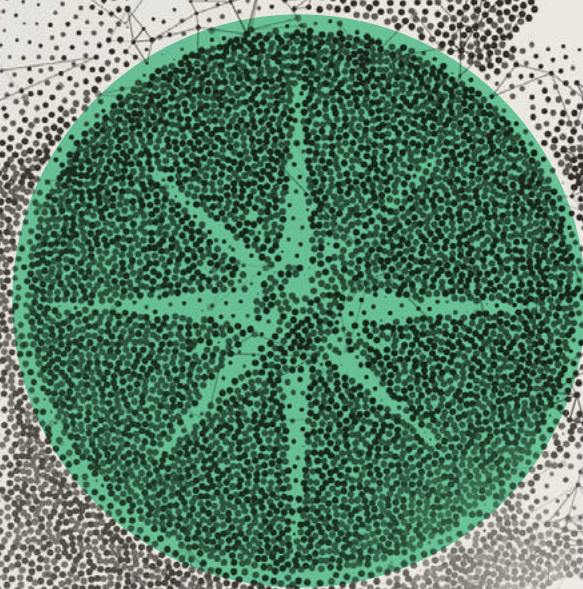




GUIDE DES OPPORTUNITÉS STRATÉGIQUES :

Trajectoires de décarbonation
du Canada



The Transition
Accelerator



L'Accélérateur
de transition

Guide des opportunités stratégiques :

Trajectoires de décarbonation du Canada

Équipe de projet

James Meadowcroft, Conseiller principal – trajectoires de transition, l'Accélérateur de transition
 Raphael Beauchamp, Directeur, Trajectoires régionales et sectorielles, et Responsable du Québec,
 l'Accélérateur de transition

Auteurs-collaborateurs principaux

Grace Newcombe, Analyste principale, l'Accélérateur de transition
 Hanna Bennet, Analyste trajectoires régionales, l'Accélérateur de transition
 Ridwan Abdulaziz, Analyste des trajectoires régionales, l'Accélérateur de transition

À propos de l'Accélérateur de transition

Notre objectif

La transition énergétique bouleverse les rapports de force à l'échelle mondiale. L'Accélérateur de transition est là pour aider le Canada à tirer son épingle du jeu — sur les plans **économique** et **géopolitique**.

Notre travail

L'Accélérateur de transition développe des projets, des partenariats et des stratégies qui ont pour objectif d'assurer la compétitivité du Canada dans un monde carboneutre. Nous tirons parti de l'évolution mondiale vers une croissance propre pour garantir des emplois permanents, une énergie abondante et des économies régionales fortes dans tout le pays. Nous collaborons avec plus de 300 organisations partenaires pour élaborer des trajectoires menant à une économie prospère et à faibles émissions de carbone et pour éviter les impasses coûteuses en cours de route. En associant la réflexion au niveau des systèmes à une analyse terrain, nous rendons possible un avenir plus abordable, compétitif et résilient pour l'ensemble des Canadiennes et des Canadiens.

Notre approche unique

- **Nous comprenons comment le système actuel fonctionne en théorie**, mais aussi en pratique, ce qui nous permet de repérer les obstacles à l'innovation et les possibilités d'évolution.
- Nous réunissons des représentants de l'industrie, des syndicats, des gouvernements, des communautés autochtones et d'autres acteurs pour **définir des visions de la réussite** pour leurs secteurs, régions ou communautés.
- Nous mobilisons nos partenaires pour **définir des trajectoires vers nos objectifs**, que nous analysons et affinons pour qu'elles demeurent crédibles, réalisables et persuasives.
- Nous concrétisons les idées et **progressons sur ces trajectoires** en initiant des projets et des partenariats pour bâtir un avenir plus compétitif.

Pour plus d'information ou pour prévoir un entretien, veuillez nous contacter à communications@transitionaccelerator.ca

Référence : Meadowcroft, J., Beauchamp, R., Newcombe, G., Bennet, H. et Abdulaziz, R. (2026). *Guide des opportunités stratégiques : Trajectoires de décarbonation du Canada*. Rapports Accélérateur de transition.

Publication originale réalisée avec le soutien du Smart Prosperity Institute. Auteur : James Meadowcroft, avec le soutien de Katherine Monahan, Hossein Hosseini, Colleen Kaiser, Shabnam Khalaj, Nathan Lemphers, Sonia Patel, Derek Eaton et Cameron Roberts.

© 2026 L'Accélérateur de transition. Tous droits réservés. Utilisation ou reproduction non autorisée interdite.

Table des matières

Résumé	iii
1. Introduction	1
2. Accélérer la transition des systèmes	5
3. Une perspective basée sur les systèmes énergétiques.....	10
4. Au-delà du système énergétique	19
5. Approcher la décarbonation de manière stratégique	21

Liste des graphiques et tableaux

Liste des graphiques

Graphique 1. L'adoption de l'automobile aux États-Unis et l'effet des principales sources de pression à l'échelle mondiale	3
Graphique 2. L'adoption de l'énergie électrique, de l'automobile et de la machine à laver aux États-Unis entre 1920 et 2020	4
Graphique 3. Courbe en S typique de l'adoption d'une technologie ou d'une pratique et de la transformation d'un système.	7
Graphique 5a Vue d'ensemble schématique du système énergétique actuel du Canada.....	17
Graphique 5b Vue d'ensemble schématique du système énergétique futur du Canada	18

Liste des tables

Tableau 1. La diversité des systèmes énergétiques des provinces canadiennes est illustrée par les émissions de GES (par habitant et par unité de PIB) et la valeur économique des principales exportations d'énergie.	11
Tableau 2. Par où commencer? Une hiérarchisation stratégique des priorités du Canada en matière de décarbonation.	24



le Canada dispose des ressources nécessaires pour être concurrentiel dans l'économie de l'énergie propre, mais qu'il ne les a pas encore déployées avec la cohérence stratégique qu'exige notre époque.

Résumé

La décarbonation du système énergétique canadien n'est plus seulement un impératif environnemental. Elle est l'une des principales opportunités de croissance économique des prochaines années. Réussir sur les fronts économique et environnemental exige toutefois une approche plus stratégique de la décarbonation. Il faut miser sur la transformation des systèmes plutôt que de viser des progrès graduels comme dans la dernière décennie.

Au lieu de considérer les changements climatiques comme un problème de contrôle de la pollution, cette approche met l'accent sur la construction des nouveaux systèmes qui peuvent contribuer à la prospérité du pays. Et plutôt que de traiter l'économie comme un tout indifférencié, faisant paraître les problèmes comme insurmontables, elle mise sur des trajectoires sectorielles et régionales qui segmentent la transformation en étapes réalisables.

Devant l'éventail grandissant d'approches de réduction des gaz à effet de serre, il peut être complexe de déterminer où concentrer nos efforts. Quelles approches constituent de véritables trajectoires vers la carboneutralité, mûres à un déploiement à grande échelle ? Lesquelles peuvent réellement renforcer la position du Canada sur les marchés mondiaux et favoriser un développement économique porteur ? Et lesquelles sont des trajectoires sans issue, susceptibles de produire des réductions d'émissions marginales à court terme, mais incapables de mener à la carboneutralité et/ou posant un risque de verrouillage technologique des infrastructures à forte intensité de carbone ?

Le présent rapport aborde ces questions pour 14 secteurs. Il propose un cadre stratégique qui cerne les trajectoires les plus susceptibles de générer un changement à l'échelle des systèmes, en récoltant au passage des retombées économiques pour le Canada.

Le rapport adopte d'abord une perspective de transition et de systèmes énergétiques. Atteindre la carboneutralité suppose de remplacer les systèmes à grande échelle qui génèrent des émissions : la façon dont la population canadienne produit et distribue l'électricité, déplace les personnes et les marchandises, chauffe les bâtiments et fabrique les matériaux dont l'économie a besoin. Ces systèmes ont été bâtis autour des combustibles fossiles. Les systèmes de l'avenir seront bâtis autour de l'électricité sans émissions.

En raisonnant à rebours à partir de ce système énergétique électrifié, on peut définir les trajectoires les plus prometteuses. S'il est impossible d'anticiper chacune des avancées technologiques et économiques des prochaines années, de nombreux paramètres des systèmes et signaux de marché se dégagent déjà clairement. Ils indiquent que :

- **L'électricité** jouera le rôle de premier plan dans un système énergétique décarboné. L'électrification des usages devrait être considérée comme la priorité absolue pour la plupart des secteurs qui dépendent aujourd'hui des combustibles fossiles.
- **Les carburants carboneutres** peuvent être un complément à l'électricité dans les secteurs où l'électrification complète n'est pas réalisable.
- **Une efficacité énergétique** accrue peut réduire la demande en nouvelle énergie décarbonée.
- **Les émissions hors énergie** (déchets, procédés industriels et agriculture) exigeront une attention particulière.
- **Les émissions résiduelles** devraient être réduites au minimum, le reste étant compensé par l'élimination du carbone.

Adopter une approche stratégique de la décarbonation

La décarbonation de la société est un processus qui s'échelonnnera sur plusieurs décennies. Au fil de cette période, les priorités politiques, la conjoncture économique, les préoccupations nationales et le contexte géopolitique évolueront à coup sûr. En agissant dès aujourd'hui, nous devrions privilégier les trajectoires où les technologies de remplacement sont prêtes pour un déploiement à grande échelle et où les gains potentiels pour les ménages et l'industrie sont manifestes. Adopter une approche stratégique, c'est :

1. Veiller à ce que la décarbonation soit arrimée à la poursuite d'autres objectifs de société, dont l'accroissement de la prospérité, la compétitivité économique, la sécurité, le bien-être collectif et la réconciliation avec les peuples autochtones.
2. Saisir l'électrification comme maillon central, en développant l'offre et en électrifiant les usages dans le transport, les bâtiments et l'industrie.
3. Miser sur la création du nouveau plutôt que sur le démantèlement de l'ancien.
4. Adopter une décarbonation asymétrique. Les provinces et les secteurs emprunteront des trajectoires variées vers la carboneutralité, à un rythme adapté à leur situation.
5. Donner priorité aux mesures concrètes nécessaires à la décarbonation et aux indicateurs physiques de progrès.
6. Porter attention aux coûts et aux prix, déterminants tant pour les ménages que pour la compétitivité industrielle.

