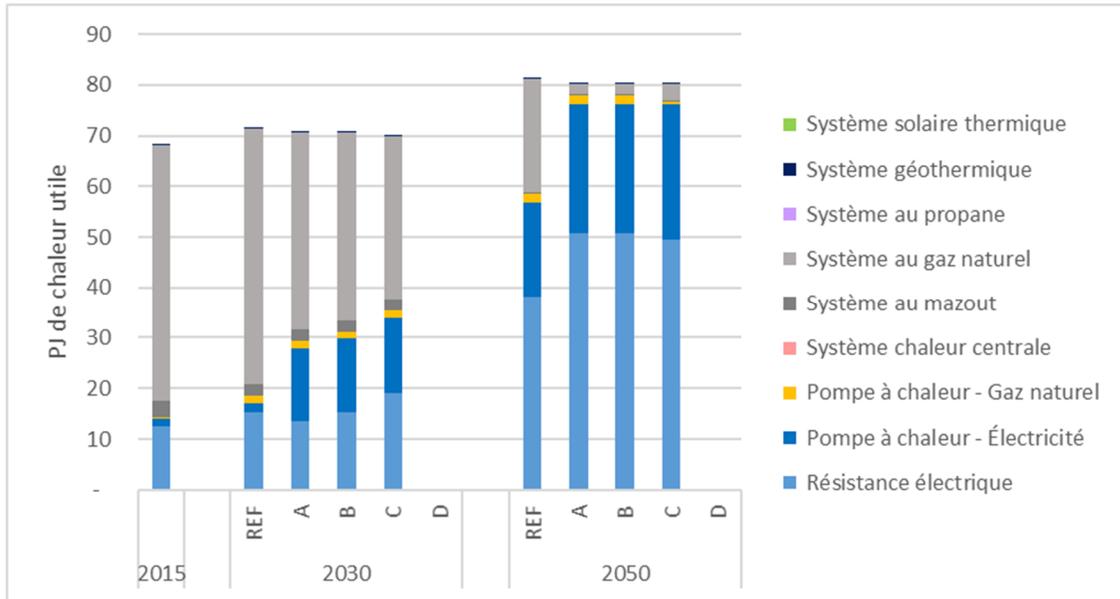
Grâce à l'efficacité énergétique, la consommation des bâtiments résidentiels, commerciaux et institutionnels du scénario de référence diminue légèrement d'ici 2030, puis se stabilise jusqu'en 2050 (graphique 1-14). Une bonne portion de cette consommation est satisfaite par la production électrique décentralisée (solaire photovoltaïque) qui apparaît déjà dans le scénario de référence en 2050 en raison de la baisse des coûts. Après 2030, les produits pétroliers et le gaz naturel non renouvelable disparaissent avec l'application de contraintes de réduction des GES, mais sont déjà en décroissance dans le scénario de référence.

Graphique 1-14 - Consommation d'énergie finale – Secteurs résidentiel, commercial et institutionnel (PJ)



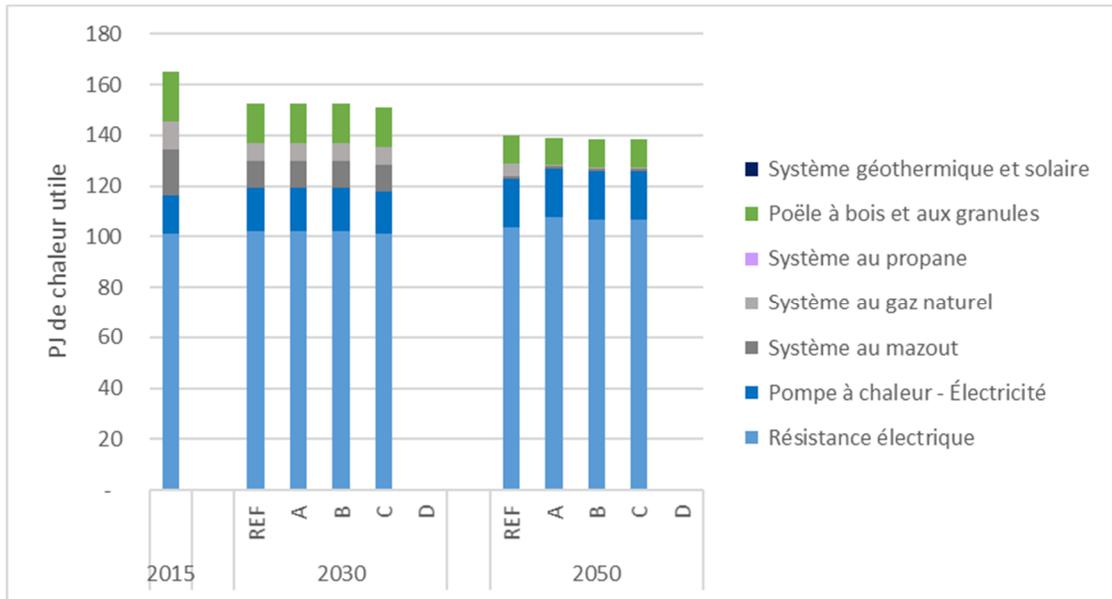
Dans le secteur commercial et institutionnel (graphique 1-15), le chauffage au gaz naturel qui est prédominant à l'heure actuelle est remplacé par le chauffage électrique, y compris dans le scénario de référence. Ceci s'explique notamment par l'augmentation de la tarification carbone qui s'applique au 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 scénarios de réduction, la pénétration de l'électricité devient très forte en 2050. La part du chauffage au gaz naturel qui demeure élevée dans le scénario de référence est pratiquement effacée au profit du chauffage électrique, dont une forte proportion est fournie par des pompes à chaleur. Ce portrait diffère du secteur résidentiel où la pénétration du gaz naturel pour le chauffage est nettement plus limitée.

Graphique 1-15 - Systèmes de chauffage dans le secteur commercial et institutionnel



Pour le secteur résidentiel (graphique 1-16), qui est déjà fortement électrifié, le portrait change peu, mis à part une diminution de la consommation en 2030 et en 2050. Après 2030, les parts du mazout et du gaz naturel diminuent, jusqu'à presque disparaître lorsque des contraintes de réduction de GES sont appliquées. Les pompes à chaleur sont moins présentes que dans le secteur commercial et institutionnel, mais fournissent néanmoins une part non négligeable de la chaleur nécessaire.

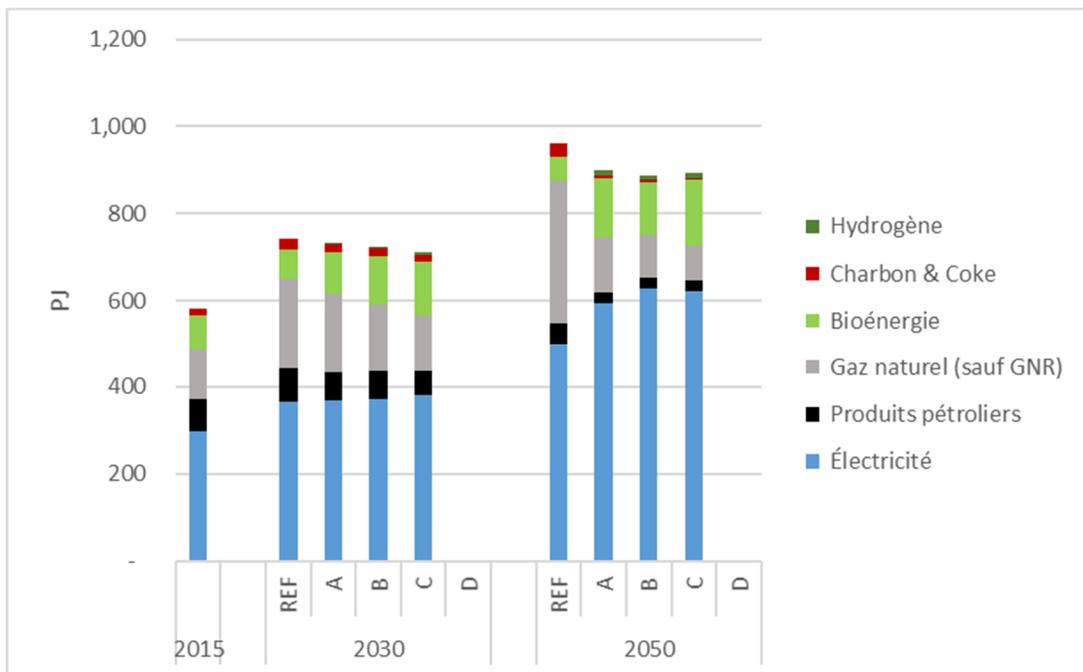
Graphique 1-16 - Systèmes de chauffage dans le secteur résidentiel



SECTEUR INDUSTRIEL

La consommation énergétique du secteur industriel dans le scénario de référence est en forte croissance jusqu'en 2050 (graphique 1-17). L'application de contraintes de réduction fait légèrement augmenter la part de l'électricité au détriment du gaz naturel, surtout à l'horizon 2050, mais change par ailleurs relativement peu le mix énergétique ou la consommation d'énergie totale.

Graphique 1-17 - Consommation d'énergie finale – Secteur industriel (PJ)



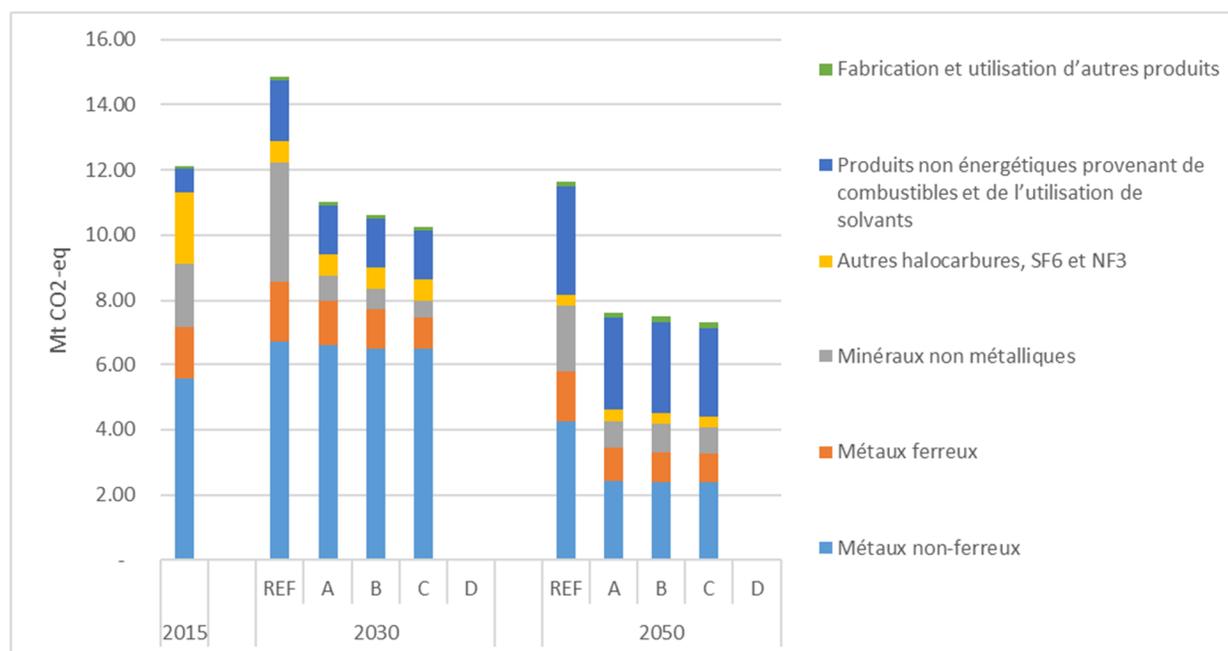
Les émissions de procédé du secteur industriel (graphique 1-18) bénéficient du nouveau procédé de production d'aluminium (sous-secteur des métaux non ferreux) avec anodes inertes, lequel est graduellement inclus dans le scénario de référence à compter de 2030.

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 minéraux non métalliques connaissent une réduction substantielle de leurs émissions dans les scénarios plus contraignants.

Les autres mesures incluent l'efficacité énergétique, la biomasse (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), etc.

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.

Graphique 1-18 – Émissions de procédé (MtCO₂eq)



TRANSPORTS

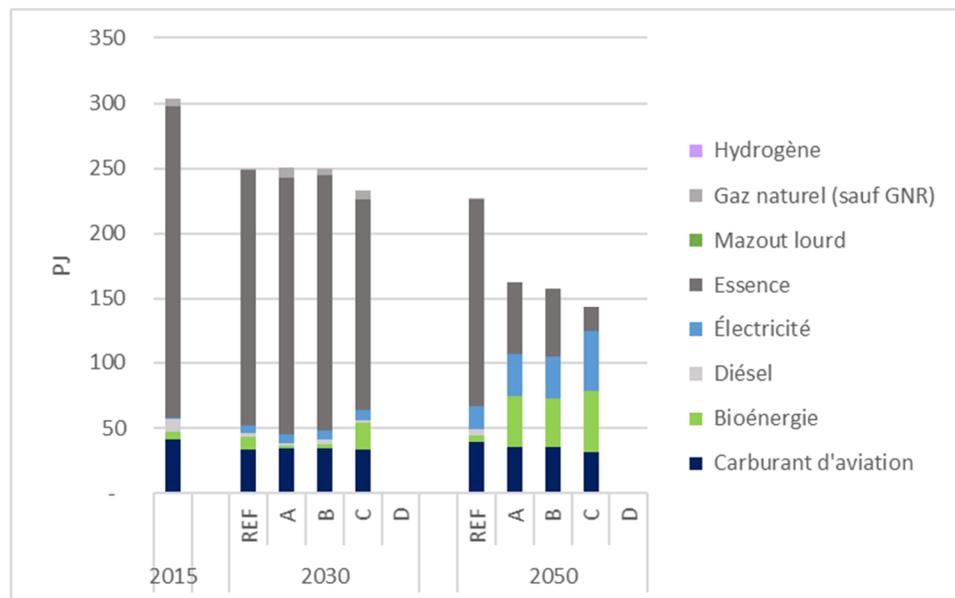
Le transport des passagers s'électrifie graduellement dans le scénario de référence (graphique 1-19). Les contraintes de réduction augmentent la part du transport électrifié, surtout à l'horizon 2050. Il est important de souligner ici que les parts sont exprimées en unités d'énergie, ce qui laisse paraître la part de la voiture électrique plus petite qu'elle ne l'est en raison de l'efficacité des moteurs électriques⁴⁴.

⁴⁴ P. ex., si on suppose qu'une voiture électrique consomme environ 3 fois moins d'énergie qu'une voiture à essence uniquement en raison de l'efficacité du moteur, et qu'il y a par ailleurs autant de voitures électriques que de voitures à essence à un moment précis, la part des voitures électriques en PJ serait trois fois moindre que celle des voitures à essence.

L'essence est toujours présente, mais le diesel disparaît complètement dans le scénario le plus contraignant à l'horizon 2050.

L'hydrogène n'est pas sollicité, car des options d'électrification moins coûteuses sont disponibles pour l'ensemble des sous-secteurs importants.

Graphique 1-19 - Consommation d'énergie finale – Transport des passagers, par source (PJ)



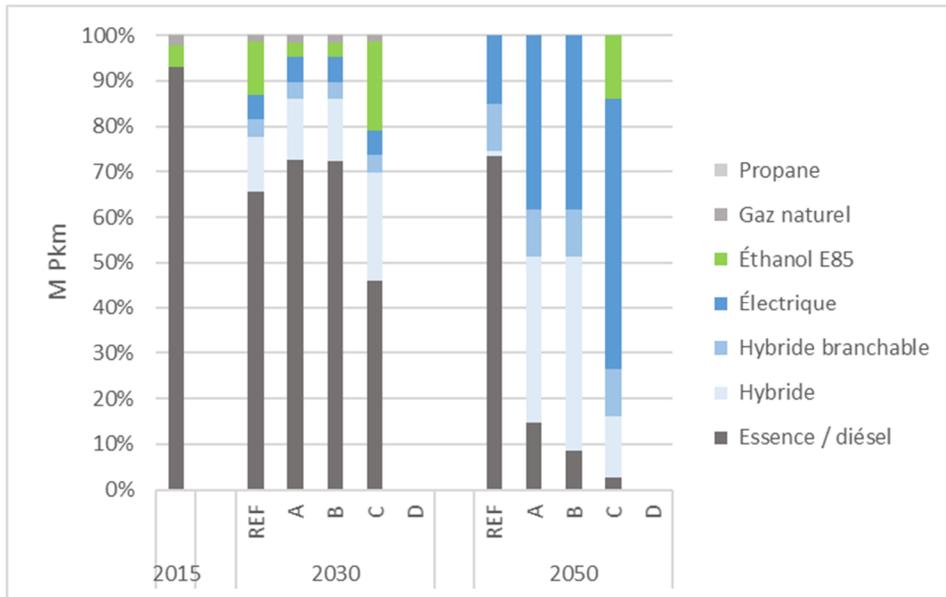
Le graphique 1-20 montre les parts de marché pour les automobiles et camions légers utilisés dans le transport des passagers. Il s'agit des parts de la demande totale en personnes-kilomètres pour une année qui sont satisfaites par les différents types de transport. Ces parts sont liées en théorie au parc de véhicules et à la quantité moyenne de personnes-kilomètres par véhicule. On y voit mieux la part importante de l'automobile électrique ou hybride à l'horizon 2050, surtout pour le scénario le plus contraignant (« C »).

On note également que la part des véhicules Éthanol E85 (véhicules « flex fuel » pouvant consommer de l'éthanol presque pur à 85 %) diminue entre 2030 et 2050, alors que le graphique 1-19 indique au contraire une augmentation de la consommation de biocarburants (bioénergie). Cela illustre le fait que davantage de biocarburants sont utilisés en mélange avec l'essence et le diesel dans les véhicules à combustion interne standard à l'horizon 2050. Cette utilisation de biocarburants fait en sorte qu'une petite quantité d'essence est encore consommée à cet horizon, même pour le scénario C.

Le secteur des transports est composé de multiples sous-segments. Même si l'électrification des véhicules légers est généralement plus rentable que l'utilisation de biocarburants ou autres combustibles, la situation peut être différente dans certains sous-segments, ce qui explique la présence de véhicules hybrides ou utilisant d'autres formes d'énergie que l'électricité (éthanol et produits pétroliers). Les résultats découlent des hypothèses sur les projections de coûts et d'efficacité de chaque catégorie de véhicules, tant pour les véhicules conventionnels que pour les véhicules électriques ou hybrides. Le modèle optimise en fonction des coûts à payer (véhicules, énergie, infrastructures, etc.) et des émissions évitées. Des analyses de sensibilité seraient requises afin de mieux comprendre les résultats par sous-segment et leur sensibilité.

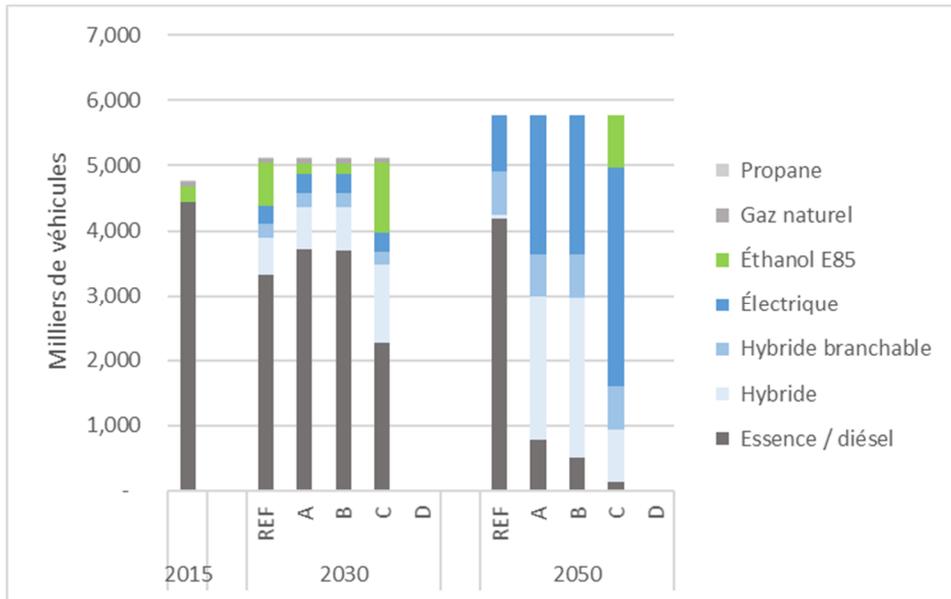
Il est à noter que les résultats des graphiques 1-20 et 1-21, établis sur la base des différentes technologies, sont difficilement comparables aux résultats du graphique 1-19 présentés par forme d'énergie du graphique 1-19. Les voitures hybrides, par exemple, peuvent consommer à la fois de l'électricité, de l'essence et des biocarburants, le tout en proportions différentes pour chacun des scénarios et chacune des années.

Graphique 1-20 - Parts de marché (composition du parc) des technologies de transport des passagers – autos et camions légers (millions de personnes-kilomètres)



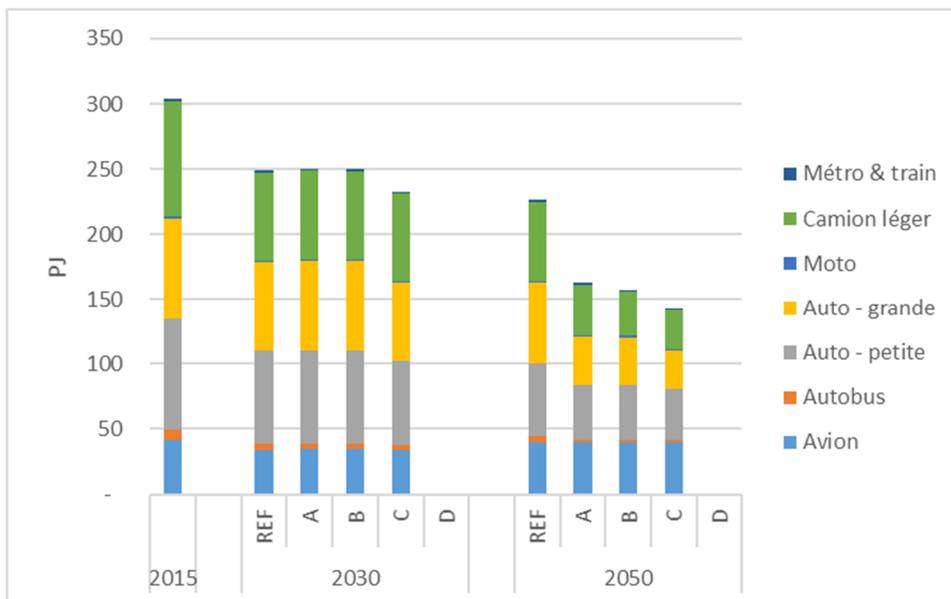
Le graphique 1-21 présente le nombre de véhicules composant le parc automobile (incluant les camions légers) par type de technologie. Comme l'illustre le graphique, le parc automobile compterait 1,2 million d'hybrides, 200 000 hybrides branchables et 300 000 voitures électriques en 2030, contre 800 000 hybrides, 600 000 hybrides branchables et 3,4 millions de voitures électriques en 2050 (scénario C).

Graphique 1-21 – Composition du parc automobile (nombre de véhicules – milliers)



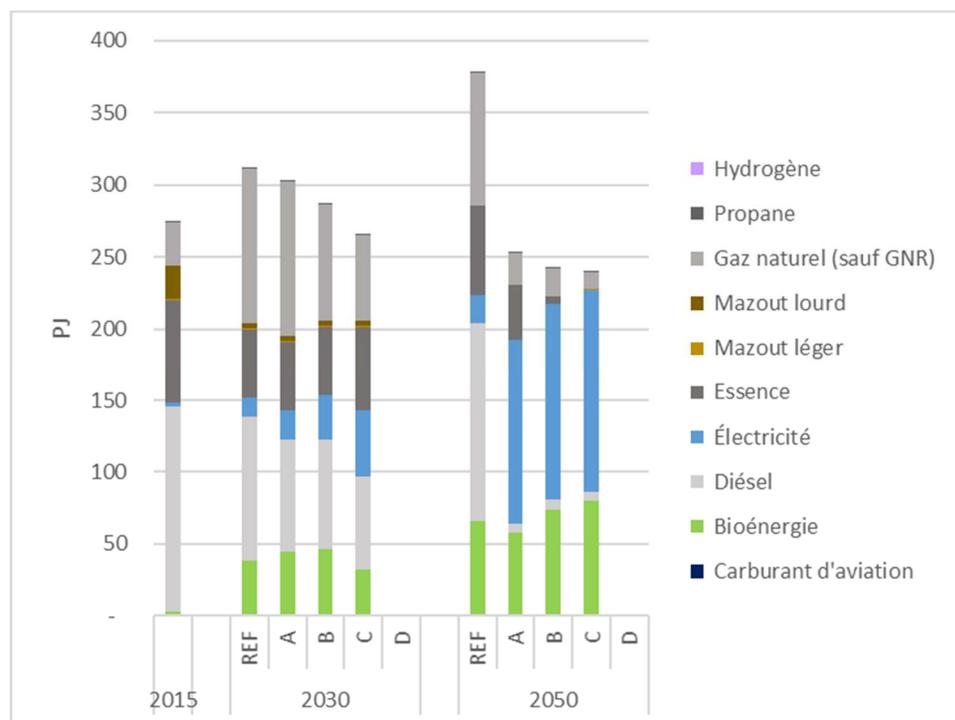
Le graphique 1-22 présente la consommation énergétique par mode pour le transport des passagers. Il est à noter que le modèle ne suppose pas de transferts modaux ; les variations de consommation par mode s’expliquent donc par l’application de mesures technologiques (efficacité des moteurs, électrification). Une optimisation des transferts modaux pourrait modifier le portefeuille énergétique.