Prises ensemble, ces priorités dessinent une logique stratégique claire : avancer rapidement là où l'analyse économique est convaincante, poser les fondations qui débloquent une transformation plus vaste, et éviter de détourner un capital politique et financier limité vers des batailles qui ne peuvent pas encore être gagnées.

Pour chacun des 14 secteurs, notre évaluation pose trois questions : quelles trajectoires peuvent générer une véritable décarbonation à l'échelle des systèmes; que devraient faire les décideurs à leur sujet dès aujourd'hui; et comment ordonner ces actions dans le temps ? Les réponses à ces questions déterminent la place de chaque secteur parmi les trois niveaux de priorité stratégique présentés ci-dessous.

Priorités stratégiques de décarbonation pour le Canada

Priorités immédiates



Mobilité des personnes
(véhicules légers et transport collectif)



Bâtiments



Électricité

Opportunités à moyen terme



Carburants de remplacement



Aluminium



Ciment et béton



Hydrogène



Véhicules moyens et lourds



Exploitation minière



Sidérurgie

Chantiers à plus long terme



Agriculture et agroalimentaire



Pétrole et gaz



Produits chimiques et plastiques

Cette séquence ne signifie pas que les secteurs à plus long terme ne sont pas pertinents aujourd'hui. Elle donne plutôt une idée plus nette de l'endroit où diriger en premier un capital et des efforts stratégiques limités : les secteurs qui offrent le plus de leviers pour faire progresser une économie à faibles émissions de carbone et concurrentielle.

À l'échelle sectorielle, chaque chapitre passe en revue l'état actuel du secteur, les principaux obstacles à l'atteinte de la carboneutralité,

ainsi que les technologies, les pratiques et les changements de systèmes les plus pertinents pour la décarbonation. Différents éléments de trajectoire sont ensuite évalués au regard de critères couvrant le potentiel de réduction des émissions, la maturité et l'adéquation techniques, l'analyse économique et l'acceptabilité sociale. Enfin, l'évaluation attribue à chaque trajectoire l'un des quatre rôles fondamentaux au sein du système carboneutre.



Trajectoire de décarbonation

Peut décarboner le système et offre plusieurs autres avantages.



Trajectoire habilitante

N'élimine pas directement les émissions, mais est essentielle au déploiement et à la performance des autres trajectoires.



Trajectoire de niche

Peut décarboner un système sectoriel ou régional ciblé.



Trajectoire-pont

Sert à réduire les émissions pendant que les options de décarbonation complète se développent, sans créer de verrouillage des infrastructures.



Trajectoire sans issue

Incompatible avec un système décarboné.

De la vision à l'action

En plus de cerner où le Canada devrait concentrer ses efforts et dans quel ordre, l'ensemble des évaluations sectorielles fait ressortir une série de défis de mise en œuvre qui dépassent le périmètre d'un seul secteur : les trajectoires sont profondément interdépendantes, la concurrence mondiale pour verrouiller les chaînes de valeur est déjà bien avancée, et la capacité institutionnelle de coordonner l'action entre les secteurs au rythme requis doit être construite de façon délibérée.

L'urgence de bien faire les choses ressort encore plus nettement dans le contexte mondial. Les partenaires commerciaux du Canada déploient des politiques industrielles ambitieuses pour verrouiller leurs positions dans l'économie de l'énergie propre. La Chine représente désormais plus de la moitié des ajouts de capacité solaire dans le monde et 60 % des ventes mondiales de véhicules électriques. L'Union européenne, le Japon, la Corée et l'Inde ont tous lancé des programmes industriels ciblés. La fenêtre dont dispose le Canada pour établir des positions défendables dans des secteurs comme les matériaux de batteries, l'aluminium à faibles émissions de carbone, le traitement des minéraux critiques et la fabrication de véhicules électriques est ouverte aujourd'hui, mais ne le restera pas indéfiniment. Une approche ciblée pourrait sécuriser environ 600 milliards de dollars par an en débouchés d'exportation d'énergie propre d'ici 2035.[1]

Le présent rapport soutient que **le Canada dispose des ressources nécessaires pour être concurrentiel dans l'économie de l'énergie propre, mais qu'il ne les a pas encore déployées avec la cohérence stratégique qu'exige notre époque.**

Transformer ces fondations en une position économique défendable suppose de traiter les secteurs interreliés présentés dans ce rapport comme un seul système industriel à bâtir, et non comme un ensemble de portefeuilles parallèles à gérer.

Comment lire ce rapport

La partie I du rapport approfondit la perspective des transitions, des systèmes énergétiques et du développement économique. La partie II présente les évaluations sectorielles détaillées des trajectoires, qui sous-tendent le tableau synthèse présenté plus haut. La partie III élabore les conditions de mise en œuvre et les choix qui en découlent.

Ensemble, ils offrent une base stratégique aux décisions de politique et d'investissement qui détermineront si le Canada bâtira le système énergétique de l'avenir tout en faisant croître son économie, ou s'il arrivera en retard dans une nouvelle économie construite ailleurs.

1. Allan B, Sawyer D. Exporter l'économie du futur : Une stratégie de diversification des échanges commerciaux pour renforcer la sécurité économique du Canada. L'Accélérateur de transition [Internet]. Décembre 2025 [cité le 4 mai 2026]. Accessible à : <https://accelerateurdetransition.ca/rapports/exporter-leconomie-du-futur/>



Il y a vingt ans, la décarbonation et la transition énergétique étaient principalement considérées comme des questions environnementales. Aujourd'hui, elles sont considérées comme des éléments essentiels à l'innovation, la compétitivité et la réussite économique à long terme.



1. Introduction

Le Canada se trouve à un moment charnière de son histoire énergétique et économique. Un abandon progressif des combustibles fossiles s'opère présentement à l'échelle mondiale, remodelant les industries, les chaînes d'approvisionnement et les positions concurrentielles dans toutes les grandes économies. La façon dont le Canada gérera cette transition s'étalant sur plusieurs décennies déterminera sa prospérité, sa sécurité énergétique et sa position dans le monde.

C'est aujourd'hui que sont prises les décisions qui façonneront cette transition. Les gouvernements établissent des cadres politiques. Les industries investissent des capitaux. Les investisseurs font des paris à long terme. Mais tous les moyens d'action ne sont pas équivalents. Certains s'alignent directement sur les objectifs du Canada en matière de décarbonation, d'économie et de compétitivité — en réduisant les coûts, en augmentant la productivité et en créant un avantage industriel. D'autres ne s'alignent pas sur ces objectifs. Pour prendre les bonnes décisions, il faut avoir une vision claire des options qui s'offrent au Canada, de ce qui fonctionne et de ce sur quoi il faut concentrer les efforts. Le présent rapport cherche à élucider ces points au moyen d'une approche fondée sur la transition, les systèmes énergétiques et le développement économique.

Plutôt que de traiter les changements climatiques comme un problème de contrôle de la pollution en ne se limitant qu'aux émissions, ce rapport examine les possibilités de transformation des systèmes sociétaux à grande échelle qui génèrent ces émissions. Aujourd'hui, les principaux systèmes d'approvisionnement social — la façon dont nous déplaçons les gens et les marchandises, construisons les bâtiments, produisons les denrées alimentaires, exploitons les industries, et ainsi de suite — restent tributaires des combustibles fossiles émetteurs de gaz à effet de serre (GES). La réorientation de ces systèmes vers des modèles plus durables est au cœur du défi carboneutre. Pour y parvenir, il faut comprendre le fonctionnement des systèmes existants et les problèmes non liés au climat qui influencent leur évolution. Le présent rapport

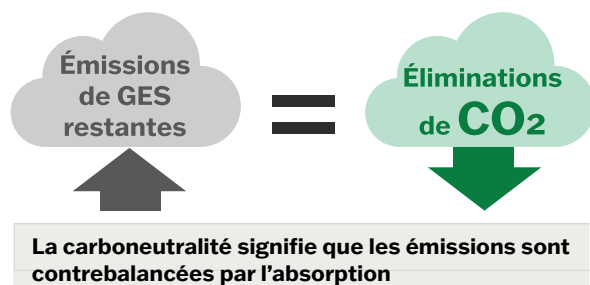
ne se concentre donc pas sur l'atteinte de cibles en matière de tonnes de GES (même si, au bout du compte, ces chiffres sont bel et bien importants!), mais sur la transformation de systèmes clés pour qu'ils soient configurés de façon compatible avec la carboneutralité.

Tout au long du rapport, nous défendons l'idée que la décarbonation du Canada doit être étroitement liée aux objectifs de développement industriel et économique susceptibles d'assurer un avenir prospère aux Canadiennes et aux Canadiens. La mise en place d'une industrie et de services carboneutres peut accroître la compétitivité du pays et améliorer notre qualité de vie.

Il y a vingt ans, la décarbonation et la transition énergétique étaient principalement considérées comme des questions environnementales. Aujourd'hui, elles sont considérées comme des éléments essentiels à l'innovation, la compétitivité et la réussite économique à long terme [2,3].¹

L'analyse de haut niveau présentée ici est pensée comme un complément aux travaux régionaux et sectoriels plus détaillés et plus concrets entrepris par l'Accélérateur de transition et d'autres intervenants sociaux, ainsi que des évaluations quantitatives plus complètes. Au sens large, une « trajectoire de transition » consiste en la séquence des changements multidimensionnels (dans les technologies, les stratégies commerciales, les cadres politiques et réglementaires, les pratiques sociales, le financement, etc.) requis pour transformer un système. Ces trajectoires sont détaillées. Elles dépendent du contexte et diffèrent selon les régions et les secteurs. Nous nous intéressons ici moins à cette analyse détaillée qu'au tableau stratégique général des principaux éléments techniques et sociaux susceptibles d'amorcer un changement transformateur, ainsi qu'aux actions susceptibles d'accélérer leur mise en œuvre.

Aux fins du présent rapport, nous entendons par « carboneutre » une société dans laquelle toutes les émissions de GES restantes sont compensées par des mesures d'élimination du CO₂. Étant donné les nombreuses incertitudes entourant les technologies d'élimination du carbone, nous insistons sur la réduction maximale des émissions par secteur, afin que seules les émissions résiduelles minimales aient à être compensées par des mesures d'élimination. Nous supposons que, d'ici à 2050, le Canada continuera à croître sur les plans économique et démographique à un rythme plutôt semblable à celui des dernières décennies. En outre, la transition du Canada vers la carboneutralité s'inscrit dans le contexte d'un *effort international coordonné*, même si les progrès demeurent inégaux d'un pays à l'autre.



L'analyse présentée ici s'appuie sur la littérature existante, sur des consultations auprès d'experts, ainsi que sur l'expérience pratique de l'Accélérateur de transition. Elle présente une évaluation complète de haut niveau des éléments de la trajectoire de décarbonation, en mettant en évidence les secteurs importants et les tendances prometteuses. Nous ne couvrons pas tous les systèmes et tous les secteurs ni ne les abordons tous avec le même degré de détail. Bien que le rapport s'appuie sur des travaux de modélisation accessibles au public, il n'est pas basé sur un exercice de modélisation spécifique. Il s'agit plutôt d'identifier les grandes avenues de progrès et leur potentiel pour parvenir à la carboneutralité, ainsi qu'à d'autres objectifs sociétaux.

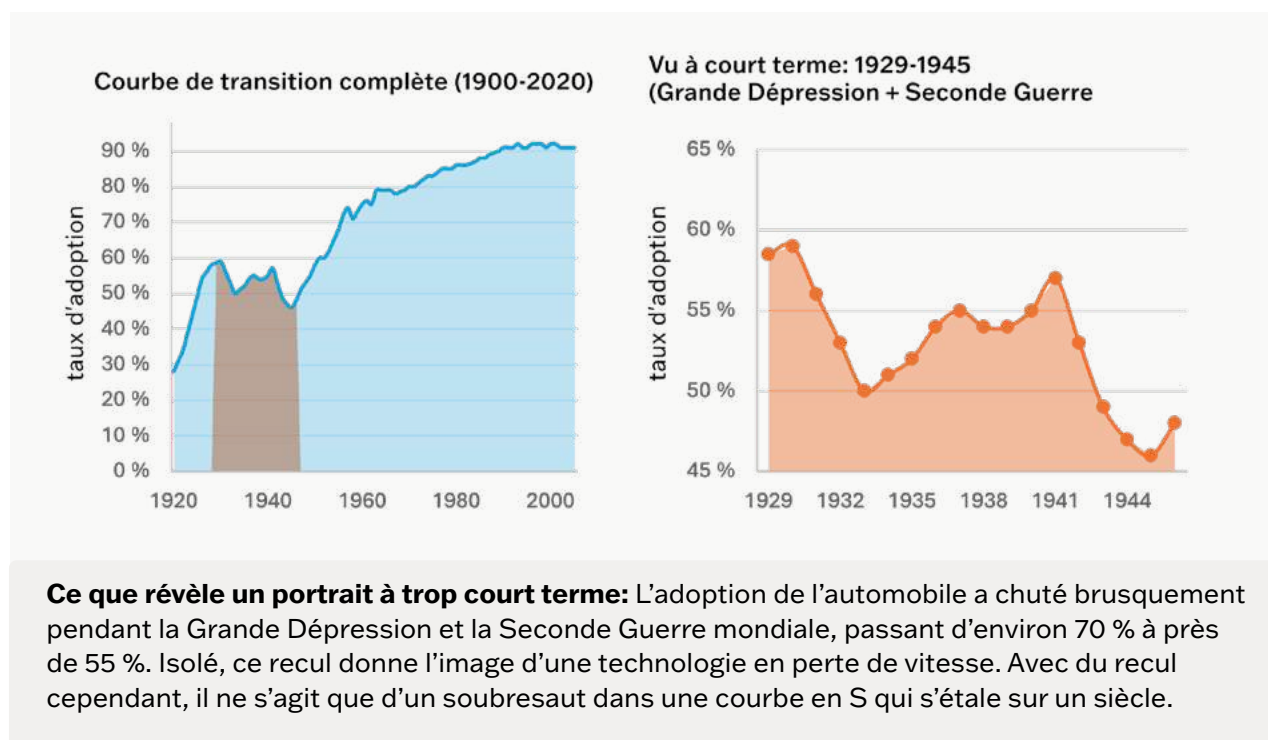
¹ Les références complètes figurent dans le rapport intégral (en anglais).

La première version de ce rapport a été publiée en janvier 2021. Cette deuxième édition a été entièrement mise à jour, élargie pour couvrir de nouveaux secteurs, et adaptée pour refléter à la fois les progrès de la décarbonation et les changements dans la conjoncture nationale et internationale qui se sont produits au cours des cinq dernières années.

Le paysage international a considérablement évolué depuis 2021. La vague d'ambition qui a suivi l'Accord de Paris sur le climat en 2015 s'est heurtée aux pressions du monde réel : la pandémie, les guerres, les tarifs douaniers, les controverses sur l'immigration, l'effritement des alliances internationales, les enjeux économiques et les tensions géopolitiques qui ne font que s'intensifier sont autant de sujets qui préoccupent de plus en plus les gouvernements. Certains pays qui ont joué un rôle de premier plan dans les premiers efforts de décarbonation ont rencontré des problèmes, tels que la hausse des prix de l'électricité, des défis liés à la résilience du

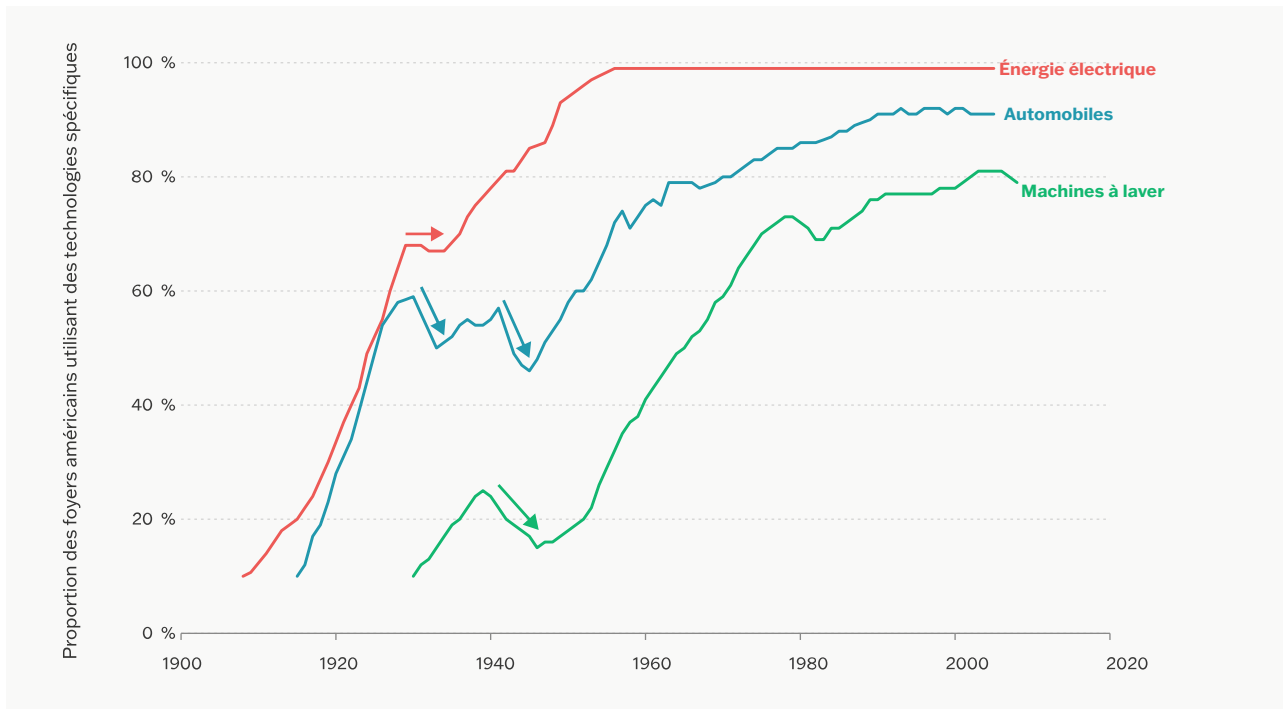
réseau à mesure que davantage d'énergies renouvelables variables ont été intégrées, ou encore des retards en matière de compétitivité industrielle dans le domaine des technologies à faible émission de carbone. Entre-temps, les acteurs établis du secteur des combustibles fossiles, désormais conscients de la menace structurelle que représente la transition énergétique pour leurs revenus à long terme, se sont organisés et se sont montrés plus affirmés dans l'orientation des débats politiques portant sur les changements climatiques.

Pourtant, les problèmes inattendus et les revers temporaires sont typiques des transitions sociétales à grande échelle qui s'étendent sur plusieurs décennies (voir les graphiques 1 et 2). Ce n'est pas une tâche simple que de réorienter la trajectoire du développement mondial pour réduire la dépendance à la combustion sans restriction de combustibles fossiles, laquelle a alimenté le développement industriel et sociétal pendant plus de 200 ans.



Graphique 1. L'adoption de l'automobile aux États-Unis et l'effet des principales sources de pression à l'échelle mondiale

D'après *Our World in Data* [4]



Graphique 2. L'adoption de l'énergie électrique, de l'automobile et de la machine à laver aux États-Unis entre 1920 et 2004

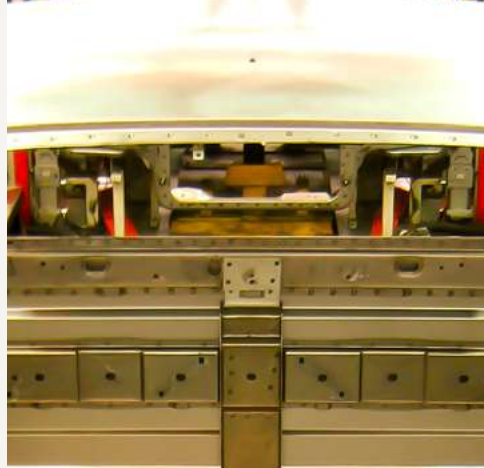
D'après Comin, Hobijn, et Our World in Data [4,5]

Avant tout, il est important de comprendre que, *malgré les obstacles politiques et économiques*, l'élan mondial vers les technologies à faibles émissions de carbone continue d'augmenter. Selon l'Agence internationale de l'énergie, les investissements mondiaux dans les énergies propres (énergies renouvelables, réseaux électriques, stockage, VE, nucléaire, carburants à faibles émissions, etc.) sont désormais deux fois plus importants que ceux consacrés aux combustibles fossiles[6]. Avec plus de 20 millions d'unités vendues en 2025, les VE représentent environ 25 % des ventes mondiales d'automobiles[7]. Les coûts actualisés de l'EPV à l'échelle mondiale ont chuté de 90 % entre 2010 et 2024, et les technologies renouvelables et les véhicules électriques sont maintenant de plus en plus adoptés dans les pays en développement [8,9].