Graphique 1-22 - Consommation d’énergie finale – Transport des passagers, par mode (PJ)



Pour les marchandises, le transport électrifié connaît une percée encore plus importante, surtout en 2050, après application des contraintes de réduction (graphique 1-23). L’électrification vient surtout réduire la consommation de diésel et de gaz naturel. Les biocarburants sont également en croissance.

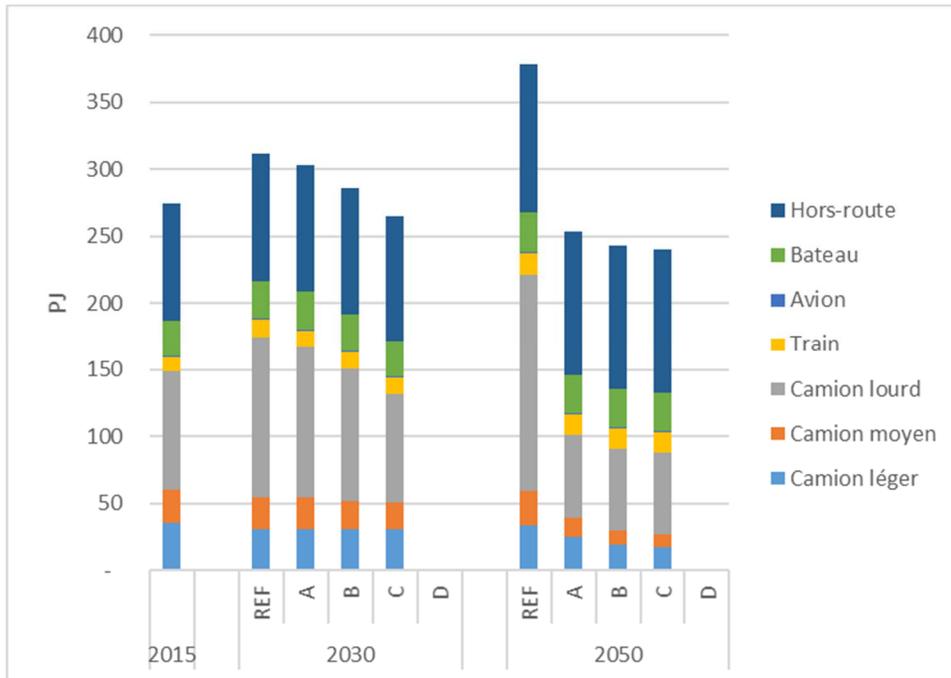
Graphique 1-23 - Consommation d'énergie finale – Transport des marchandises, par source (PJ)



Comme le montre le graphique 1-24, cette substitution vers les sources d'énergie propres s'effectue dans les sous-secteurs du camionnage. Encore une fois, il n'y a pas de mesures de transferts modaux à cette étape, mais ceux-ci ont été modélisés dans nos scénarios alternatifs. La consommation d'énergie de la catégorie « hors route » – principalement la machinerie agricole et forestière⁴⁵ – demeure importante dans l'ensemble des scénarios, reflétant le fait que les technologies d'électrification y sont difficilement applicables. Dans ce cas, la substitution d'énergie est la principale mesure considérée.

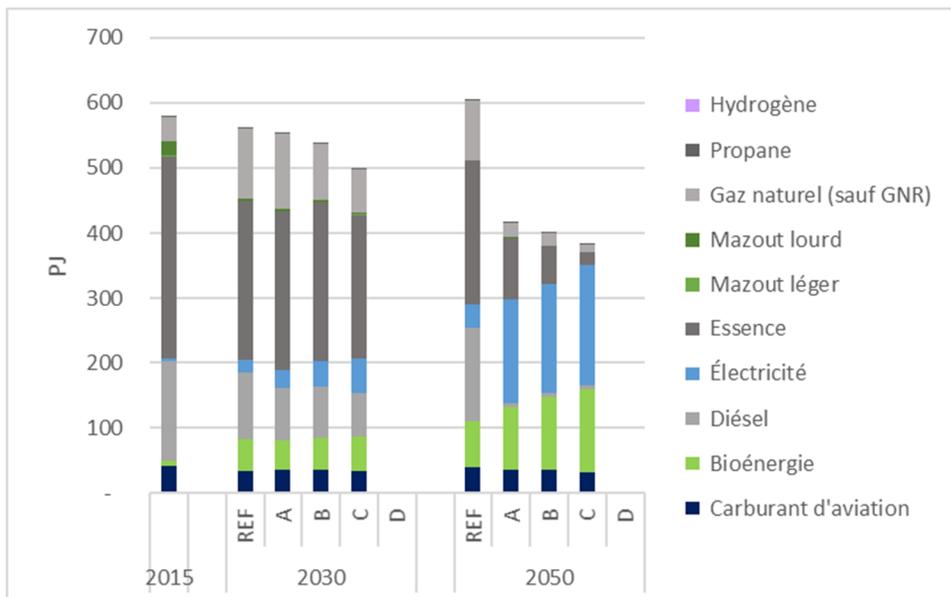
⁴⁵ La catégorie « hors route » inclut les véhicules routiers récréatifs hors route, la machinerie agricole (autre que les tracteurs et véhicules immatriculés pour aller sur la route), la machinerie utilisée dans les secteurs de la construction et de la foresterie, ainsi que l'énergie utilisée pour le transport par pipeline. Pour cette dernière sous-catégorie, les émissions sont minimes, car seule la portion de pipeline au Québec est considérée.

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



Pour l'ensemble du secteur des transports, l'électrification a un impact important à l'horizon 2050 pour les scénarios de réduction de GES, réduisant la consommation de gaz naturel, d'essence et de diesel. La bioénergie croît également avec les contraintes de réduction de GES (graphique 1-25).

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

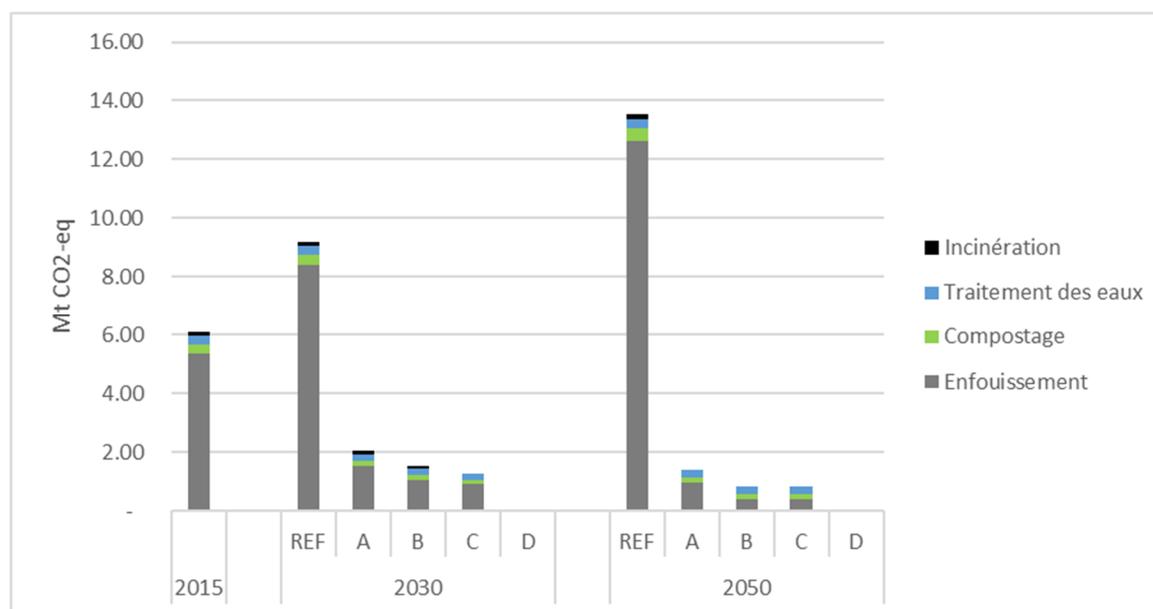


SECTEURS NON ÉNERGÉTIQUES (DÉCHETS, AGRICOLE)

Le secteur des déchets est dominé par les émissions provenant des sites d'enfouissement, lesquelles sont en croissance dans le scénario de référence (graphique 1-26). Malgré les politiques 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)), la forte croissance attendue en matière de déchets produits et enfouis fait en sorte que ces émissions augmentent dans le scénario de référence⁴⁶. En revanche, ces émissions sont grandement réduites dans tous les scénarios 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.

Le secteur des déchets présente la plus forte augmentation des émissions en 2050 dans le scénario de référence. Paradoxalement, il décroît très rapidement dans les scénarios de réduction, dès 2030 dans le scénario A, soit le moins contraignant, ce qui indique que les mesures de réduction sont relativement peu coûteuses à mettre en place.

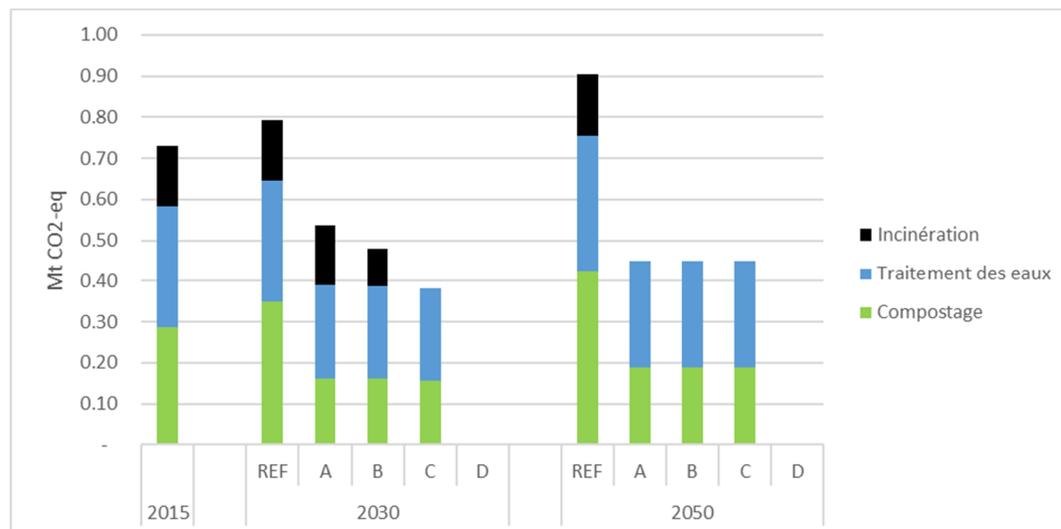
Graphique 1-26 – Émissions du secteur des déchets (MtCO₂eq)



Afin de pouvoir mieux observer l'évolution des autres sous-secteurs, le graphique 1-27 reprend les mêmes données, mais cette fois sans les émissions de l'enfouissement. On note l'élimination de l'incinération et une importante réduction des émissions pour le compostage dès l'application de contraintes de réduction pour faire place à la valorisation des déchets (production de GNR/biocarburants). Le captage du biométhane aux sites de traitement des eaux qui utilisent un procédé anaérobie est également retenu par le modèle, mais son impact paraît peu, car les émissions de ce sous-secteur proviennent principalement du N₂O (émissions fugitives plus difficiles à réduire).

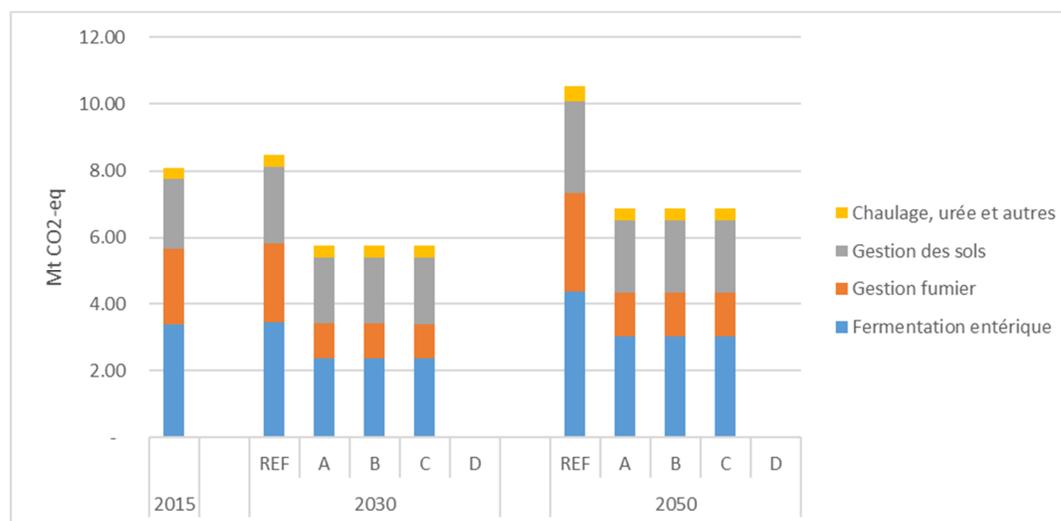
⁴⁶ À noter qu'un degré d'incertitude important prévaut à l'égard de l'évolution des émissions de GES du secteur des déchets et cela se traduit dans le scénario de référence.

Graphique 1-27 – Émissions du secteur des déchets sans les sites d’enfouissement (MtCO₂-eq)



Pour le secteur agricole (graphique 1-28), les mesures de réduction sont appliquées pour l’ensemble des scénarios de réduction de GES. Comme il s’agit de mesures relativement peu coûteuses, elles sont mises en application dès le scénario A. 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 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 de la gestion des sols⁴⁷.

Graphique 1-28 – Émissions du secteur agricole



⁴⁷ 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.).

Cette section présente les courbes de coûts marginaux des secteurs et principales mesures de réduction, les coûts totaux estimatifs et les investissements requis, ainsi que les résultats d'une analyse de sensibilité sur des projections alternatives de prix sur le marché du carbone.

COURBES DE COÛTS MARGINAUX

Les courbes de coûts marginaux⁴⁸ ont été produites en effectuant de multiples analyses du modèle NATEM pour chaque scénario sélectionné. Chaque courbe représente les options de réduction (par rapport aux émissions de la même année sans aucune contrainte de réduction ni tarification carbone) en considérant l'effort total de réduction nécessaire ainsi que leur coût net. En catégorisant chaque option de réduction par secteur d'activité, la courbe de coûts marginaux permet de voir dans quels secteurs d'activité se situent les meilleures opportunités et sert de base pour l'élaboration de scénarios et de mesures de réduction plus précis.

Chaque solution optimale (chaque niveau de prix) représente une solution permettant de satisfaire les demandes pour des services énergétiques, tout en minimisant le coût total net actualisé⁴⁹ du système énergétique sur toute la période temporelle, et tout en respectant les contraintes sur les GES. La minimisation du coût total inclut 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.

Les courbes de coûts par secteurs et principales technologies sont présentées aux graphiques 1-29 (horizon 2030) et 1-30 (horizon 2050). Notons que les principaux blocs seulement y sont représentés pour que l'ensemble demeure lisible. Pour les automobiles, par exemple, l'électrification se fait graduellement, même si les gains les plus substantiels en transport se font à des prix plus élevés. Le tableau 1-2 présente les principales mesures par tranche de coût.

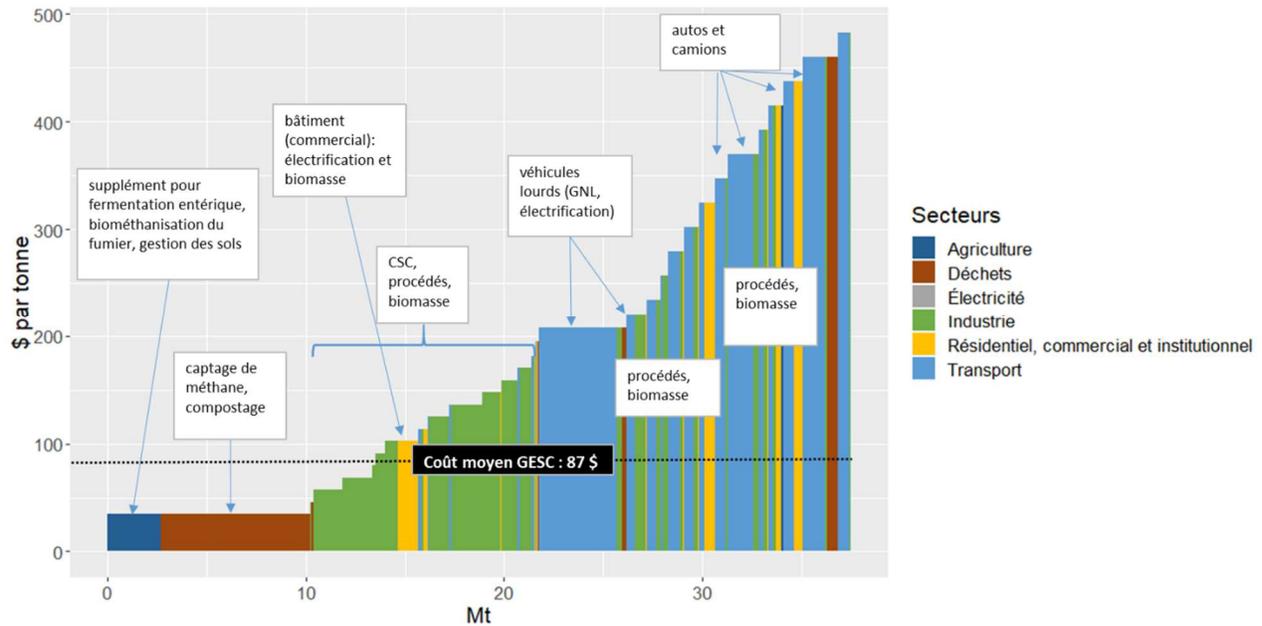
Les secteurs de l'agriculture et des déchets offrent d'importants potentiels de réduction de GES à faible coût (moins de 50 \$/tCO₂éq), notamment par les suppléments alimentaires pour réduire la fermentation entérique, la biométhanisation du fumier, la gestion des engrais, le captage du méthane aux sites d'enfouissement et le compostage des matières putrescibles. Le secteur industriel offre ensuite un bloc substantiel de réductions incluant l'utilisation accrue de la biomasse, l'amélioration des procédés et le CSC (dans la limite de la contrainte annuelle de 2,5 MtCO₂éq). Au-delà d'environ 20 MtCO₂éq de réductions, les mesures touchant les véhicules lourds sont mises à contribution.

⁴⁸ Rappelons que dans l'ensemble du rapport, les coûts incluent l'ensemble des coûts incrémentaux (c.-à-d. les coûts additionnels des technologies propres par rapport aux technologies de base), ainsi que les économies d'énergie et autres coûts et économies d'opération pour l'ensemble des secteurs économiques (particuliers, entreprises, administrations publiques). Ils tiennent compte également de la valeur résiduelle des actifs à la fin de l'horizon temporel de modélisation. Ces coûts nets peuvent être substantiellement inférieurs aux investissements initiaux requis pour réduire les émissions de GES.

⁴⁹ Le taux d'actualisation utilisé est de 4 % (réel) jusqu'en 2040, puis de 3 % par la suite.

Rappelons que l'ensemble des valeurs monétaires dans ce rapport sont exprimées en dollars constants de 2018.

Graphique 1-29 - Courbe de coûts marginaux sectoriels, horizon 2030



Graphique 1-30 - Courbe de coûts marginaux sectoriels, horizon 2050

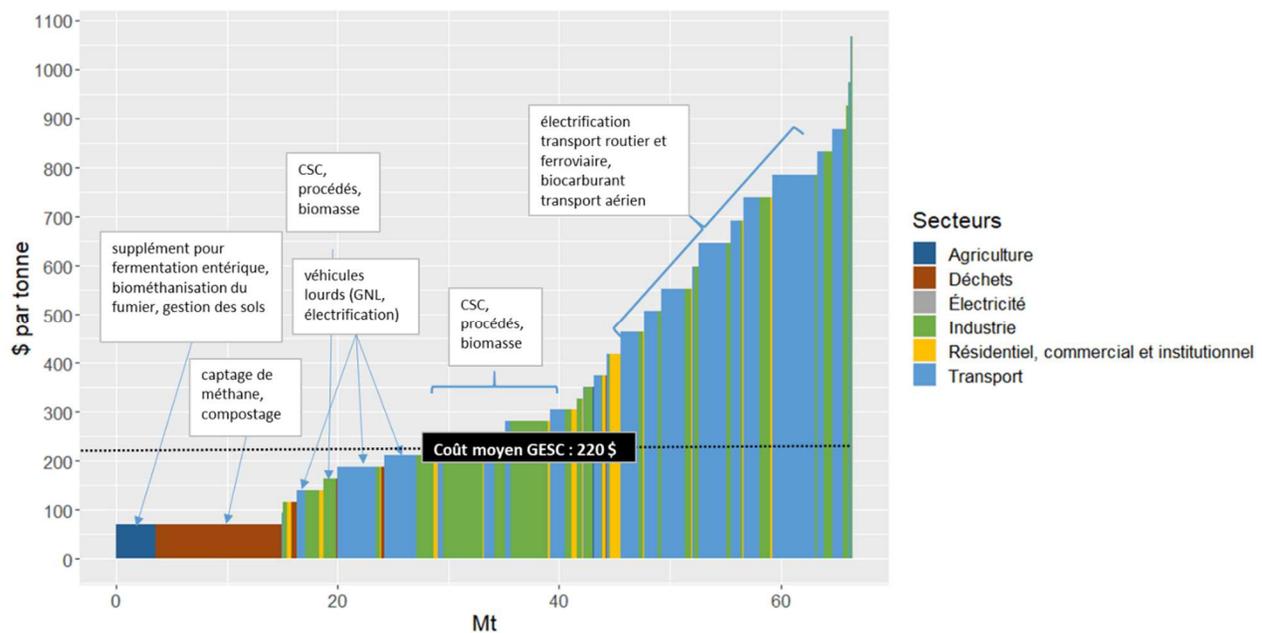


Tableau 1-2 – Principales mesures de réduction⁵⁰ des émissions de GES par secteur, selon leur coût marginal

Coût marginal	<100 \$/tCO ₂ éq	100-300 \$/tCO ₂ éq	>300 \$/tCO ₂ éq
Transport		Véhicules lourds (GNL, électrification)	Autos et camions légers (électrification, biocarburants)
		Transport ferroviaire (électrification, biocarburants)	Véhicules lourds (GNL, électrification) Transport aérien (biocarburants)
Industrie	Électrification	Bioénergie et électrification	Électrification
	Substitution du clinker dans la production de ciment	Anodes inertes pour aluminium	Captage et séquestration du carbone (potentiel probable, mais non capturé en raison de la contrainte exogène)
	Anodes inertes pour aluminium	Captage et séquestration du carbone (potentiel probable, mais non capturé en raison de la contrainte exogène)	
	Captage et séquestration du carbone (ciment, fer et acier)		Procédé de réduction directe
Résidentiel, commercial et institutionnel	Efficacité énergétique		
	Pompes à chaleur	Électrification	Électrification
Électricité	Efficacité énergétique	Bioénergie	
		Substitution de la production thermique par de l'électricité de source renouvelable	
Agriculture		Suppléments et additifs alimentaires pour réduire la fermentation entérique	Gestion des sols pour réduire CO ₂ du chaulage
		Biométhanisation du fumier	
		Gestion des sols (utilisation d'engrais à diffusion lente, agriculture de précision, ciblage des zones où appliquer les engrais, etc.)	
Déchets		Captage de méthane aux sites d'enfouissement	Valorisation des matières résiduelles (additionnelle)
		Captage de méthane aux sites de traitement anaérobie des eaux usées	Captage de méthane additionnel aux sites d'enfouissement
		Valorisation des matières résiduelles	
		Arrêt de l'incinération	

⁵⁰ Solutions technologiques seulement (exclut les réductions de demandes).