Cette analyse reflète nos efforts pour systématiser les connaissances actuelles, dans un contexte de progression des

technologies et de transformation des marchés, et où notre compréhension collective ne cesse d'évoluer. Les commentaires et suggestions susceptibles d'affiner l'analyse et de rectifier les erreurs sont les bienvenus. Par le présent engagement, nous souhaitons contribuer au débat de société plus large qui englobe le défi carboneutre et la tangente que nous espérons voir prendre le Canada au cours des prochaines décennies.

Le rapport est structuré en trois parties. La première traite de notre approche de base et souligne ce que nous entendons par les perspectives de « transition » et de « systèmes énergétiques », tout en examinant brièvement les questions portant sur les émissions non liées à l'énergie et sur l'élimination des GES et en explorant une approche stratégique de la décarbonation. La deuxième partie est consacrée à l'analyse des éléments de trajectoire propres à certains systèmes et secteurs. Enfin, la troisième partie présente quelques conclusions générales.



Même si la société pourrait tirer profit d'une refonte du système qui permettrait d'améliorer les services et de réaliser des économies, certaines entreprises ou certains secteurs connaîtront un déclin alors même que de nouvelles entreprises et de nouveaux secteurs d'activité prendront de l'ampleur. Les acteurs établis résistent au changement, ce qui rend le progrès difficile.

2. Accélérer la transition des systèmes

Pour parvenir à la carboneutralité, il faut modifier en profondeur les systèmes à grande échelle que nous utilisons pour répondre aux besoins de la société, notamment notre manière de produire et de distribuer l'énergie, de déplacer les personnes et les marchandises, et de construire nos villes [10,11]. Bien que ces systèmes évoluent généralement de façon progressive, de nombreuses transformations spectaculaires ont eu lieu par le passé : pensons à l'avènement d'un système de transport axé sur l'automobile personnelle [12], à la mise en place de réseaux électriques pour alimenter les logements et les entreprises [13], ou à la place que prennent désormais l'informatique, l'économie numérique et l'IA dans notre vie.

Ces « transitions de systèmes », qui peuvent s'étendre sur plusieurs décennies, impliquent des changements interconnectés en matière de technologies, de pratiques sociales, de modèles d'entreprises, de réglementations et de normes sociétales [12,14,15]. Les périodes de transition se caractérisent par une grande incertitude, car les changements se produisent à une vitesse imprévisible, et on ne peut prédire quelle approche s'imposera. Ces périodes ont une grande incidence sur la distribution [16]. Même si la société pourrait tirer profit d'une refonte du système qui permettrait d'améliorer les services et de réaliser des économies, certaines entreprises ou certains secteurs connaîtront un déclin alors même que de nouvelles entreprises et de nouveaux secteurs d'activité prendront de l'ampleur. Les acteurs établis résistent au changement, ce qui rend le progrès difficile [17,18]. De plus, il existe toujours de multiples façons d'appliquer de nouvelles technologies, de nouvelles pratiques sociales ou de nouveaux modèles d'affaires, qui reflètent des valeurs différentes ou proposent d'autres modes de répartition des bénéfices. Ainsi, les transitions impliquent inévitablement des luttes quant à l'orientation et au rythme du changement [19,20].



Il est donc évident que les gouvernements et le secteur politique, ainsi que l'application de mesures, jouent un rôle important dans les transitions de systèmes [21,22]. Les États peuvent voir un avantage stratégique, militaire ou commercial dans les systèmes technologiques émergents (par exemple, le développement des bateaux à vapeur, des satellites, des drones ou de l'IA). Des modifications des cadres réglementaires et des droits de propriété sont généralement nécessaires pour libérer le potentiel des nouvelles approches. Les acteurs établis, tout comme les nouveaux venus dans le secteur, rivalisent d'ingéniosité pour façonner les règles en leur faveur.

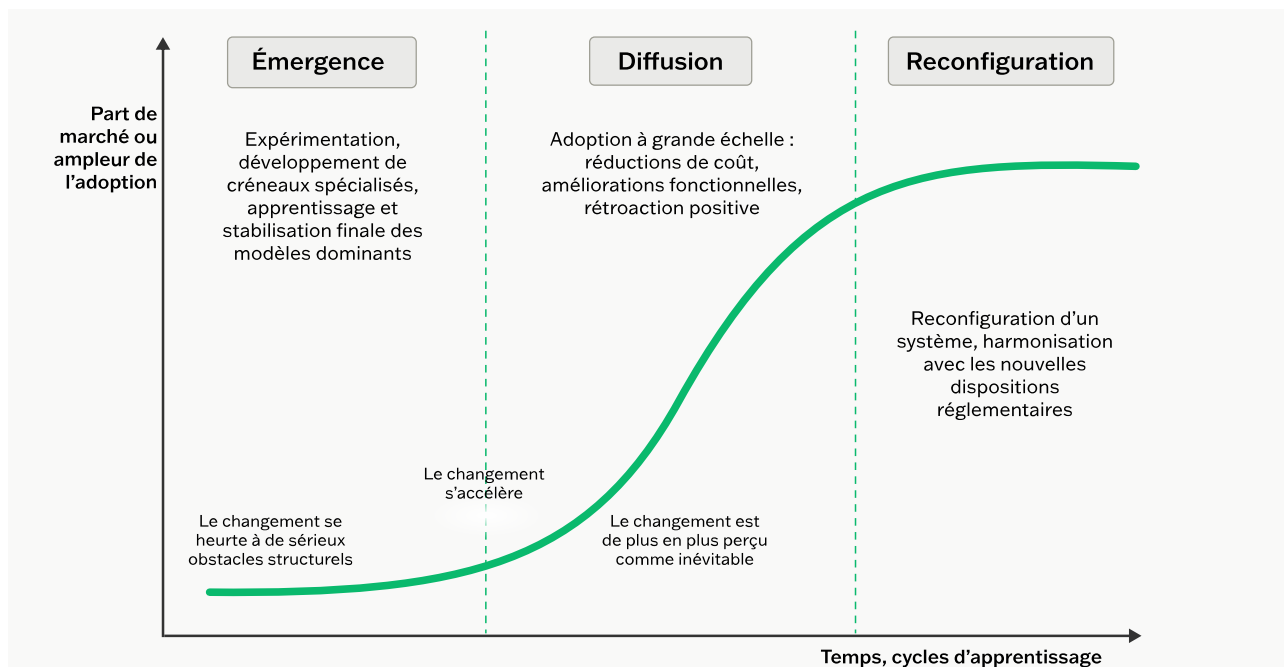
Les transitions passent généralement par trois étapes : d'abord *l'émergence*, puis la diffusion, et enfin la reconfiguration d'un système [23]. L'étape de l'émergence consiste à mettre au point et à essayer différentes options. L'insatisfaction à l'égard des méthodes établies incite les innovateurs à expérimenter. Au début, les nouvelles technologies sont coûteuses et imparfaites, et les modèles de conception et de gestion qui permettront leur adoption à grande échelle ne sont pas clairs. Les solutions novatrices émergent généralement dans des créneaux protégés, où les utilisateurs sont prêts à payer davantage et à fermer les yeux sur des lacunes d'ordre fonctionnel. Les piles solaires, par exemple, ont d'abord été utilisées pour la production d'électricité pour les engins spatiaux et dans des régions isolées. Au fur et à mesure que les innovateurs acquièrent de l'expérience avec une nouvelle technologie, un ensemble de circonstances favorables (problèmes avec le régime existant, changements dans le contexte politique ou économique) peut permettre une remise en question plus directe du *statu quo* [24,25].

Pendant la phase de *diffusion*, la nouvelle approche gagne des adeptes et améliore la fonctionnalité, et les prix baissent grâce aux

économies d'échelle. Des boucles de rétroaction positive se mettent en place à mesure que les consommateurs se familiarisent avec la nouvelle technologie, que l'infrastructure se développe, que des innovations complémentaires arrivent sur le marché et que des cadres politiques et réglementaires plus favorables sont mis en place. À mesure que la phase de diffusion progresse, les acteurs établis peuvent de plus en plus s'alarmer des progrès rapides réalisés par les nouveaux venus, et des luttes très médiatisées peuvent s'ensuivre quant à la façon d'orienter le changement [26,27].

Les changements ont éventuellement une incidence sur la configuration globale du système. Parfois, les éléments novateurs sont intégrés par l'intermédiaire d'un réaligement tandis que des caractéristiques importantes du système précédent sont conservées, mais dans d'autres cas, un nouveau système remplace presque entièrement l'ancien. Grâce à cette *reconfiguration*, les cadres réglementaires et politiques s'harmonisent pleinement avec les nouveaux arrangements, les liens avec d'autres systèmes sont stabilisés, et les nouveaux venus deviennent les nouveaux acteurs établis [28]. Ces trois phases tracent une courbe en S classique, dans laquelle une longue phase préparatoire fait place à un déploiement généralisé et, finalement, à la transformation d'un système (voir le graphique 3).

Aborder l'enjeu climatique sous l'angle des transitions de systèmes met en lumière des questions qui peuvent aider à mettre au point des trajectoires de transformation et à formuler des politiques de soutien. En premier lieu, s'il est courant de parler de la « transition énergétique » comme d'un phénomène unique, la décarbonation de l'économie impliquera en réalité une série de transitions reliées entre elles dans des systèmes sectoriels distincts : la mobilité des personnes, le transport de marchandises,



Graphique 3. Courbe en S typique de l'adoption d'une technologie ou d'une pratique et de la transformation d'un système.

D'après Victor, Geels, et Sharpe, 2019 [77]

l'agroalimentaire, et plus encore [10,11]. Chacun de ces systèmes a sa propre dynamique et présente ses propres obstacles et facteurs favorables. En outre, le changement climatique n'est pas le seul problème auquel ces systèmes font face, et il n'est généralement pas le moteur de changement le plus puissant. Les pressions liées aux coûts, la concurrence, les changements démographiques et les bouleversements technologiques exercent souvent une influence plus immédiate. Une stratégie de décarbonation efficace doit donc travailler en harmonie avec ces forces, et non pas en dépit de celles-ci.

Certains secteurs sont déjà perturbés par de puissants courants perturbateurs qui vont bien au-delà des politiques en matière de climat. Le secteur de l'automobile subit présentement une transformation due aux véhicules électriques et autonomes, ainsi qu'aux nouvelles plateformes de mobilité telles que les applications de covoiturage. Le secteur du logement subit la pression d'une crise de l'abordabilité qui impose une

réévaluation des manières de bâtir et du choix des emplacements pour la construction au Canada [29–32]. Il est donc essentiel d'intégrer les initiatives de décarbonation aux solutions apportées à des défis plus vastes, notamment la volonté du Canada de diversifier ses échanges commerciaux et de renforcer sa résilience économique face à des tensions géopolitiques en pleine évolution.

Les autres mesures liées à une approche de transition pour l'atteinte de la carboneutralité sont les suivantes :

- L'accélération des changements de systèmes permettant d'atteindre la carboneutralité (et d'autres objectifs sociétaux) devrait être une priorité lors de l'élaboration de mesures, plutôt que d'essayer de faire diminuer graduellement les GES de la manière la moins coûteuse possible et avec une date d'échéance en tête. Dans de nombreux cas, les possibilités de réduction des GES les plus évidentes et les moins coûteuses ne s'inscrivent pas dans une trajectoire de

transformation, et le fait d'investir dans ces possibilités fait perdre du temps et des ressources qui pourraient être consacrés à des efforts plus stratégiques.

- Les mesures doivent être adaptées aux particularités du secteur et de la région considérés. C'est seulement ainsi qu'elles pourront donner aux innovateurs les moyens d'agir et de cibler les obstacles spécifiques qui freinent le changement. Les secteurs de l'agroalimentaire, de la mobilité des personnes et de la construction font appel à des technologies, à des acteurs et à des cadres réglementaires différents, et chaque contexte requiert des trajectoires et un soutien spécifique en ce qui a trait à l'élaboration des mesures.
- En tenant compte des phases de transition (émergence, diffusion, reconfiguration), on peut aider à orienter la conception de l'ensemble des mesures à chaque étape du processus de transformation (voir l'encadré A). Il est possible d'appliquer un large éventail de mesures, notamment du soutien à la R-D, des investissements dans les infrastructures, des réglementations, des mesures fiscales, des subventions, ainsi que l'éducation du public. À un certain stade, des mesures d'élimination progressive peuvent être nécessaires, notamment des dates de retrait pour des processus, des combustibles ou des technologies spécifiques, ainsi que des mesures visant à indemniser les personnes désavantagées par les changements. Toutefois, choisir un mauvais moment pour introduire de telles mesures peut s'avérer contre-productif.
- Au moment opportun, les gouvernements doivent être prêts à soutenir des technologies et des pratiques sociales et

commerciales spécifiques susceptibles d'accélérer le développement économique et d'appuyer les trajectoires vers la carboneutralité. Même si l'on peut comprendre qu'il y ait une certaine réticence à choisir les technologies et les pratiques « gagnantes », les gouvernements doivent jouer un rôle central en concentrant les investissements sur les options les plus prometteuses, en finançant les infrastructures essentielles, en réduisant l'incertitude pour les investisseurs privés, et en facilitant les économies d'échelle. Malgré la rhétorique consistant à « laisser le marché décider », les gouvernements ont toujours fait des choix concernant les options technologiques, en particulier pour les technologies de grande échelle reliées à l'énergie. La route Transcanadienne, l'industrie nucléaire et l'exploitation des sables bitumineux ont toutes nécessité un engagement public délibéré. Il s'agit maintenant de faire preuve de la même détermination en ce qui a trait aux technologies et à l'infrastructure du prochain système énergétique [21, 22, 33, 34].

- Alors que des facteurs internationaux (notamment les accords sur le climat, les avancées technologiques, les chaînes d'approvisionnement intégrées à l'échelle mondiale, les rivalités géopolitiques et les tensions commerciales) auront un impact sur le rythme et l'orientation des changements dans les secteurs clés, les gouvernements nationaux disposent toujours de puissants leviers pour influencer les trajectoires de développement [21,34].

Des politiques ciblées pour accélérer le changement aux différentes phases de la transition

ÉMERGENCE

Objectif de politique : favoriser l'émergence de solutions de rechange susceptibles de mener à une transformation du système, capable d'atteindre la carboneutralité des émissions de GES et d'autres objectifs collectifs.

Approche : soutenir un portefeuille de recherche-développement axé sur des secteurs ou des problèmes particuliers ; financer des expérimentations et des programmes de démonstration ; articuler une vision des solutions les plus prometteuses pour coordonner les acteurs ; faciliter le partage des connaissances entre les secteurs visés ; financer des intermédiaires qui mettent les innovateurs en réseau et élaborent de bonnes pratiques ; favoriser les premiers créneaux d'application (par exemple, au moyen des marchés publics).

DIFFUSION

Objectif de politique : accélérer l'amélioration et le déploiement à grande échelle d'approches novatrices porteuses d'une transformation positive du système.

Approche : favoriser les économies d'échelle, l'apprentissage par la pratique et l'accès à des technologies complémentaires ; soutenir l'élaboration de normes et de codes ; appuyer le développement des infrastructures de base ; stimuler la demande par des subventions à l'achat et les marchés publics ; mobiliser des investissements au moyen de subventions, de prêts et de mesures fiscales incitatives ; appliquer des règlements et des mesures fiscales pour accroître la pression sur les acteurs en place et créer des occasions de marché pour les nouveaux venus ; mener des campagnes de sensibilisation du public ; accompagner les personnes défavorisées par ces changements ou moins en mesure de profiter des bénéfices collectifs.

RECONFIGURATION

Objectif de politique : mener à terme la transformation du système afin d'atteindre la carboneutralité et d'autres objectifs collectifs.

Approche : stabiliser les nouveaux cadres institutionnels et réglementaires ; favoriser les complémentarités avec d'autres systèmes ; retirer progressivement les éléments de l'ancien système, notamment par des mesures de compensation, de requalification et de développement régional.



Les producteurs d'énergie sont devenus une composante importante de l'économie canadienne, fournissant des emplois, des recettes d'exportation et des possibilités d'investissement, ce qui est un élément important à prendre en compte dans l'élaboration de trajectoires de transition.



3. Une perspective basée sur les systèmes énergétiques

L'application d'une perspective basée sur les systèmes énergétiques, qui suit les flux d'énergie et de matières connexes à travers l'économie, apporte un éclairage important sur certains aspects essentiels du défi de la carboneutralité. Les systèmes énergétiques impliquent une exploitation des ressources environnementales renouvelables et non renouvelables (le pétrole brut, l'uranium, le vent, le rayonnement solaire, etc.), la conversion de l'énergie en des formes utiles (essence, diesel, électricité) et son transport jusqu'aux endroits où elle est en demande (par chemins de fer, par pipelines ou par l'intermédiaire de réseaux électriques), le tout afin de faire fonctionner des appareils (voitures, calorifères, lampes) qui fournissent des services (transport, chaleur, lumière) aux utilisateurs finaux (particuliers, ménages, entreprises) [35].

Le système énergétique du Canada est vaste, diversifié et fortement dépendant des combustibles fossiles. Les principales sources d'énergie primaire exploitées au Canada aujourd'hui sont les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel), l'uranium et les rivières qui produisent de l'hydroélectricité, ainsi que, dans une moindre mesure, la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie solaire [36]. Le charbon est utilisé pour la production d'électricité, pour fournir de la chaleur industrielle et (sous forme de coke) comme agent réducteur dans le domaine de la métallurgie. Le pétrole est transformé en carburants pour les transports et l'industrie (et pour une partie de la production d'électricité) ou en produits non énergétiques (produits chimiques, plastiques, lubrifiants, asphalte, etc.). Le gaz naturel contribue à la production d'électricité, au chauffage des processus industriels et des locaux commerciaux et résidentiels, et à la production d'engrais, en plus d'être utilisé directement dans le secteur de l'énergie (par exemple, pour les sables bitumineux).

L'uranium est transformé en combustible pour les centrales nucléaires. La biomasse est principalement utilisée pour la production d'électricité dans le secteur des pâtes et papiers et pour la fabrication de biocarburants liquides pour le transport. L'électricité produite à partir des énergies hydroélectrique, éolienne, solaire, nucléaire et à partir du gaz ou du pétrole sert à des usages finaux résidentiels, commerciaux et industriels, tels que l'éclairage, le refroidissement, le chauffage, les moteurs, les compresseurs, la production d'acier et la fonte d'aluminium [37].

Au bout du compte, les consommateurs apprécient l'énergie pour le large éventail de services qu'elle fournit. Parallèlement, les producteurs d'énergie sont devenus une composante importante de l'économie canadienne, fournissant des emplois, des recettes d'exportation et des possibilités d'investissement, ce qui est un élément important à prendre en compte dans l'élaboration de trajectoires de transition.

Les caractéristiques les plus importantes du système énergétique canadien incluent notamment ce qui suit [38,39] :

- Le pays est un important exportateur net d'énergie, produisant beaucoup plus d'énergie qu'il n'en consomme. En 2025, le Canada a exporté 87 % de sa production de pétrole et 46 % de sa production de gaz naturel ; la grande majorité de ces exportations ont été destinées aux États-Unis (97 % du gaz naturel et 90 % du pétrole brut) [40,41]. Les exportations internationales d'uranium, de charbon et d'électricité sont également importantes (elles représentent respectivement 90 %, 81 % et 6 % de la production canadienne [42,43,44].

- L'intensité en GES de l'économie canadienne est élevée par rapport à celle de nombreux autres pays développés. L'exploitation des avantages économiques comparatifs du Canada (des terres et des ressources naturelles en abondance) au cours du siècle dernier a été source d'une grande prospérité, mais a laissé en héritage des défis à relever alors que nous entrons dans une ère de restriction des émissions de carbone.
- Les systèmes d'approvisionnement en électricité sont déjà largement décarbonés : environ 80 % de la production provient de sources à faibles émissions de carbone (principalement l'hydroélectricité et le nucléaire) [45].
- Les systèmes énergétiques des provinces canadiennes sont très variés. La diversité de leurs ressources naturelles et de leurs trajectoires de développement économique, combinée à des dispositions constitutionnelles décentralisées, a donné lieu à des profils énergétiques distincts. Les réseaux électriques provinciaux ont des actifs de production, des structures de propriété et des régimes réglementaires variés. L'électricité a servi de levier de développement économique à l'échelle régionale, et les provinces hésitent à s'intégrer avec les provinces et territoires voisins. En effet, étant donné l'attrait des marchés plus au sud, le commerce de l'électricité est plus développé sur l'axe nord-sud que sur l'axe est-ouest.