COÛTS MARGINAUX, MOYENS ET TOTAUX

Les coûts moyens et totaux ne résultent pas directement de la modélisation, mais ont été estimés sur la base des coûts marginaux par palier de réduction. Par exemple, si le coût marginal se situe, pour un bloc de réductions de 10 MtCO₂éq, entre 75 \$/tCO₂éq et 85 \$/tCO₂éq, alors le coût moyen pour ce bloc de réductions de 10 MtCO₂éq sera de 80 \$/tCO₂éq. Le coût moyen pour l'ensemble d'un scénario est obtenu par moyenne pondérée des différents blocs de réductions requis pour atteindre la cible ou l'objectif du scénario, en commençant par les réductions les moins coûteuses.

En raison des importantes mesures de réduction à coût moindre, le coût moyen est inférieur au coût marginal. En 2030, le coût moyen serait de 42 \$/tCO₂éq à 87 \$/tCO₂éq, selon le scénario. À l'horizon 2050, le coût moyen se situe plutôt entre 161 \$/tCO₂éq et 220 \$/tCO₂éq. Pour le scénario de réduction C, le coût total annuel serait d'environ 2,6 milliards \$ en 2030 et 15,1 milliards \$ en 2050 pour l'ensemble des acteurs économiques.

Les coûts cumulatifs sont présentés à titre indicatif pour l'ensemble des deux périodes (2021-2030 et 2031-2050), mais il existe de grandes incertitudes sur ces estimés en raison des hypothèses nécessaires à leur calcul, notamment les coûts moyens qui ne sont disponibles que pour 2030 et 2050 et qui ont dû être estimés pour les autres années. Ces chiffres doivent être utilisés avec prudence.

Le tableau 1-3 présente les coûts moyens pour chaque scénario et horizon de temps, ainsi que le coût total annuel en 2030 et 2050 et les coûts cumulatifs.

Tableau 1-3 – Coût marginal, moyen et annuel total pour les scénarios de base

	Coût marginal		Coût moyen		Coût annuel total		Coûts cumulatifs	
	(\$/tCO ₂ éq)		(\$/tCO ₂ éq)		(M\$)		(M\$)	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2021-2030	2031-2050
Scénario A	94	675	42	161	788	9 580	2 800	95 000
Scénario B	154	889	59	186	1 369	11 917	4 900	125 000
Scénario C	302	1 179	87	220	2 606	15 127	9 500	171 000

Pour mettre en œuvre les solutions technologiques nécessaires à l'atteinte des objectifs du Québec, des investissements massifs seront requis. Pour atteindre la cible de 2030, on estime que des investissements moyens de 1,7 milliard de dollars par année (sur la période 2021-2030) seront nécessaires en sus des investissements déjà prévus dans le scénario de référence. Pour la période 2031-2050, ces investissements additionnels s'élèveraient à environ 9,8 milliards de dollars en moyenne par année. Ces investissements pourraient être réduits en privilégiant des mesures en lien avec la réduction des demandes.

ANALYSE DE SENSIBILITÉ – PRIX DU CARBONE

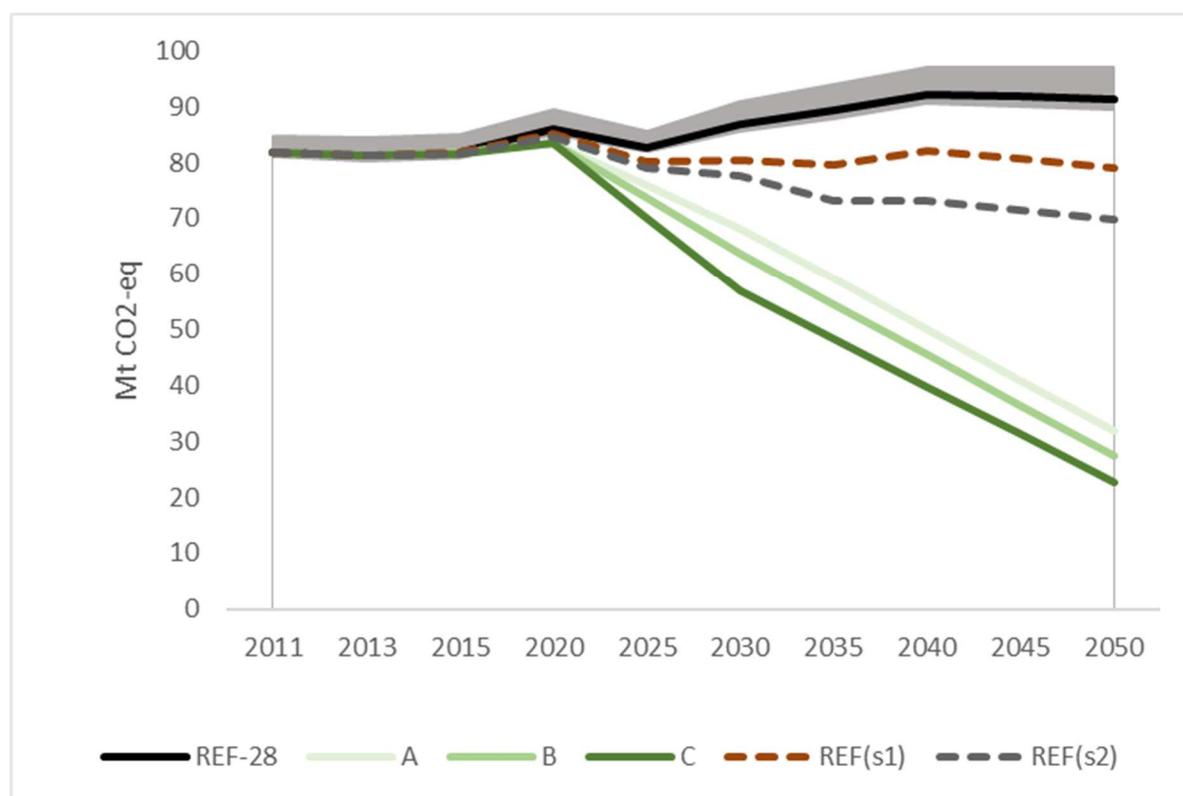
Nous avons simulé deux niveaux alternatifs de prix du carbone pour le scénario de référence - REF(s1) et REF(s2), ainsi que pour le scénario de réduction de GES C - C (s1) et C (s2). Les séries de valeurs alternatives de prix du carbone, par rapport au niveau de prix utilisé dans le scénario de base (25 \$ en 2030 et 67 \$ en 2050 en dollars constants de 2018) représentent en moyenne :

- 2.75 x le prix du scénario de base pour les scénarios REF(s1) et C (s1) en moyenne de 2020 à 2050 (91 \$ en 2030 et 140 \$ en 2050)
- 4.45 x le prix du scénario de base pour le scénario REF(s2) et C (s2) en moyenne de 2020 à 2050 (141 \$ en 2030 et 216 \$ en 2050)

Bien que le prix soit substantiellement plus élevé que dans le scénario de base, il demeure bien en deçà du coût marginal des réductions de GES pour les scénarios de réduction.

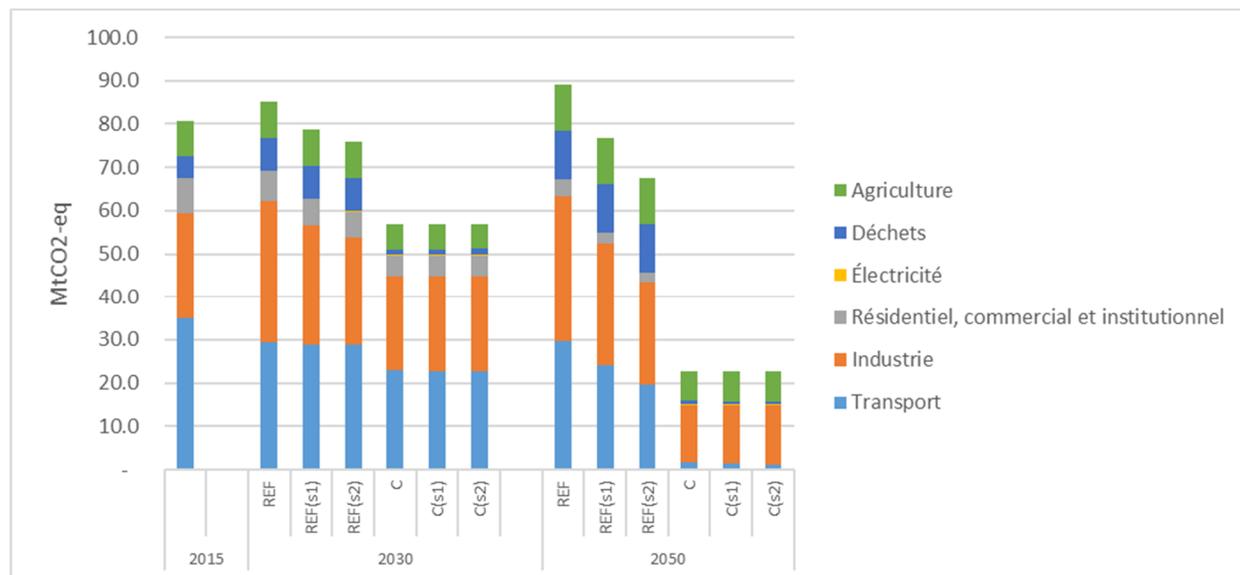
À ces niveaux plus élevés de prix, REF(s1) et REF(s2) affichent des émissions plus faibles comparativement au scénario de référence (REF-28, soit le scénario de référence avec méthane à PRP de 28), amenant des baisses d'émissions totales en 2030 et 2050 plutôt que des hausses (graphiques 1-31 et 1-32).

Graphique 1-31 – Analyse de sensibilité, prix du carbone (trajectoires globales)



Par contre, la hausse de prix du carbone affecte très peu les solutions des scénarios de réduction, car dans ceux-ci la cible ou l'objectif de réduction de GES est beaucoup plus contraignant que le prix du carbone. Autrement dit, les contraintes de réduction de GES des scénarios vont bien au-delà des réductions que permet d'obtenir le prix du carbone et ce sont donc ces contraintes qui déterminent en majeure partie les résultats de la modélisation. Comme on le voit au graphique 1-32, les solutions pour les scénarios C (s1) et C (s2) sont presque identiques à celles du scénario C.

Graphique 1-32 – Analyse de sensibilité, prix du carbone (résultats globaux et sectoriels)



Les émissions pour les scénarios de prix alternatifs demeurent plus élevées que celles du scénario A, le moins contraignant de nos quatre scénarios de réduction (tableau 1-4). L'écart est particulièrement frappant pour 2050 (autour de 70 MtCO₂éq pour REF (s1) et REF (s2) versus 31,8 MtCO₂éq pour le scénario A).

Tableau 1-4 – Analyse de sensibilité, prix sur le marché du carbone (comparaison avec le scénario A)

	REF	REF(s1)	REF(s2)	Scénario A	C (s1)	C (s2)
En émissions totales annuelles (MtCO₂éq)						
Horizon 2030	86,9	78,8	75,9	68,2	56,9	56,9
Horizon 2050	91,4	76,7	67,4	31,8	22,7	22,7
Niveaux de prix du carbone (\$ CAN₂₀₁₈)						
Horizon 2030	25	91	141	25	91	141
Horizon 2050	67	140	216	67	140	216

Pour résumer, les niveaux alternatifs de prix du carbone viennent affecter le scénario de référence et amènent des baisses d'émissions pour 2030 et pour 2050. Globalement, ils sont beaucoup moins contraignants que les scénarios de réduction de GES (scénarios A à D), surtout pour 2050.

Lorsqu'appliqués conjointement aux cibles et objectifs de réduction de ces scénarios, ils affectent très peu les résultats, car la cible ou l'objectif de réduction déjà appliqué est beaucoup plus contraignant. Cela signifie que le prix du carbone induit par le marché du carbone, s'il se situe en deçà des niveaux alternatifs de prix du carbone modélisés, serait insuffisant pour permettre à lui seul l'atteinte des cibles et objectifs de réduction du Québec (avec des réductions en territoire québécois seulement), selon l'étendue des hypothèses de prix actuelles.

CHAPITRE 2 : SCÉNARIOS ALTERNATIFS

FAITS SAILLANTS

Le chapitre suivant, « Scénarios alternatifs », présente le résultat de la deuxième partie de l'étude. Celle-ci visait à tester la sensibilité des résultats de la modélisation précédente face à différents facteurs tels que les projections de demandes, les risques technologiques, les ressources disponibles ou les contraintes d'acceptabilité sociale.

Pour cela, huit scénarios alternatifs ont été définis⁵¹ :

	SCÉNARIO	DESCRIPTION
	1. Mobilité durable/ Aménagement urbain	Développement urbain orienté vers le transport en commun, transfert modal vers le transport en commun et le train, aménagement compact des villes engendrant une réduction des besoins énergétiques des bâtiments.
	2. Tissu industriel	Production industrielle axée vers un développement des industries vertes
	3. Ajustement du système alimentaire	Réduction du gaspillage alimentaire et diversification des sources de protéines du régime alimentaire
	4. Demandes	Combinaison des scénarios 1, 2 et 3
	5. Analyse de risques	Réduction ou retrait des options technologiques jugées plus risquées
	6. Captage et séquestration du carbone	Aucune limite imposée au captage et à la séquestration du carbone (sauf la contrainte géologique de séquestration) ni à la production d'énergie à partir de biomasse avec captage (« BECSC »).
	7. Biomasse	Augmentation de la quantité de biomasse disponible
	8. Demandes, biomasse et séquestration du carbone	Combinaison de l'ensemble des scénarios favorables, soit les scénarios 1, 2, 3, 6 (sauf la BECSC) et 7.

Chacun des scénarios alternatifs a été modélisé avec le scénario de référence et les quatre scénarios de réduction présentés dans le chapitre précédent (scénarios A à D), notamment afin de tester si l'un (ou plusieurs) des scénarios alternatifs permettait d'atteindre le scénario D (-87,5 % en 2050).

⁵¹ Pour plus de détails sur la définition des scénarios, le lecteur peut se référer à la section Méthodologie.

Il ressort de la modélisation de ces nombreuses variations les constats suivants :

- **Les scénarios alternatifs, à l'exception du scénario 5 (risques), facilitent l'atteinte des cibles et objectifs en réduisant les demandes projetées, en réduisant les contraintes technologiques imposées au modèle ou en augmentant les ressources de bioénergie disponibles. Trois de ces scénarios permettent même l'atteinte de l'objectif du Québec de -80 % ou plus à l'horizon 2050, soit le scénario 4 (Demandes), le scénario 6 (CSC et BECSC) et le scénario 8 (Combinaison des scénarios favorables). Ces deux derniers scénarios permettent même l'atteinte du scénario de réduction D (-87,5 % en 2050).**
- **Les impacts des scénarios alternatifs se manifestent surtout dans les scénarios de référence.** Ils amènent quelques variations sectorielles, mais influent peu sur la quantité totale d'émissions, étant donné les contraintes inhérentes au modèle (dans les scénarios de réduction A à D). L'impact des scénarios alternatifs se fait davantage ressentir en termes de coûts marginaux pour atteindre les objectifs de réduction. En d'autres termes, les scénarios alternatifs permettent de se rapprocher ou d'atteindre les cibles et objectifs à moindre coût.
- **À l'exclusion du scénario 5 (risques), tous les scénarios alternatifs amènent une baisse des coûts marginaux.** Une diminution du coût marginal ne signifie pas uniquement une baisse des coûts engendrés pour réduire les GES, mais également une marge de manœuvre accrue pour les réduire davantage. Les scénarios 6 et 8, qui présentent les coûts marginaux les plus bas, sont également les seuls à pouvoir atteindre les cibles du scénario D. À l'opposé, le scénario 5 présente déjà un coût marginal très élevé dans le scénario A et ne peut aller plus loin dans le niveau des réductions.

Voici ce que l'on peut retenir de cette deuxième partie de l'analyse :

- **La réduction des demandes doit faire partie de la solution.**

La combinaison de nos réductions de demandes (scénario 4) amène une baisse du coût marginal de plus de 40 % à l'horizon 2050 (scénario C). La réduction des demandes permet également d'aller plus loin dans l'atteinte des cibles et objectifs de réduction, soit jusqu'à 85 % de réduction à l'horizon 2050 permettant ainsi l'atteinte de la cible et des objectifs du Québec.

- **Le CSC et la BECSC doivent également faire partie de la solution comme technologie de dernier recours.**

Les scénarios 6 (CSC sans contrainte et BECSC) et 8 (scénario favorable incluant le CSC sans contrainte) sont les seuls à atteindre le scénario de réduction D sans l'achat de crédits de carbone internationaux. Ces technologies permettent également de réduire les coûts marginaux, surtout à long terme.

- **Des risques technologiques importants demeurent.**

Avec le retrait des technologies jugées plus risquées (scénario 5), seul le scénario de réduction A est atteint. Ceci confirme l'importance d'appuyer le développement de technologies afin de consolider les options de réduction disponibles.

STRUCTURE DU CHAPITRE

Ce chapitre porte sur l'analyse de huit scénarios alternatifs, ainsi que sur la séquence optimale d'introduction des mesures. Il est structuré comme suit :

ANALYSE ÉNERGÉTIQUE ET TECHNOLOGIQUE

Une présentation de résultats globaux et sectoriels sélectionnés les plus pertinents pour les huit scénarios alternatifs.

ANALYSE ÉCONOMIQUE

Coûts marginaux des huit scénarios alternatifs à l'horizon 2030 et 2050 pour chacun des scénarios de réduction.

ANALYSE ÉNERGÉTIQUE ET TECHNOLOGIQUE

Cette section présente tour à tour les résultats de chacun des scénarios alternatifs. Les ajustements modélisés dans ces scénarios alternatifs viennent modifier autant les résultats du scénario de référence que des scénarios de réduction de la première partie de l'analyse. Cette seconde série de modélisations génère ainsi de nouveaux scénarios de référence qui permettent d'isoler l'effet de ces ajustements en les comparant tant aux scénarios de référence initiaux qu'aux scénarios de réduction alternatifs.

Une comparaison avec le scénario de référence et un scénario de réduction est présentée sous forme graphique pour chacun des scénarios alternatifs. Le scénario de réduction C est retenu pour cette comparaison,⁵² car il s'agit du scénario le plus contraignant atteint par le scénario de base (technologies seulement). Par la suite, les informations les plus pertinentes sont sélectionnées et présentées pour certains des scénarios. Les résultats pour l'ensemble des scénarios de réduction sont présentés en annexe de ce rapport.

En général, les impacts des scénarios alternatifs se font surtout sentir dans les scénarios de référence, dont les émissions totales fluctuent selon les modifications exogènes apportées au modèle.

Pour les scénarios de réduction cependant, les scénarios alternatifs amènent de légères substitutions entre les secteurs sur les émissions en 2030 et 2050, mais les émissions totales demeurent au même niveau en raison de l'application des contraintes de réductions de GES. En effet, à moins de réussir à atteindre les réductions du scénario D, les cibles et objectifs de réduction maximums atteints demeurent au même niveau même si les résultats (notamment les coûts marginaux) laissent croire qu'une marge de manœuvre est dégagée et que des réductions d'émissions plus importantes seraient possibles.

L'effet le plus important découlant de la modélisation des scénarios alternatifs se situe dans le coût marginal des mesures de réduction, qui varie sensiblement en fonction des contraintes exogènes imposées au modèle (voir section « Analyse économique »).

Le scénario 5 (Risques technologiques) rend plus difficile l'atteinte des cibles et objectifs, car les technologies de réduction de GES disponibles sont restreintes. Seul le scénario de réduction A réussit à trouver une solution.

Dans tous les autres cas, les scénarios facilitent l'atteinte des cibles en réduisant les demandes projetées, en réduisant les contraintes technologiques ou en augmentant les ressources de bioénergie disponibles. Deux de ces scénarios permettent même l'atteinte des cibles et objectifs les plus contraignants (scénario de réduction D) alors qu'un troisième s'en approche (atteinte de l'objectif du Québec pour 2050 avec un minimum de 80 % de réductions).

⁵² Pour le scénario alternatif 5 (Risques technologiques), qui n'atteint que le niveau de réduction A, c'est ce dernier scénario qui a été retenu pour la comparaison.

MOBILITÉ DURABLE / AMÉNAGEMENT URBAIN (SCÉNARIO ALTERNATIF 1)

RÉSULTATS-CLÉS

- Les émissions liées au transport diminuent significativement dans le scénario de référence (16 % en 2050). La part du métro, du train et de l'autobus croît dans le transport des passagers, au détriment des autres moyens de transport. Le train est davantage utilisé pour le transport de marchandises.
- Malgré la construction plus compacte, les émissions des bâtiments augmentent, en raison de l'utilisation accrue du gaz naturel pour le chauffage. Cela est dû au fait que la pénétration du gaz naturel est plus grande pour les immeubles multilocatifs. Cet effet pourrait être contré par des politiques appropriées (promotion de développements résidentiels sans gaz naturel, ou promotion du GNR).
- Le scénario de réduction C est atteint (-75 % en 2050), mais pas le D (-87,5 % en 2050).

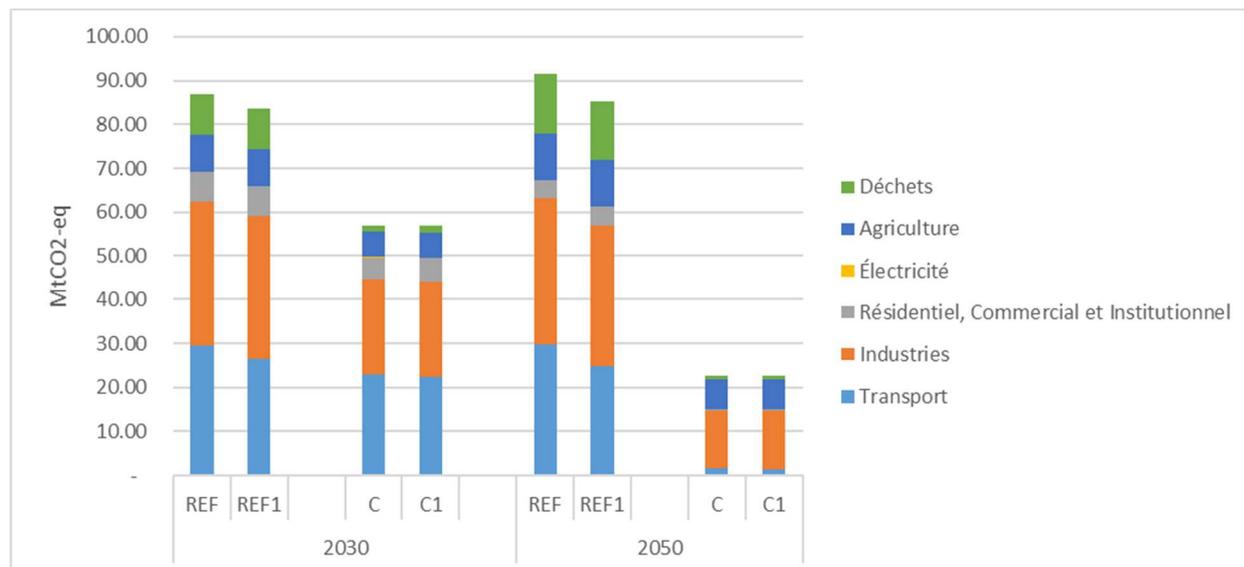
La réduction des besoins énergétiques en transport et pour les bâtiments amène une réduction substantielle des émissions du scénario de référence, de 91,4 MtCO₂éq à 85,4 MtCO₂éq en 2050, soit une diminution d'environ 7 % des émissions totales ou 6,0 MtCO₂éq (graphique 2-1).

La réduction la plus marquée se retrouve en transport, avec une baisse de 16 % des émissions en 2050. Malgré la baisse de la demande énergétique dans le secteur résidentiel, avec une diminution du nombre de maisons unifamiliales détachées et une augmentation correspondante du nombre de logements multifamiliaux, le secteur du bâtiment connaît une hausse de ses émissions, en raison de l'utilisation accrue du gaz naturel pour le chauffage des locaux et de l'eau dans ce type d'habitation. Une politique d'aménagement urbain pourrait s'accompagner d'une électrification stratégique dans le bâtiment ou du développement du gaz naturel renouvelable afin de contrer cet effet pervers. Par exemple, l'aide financière d'un programme d'encouragement pour les développements urbains densifiés pourrait être conditionnelle à l'utilisation de sources d'énergie neutres en carbone, avec appui additionnel pour les systèmes les plus efficaces (p. ex., géothermie).

L'utilisation accrue du gaz naturel dans le bâtiment et l'utilisation moindre de l'électricité ont également des impacts, minimes, sur les émissions des secteurs industriel et agricole. Le niveau d'efficacité énergétique diminue également pour l'ensemble des secteurs, car plus d'énergie est disponible pour satisfaire les besoins. La réduction de la demande en transport et en bâtiments génère une redistribution énergétique et un rééquilibrage des réductions de GES pour l'ensemble des secteurs. Ces résultats illustrent bien la complexité du modèle et des nombreuses interactions qui peuvent affecter la modélisation. Des effets interactifs entre secteurs sont également observés pour d'autres scénarios.

Contrairement au scénario de référence qui voit ses émissions diminuer sensiblement, l'application du scénario alternatif a relativement peu d'impact sur les scénarios de réduction (C vs C1). La contrainte de réduction de GES force le modèle à atteindre le niveau d'émissions donné. De légers effets de substitution entre les secteurs sont observés.