Ce dernier point — la variation entre les régions — détermine les trois premières caractéristiques du système énergétique canadien décrites plus haut, car les exportations diffèrent d'une province à l'autre, tout comme l'intensité en GES du PIB et l'intensité en GES de la production d'électricité (voir le tableau 1).

Tableau 1. La diversité des systèmes énergétiques des provinces canadiennes est illustrée par les émissions de GES (par habitant et par unité de PIB) et la valeur économique des principales exportations d'énergie.
D'après le Rapport d'inventaire national 1990-2023 et l'application Web sur le commerce international de marchandises du Canada. Données d'exportation annuelles pour l'année 2025 [46,47].

Province ou territoire	Émissions de GES (tonnes d'éq. CO ₂)		Valeur des exportations d'énergie (millions de \$ CAN)				
	par habitant	par million	Pétrole (pétrole brut et produits pétroliers raffinés)	Gaz naturel (gaz et liquides)	Charbon	Électrique	Uranium
Terre-Neuve-et-Labrador	14,6	196	7 817	0	0	78	0
Île-du-Prince-Édouard	9,1	158	0	0	0	0	0
Nouvelle-Écosse	13,2	231	19	2	0	0	0
Nouveau-Brunswick	13,1	237	8 295	624	0	262	0
Québec	8,9	136	3 959	52	0	580	0
Ontario	10,0	140	1 641	608	109	920	602
Manitoba	14,4	226	633	32	0	443	0
Saskatchewan	60,5	655	11 408	137	0	55	2 321
Alberta	55,3	583	122 232	11 711	732	42	0
Colombie-Britannique	10,8	145	3 426	5 143	6 766	671	0
Yukon	14,6	160	0	0	0	0	0
Territoires du Nord-Ouest	31,4	262	0	0	0	0	0
Nunavut	17,3	145	0	0	0	0	0
Canada	17,1	234	159 431	18 310	7 607	3 051	2 923

Dans la perspective de l'analyse de la transition du système énergétique au Canada, les caractéristiques suivantes du système actuel méritent d'être prises en compte :

- *La plupart des secteurs présentent une dépendance critique à la combustion de combustibles fossiles pour des usages finaux*, notamment la quasi-totalité du système de transport, une grande partie du secteur du chauffage pour les bâtiments résidentiels et commerciaux, ainsi que diverses grandes industries (voir le graphique 3) [23].
- *Une quantité significative d'énergie est perdue à l'échelle du système*, notamment l'énergie consommée par l'industrie pétrolière et gazière elle-même, les pertes liées à la combustion (sous forme de chaleur dans les moteurs à combustion interne et lors de la production d'énergie thermique), et les inefficacités liées aux usages finaux (par exemple, avec des bâtiments mal isolés) [39].
- *La production actuelle de carburants et d'électricité est relativement centralisée*. Quelques installations principales (comme des raffineries ou des centrales électriques) assurent l'acheminement de l'énergie à des millions de consommateurs par l'intermédiaire de réseaux de distribution.
- *L'offre et la demande au sein des systèmes électriques doivent être équilibrées en temps réel*. Cette nécessité devient un défi de plus en plus important à mesure que la production d'énergies variables (énergie éolienne, énergie solaire) est de plus en plus intégrée au réseau [48,49].
- *La distribution spatiale doit être prise en compte*. En effet, le pétrole ou le vent ne peuvent être exploités que là où ils se trouvent, ce qui peut être loin des marchés; et les contraintes d'infrastructure (congestion des oléoducs et des réseaux électriques) ne sont pas négligeables.
- *Il n'existe pas de forme d'énergie idéale*. Toutes les formes d'énergie présentent un ensemble de coûts et d'avantages (économiques, sociaux, environnementaux) qui doivent être évalués et équilibrés [48].

Les dimensions politiques et économiques du système énergétique canadien qui constituent des défis pour la transition vers la carboneutralité sont les suivantes :

- Le poids de l'industrie pétrolière et gazière dans l'économie et le processus décisionnel public, en particulier dans certaines régions (emplois, portefeuilles d'investissement, influence politique).



- Un contrôle provincial substantiel (et protégé par la constitution) sur l'exploitation des ressources, ce qui rend difficile l'harmonisation des mesures au sein de la fédération.
- Une intégration économique étroite avec les États-Unis (et leur politique climatique en dents de scie) qui doit être prise en compte dans l'élaboration des mesures.

Une perspective axée sur les systèmes énergétiques peut également nous renseigner sur les systèmes énergétiques carboneutres de l'avenir. Nous ne pouvons pas anticiper chaque développement technologique ou économique des décennies à l'avance, mais certains paramètres de base sont évidents [50–52]. Il est important d'avoir une idée de l'objectif à atteindre afin de pouvoir définir des trajectoires à suivre pour y arriver.

Le graphique 4 présente un modèle conceptuel de système énergétique carboneutre pour le Canada. Ce système repose sur cinq éléments essentiels :

1. Au cœur de ce projet, l'électricité décarbonée jouera un rôle beaucoup plus important dans la prestation de services énergétiques pour usages finaux, en particulier pour le transport, le chauffage des bâtiments et les opérations industrielles [50,53]. L'électricité est la plus polyvalente des formes d'énergie actuelles et peut être convertie efficacement pour un large éventail d'utilisations. La société est déjà raccordée au réseau électrique. Au Canada, l'électricité est décarbonée à 80 % et nous connaissons plusieurs moyens de produire davantage d'électricité carboneutre, notamment l'hydroélectricité, l'énergie éolienne, l'énergie solaire, la biomasse, l'énergie géothermique et d'autres énergies renouvelables, ainsi que

l'énergie nucléaire et les combustibles fossiles avec captage et stockage du carbone (CSC).

2. L'hydrogène ou les carburants sans émissions servent de vecteurs énergétiques supplémentaires dans les secteurs où l'électrification est difficile ou coûteuse (par exemple, le transport de marchandises lourdes et le chauffage industriel) [52,54].
3. Les biocarburants auront des applications dans l'industrie, dans l'agroalimentaire, et peut-être dans certains marchés du secteur des transports (par exemple, les carburants d'aviation). Toutefois, des problèmes liés aux matières premières, ainsi que la concurrence découlant d'autres utilisations des sols, peuvent limiter leur contribution.
4. Les usages domestiques résiduels d'énergie fossile, y compris les industries d'extraction et de traitement des combustibles fossiles, intègrent l'énergie à faibles émissions de carbone, le CSC et les émissions négatives pour atteindre la carboneutralité. Les exportations restantes de combustibles fossiles et les exportations d'énergie provenant à l'origine de sources fossiles (par exemple, l'hydrogène ou l'électricité) auront des profils de production carboneutres.
5. Des changements radicaux dans les technologies, les modèles d'affaires et les pratiques sociales dans les secteurs d'utilisation finale — y compris des augmentations substantielles de l'efficacité énergétique [53] — auront permis l'élimination progressive de la décentralisation des usages finaux de combustibles fossiles dans les transports, les bâtiments et l'industrie.

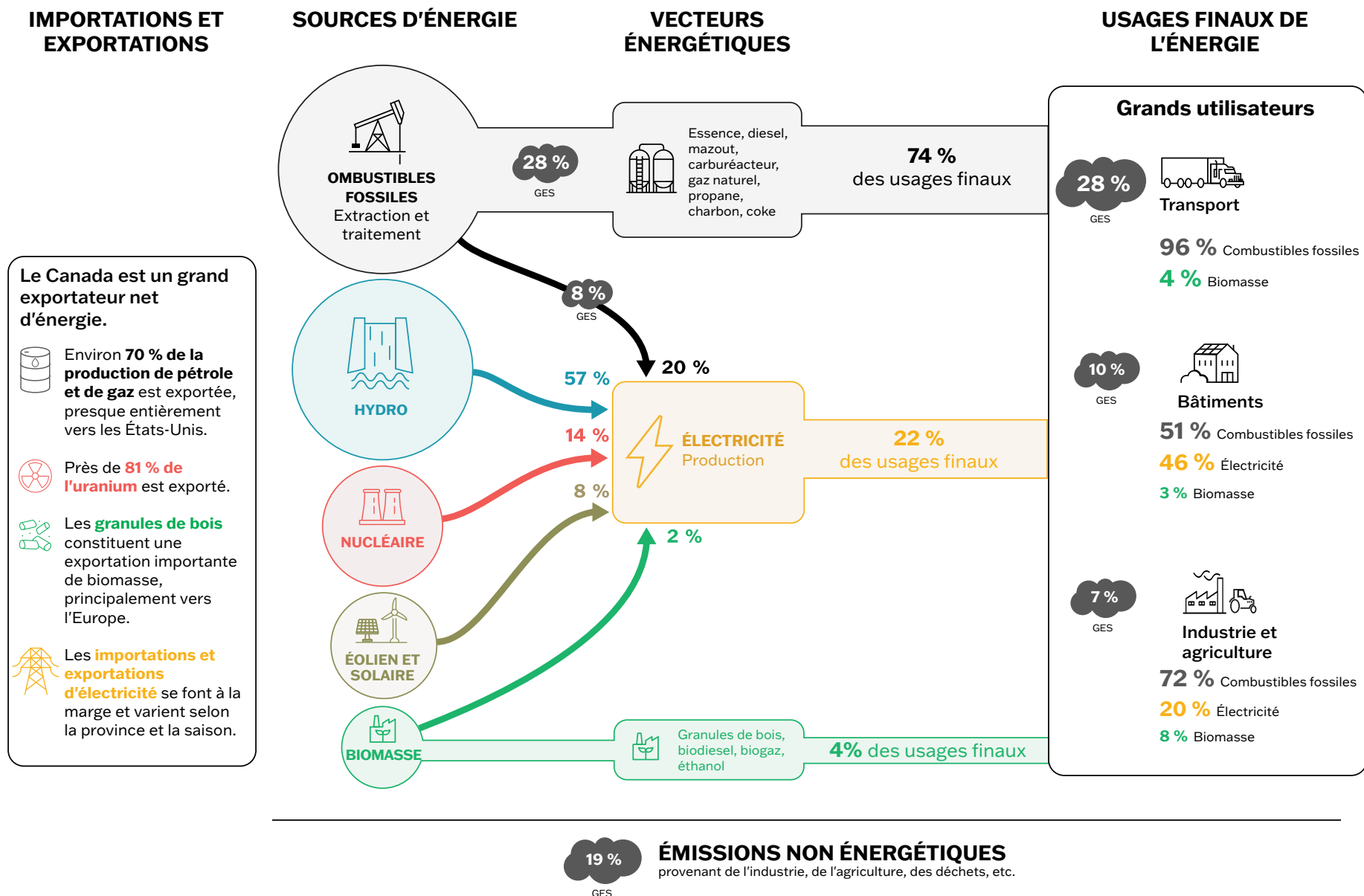
Il est présentement impossible de préciser l'importance relative des éléments de ce schéma conceptuel. Les développements technologiques, l'évolution des coûts relatifs, l'acceptabilité sociale, les circonstances internationales et les choix politiques influenceront les déploiements futurs. Quelle sera la part de l'hydroélectricité par rapport au nucléaire, à l'éolien, au solaire, etc., dans ce bouquet énergétique? Quelle proportion des besoins énergétiques de chaque secteur d'utilisation finale sera comblée par l'électricité ou par des combustibles à faibles émissions de carbone? Quelle proportion d'hydrogène proviendra de l'électrolyse, ou du reformage du méthane avec le CSC et les systèmes de

compensation? À quel point l'approvisionnement en énergie sera-t-il centralisé ou décentralisé? Quelle sera l'ampleur des exportations d'énergie fossile (sans émissions de production) qui subsisteront? Quelles approches en matière d'émissions négatives se révéleront viables? Les réponses à ces questions et à bien d'autres restent indéterminées. La structure des systèmes en place impose des contraintes importantes sur les résultats probables, et la modélisation peut aider à explorer l'éventail des possibilités, mais ces questions seront finalement résolues par des processus technologiques, économiques, sociaux et politiques s'étalant sur plusieurs décennies.



Malgré ces incertitudes, plusieurs éléments sont clairs :

- Étant donné que la demande en énergie pour usages finaux devra être comblée par l'électricité plutôt que par les combustibles fossiles, il faudra ultimement accroître l'approvisionnement en électricité. En outre, la croissance de la population et de l'activité économique au cours de plusieurs décennies nous laissera avec davantage de besoins à satisfaire. Ainsi, l'évolution vers la carboneutralité nécessite la mise en place progressive du système électrique. La bonne nouvelle est qu'il n'est pas nécessaire de remplacer la totalité de l'énergie fournie jusqu'alors par les combustibles fossiles (« joule pour joule ») en raison du rendement inhérent des appareils électriques utilisés pour des usages finaux (comme les moteurs électriques ou les thermopompes) comparativement à la combustion des combustibles fossiles. Néanmoins, le Canada envisage de doubler, voire plus, sa production d'électricité actuelle au cours des prochaines décennies.
- L'importance relative des éléments du schéma variera d'une province à l'autre, en fonction des ressources et de la trajectoire économique de chacune. Les provinces ont la possibilité d'exploiter leurs avantages comparatifs en se dotant de trajectoires distinctes en matière de faible émission de carbone (l'hydroélectricité sert au stockage de l'énergie au Québec, l'hydrogène peut être produit à peu de frais à partir du méthane en Alberta, la Saskatchewan possède d'importantes réserves d'uranium, etc.) [55].
- Comme les nouvelles capacités de production d'électricité imposent toujours des coûts, que ceux-ci soient économiques, sociaux ou environnementaux, il sera important d'améliorer encore l'efficacité dans de nombreux secteurs d'utilisation finale.
- Comme il n'est pas possible de tout électrifier, d'autres vecteurs énergétiques à faibles émissions de carbone seront nécessaires [56]. Il est donc justifié de renforcer la recherche et le développement, les projets de démonstration et les investissements dans les infrastructures pour l'hydrogène, l'ammoniac et les carburants propres.



Graphique 4 Vue d'ensemble schématique du système énergétique actuel du Canada.

IMPORTATIONS ET EXPORTATIONS

SOURCES D'ÉNERGIE

VECTEURS ÉNERGÉTIQUES

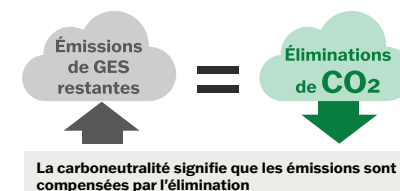
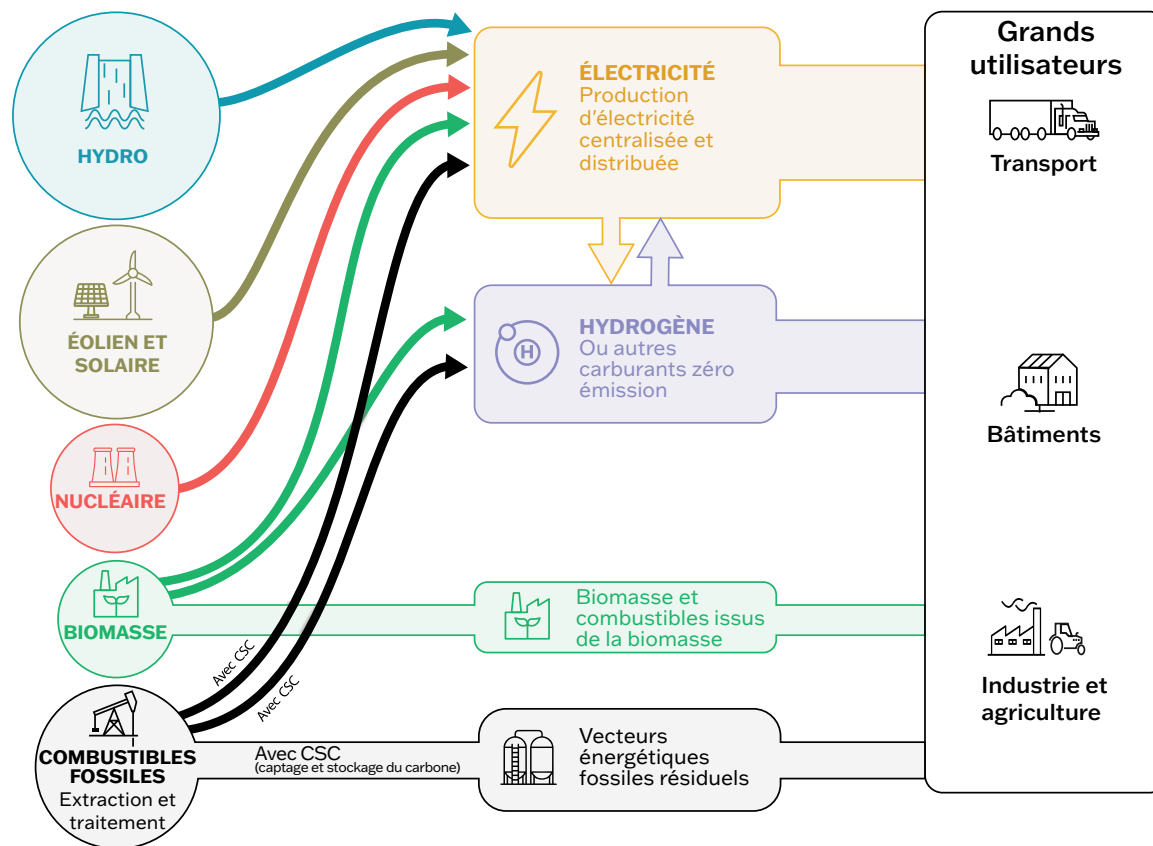
USAGES FINAUX DE L'ÉNERGIE

ÉMISSIONS RÉSIDUELLES

↔

Le Canada continue d'exporter de l'énergie, mais la composition de ses exportations évolue.

L'électricité propre, les carburants zéro émission, and l'hydrogène et les combustibles issus de la biomasse gagneront en importance dans les exportations, tandis que le pétrole et le gaz reculeront.



ÉMISSIONS NON ÉNERGÉTIQUES
provenant de l'industrie, de l'agriculture, des déchets, etc.



Graphique 5 Vue d'ensemble schématique du système énergétique futur du Canada.



L'atteinte de la carboneutralité implique principalement de mettre sur pied des systèmes évitant les émissions de GES, mais comprend aussi des solutions à « émissions négatives » qui éliminent le dioxyde de carbone de l'atmosphère.



4. Au-delà du système énergétique

Certaines émissions canadiennes de GES ne sont pas directement liées à la consommation d'énergie, mais proviennent de procédés et de produits industriels (7,7 %), de l'agriculture (7,9 %), et de déchets (3,3 %) [46]. Ces émissions, qui sont étroitement liées à une variété de systèmes d'approvisionnement existants, peuvent s'avérer particulièrement difficiles à traiter. Les processus industriels comprennent la production de fer, d'acier et de ciment (les matériaux structurels essentiels d'une société industrielle), ainsi que la fabrication de produits chimiques. Les produits industriels comprennent des gaz fluorés utilisés dans la réfrigération, la climatisation et les thermopompes, en plus d'avoir d'autres applications industrielles et commerciales. Les émissions agricoles sont générées par les exploitations d'élevage (émissions entériques et fumier) et les pratiques culturales (engrais, sols agricoles). Les sites d'enfouissement et les installations de traitement des eaux usées génèrent également d'importantes émissions de GES.

Pour tendre vers la carboneutralité, les transformations du système doivent réussir à traiter à la fois les émissions énergétiques et non énergétiques, lesquelles seront examinées ensemble dans les sections suivantes du présent rapport [39,46].

L'atteinte de la carboneutralité implique principalement de mettre sur pied des systèmes évitant les émissions de GES, mais comprend aussi des solutions à « émissions négatives » qui éliminent le dioxyde de carbone de l'atmosphère. Cela sera nécessaire pour compenser les émissions résiduelles dont l'élimination s'avère difficile sur le plan technique ou trop coûteuse. Par exemple, si le captage et le stockage du carbone sont appliqués à la production et à l'utilisation des énergies fossiles, ou pour contrôler les émissions de procédés industriels, des émissions résiduelles de l'ordre de 10 % devront être compensées par des éliminations. Et si les rejets accidentels de méthane associés à la production et à l'utilisation d'énergies fossiles peuvent en principe être réduits à de faibles niveaux, des solutions à émissions négatives pourraient s'avérer nécessaires pour y faire face.