Graphique 2-1 – Émissions comparées du scénario de base et du scénario alternatif 1

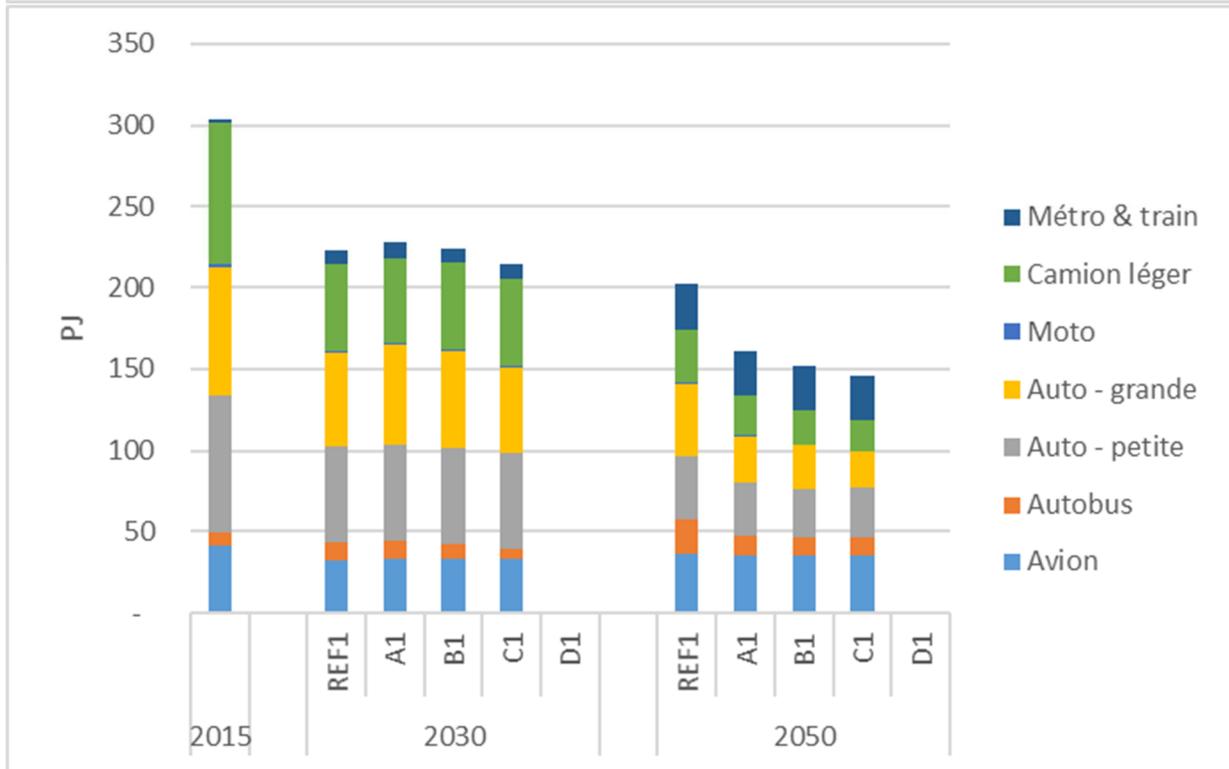
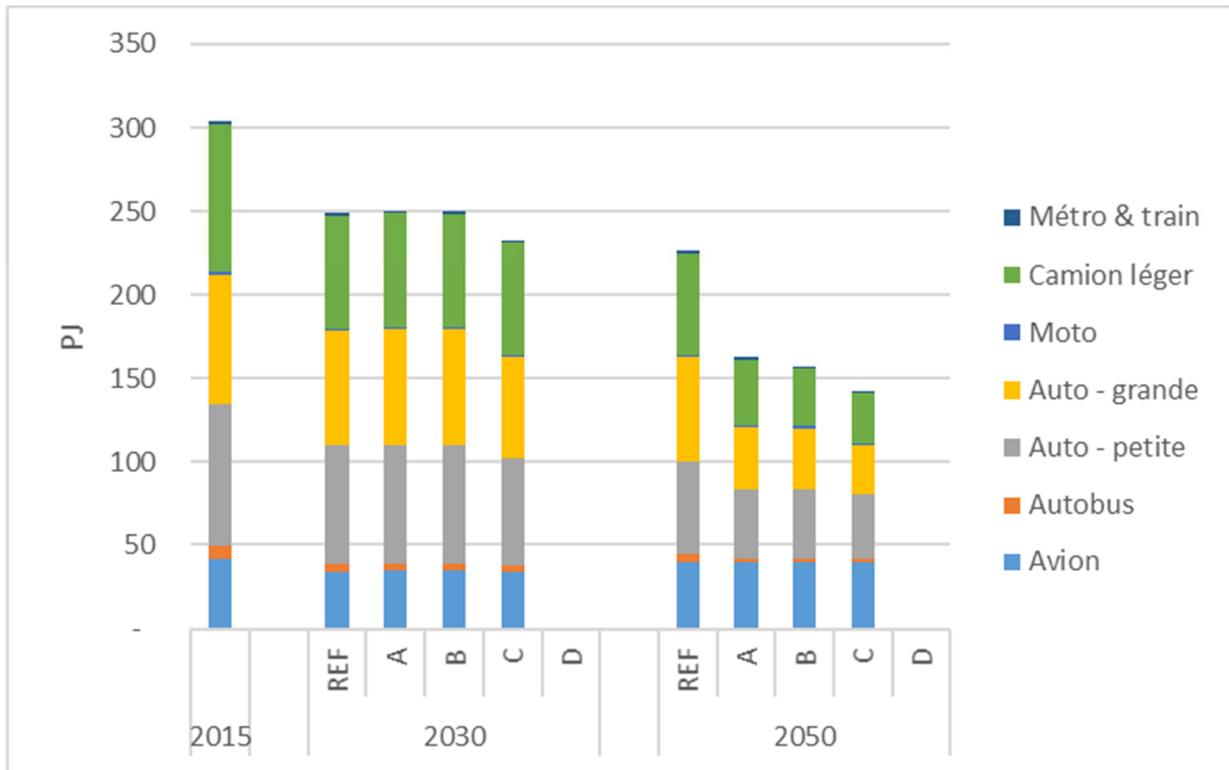


Les graphiques 2-2 et 2-3 présentent la consommation finale pour le transport des passagers, en pétajoules (PJ). On y observe la part beaucoup plus élevée du métro, du train et de l'autobus, au détriment des autres moyens de transport. La demande énergétique totale en transport diminue à l'horizon 2030 et pour le scénario de référence en 2050. Pour les scénarios de réduction à l'horizon 2050, la consommation énergétique totale reste sensiblement la même, car les transports sont déjà largement électrifiés dans les scénarios de réduction de base. Pour les parts de marché des technologies de transport des passagers, on note un léger recul des véhicules électriques et hybrides au profit de moteurs à combustion interne et des biocarburants, tant en 2030 et 2050 (graphiques 2-4 et 2-5) qui découle de la marge de manœuvre accrue provenant du transport collectif, car le modèle abandonne l'électrification de segments de marché plus coûteux. Ces impacts découlent du fait que les cibles et objectifs de réduction demeurent fixes ce qui laisse croire que des réductions additionnelles à celles obtenues par le scénario C sont possibles (sans toutefois que les cibles du scénario D ne soient atteintes)

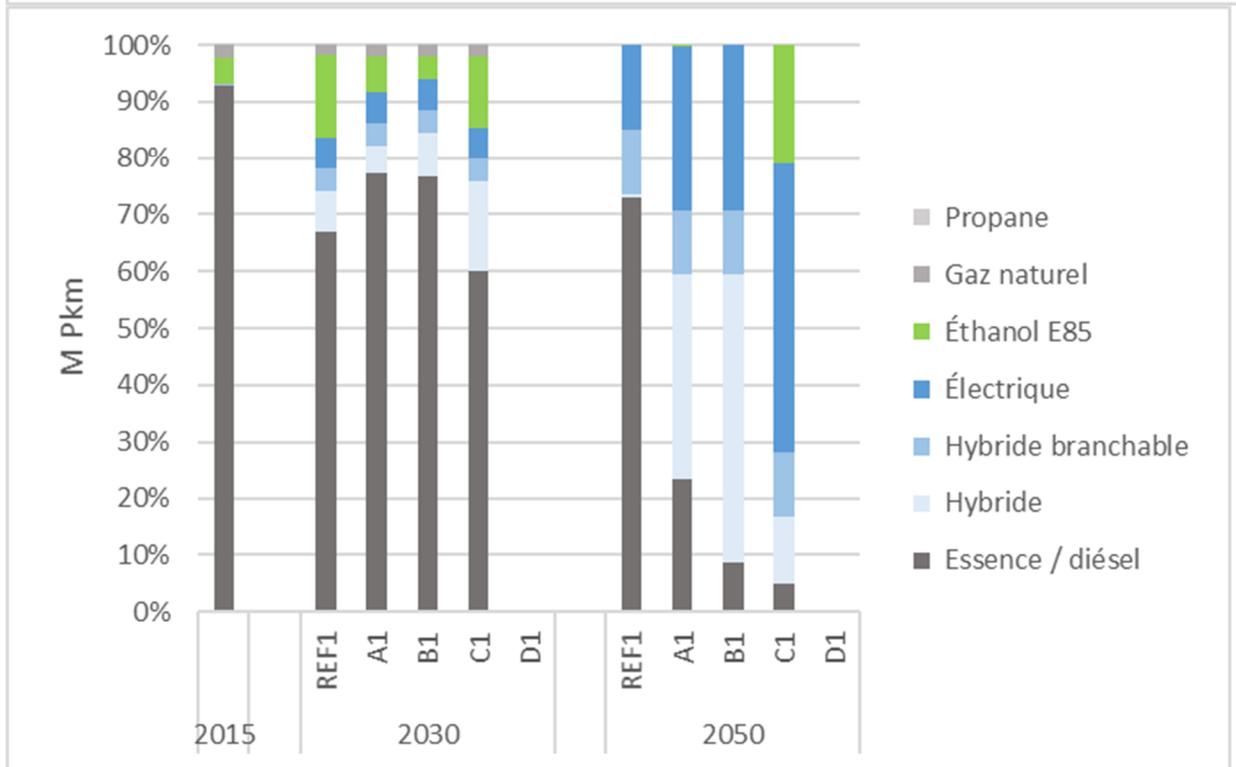
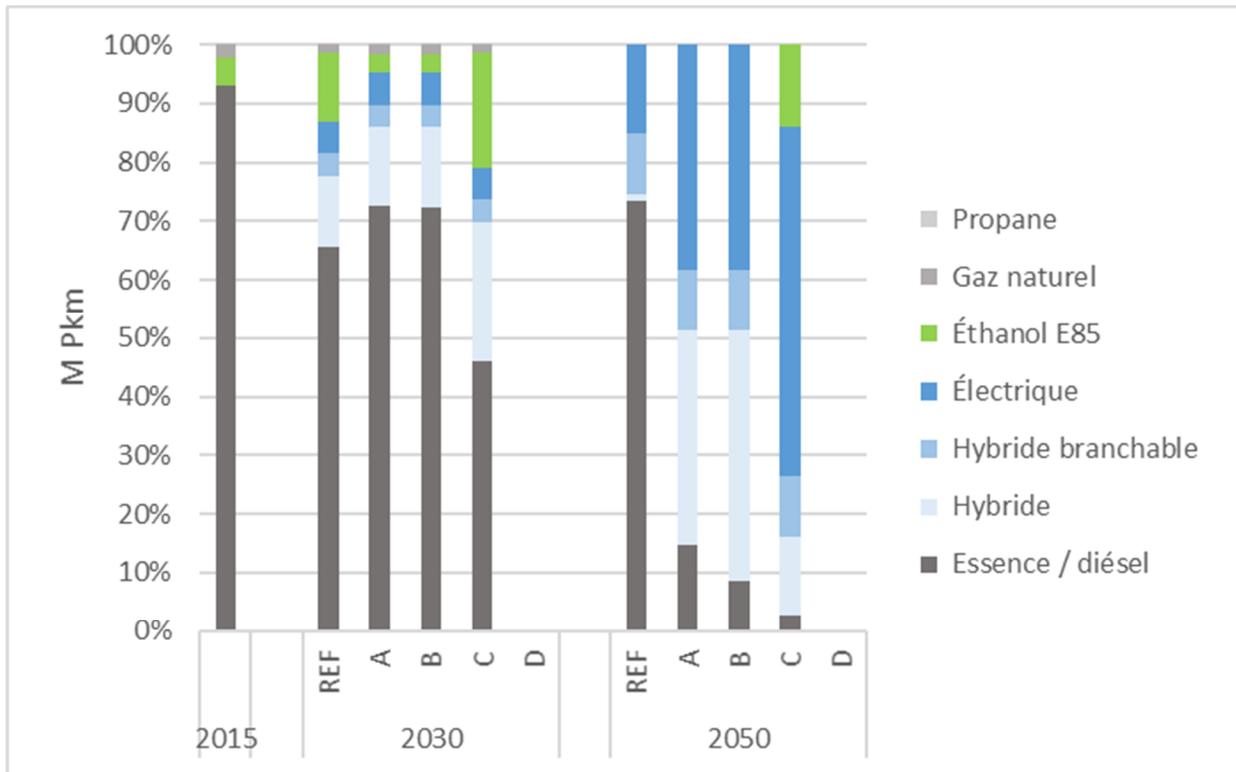
Pour le transport des marchandises (graphiques 2-6 et 2-7), une utilisation accrue du train occasionne une diminution de la demande énergétique pour le transport lourd. La consommation énergétique en transport diminue pour le scénario de référence, surtout en 2050, mais beaucoup moins pour les scénarios de réduction.

Les scénarios A et B génèrent une consommation d'énergie légèrement supérieure au scénario de référence en 2030. La différence est toutefois minime et s'explique par une consommation d'essence pour les petites voitures en 2030 légèrement plus élevée que dans le scénario de référence. Ce résultat est causé par un échange entre des véhicules « flex fuel » (pouvant consommer 85 % d'éthanol, mais aussi 100 % d'essence) et des véhicules conventionnels à l'essence. Cela est peut-être dû aux interactions entre la norme sur les carburants propres et la contrainte sur les émissions GES.

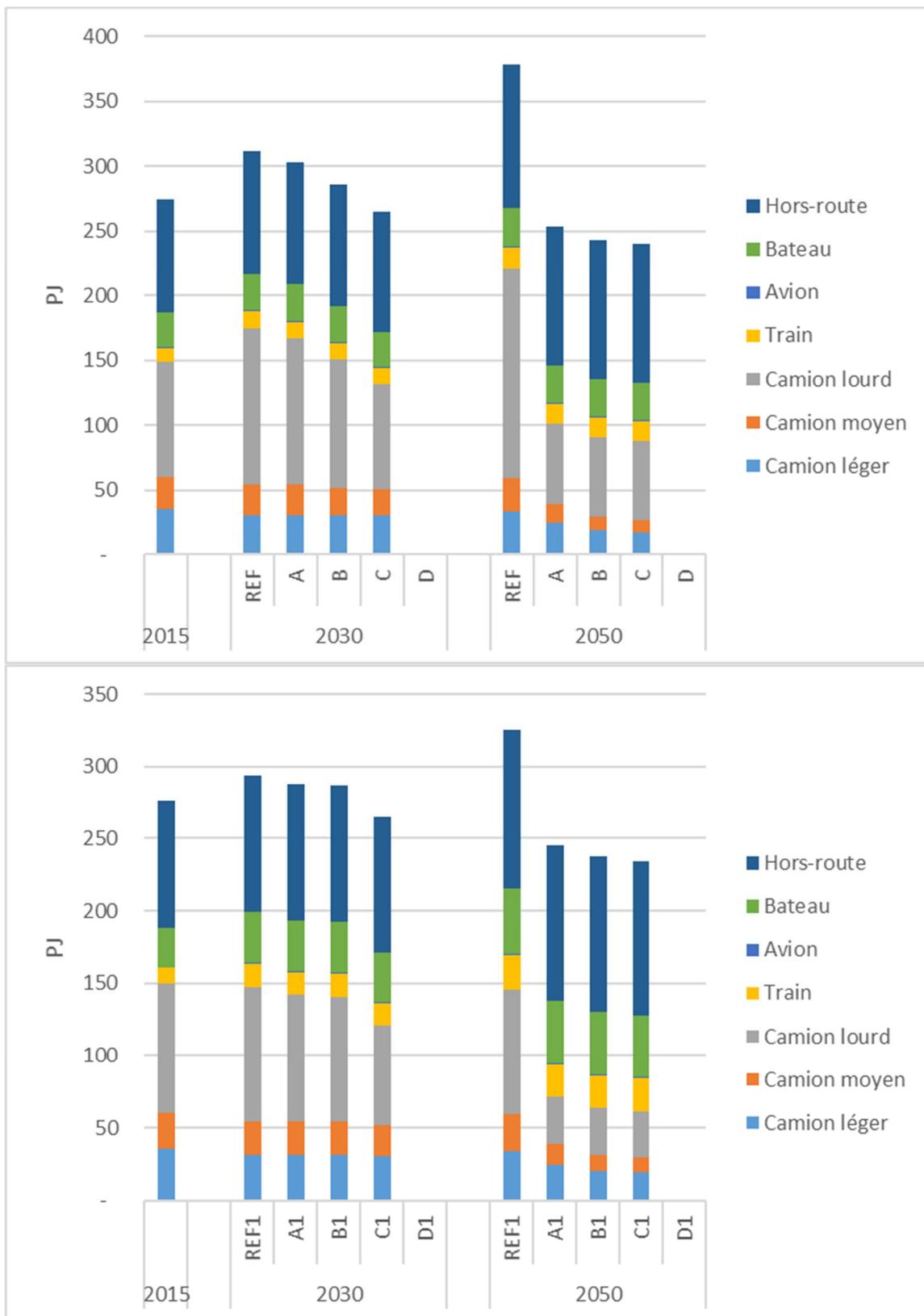
Graphiques 2-2 et 2-3 – Consommation finale pour le transport des passagers, scénario de base (haut) et scénario alternatif 1 (bas)



Graphiques 2-4 et 2-5 – Parts de marché des technologies de transport des passagers, scénario de base (haut) et scénario alternatif 1 (bas)



Graphiques 2-6 et 2-7 – Consommation finale pour le transport des marchandises, scénario de base (haut) et scénario alternatif 1 (bas)



TISSU INDUSTRIEL (SCÉNARIO ALTERNATIF 2)

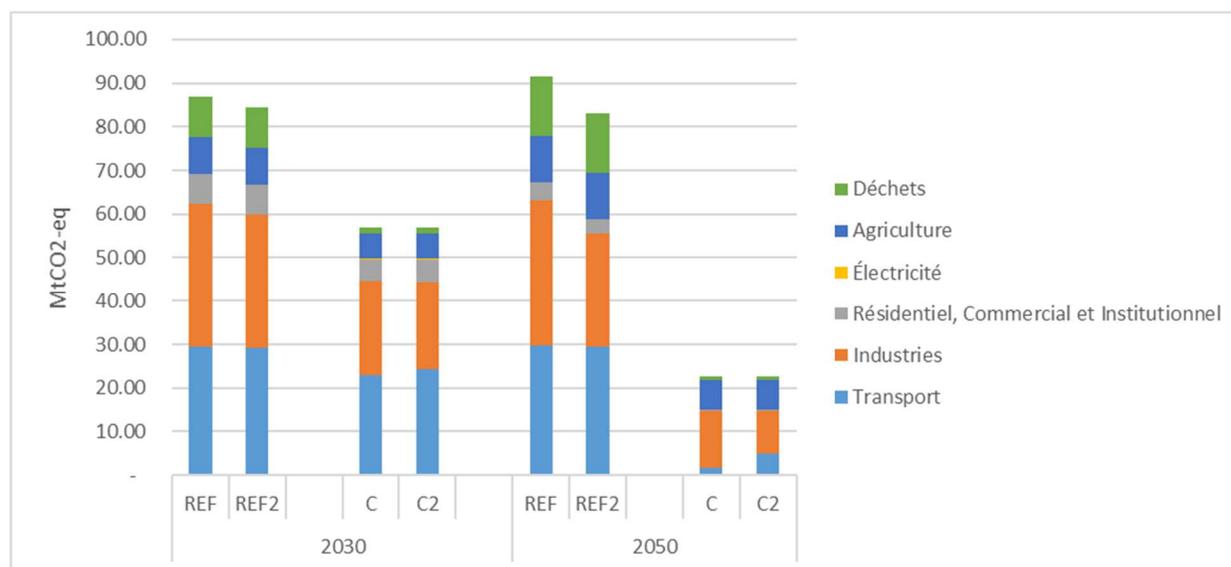
RÉSULTATS-CLÉS

- Les émissions du secteur industriel baissent significativement dans le scénario de référence (-9 % en 2050). Les émissions de procédés industriels sont réduites de près du tiers.
- La diminution des besoins du secteur industriel libère de l'électricité pour le transport et le bâtiment, afin de substituer les produits pétroliers et le gaz naturel.
- Le scénario de réduction C est atteint (-75 % en 2050), mais pas le D (-87,5 % en 2050).

La modification du tissu industriel se traduit par d'importantes diminutions des émissions pour le scénario de référence en 2050, lesquelles passent de 91,4 MtCO₂éq à 83,0 MtCO₂éq, une baisse de 9 % ou 8,4 MtCO₂éq (graphique 2-8). L'essentiel des réductions se produit dans le secteur industriel (7,5 MtCO₂éq), mais la diminution des besoins du secteur industriel libère de l'électricité qui est maintenant davantage utilisée dans le transport et le bâtiment, afin de substituer les produits pétroliers et le gaz naturel.

Pour le scénario de réduction C, on note une hausse marquée des émissions dans le secteur des transports entre C et C2, surtout à l'horizon 2050. Dans le modèle, la baisse des émissions en industrie amène une plus grande flexibilité pour le choix des mesures, ce qui permet de laisser tomber les mesures plus coûteuses en transport tout en respectant la contrainte de réduction de GES du scénario C. Mis à part les secteurs des transports et de l'industrie, les émissions pour les autres secteurs sont essentiellement les mêmes.

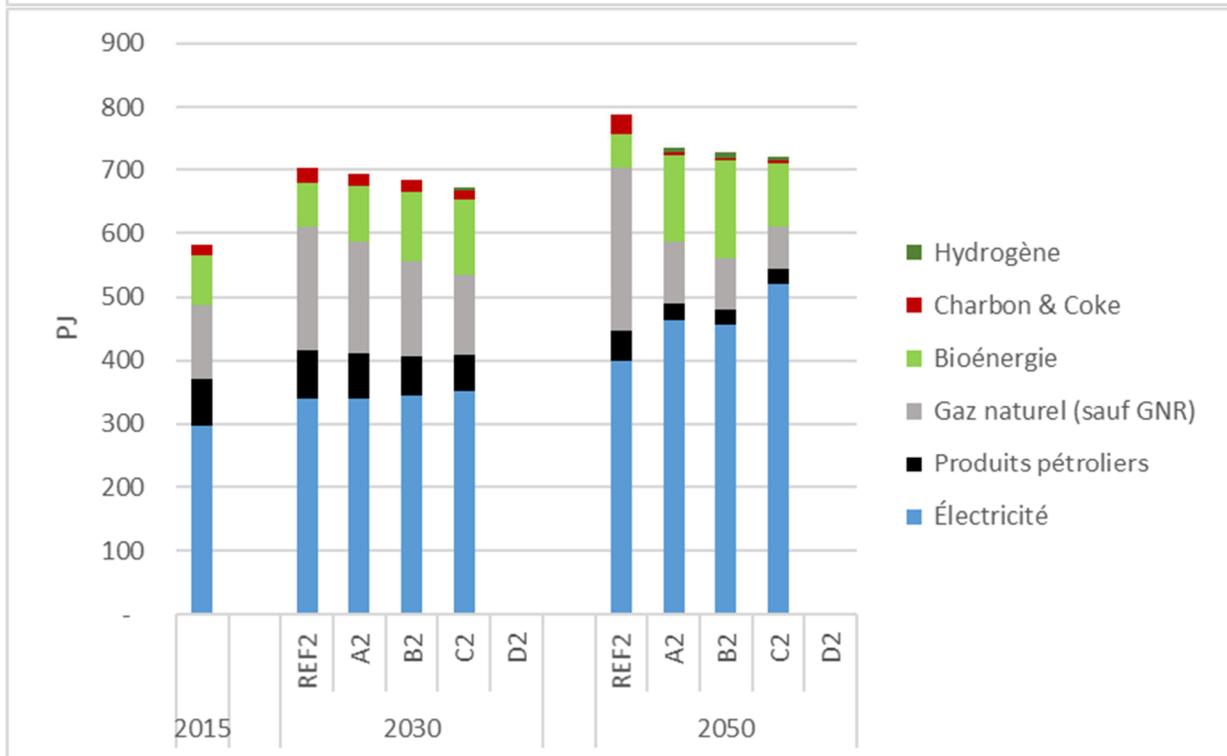
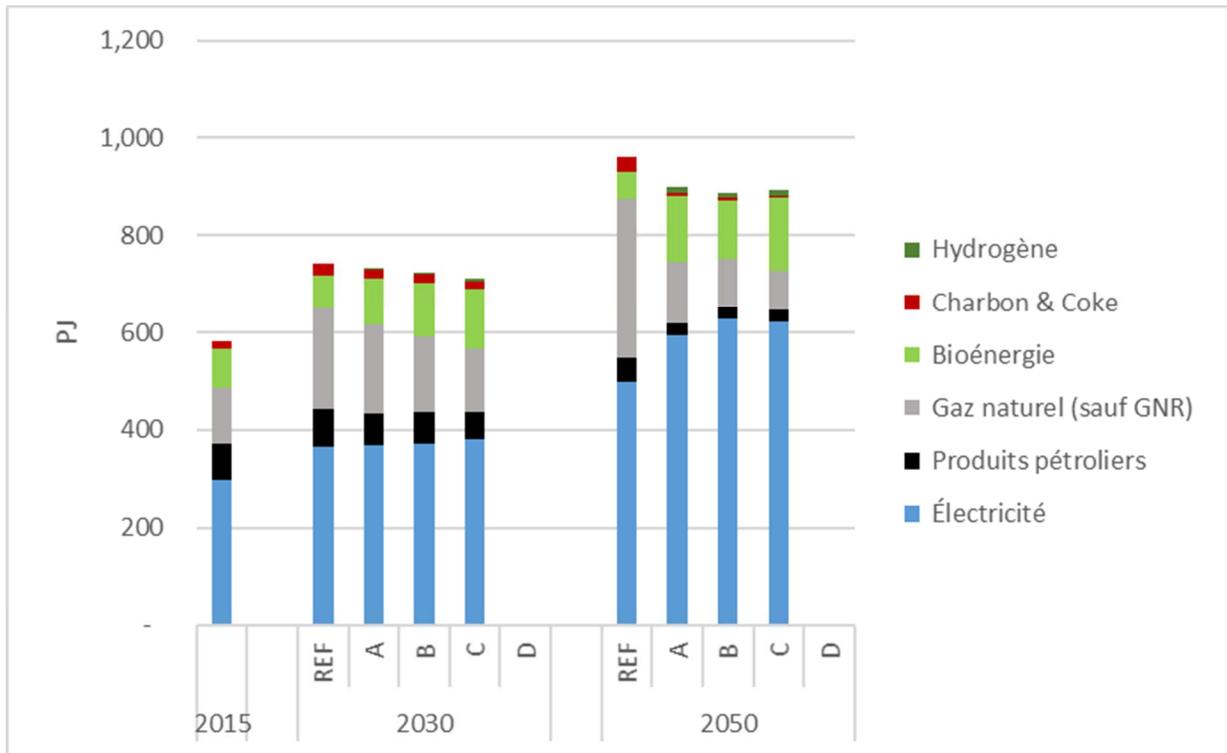
Graphique 2-8 – Émissions comparées du scénario de base et du scénario alternatif 2



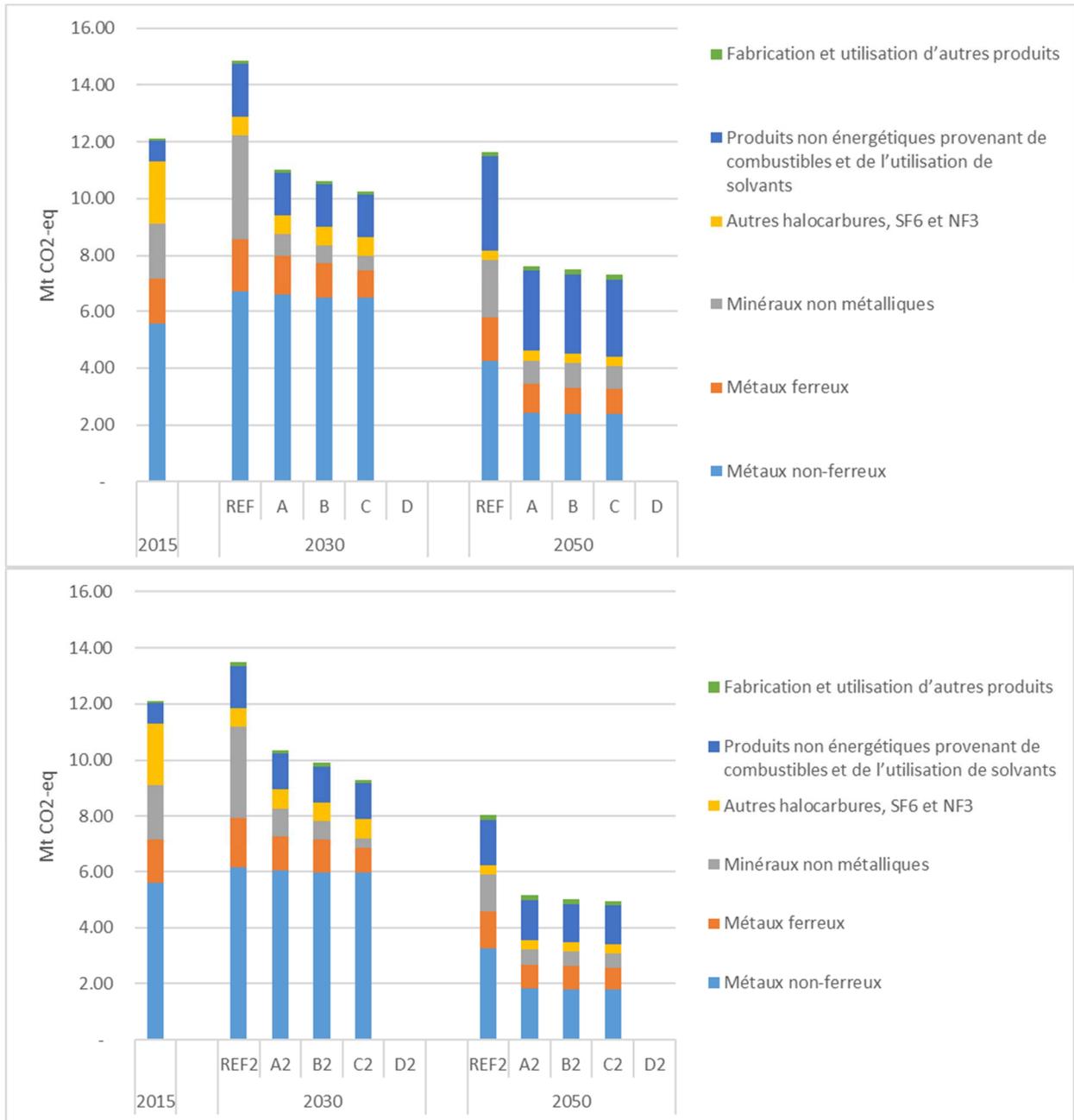
Les besoins en énergie du secteur industriel du scénario alternatif changent peu à l'horizon 2030 par rapport au scénario de base, mais sont grandement diminués en 2050, y compris sous contrainte de réduction de GES (graphiques 2-9 et 2-10). Le mix énergétique fluctue selon le scénario, mais le portrait d'ensemble est similaire, avec une électrification et une utilisation accrue de bioénergie au détriment du gaz naturel de source fossile.

Pour les émissions non énergétiques (graphiques 2-11 et 2-12), les demandes alternatives amènent une réduction marquée, tant pour le scénario de référence que pour les scénarios de réduction alternatifs. Pour le scénario de référence par exemple, les émissions de procédé passent de près de 12 MtCO₂éq en 2050 à seulement 8 MtCO₂éq avec le scénario alternatif.

Graphiques 2-9 et 2-10 – Consommation finale dans les industries, scénario de base (haut) et scénario alternatif 2 (bas)



Graphiques 2-11 et 2-12 – Émissions de procédé, scénario de base (haut) et scénario alternatif 2 (bas)



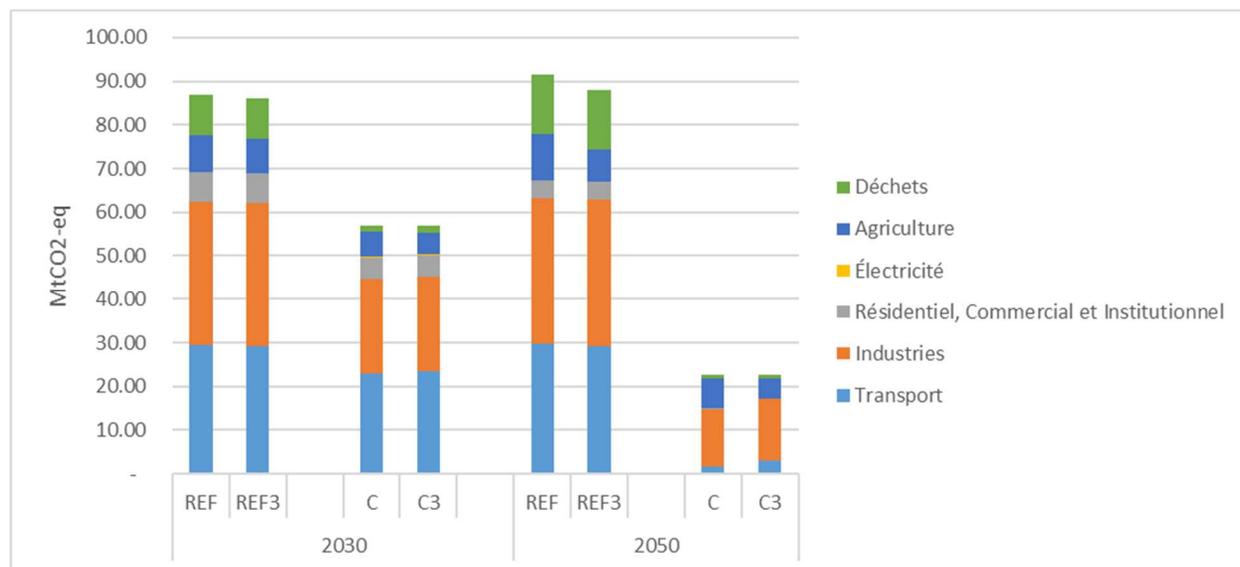
AJUSTEMENT DU SYSTÈME ALIMENTAIRE (SCÉNARIO ALTERNATIF 3)

RÉSULTATS-CLÉS

- La diminution du gaspillage alimentaire et de l'apport de protéines d'origine animale permet de réduire les émissions du secteur agricole de 30 % en 2050 dans le scénario de référence.
- Les réductions d'émissions se présentent surtout dans le sous-secteur de la fermentation entérique, mais des réductions importantes sont observées aussi pour les autres types d'émissions.
- Le scénario de réduction C est atteint (-75 % en 2050), mais pas le D (-87,5 % en 2050).

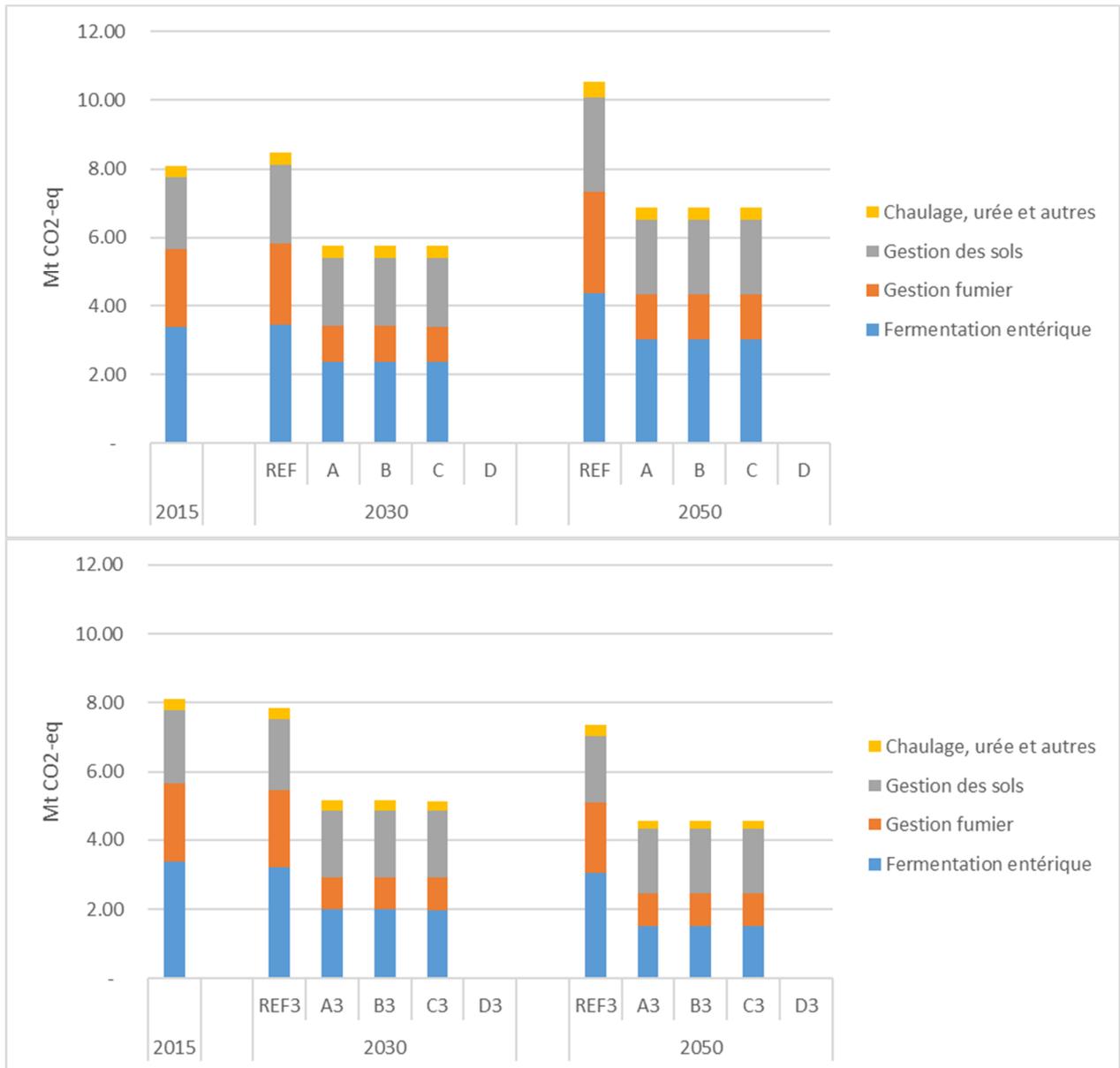
La diminution du gaspillage alimentaire et la diversification des protéines alimentaires permettent une réduction de 30 % des émissions du secteur agricole dans le scénario de référence en 2050, qui se traduit par une baisse des émissions totales de 3,6 MtCO₂éq. Les effets interactifs sur les autres secteurs dans le scénario de référence sont très limités (graphique 2-13). Pour le scénario de réduction C, la réduction des émissions du secteur agricole est de 34 % en 2050, laquelle réduction est compensée par des hausses dans le transport et l'industrie étant donné les contraintes du modèle.

Graphique 2-13 – Émissions comparées du scénario de base et du scénario alternatif 3



Comme le montrent les graphiques 2-14 et 2-15, ce scénario amène un renversement complet de la tendance observée dans le scénario de référence, de hausse constante des émissions d'ici 2050 dans le scénario de base, à une décroissance dans le scénario alternatif. Les réductions d'émissions se présentent surtout pour la fermentation entérique, mais des réductions importantes sont observées aussi pour les autres types d'émissions. Malgré la croissance de la production de grains, fruit et légumes destinés à la consommation humaine, cette hausse est plus que compensée par la baisse de production des grains pour l'alimentation animale.

Graphiques 2-14 et 2-15 – Émissions non énergétiques du secteur agricole, scénario de base (haut) et scénario alternatif 3 (bas)



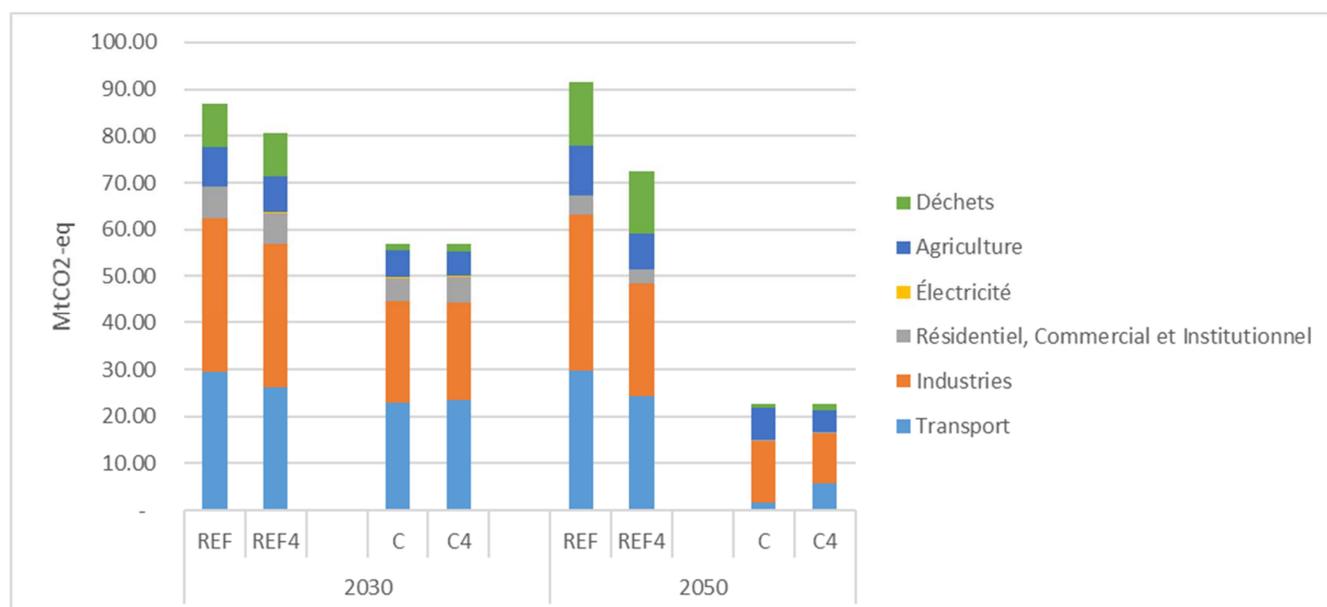
DEMANDES (SCÉNARIO ALTERNATIF 4)

RÉSULTATS-CLÉS

- La combinaison des réductions de demandes (mobilité/urbanisme, tissu industriel et système alimentaire) a un impact majeur sur les émissions du scénario de référence, qui diminuent de plus de 20 % à l'horizon 2050.
- Le scénario de réduction C est atteint (-75 % en 2050), mais pas le D (-87,5 % en 2050). Il a été estimé que ce scénario pouvait atteindre une réduction d'environ 85 % en 2050, soit une baisse qui permettrait d'atteindre l'objectif du Québec en 2050.

Ce scénario alternatif regroupe l'ensemble des modifications de demande des scénarios antérieurs (scénarios 1, 2 et 3). Il présente un impact majeur sur les émissions du scénario de référence, surtout en 2050 (graphique 2-16). Les émissions prévues à cet horizon passent de 91,4 MtCO₂eq à 72,5 MtCO₂eq, soit une diminution de 21 % ou 18,9 MtCO₂eq. Il est intéressant de noter que les diminutions à l'horizon 2050 excèdent légèrement celles de la somme de chacun des scénarios individuels précédents (18,0 MtCO₂eq). Ce phénomène est probablement lié à des effets de substitution, notamment la libération de certaines quantités d'électricité suite aux réductions de demandes et son utilisation accrue dans d'autres secteurs.

Graphique 2-16 – Émissions comparées du scénario de base et du scénario alternatif 4



Pour le scénario de réduction C, le scénario alternatif amène une nette diminution des émissions industrielles et agricoles, qui sont plus difficilement compressibles. Ces baisses sont compensées surtout par une augmentation des émissions en transport et, dans une moindre mesure, des déchets.

Bien que ce scénario ne puisse pas atteindre les cibles et objectifs de réduction du scénario D, une estimation a permis d'établir dans quelle mesure une réduction des demandes permettrait d'atteindre les objectifs du Québec à l'horizon 2050. Plus précisément, nous avons ajouté les réductions additionnelles obtenues dans certains sous-secteurs (essentiellement industrie et agriculture) pour le scénario de

réduction des demandes à celles obtenues avec le scénario C. Ces réductions additionnelles de 5,7 MtCO₂éq permettraient d'atteindre des réductions de 85 % en 2050 par rapport à 1990, soit à l'intérieur de la fourchette de l'objectif du Québec pour 2050 (80 % à 95 %). Ces réductions additionnelles permettent de combler l'essentiel de l'écart entre le scénario C (75 % de réductions) et le scénario D (87,5 %).

RISQUES TECHNOLOGIQUES (SCÉNARIO ALTERNATIF 5)

RÉSULTATS-CLÉS

- Le retrait des technologies plus risquées amène une augmentation des émissions du scénario de référence de 7 % en 2050, et de 18 % pour le secteur industriel uniquement.
- La forte augmentation des émissions dans l'industrie et l'agriculture sont compensées en partie par des réductions dans le transport ainsi qu'une légère diminution des émissions des déchets pour atteindre le niveau de réduction A.
- Seul le scénario de réduction A est atteint (-65 % en 2050). Ce scénario alternatif limite sérieusement les options de réduction.

Le retrait des technologies plus risquées amène une augmentation des émissions du scénario de référence de 18 % pour le secteur industriel en 2050 (graphique 2-17). Il n'y a pas d'impact pour le secteur de l'agriculture dans le scénario de référence, car la 3 -NOP n'est pas retenue par le modèle dans ce scénario. Au total, les émissions du scénario de référence en 2050 augmentent de 7 % ou 6,0 MtCO₂éq.

Pour le scénario de réduction, la forte augmentation des émissions dans l'industrie et l'agriculture sont compensées par des réductions dans le transport ainsi qu'une légère diminution pour les émissions des déchets. Seuls les cibles et objectifs du scénario A sont atteints. Malgré un impact relativement faible sur les émissions du scénario de référence, on observe donc que ce scénario alternatif limite sérieusement les options de réduction.

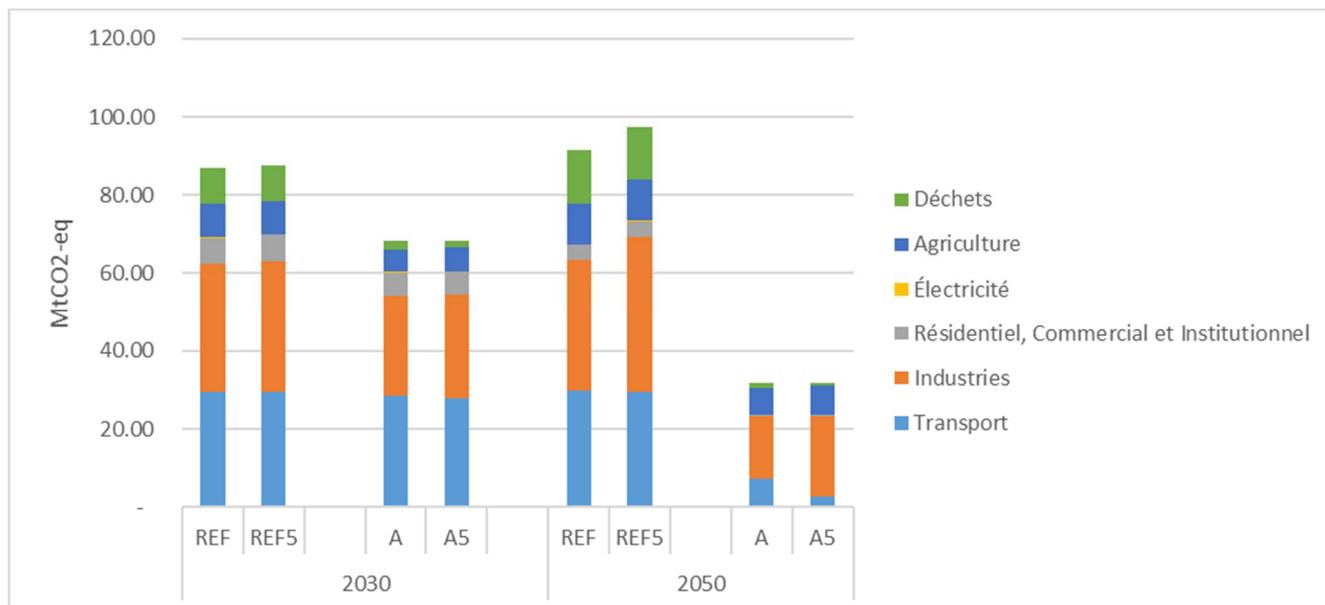
Sur la base des scénarios A et A5 en 2050, le retrait des technologies risquées amène des augmentations d'émissions de GES dans les sous-secteurs suivants (en ordre d'importance) :

- Métaux non ferreux (aluminium), 3,5 MtCO₂éq
- Minéraux non métalliques (ciment et chaux), 2,4 MtCO₂éq⁵³
- Véhicules lourds, 1,1 MtCO₂éq⁵⁴
- Métaux ferreux, 0,7 MtCO₂éq
- Fermentation entérique, 0,5 MtCO₂éq.

⁵³ L'impact sur les émissions de GES inclut également d'autres effets, par exemple l'élasticité-prix de la demande. Dans le cas des minéraux non métalliques, ces effets semblent importants. L'impact du retrait de la technologie est substantiellement moindre que ce que l'écart des émissions des deux scénarios indique.

⁵⁴ L'impact du retrait de cette technologie est grandement mitigé par une utilisation accrue du biodiésel dans ce sous-secteur en 2050.

Graphique 2-17 – Émissions comparées du scénario de base et du scénario alternatif 5



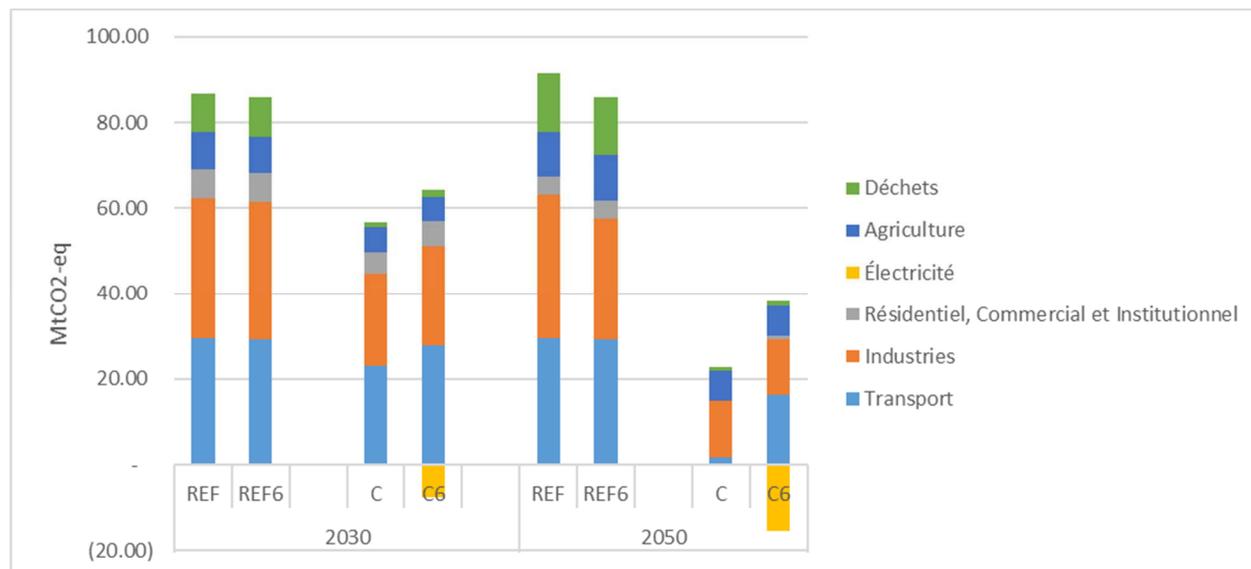
CAPTAGE ET SÉQUESTRATION DU CARBONE (SCÉNARIO ALTERNATIF 6)

RÉSULTATS-CLÉS

- L'usage accru du CSC dans l'industrie diminue les émissions du scénario de référence (-6 % en 2050). Les émissions industrielles diminuent quant à elles de 16 % en 2050.
- La BECSC n'est pas utilisée dans le scénario de référence, mais elle apparaît dans les scénarios de réduction. Elle permet d'abandonner les mesures de réduction les plus coûteuses dans d'autres secteurs (notamment transport).
- Par conséquent, les émissions du secteur des transports sont bien plus élevées dans ce scénario alternatif que dans les scénarios de base à l'horizon 2050.
- Le scénario de réduction D est atteint (-87,5 % en 2050). Ce scénario alternatif est l'un des deux seuls à l'atteindre (à noter que le scénario 4 s'en rapproche beaucoup et qu'il atteint l'objectif du Québec pour 2050).

La levée des contraintes sur le CSC réduit les émissions dans le scénario de référence, surtout à l'horizon 2050, en raison de l'utilisation accrue du CSC en industrie (graphique 2-18). Les émissions industrielles diminuent de 16 % ou 5,6 MtCO₂éq en 2050 (6 % des émissions totales du Québec). Cette réduction affecte peu les émissions des autres secteurs.

Graphique 2-18 – Émissions comparées du scénario de base et du scénario alternatif 6



Il n’y a pas de production d’électricité avec émissions négatives (BECSC) dans le scénario de référence. Cependant, la BECSC apparaît de manière importante dans tous les scénarios de réduction⁵⁵, tant en 2030 qu’en 2050. Ces émissions négatives permettent de laisser tomber les mesures les plus coûteuses dans les autres secteurs, principalement en transport. Les émissions négatives atteignent 15,4 MtCO₂eq en 2050 pour le scénario C6, ce qui procure une marge de manœuvre accrue à l’ensemble des secteurs.

La BECSC apporte également une contribution non négligeable à la production électrique⁵⁶ dans les scénarios de réduction, soit 14,5 TWh à l’horizon 2050 pour le scénario C6 et 16,7 TWh pour le scénario D6 (graphiques 2-19 et 2-20). Le portrait d’ensemble ne change pas toutefois, avec des besoins importants en nouvelle production hydroélectrique, éolienne et solaire à l’horizon 2050.

Notons que le modèle préfère généralement utiliser la bioénergie pour la BECSC plutôt que dans des secteurs où elle serait utilisée directement pour générer de la chaleur à un taux d’efficacité beaucoup plus élevé, par exemple le chauffage de bâtiments, dans la mesure où ces secteurs peuvent facilement être électrifiés. Dans les deux cas, les émissions liées à la production de chaleur sont éliminées (bioénergie ou électrification), mais la BECSC procure en outre des émissions négatives. Les coûts additionnels liés à l’utilisation de la BECSC (utilisation peu efficace de la bioénergie pour générer de l’électricité, captage et séquestration du carbone, équipements de production éolienne, solaire et/ou hydroélectriques additionnels) sont généralement compensés par les émissions négatives dans les scénarios de réduction.

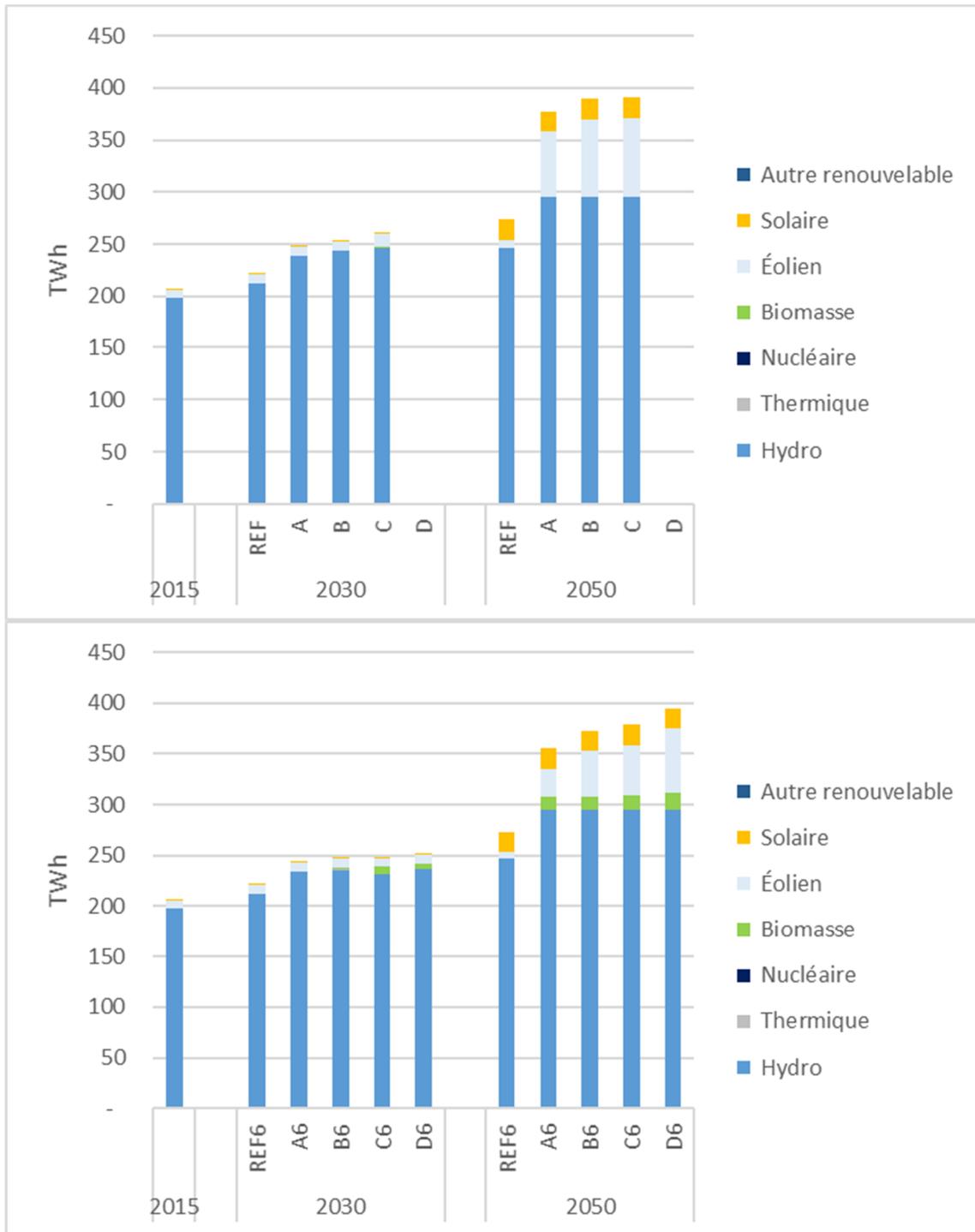
⁵⁵ Seules les émissions négatives de la production d’électricité apparaissent au graphique. La BECSC pour le secteur industriel produit des émissions négatives qui réduisent les émissions totales du secteur, mais qui n’apparaissent pas au niveau agrégé (les émissions positives sont supérieures aux émissions négatives). Notons que le CSC (sans bioénergie) permet également de réduire les émissions de GES, mais ne génère pas d’émissions négatives.

⁵⁶ La très grande majorité du potentiel de pénétration de la BECSC se situe dans le secteur de production d’électricité. Il y a peu de potentiel dans l’industrie, car il est nécessaire de combiner un potentiel d’utilisation de la biomasse et un potentiel de captage des émissions de GES au même endroit. De plus, nous avons limité le recours à la BECSC dans plusieurs segments industriels où sa modélisation est plus difficile, pour différentes raisons. L’industrie du fer et de l’acier ainsi que celle du ciment présentent des potentiels mineurs.

Fait important à noter, ce scénario alternatif est l'un des deux seuls à permettre l'atteinte du scénario de réduction le plus contraignant (D). Par rapport au scénario C6, le scénario D6 amène des réductions d'émissions plus importantes en 2050, surtout en transport (qui demeure tout de même un secteur substantiel à cet horizon, avec l'industrie et l'agriculture), ainsi qu'un recours accru à la BECSC. Les investissements en transport requis pour 2050 semblent se répercuter légèrement sur les émissions du secteur dès 2030, ce qui permet de réduire un peu le recours à la BECSC en 2030 (voir annexe).

Dans ce scénario, qui exploite le CSC et la BECSC sans contrainte exogène, une quantité totale cumulative de 437 MtCO₂éq est séquestrée de 2020 à 2050, ce qui correspond à 49 % du potentiel géologique estimé à 890 MtCO₂éq.

Graphiques 2-19 et 2-20 – Production d'électricité par type de production, scénario de base (haut) et scénario alternatif 6 (bas)



BIOMASSE (SCÉNARIO ALTERNATIF 7)

RÉSULTATS-CLÉS

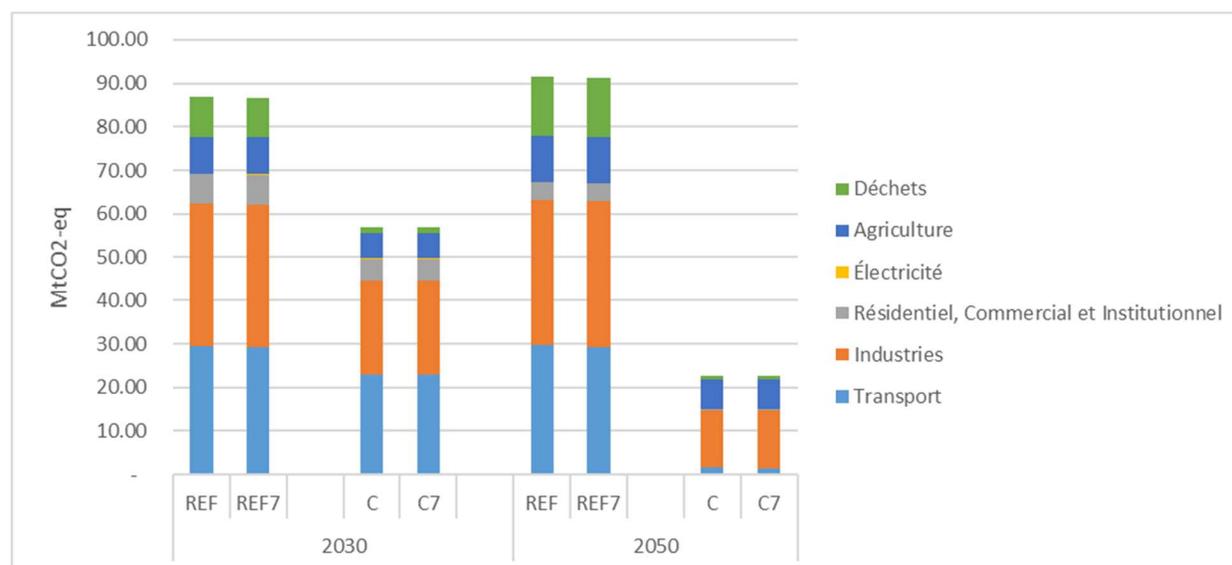
- L'ajout de quantités additionnelles de biomasse n'a qu'un faible impact sur le scénario de référence, la biomasse étant déjà très abondante.
- La biomasse additionnelle est surtout utilisée pour fabriquer des biocarburants, ce qui diminue encore davantage les émissions du transport (tandis que celles du secteur industriel augmentent en contrepartie).
- Le scénario de réduction C est atteint (-75 % en 2050), mais pas le D (-87,5 % en 2050).

L'ajout de biomasse disponible n'a qu'un très faible impact sur le scénario de référence en 2050, dont les émissions passent de 91,4 MtCO₂éq à 91,1 MtCO₂éq, une baisse de 0,3 MtCO₂éq ou 0,3 % (graphique 2-21). La bioénergie étant déjà très abondante, l'ajout de quantités additionnelles avec ce scénario modifie peu le portrait.

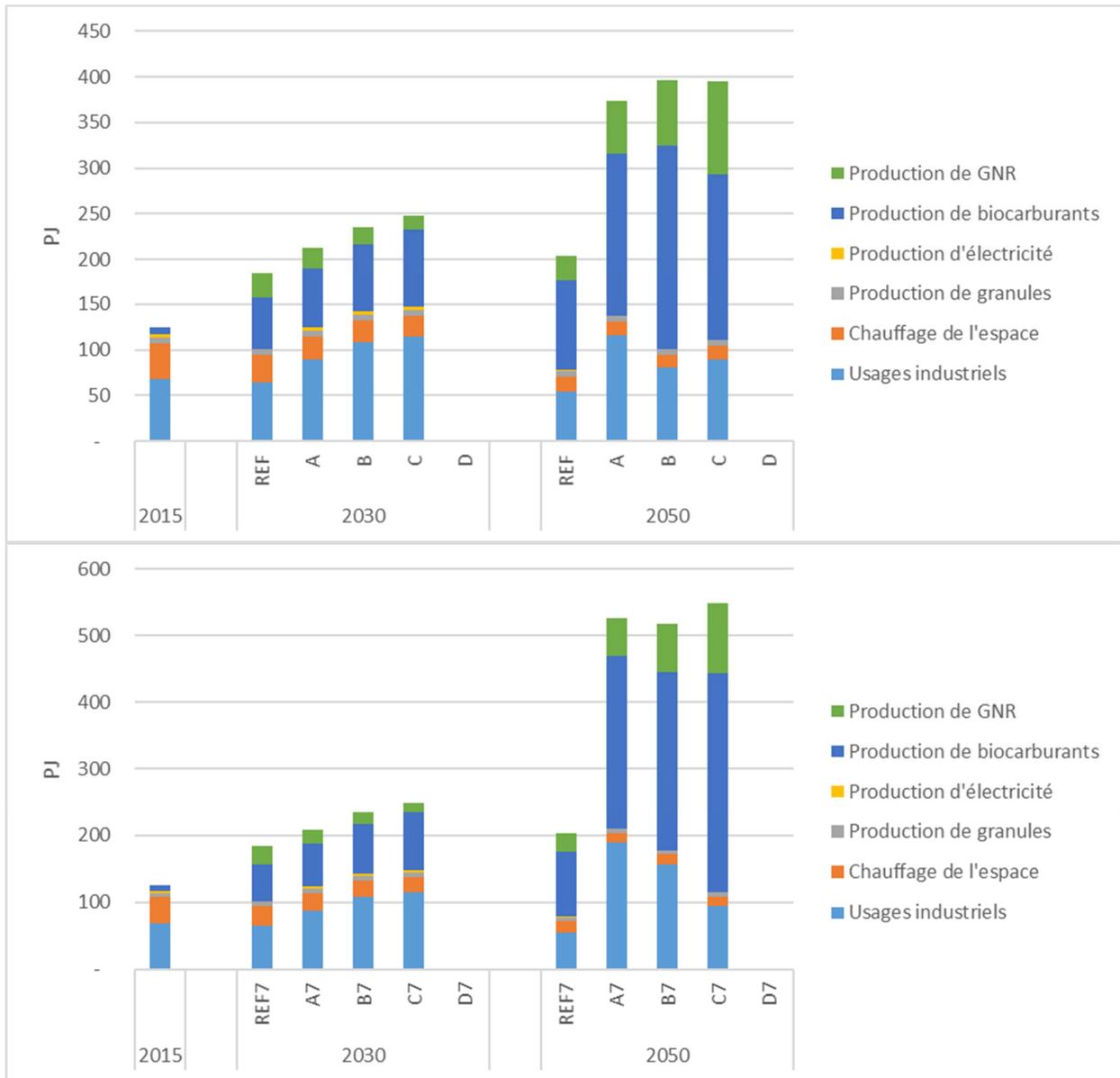
Pour le scénario de réduction C, on note un léger impact entre les secteurs, avec une légère baisse des émissions en transport et une hausse des émissions en industrie. La biomasse additionnelle est surtout utilisée pour fabriquer de l'éthanol cellulosique et autres biocarburants (graphiques 2-22 et 2-23). Les parts de marché de l'éthanol augmentent sensiblement pour le transport de passagers lorsque la biomasse est plus abondante et que les cibles et objectifs de réduction sont plus contraignants (graphiques 2-24 et 2-25, C).

Pour les scénarios moins contraignants (A et B), l'industrie utilise davantage de biomasse à l'horizon 2050 lorsque celle-ci est plus abondante (graphiques 2-22 et 2-23). La biomasse est peu ou pas utilisée en transport, et l'électricité est également moins sollicitée pour A7.

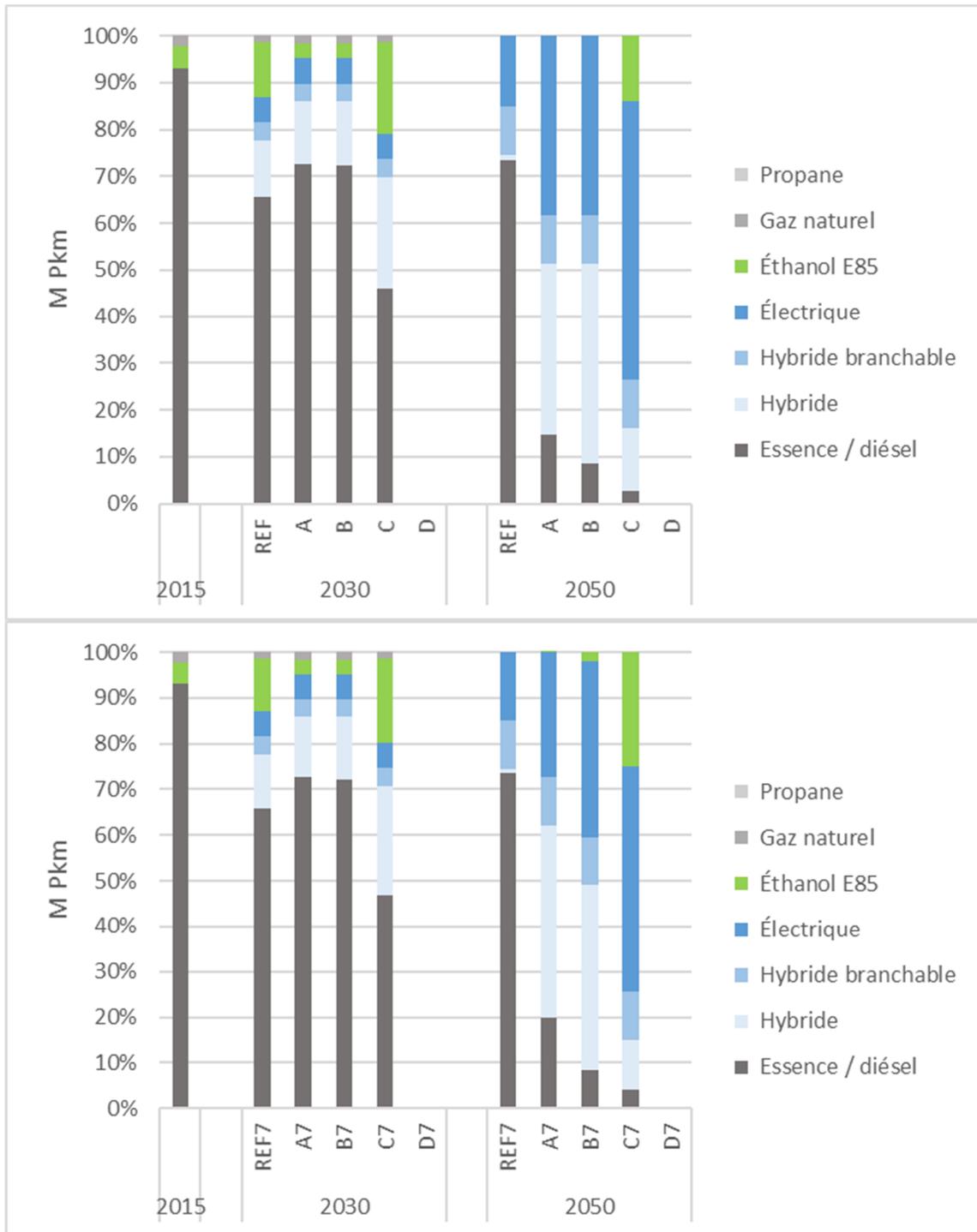
Graphique 2-21 – Émissions comparées du scénario de base et du scénario alternatif 7



Graphiques 2-22 et 2-23 – Utilisation primaire de bioénergie par type, scénario de base (haut) et scénario alternatif 7 (bas)



Graphiques 2-24 et 2-25 – Parts de marché des technologies de transport des passagers, scénario de base (haut) et scénario alternatif 7 (bas)



COMBINAISON DES SCÉNARIOS FAVORABLES (SCÉNARIO ALTERNATIF 8)

RÉSULTATS-CLÉS

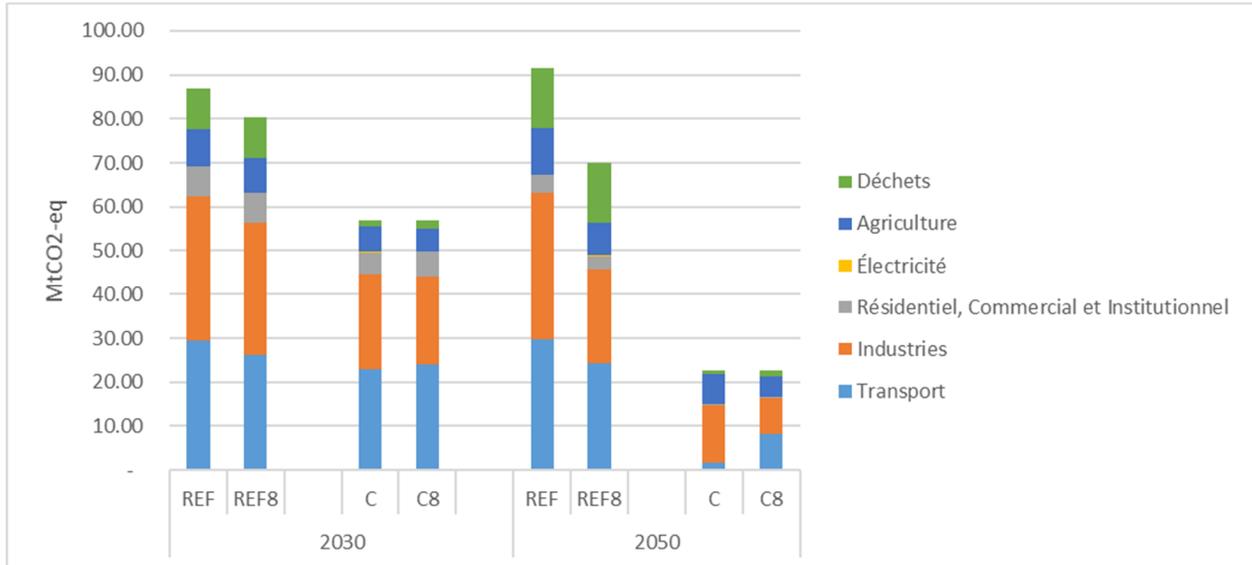
- La combinaison des scénarios favorables (réductions de demandes en transport, bâtiments, industrie et agriculture, levée de la contrainte sur le CSC et plus grande quantité de biomasse disponible) amène une diminution importante des émissions du scénario de référence (-24 % en 2050).
- La combinaison des facteurs favorables a également un impact déterminant sur les besoins en électricité (-21 % en 2050), notamment d'origine éolienne.
- Le scénario de réduction D est atteint (-87,5 % en 2050). Ce scénario alternatif est l'un des deux seuls à l'atteindre (à noter que le scénario 4 s'y rapproche beaucoup et qu'il atteint l'objectif du Québec pour 2050). Ce scénario permet l'atteinte des cibles et objectifs les plus ambitieux sans avoir recours à la BECSC, ce qui exige toutefois de réduire au maximum les émissions de tous les secteurs.

La combinaison des scénarios favorables (réductions de demandes en transport, bâtiments, industrie et agriculture, levée de la contrainte sur le CSC et plus grande quantité de biomasse disponible) amène une diminution importante des émissions du scénario de référence pour tous les secteurs sauf la production d'électricité et les déchets. Les émissions totales du scénario de référence en 2050 passent de 91,4 MtCO₂éq à 69,9 MtCO₂éq, soit une baisse de 21,5 MtCO₂éq ou 24 % (graphique 2-26).

L'ensemble de ces impacts permet l'atteinte des cibles et objectifs les plus ambitieux (scénario D) à l'horizon 2050 sans avoir recours à la BECSC, ce qui exige toutefois de réduire au maximum les émissions de tous les secteurs. À l'horizon 2050, seules l'industrie et l'agriculture émettent encore des quantités non négligeables de GES (voir annexe). La solution du modèle en 2030 est sensiblement la même pour C et D, car la contrainte de réduction de ces scénarios est identique à cet horizon.

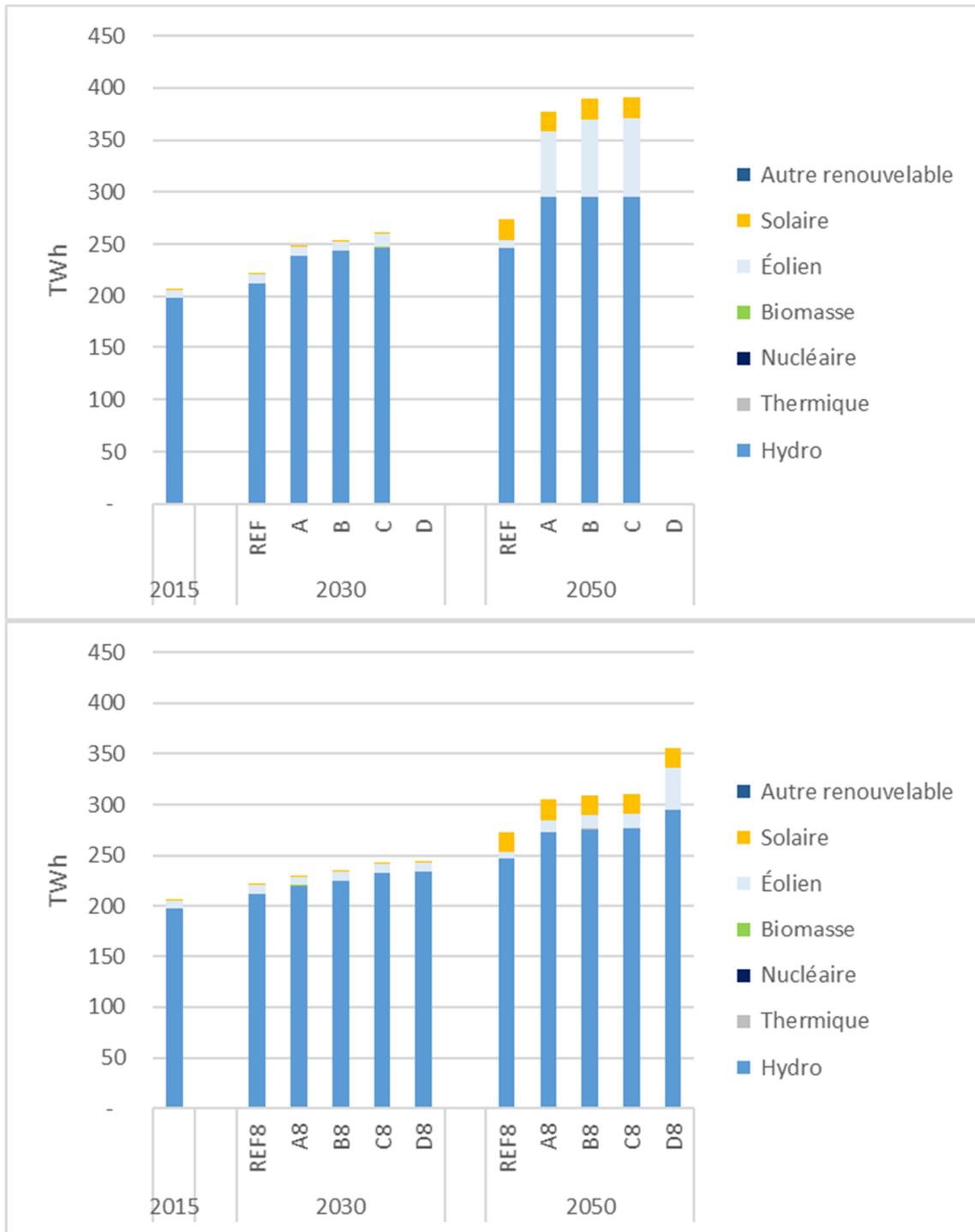
Pour le scénario C, des diminutions importantes d'émissions pour l'industrie et le secteur agricole en 2050 sont compensées par des hausses principalement dans le secteur des transports, ainsi que dans celui des déchets.

Graphique 2-26 – Émissions comparées du scénario de base et du scénario alternatif 8



La combinaison des facteurs favorables a également un impact déterminant sur les besoins en électricité, surtout à l’horizon 2050. Alors que le scénario C exige 391 TWh, le scénario alternatif C8 ne nécessite que 310 TWh, soit 21 % de moins, la diminution venant pour l’essentiel de la production éolienne (graphiques 2-27 et 2-28).

Graphiques 2-27 et 2-28 – Production d'électricité par type de production, scénario de base (haut) et scénario alternatif 8 (bas)



ANALYSE ÉCONOMIQUE

Cette section présente les coûts marginaux du scénario de base et des scénarios alternatifs. Nous avons constaté dans la section précédente que la solution change peu les GES émis pour les scénarios de réduction de la plupart des scénarios alternatifs. En effet, les émissions sectorielles connaissent des variations dans certains cas, mais les émissions totales demeurent au même niveau pour respecter la contrainte imposée de réduction de GES. On peut toutefois mieux observer l'impact de chaque scénario alternatif sur l'atteinte des cibles et objectifs en analysant les variations des coûts marginaux.

Il importe de souligner qu'il est difficile de comparer directement les coûts marginaux de deux scénarios qui n'ont pas la même base de référence. Dans ce cas, il faut surtout noter l'ordre de grandeur des coûts marginaux. Les coûts marginaux en 2030 du scénario de base et du scénario alternatif 3 (système alimentaire) sont, dans ce contexte, essentiellement au même niveau. De même, les coûts marginaux en 2050 du scénario de base et du scénario alternatif 1 (mobilité/urbanisme) sont également similaires.

Notons également que nous avons retenu le scénario de réduction C pour cette comparaison. Comme le scénario alternatif 5 (Risque technologique) n'atteint pas ces réductions, il ne peut être comparé dans cette analyse.

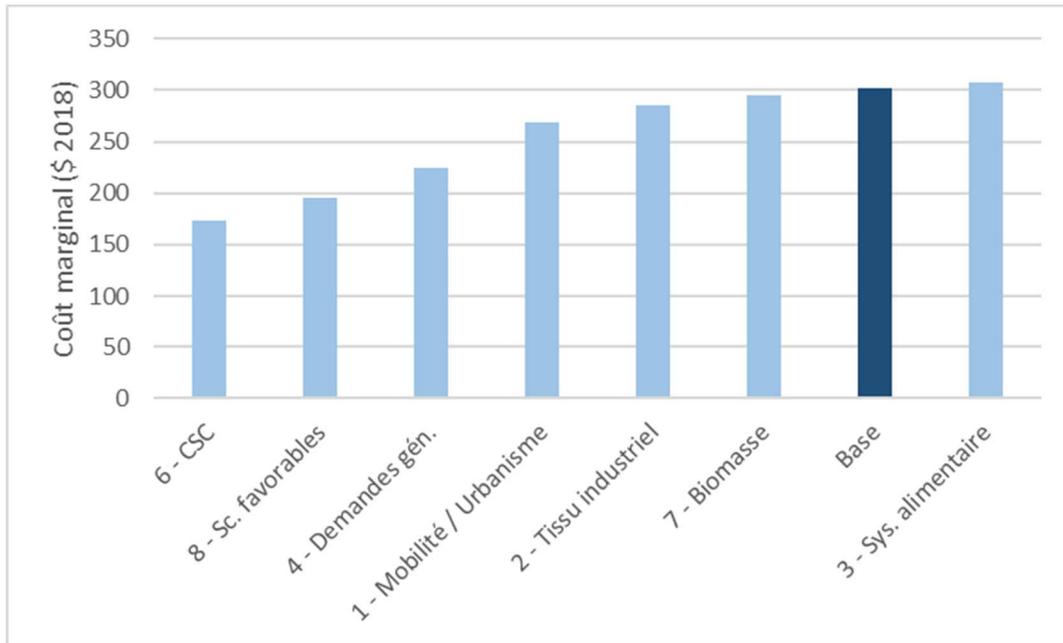
Comme les courbes de coûts marginaux n'ont pas été établies pour les scénarios alternatifs⁵⁷, il n'est pas possible d'établir les coûts moyens et totaux de ces scénarios.

À l'horizon 2030, les coûts marginaux pour le scénario C varient, selon le scénario alternatif retenu, de 173 \$ pour le scénario 6 (CSC) à 308 \$ pour le scénario 3 (Ajustement du système alimentaire), contre un coût marginal de 302 \$ pour le scénario de base (graphique 2-29).

Une diminution du coût marginal ne signifie pas uniquement une baisse des coûts engendrés pour réduire les GES, mais également une marge de manœuvre accrue pour les réduire davantage. Les scénarios 6 et 8, qui présentent les coûts marginaux les plus bas, sont également les seuls à pouvoir atteindre les cibles et objectifs du scénario D (à noter que le scénario 4 s'y rapproche beaucoup et qu'il atteint l'objectif du Québec pour 2050).

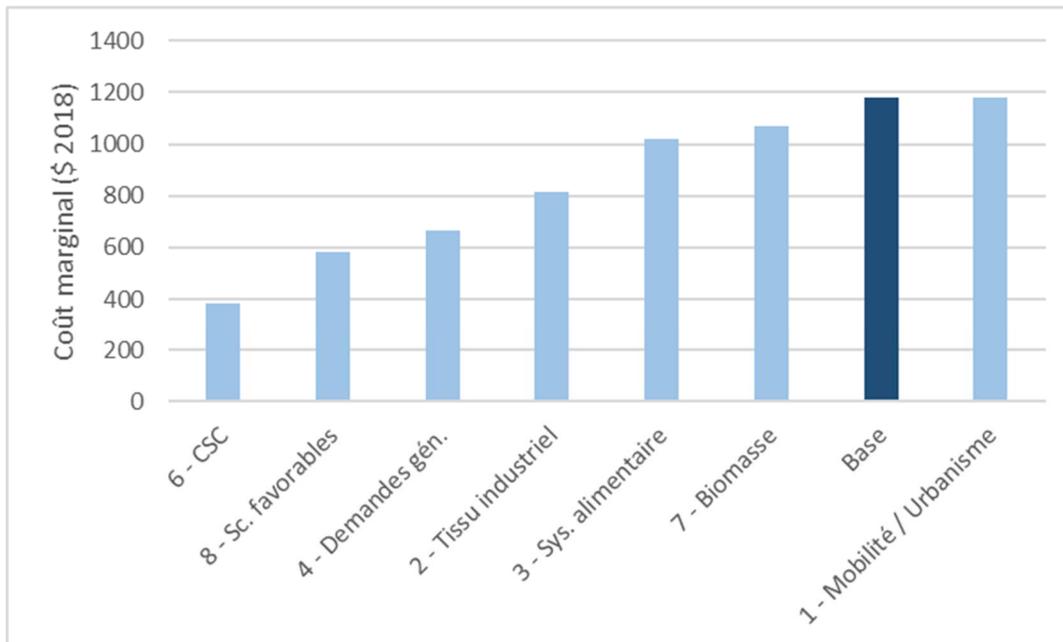
⁵⁷ De multiples exécutions du modèle NATEM à différents niveaux de taxes de carbone ont été nécessaires pour construire les courbes de coûts marginaux présentées dans la première partie de ce rapport. De tels travaux ne faisaient pas partie du cadre du projet pour les scénarios alternatifs.

Graphique 2-29 – Coûts marginaux pour le scénario de réduction C à l’horizon 2030



À l’horizon 2050, les coûts marginaux sont beaucoup plus élevés, variant entre 385 \$/tCO₂éq et 1 179 \$/tCO₂éq. L’écart de coût marginal entre le scénario le plus favorable (6 – Captage et séquestration du carbone) et le scénario de base s’accroît également. À long terme, le coût marginal semble devenir beaucoup plus sensible à des modifications de paramètres comme les demandes projetées ou les technologies disponibles (graphique 2-30).

Graphique 2-30 – Coûts marginaux pour le scénario de réduction C à l’horizon 2050



Dans la majorité des cas, les scénarios dont le coût marginal est peu élevé en 2030 ont également un coût peu élevé en 2050. Il y a toutefois quelques exceptions.

Le scénario 1, par exemple, présente à l'horizon 2030 un coût marginal sensiblement plus faible que le scénario de base. À l'horizon 2050, cependant, le coût marginal de ce scénario est essentiellement le même que le scénario de base. Ce scénario procure donc des économies importantes à court terme, mais son coût marginal rejoint celui du scénario de base à plus long terme, car d'un point de vue de réduction de GES (et uniquement de ce point de vue), la densification des quartiers et les transferts modaux amènent peu de réductions par rapport à des transports et bâtiments largement électrifiés⁵⁸. Il importe de souligner que les transferts modaux et la densification urbaine demeurent pertinents à long terme, notamment pour réduire les besoins additionnels en production d'électricité ainsi que pour les autres bénéfices qu'ils peuvent apporter (réduction du temps de déplacement et de la congestion, qualité de vie, etc.).

Le scénario 3, inversement, montre un coût marginal équivalant à celui du scénario de base en 2030, mais sensiblement inférieur en 2050. Les réductions de GES dues à la réduction des niveaux de production pour le secteur agricole semblent avoir relativement peu d'effets en 2030, comparativement à l'ensemble des émissions, mais sont critiques en 2050 lorsque les objectifs deviennent beaucoup plus difficiles à atteindre.

Le tableau 2-1 présente l'ensemble des coûts marginaux selon les différents scénarios et les périodes, notamment les scénarios de réduction autres que A, ainsi que les périodes de temps autres que 2030 et 2050.

À quelques exceptions près, on note une augmentation du coût marginal à mesure que l'on se rapproche de 2050. Les scénarios plus favorables (réductions de demandes, ajouts de technologies ou de ressources) présentent également des coûts marginaux moins élevés que le scénario de base. À l'inverse, le scénario 5 (Risques) atteint des niveaux de coûts marginaux beaucoup plus élevés que le scénario de base, de 2030 à 2050.

Le profil du scénario 6 (CSC) pour le scénario de réduction C est particulier. Le coût marginal est assez élevé, dès 2025, probablement en raison des investissements importants requis pour cette technologie. Il demeure cependant relativement stable jusqu'en 2050 et devient même le scénario offrant le coût marginal le plus bas⁵⁹ (dès 2030 pour le scénario de réduction C).

Ces données aident à mieux comprendre les impacts des différents scénarios sur les coûts de réduction de GES, mais également le profil d'évolution de ces coûts dans le temps qui varie sensiblement d'un scénario à un autre.

⁵⁸ Toujours en considérant seulement les émissions capturées par l'Inventaire GES du Québec. Une analyse de cycle de vie des projets pourrait donner des résultats différents (voir la section Précisions méthodologiques pour les limites).

⁵⁹ Le scénario 8, qui inclut en partie le CSC, a un coût marginal plus bas en 2035.

Tableau 2-1 – Coûts marginaux des mesures de réduction de GES, ensemble des scénarios

	2025	2030	2035	2040	2050
Base	57	94	203	338	675
1 - Transferts modaux et urbanisme	10	85	138	291	676
2 - Production industrielle	33	88	159	324	563
3 - Production agricole	37	90	192	330	621
A 4 - Demandes alternatives (1 à 3)	6	65	87	234	430
5 - Risques	32	153	273	529	2,177
6 - CSC et BECSC	39	94	151	215	265
7- Biomasse	39	96	219	338	641
8 - Combinaison (4, 6 partie, 7)	6	64	87	201	321

	2025	2030	2035	2040	2050
Base	131	154	247	353	889
1 - Transferts modaux et urbanisme	54	102	205	341	755
2 - Production industrielle	79	119	228	339	657
3 - Production agricole	80	128	237	342	705
B 4 - Demandes alternatives (1 à 3)	37	90	154	307	559
5 - Risques	-	-	-	-	-
6 - CSC et BECSC	80	138	180	254	284
7- Biomasse	81	153	249	357	770
8 - Combinaison (4, 6 partie, 7)	31	86	140	278	440

	2025	2030	2035	2040	2050
Base	119	302	311	404	1,179
1 - Transferts modaux et urbanisme	80	269	275	356	1,179
2 - Production industrielle	80	286	266	361	816
3 - Production agricole	80	308	290	369	1,018
C 4 - Demandes alternatives (1 à 3)	82	225	239	333	668
5 - Risques	-	-	-	-	-
6 - CSC et BECSC	259	173	223	278	385
7- Biomasse	76	294	320	451	1,069
8 - Combinaison (4, 6 partie, 7)	82	196	212	321	580

	2025	2030	2035	2040	2050
Base	-	-	-	-	-
1 - Transferts modaux et urbanisme	-	-	-	-	-
2 - Production industrielle	-	-	-	-	-
3 - Production agricole	-	-	-	-	-
D 4 - Demandes alternatives (1 à 3)	-	-	-	-	-
5 - Risques	-	-	-	-	-
6 - CSC et BECSC	239	173	221	305	696
7- Biomasse	-	-	-	-	-
8 - Combinaison (4, 6 partie, 7)	76	167	241	376	3,174

PRIORISATION DES MESURES ET IMPACTS POUR LE QUÉBEC

PRIORISATION DES MESURES

La présente section présente une priorisation des mesures de réduction des GES, sur la base des résultats obtenus jusqu'à maintenant. Nous distinguons trois périodes de mise en œuvre, soit le court terme (d'ici un à cinq ans), le moyen terme (vers 2030) et le long terme (vers 2040).

Cette priorisation repose 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 il est crucial de choisir dès maintenant les meilleures options afin de viser l'atteinte des 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 à 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 accompagnés de campagnes de sensibilisation et d'éducation du public.
- **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 3-1 présente les options à prioriser pour l'ensemble des secteurs (et certains sous-secteurs) à court terme, moyen terme et long terme.⁶⁰

⁶⁰ 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,

Tableau 3-1 – 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.

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 (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). Nos analyses font état d'une centaine de pétajoules (PJ) de GNR annuellement en 2050 dans le scénario de réduction C. Toujours selon les résultats de modélisation, le GNR devrait provenir principalement de captage aux sites d'enfouissement à court terme, puis de procédés de biométhanisation/gazéification à plus long terme.

	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			
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
BECS	<ul style="list-style-type: none"> Projet pilote de BECS 	<ul style="list-style-type: none"> Développer la BECS selon le niveau d'acceptabilité sociale et les besoins en réductions de GES supplémentaires 	<ul style="list-style-type: none"> Développer la BECS selon le niveau d'acceptabilité sociale et les besoins en réductions de GES supplémentaires

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 BECS (production d'électricité avec bioénergie et captage du carbone) devrait être développée afin de s'ajouter au panier de mesures potentielles.

	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.

IMPACTS SUR L'EMPLOI ET L'ÉCONOMIE

Le principal impact positif pour l'économie québécoise est l'amélioration de la balance commerciale énergétique, avec une forte diminution de la dépendance au pétrole et au gaz naturel. En 2030, la balance commerciale interprovinciale et internationale du Québec pour l'énergie s'améliorera de près de 2 milliards de dollars par an par rapport à 2020 grâce à une réduction substantielle des importations de pétrole brut et, dans une moindre mesure, de gaz naturel. D'ici 2050, ce gain se porte à près de 5 milliards de dollars. Le Québec devient exportateur net d'énergie à l'échelle canadienne.

Outre l'impact sur la balance commerciale, 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. L'efficacité énergétique permettrait à elle seule de créer 25 000 emplois et de faire croître le PIB du Québec de 4 milliards de dollars en moyenne annuellement à l'horizon 2030⁶¹.

L'atteinte de cibles et objectifs de réduction ambitieux mènera également en toute probabilité au développement de nouvelles technologies commercialisables, voire exportables, et à un avantage concurrentiel au Québec. Le développement récent d'anodes permettant la production d'aluminium sans émission de CO₂ de procédé en est un bon exemple. La demande pour ces technologies est en forte croissance à l'échelle mondiale. 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 mondiale⁶².

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.

Finalement, la réduction des émissions au Québec réduit d'autant le risque financier lié à l'achat de crédits de carbone, dont le prix futur est très incertain.

En contrepartie, le transfert d'activité économique de secteurs à fort niveau d'émission vers les secteurs à plus faibles émissions implique une restructuration de l'économie et de certaines communautés, ainsi que des besoins accrus en formation de la main-d'œuvre et de soutien envers les plus vulnérables. L'industrie pétrolière, notamment, sera particulièrement touchée par l'électrification de l'économie. Le gaz naturel sera également touché, mais dans une moindre mesure, car une bonne partie de la consommation pourra se faire avec du GNR. Les résultats de la modélisation laissent croire toutefois que le GNR sera surtout réservé aux usages industriels et au transport, délaissant l'utilisation du gaz naturel pour le résidentiel, le commercial et l'institutionnel.

⁶¹ 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*.

⁶² 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 %.

La mise en place des mesures de réduction de GES nécessitera des investissements massifs en capitaux. Ces investissements pourraient stimuler l'économie, mais également mener à une hausse de l'endettement public. Toutefois, ces investissements contribueront à une trajectoire mondiale qui minimisera les changements climatiques et les coûts qui en résulteront. Les impacts des changements climatiques auront eux aussi un effet majeur sur l'endettement public.

L'impact global net sur le PIB et sur l'emploi dépend de la combinaison des facteurs précédents, de l'impact des mesures de réduction de GES sur la position concurrentielle relative du Québec et de l'effort international vers la réduction des émissions de GES. Sans avoir réalisé une étude économique exhaustive, nous croyons toutefois que l'impact devrait être positif, notamment grâce au remplacement du pétrole importé par une électricité produite au Québec et potentiellement moins chère.

AXES DE RECHERCHE

Comme nous l'avons vu précédemment dans la section sur les scénarios alternatifs, le retrait des technologies risquées limite sérieusement les options de réduction. Selon le scénario 5, il n'est pas possible d'aller au-delà du scénario de réduction A lorsque ces technologies sont retirées. 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 sociétales 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 doit 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.

Les autres secteurs ne sont pas à négliger pour autant, mais sont moins critiques dans 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 ne mène pas à terme à une restructuration et à une décarbonisation de l'économie, mais peut servir de solution de dernier recours pour l'atteinte des cibles et objectifs de réduction du Québec.

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 hydrolyse-méthanation (« power-to-gas »), présentement plus coûteuse que la gazéification, mais qui pourrait être intéressante à plus long terme.

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

Cette étude permet de dégager les grands constats suivants :

- **Le Québec pourrait, à lui seul, réaliser l'essentiel de ses cibles et objectifs globaux** (37,5 % à l'horizon 2030 et 75 % *ou plus* d'ici 2050) grâce au recours aux technologies sobres en carbone, **et ceci sur son propre territoire** (c'est-à-dire sans recourir à l'achat de crédits de carbone internationaux, notamment sur le marché lié du carbone du Québec et de la Californie).

Les secteurs qui continuent d'émettre une quantité substantielle de GES à l'horizon 2050 sont les secteurs industriel et agricole. Pour atteindre une réduction au-delà de 80 % en 2050 au Québec sans l'achat de crédits de carbone internationaux, il sera nécessaire de lever certaines contraintes, d'utiliser de nouvelles technologies, ou encore de jouer sur les changements de comportement (afin notamment de réduire les demandes utiles).

- **Il est important de s'attaquer rapidement à l'ensemble des secteurs et des opportunités.**

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 à 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.).

- **Les réductions passent par une électrification massive** des besoins en transport et en chauffage notamment, avec un apport important des bioénergies en sus. Pour l'ensemble des secteurs, la consommation d'électricité croît, par rapport au scénario de référence, et ce au détriment du gaz naturel et des produits pétroliers. Le recours à la bioénergie augmente également.

- **La réduction des demandes doit faire partie de la solution.**

L'intégration de réductions de demandes (scénario alternatif 4) amène une baisse du coût marginal de plus de 40 % à l'horizon 2050 (scénario C). Elle permet également d'aller plus loin dans l'atteinte des cibles et objectifs, soit jusqu'à 85 % de réduction à l'horizon 2050 sur le territoire du Québec.

- **Le CSC et la BECSC peuvent faire partie de la solution comme technologies de dernier recours.**

Les scénarios alternatifs 6 (CSC sans contrainte et BECSC) et 8 (incluant le CSC sans contrainte) sont présentement les seuls à atteindre pleinement les cibles et objectifs du scénario D (-87,5 % en 2050) sans l'achat de crédits internationaux. Ces technologies, qui génèrent peu ou pas de cobénéfices pour le Québec, permettent également de réduire les coûts marginaux, surtout à long terme.

- **Des risques technologiques importants demeurent.**

Avec le retrait des technologies jugées plus risquées (scénario alternatif 5), seul le scénario de réduction A est atteint (65 % de réduction en 2050). Ceci confirme l'importance d'appuyer le développement de technologies afin de consolider les options de réduction disponibles.

Ce qu'on peut retenir de toute cette analyse, c'est que le défi climatique est d'ampleur. 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 (que ce soit hydroélectrique, éolienne ou solaire), lui permettant encore d'accroître sa production d'électricité sans émissions 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 pour le CSC.

Au regard de cette analyse, voici les priorités qui émergent en vue de la cible de 2030 :

Si le Québec souhaite tirer le maximum de cobénéfices 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 (ceux-ci représentent 60 % des réductions attendues en 2030).

Un bémol : 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 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 recours à l'achat de crédits. Le CSC peut également contribuer à réduire les coûts de la transition. Les scénarios qui ne placent pas de limite au CSC sont en effet les moins coûteux.

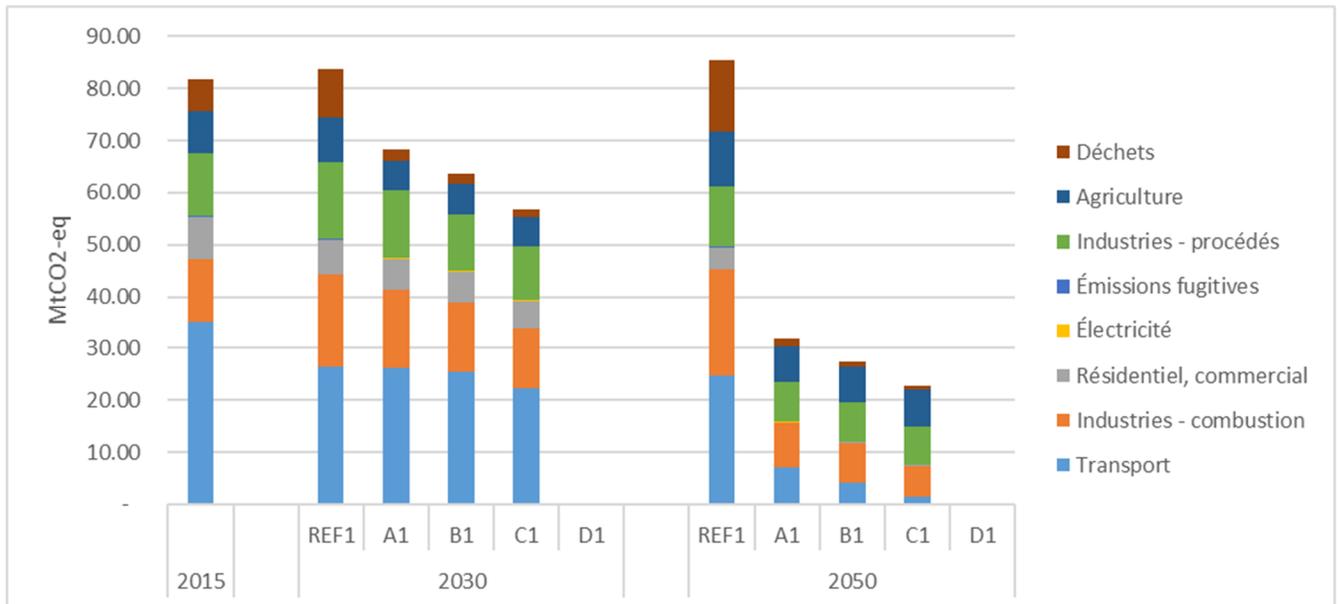
Nous concluons que le Québec est particulièrement bien placé pour réussir la décarbonisation de son économie, et pour tirer son épingle du jeu sur les plans de l'économie et de la santé humaine. Toutefois, l'effort pour y arriver ne doit pas être sous-estimé, et devra viser *toutes les occasions* de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



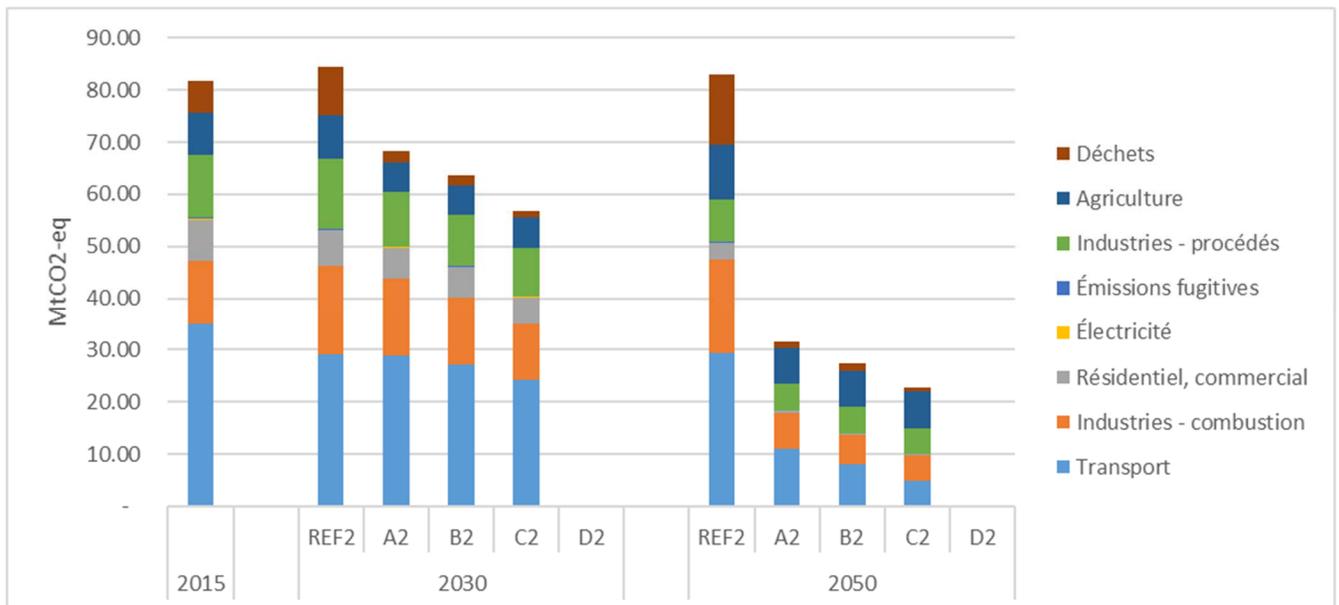
ANNEXE

ANNEXE – GRAPHIQUES SUPPLÉMENTAIRES (ÉMISSIONS DE GES PAR SECTEUR POUR L'ENSEMBLE DES SCÉNARIOS)

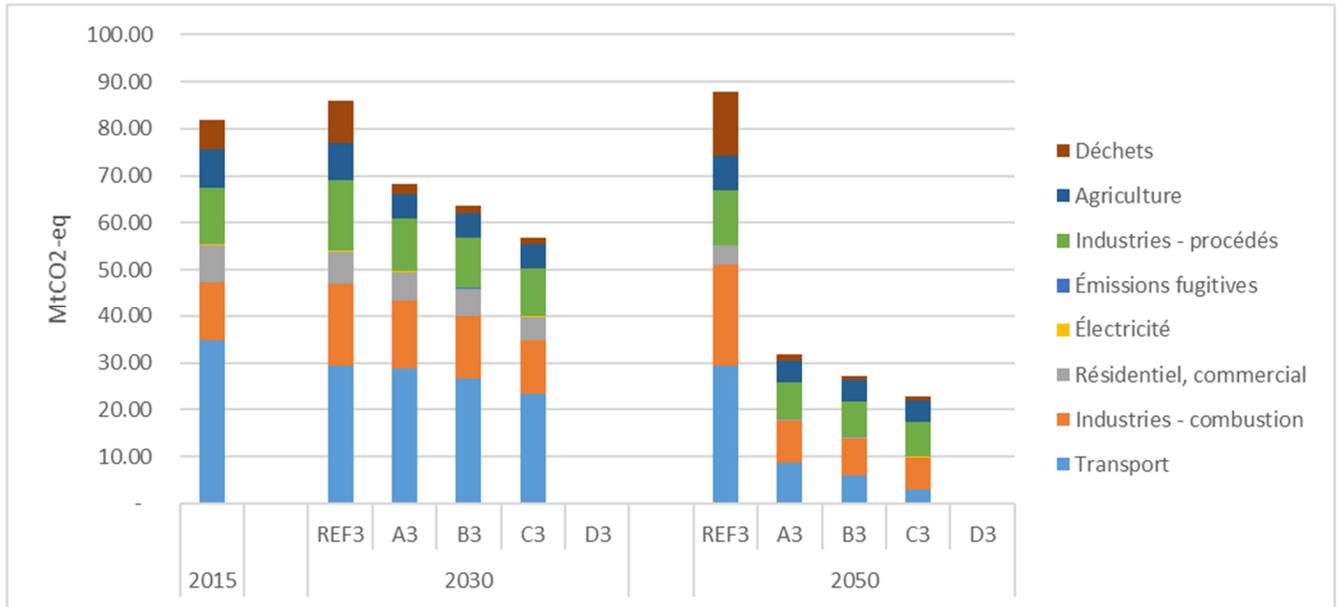
Scénario alternatif 1 – Mobilité durable / aménagement urbain



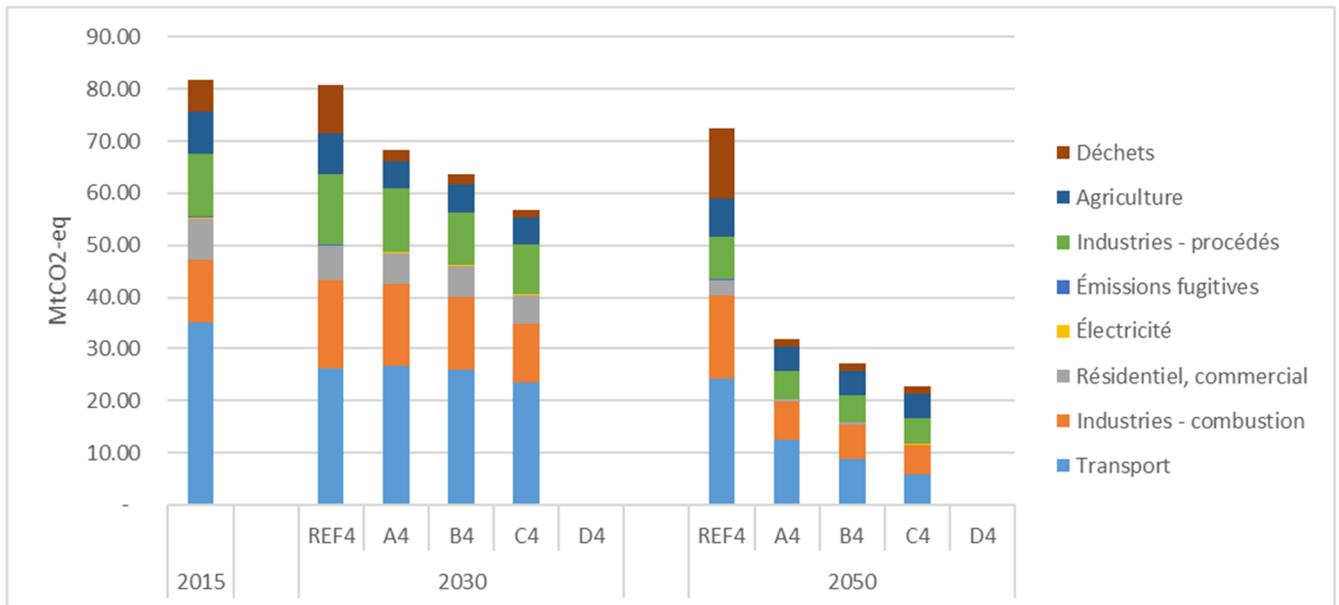
Scénario alternatif 2 – Tissu industriel



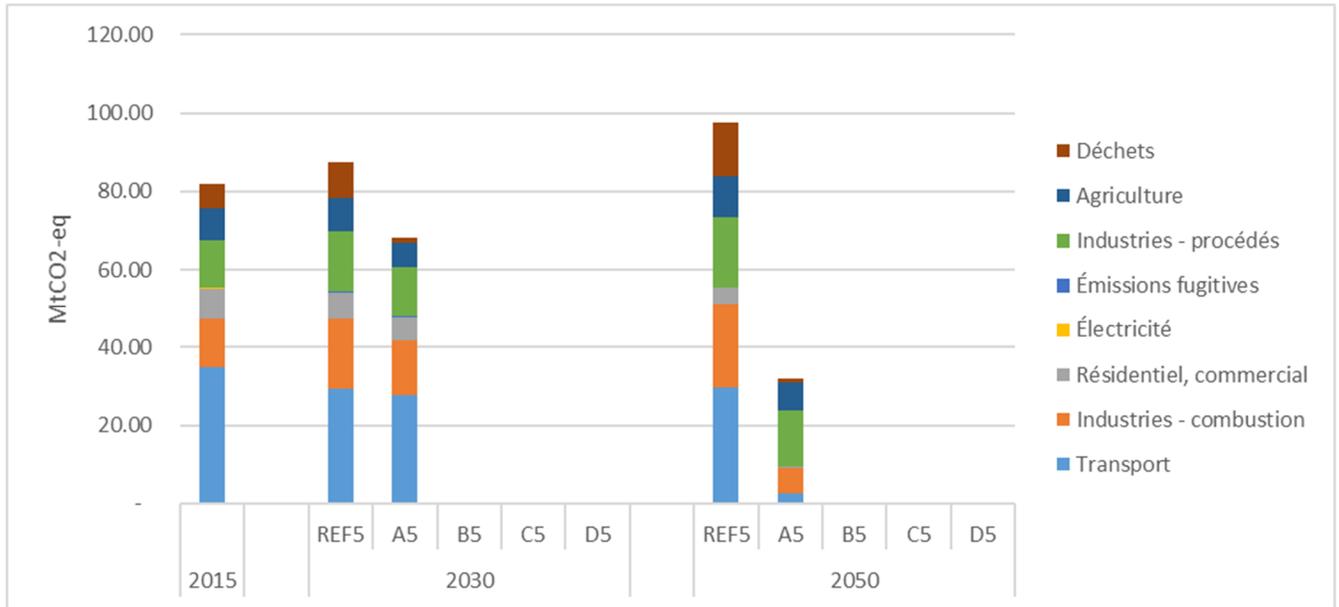
Scénario alternatif 3 – Ajustement du système alimentaire



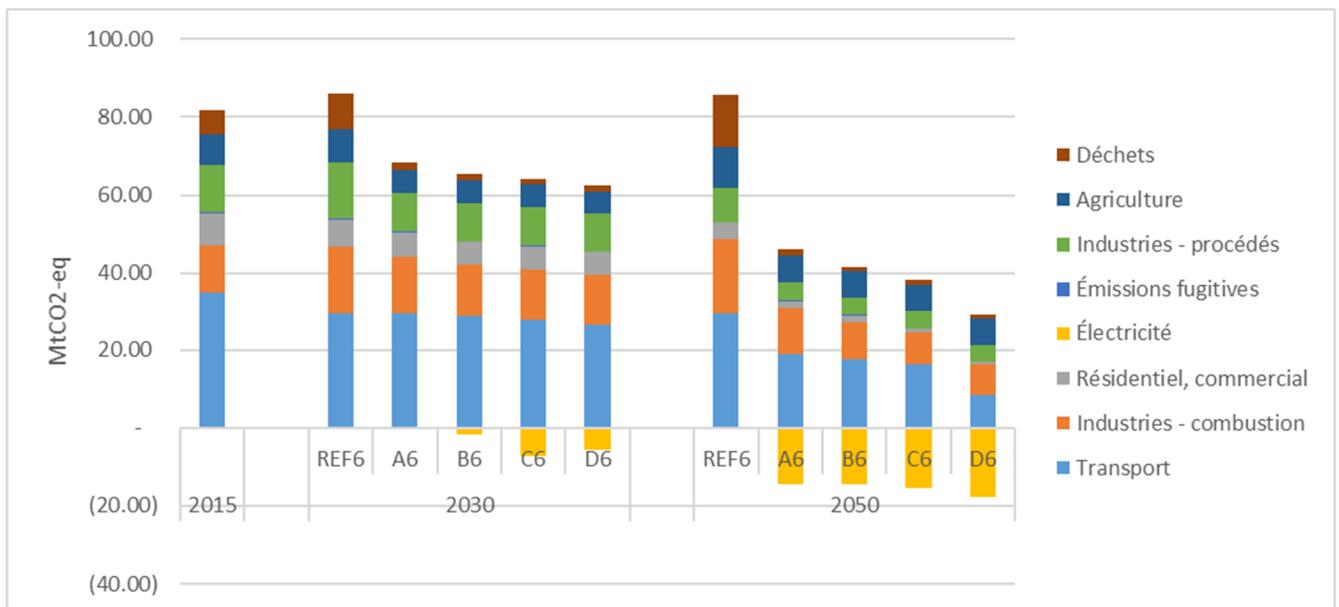
Scénario alternatif 4 – Demandes



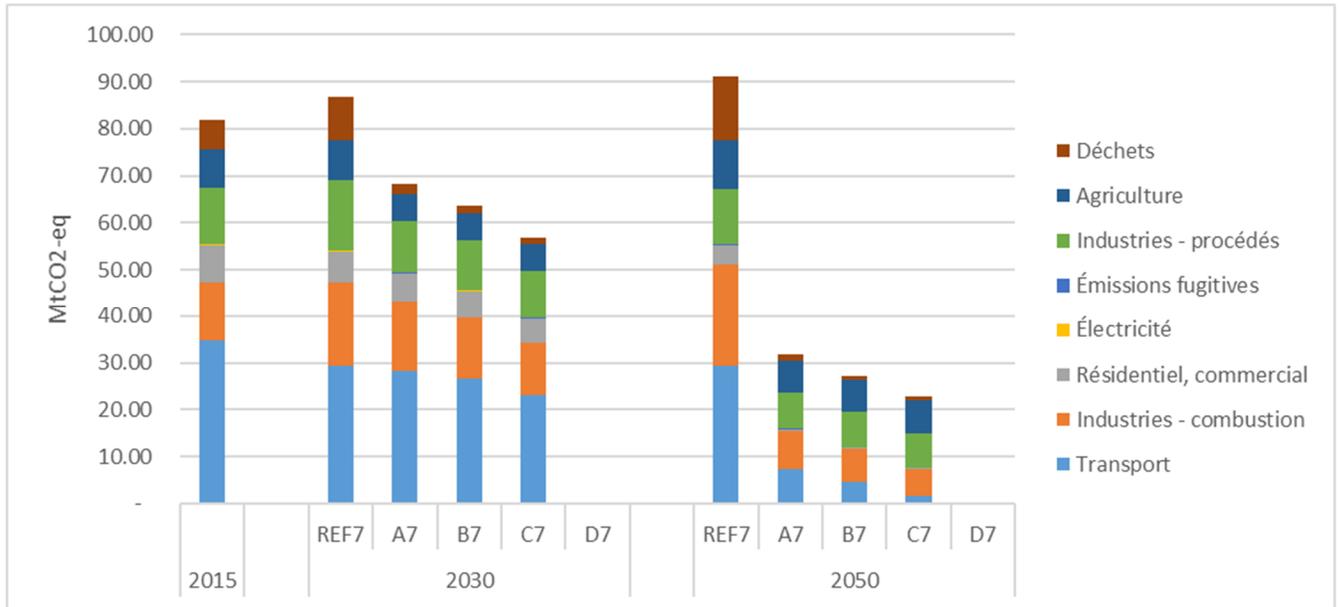
Scénario alternatif 5 – Risques technologiques



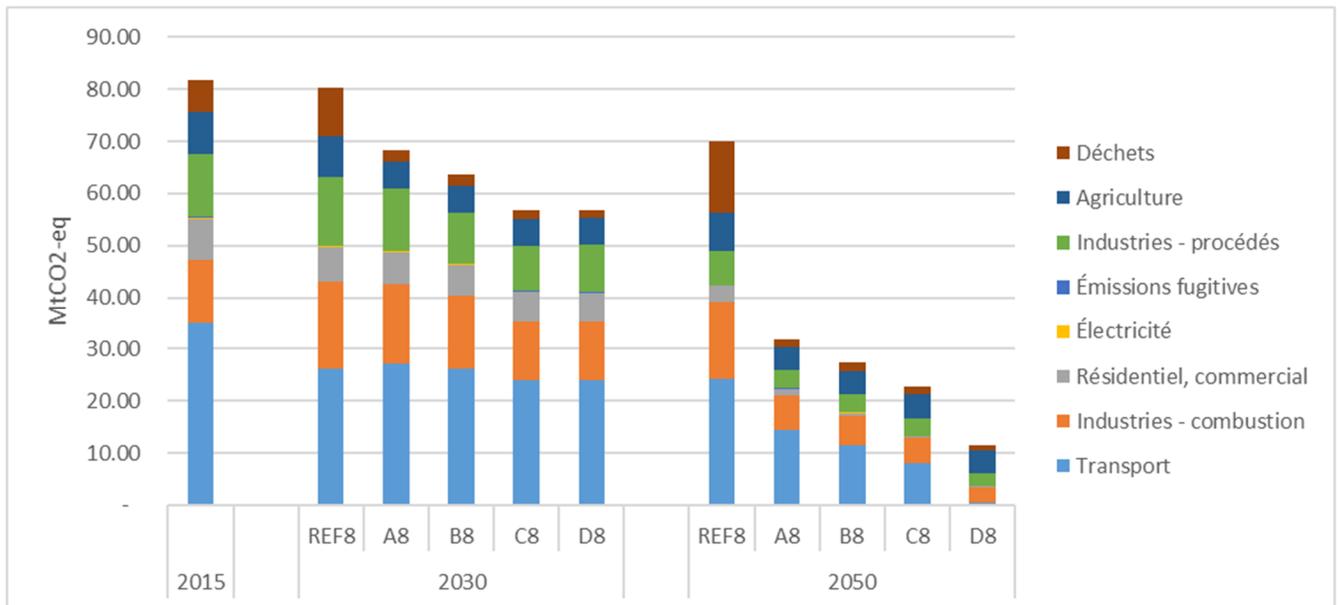
Scénario alternatif 6 – Captage et séquestration du carbone



Scénario alternatif 7 – Biomasse



Scénario alternatif 8 – Combinaison des scénarios favorables





 dunsky