En outre, même si l'on mettait fin à l'utilisation des énergies fossiles, ou si de nouvelles techniques d'exploitation permettaient d'éviter totalement les émissions de GES, des solutions à émissions négatives pourraient en fin de compte être nécessaires pour réduire les concentrations atmosphériques de GES. La plupart des modèles d'évaluation intégrée indiquent que ces solutions seront nécessaires au cours de la seconde moitié de ce siècle si l'on veut maintenir les effets du réchauffement climatique à un niveau gérable [9,10]. Bien que certains affirment que ces modèles n'ont pas pris en compte des changements systémiques plus radicaux induits par la demande et qui pourraient éviter le recours à des émissions négatives, plus les actions en matière de climat sont repoussées, plus leur importance potentielle s'accroît [62].

Un large éventail de solutions à émissions négatives a été suggéré, notamment :

- Le reboisement et le boisement à grande échelle. Au fil de leur croissance, les arbres absorbent le dioxyde de carbone et le transforment en biomasse verticale. Si la forêt reste intacte, le carbone est contenu et ne se retrouve pas dans l'atmosphère [63].
- Une augmentation de la rétention du carbone dans les sols grâce à la modification des pratiques agricoles et à l'incorporation à grande échelle du biochar [64,65].
- La bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECCS) : les installations de production d'énergie à partir de la biomasse utilisent le CSC pour contenir sous terre le dioxyde de carbone absorbé par la croissance des plantes [66].
- La capture directe dans l'air (CDA), où le CO₂ est extrait de l'air ambiant et séquestré sous terre ou utilisé comme intrant dans des processus industriels [67].

Mais il existe de nombreuses autres approches potentielles, notamment l'altération forcée (où des processus géologiques d'absorption du CO₂ sont accélérés) ou la pyrolyse de déchets organiques et le stockage de l'huile qui en résultent [68,69].

Chaque solution présente un potentiel différent ainsi que des difficultés ou des inconvénients. En ce qui concerne le boisement et le reboisement, les préoccupations portent sur la vulnérabilité du stockage de carbone face aux incendies, aux attaques de ravageurs, aux maladies ou aux activités humaines, ainsi que sur la disponibilité des terres. Le potentiel ultime de rétention du carbone organique dans les sols reste incertain, tandis que les recherches systématiques portant sur le biochar sont encore peu nombreuses. La technologie BECCS est présentement coûteuse ; il faut de l'énergie pour collecter des matières premières dispersées ; et des doutes subsistent quant à la disponibilité de matières premières issues de ressources biologiques sans impact négatif sur l'utilisation des terres. La capture de l'air est présentement très coûteuse et gourmande en énergie, mais elle pourrait éventuellement être associée à la production de combustibles synthétiques. D'autres approches sont possibles, mais des doutes persistent quant au financement des activités d'élimination, à l'ampleur que celles-ci pourraient prendre, et à leurs conséquences négatives éventuelles sur l'environnement. Plusieurs rapports récents donnent un aperçu des solutions à émissions négatives et des cadres nécessaires à leur gouvernance [70-73].



Les Canadiens veulent de bons emplois, des logements abordables et de meilleurs soins de santé : c'est dans ce contexte que les technologies à faible teneur en carbone doivent démontrer leur valeur.

5. Approcher la décarbonation de manière stratégique

La décarbonation de la société est un processus qui s'étendra sur plusieurs décennies. Au cours de cette période, les priorités politiques, les conditions économiques, les préoccupations d'ordre national et le contexte géopolitique ne cesseront d'évoluer. Les surprises et les revers seront inévitables. Il est donc impératif que ceux qui souhaitent progresser vers un avenir carboneutre adoptent une approche stratégique qui se concentre sur les éléments les plus importants tout en s'adaptant continuellement à ces circonstances changeantes. Dans le contexte canadien, il est particulièrement important de :

- **Veiller à ce que la décarbonation soit intégrée à la poursuite d'autres objectifs sociétaux**, notamment l'augmentation de la prospérité, la compétitivité économique, la sécurité, le bien-être collectif, et la réconciliation avec les peuples autochtones. Les Canadiens veulent de bons emplois, des logements abordables et de meilleurs soins de santé : c'est dans ce contexte que les technologies à faibles émissions de carbone doivent démontrer leur valeur. Le soutien à la construction du réseau électrique, à la transformation à valeur ajoutée des ressources naturelles (extraction et traitement des minéraux critiques) et à la fabrication de technologies à faibles émissions de carbone (VE, thermopompes, composants de systèmes électriques, etc.) jette les bases d'une prospérité future et nous fournit des outils pour décarboner notre économie nationale, tout en ayant le potentiel de renforcer des coalitions politiques en faveur de mesures plus énergiques.
- **Faire de l'électrification le maillon central en développant l'offre et en électrifiant pour les usages dans le transport, le bâtiment et de l'industrie.** Avec la baisse continue des coûts des technologies axées sur l'énergie renouvelable (notamment l'énergie solaire, et de plus en plus les piles), les progrès rapides dans les appareils électriques de consommation (véhicules et

thermopompes) et la numérisation croissante (notamment avec l'IA et la robotique), certains commentateurs ont commencé à parler d'une « révolution électro-technologique [74] ». Celle-ci étendrait les avantages de la première vague d'électrification du XXe siècle (éclairage, équipements industriels, réfrigération et climatisation, appareils ménagers) à de nouveaux domaines de la vie sociale en rendant les services énergétiques plus commodes, plus fiables, plus propres et plus efficaces. Dans les décennies à venir, l'électrification accrue sera à la fois une clé de la compétitivité industrielle et la pierre angulaire de l'économie carboneutre.

- **Construire l'avenir au lieu de démanteler le passé.** Depuis des décennies, des militants mettent en évidence les risques liés aux changements climatiques et dénoncent le système énergétique fondé sur les combustibles fossiles. Aujourd'hui, la priorité doit être donnée à la mise en œuvre de solutions pratiques. Tant que le pétrole et le gaz resteront la principale source de revenus d'exportation du Canada et que la demande mondiale pour les combustibles fossiles sera forte, il est peu probable que l'industrie soit limitée par des mesures politiques nationales. L'accent devrait plutôt être mis sur le déploiement de nouvelles solutions, soit en démontrant les avantages des usages de l'électricité grâce à sa meilleure performance et sa réduction des coûts. À mesure que la dépendance à l'égard des combustibles fossiles s'érode du côté de la demande, tant à l'échelle nationale que mondiale, l'équilibre des forces entre les anciens et les nouveaux systèmes énergétiques — ainsi que les calculs politiques qui y sont associés — changeront ; la transition pourra ainsi s'accélérer.

- **Adopter une stratégie de décarbonation asymétrique.** Les provinces et les secteurs suivront des trajectoires différentes pour atteindre la carboneutralité, à des rythmes correspondant à leur situation respective. Les mesures devraient être adaptées à cette diversité de conditions et de besoins, et tenir compte du degré de préparation à la transition des différents secteurs et régions. Appliquer une approche unique « standardisée » entraînera des retards et accentuera la division. Lorsque des solutions sont prêtes, les mesures appliquées devraient accélérer le déploiement à grande échelle. Lorsqu'il n'y a pas encore de solutions mûres, les mesures appliquées peuvent servir à soutenir la R-D, l'expérimentation, ainsi que les démarches visant à préparer l'éventuelle transformation du marché.

- **Hiérarchiser les mesures pratiques nécessaires pour parvenir à la décarbonation.** Trop souvent, les plans et les stratégies des gouvernements restent en suspens, sans tenir compte de manière réaliste des mesures concrètes nécessaires pour opérer un changement. Les plans et les objectifs doivent être traduits en termes concrets (par exemple, le nombre de nouveaux logements à équiper d'un système de chauffage électrique) et permettre d'identifier les étapes spécifiques nécessaires pour atteindre un objectif (changements réglementaires, mobilisation de capitaux, développement de la chaîne d'approvisionnement, formation de la main-d'œuvre, etc.) Les indicateurs de progrès devraient refléter l'état réel de la transformation du marché (par exemple, la proportion de ventes de voitures neuves électriques) et non les réductions d'émissions anticipées en nombre de tonnes par rapport à un scénario hypothétique où le *statu quo* est maintenu.

- **Porter attention aux coûts et aux prix.** Les coûts sont déterminants pour la compétitivité industrielle, et les prix sont importants pour les ménages. Aujourd'hui, les solutions à faibles émissions de carbone sont souvent plus coûteuses que les solutions basées sur les combustibles fossiles. À court terme, les prix sont relativement fixes, mais ils finissent par évoluer sous l'effet d'investissements. Les taux d'apprentissage (la baisse des prix lorsque le déploiement double) et les économies d'échelle peuvent transformer radicalement les coûts relatifs. Les mesures appliquées peuvent contribuer à faire baisser le prix des nouvelles technologies par l'intermédiaire des marchés publics, de subventions temporaires à la production ou à la consommation, de règlements et d'autres mécanismes. La tarification du carbone agit dans le sens inverse en augmentant le coût des carburants à forte teneur en carbone. Mais comme nous l'avons vu, elle demeure une source de discordance politique. Les initiatives de décarbonation devraient donc s'appuyer avant tout sur des mesures visant à réduire les coûts des technologies à faibles émissions de carbone afin d'encourager la transformation du marché. En outre, pour que la hausse des prix de l'électricité ne devienne pas le talon d'Achille de la décarbonation, il convient d'accorder une attention particulière au développement systématique du réseau, au bouquet de technologies de production sélectionnées, au rythme du déploiement des technologies d'usage de l'électricité, ainsi qu'au mode de financement des améliorations du système électrique.

Lorsque l'on considère ces priorités ensemble, elles témoignent d'une logique stratégique claire : il faut agir rapidement là où les arguments économiques sont convaincants, jeter les bases qui permettront une transformation plus large, et éviter de consacrer les rares ressources politiques et financières à des combats qui ne peuvent pas encore être gagnés.

Les sections suivantes du présent rapport traduisent cette logique sous la forme d'évaluations effectuées secteur par secteur. Avant d'aborder cette analyse, le tableau 2 résume la position stratégique globale du présent rapport en une seule vue d'ensemble : quels secteurs justifient une action prioritaire dès maintenant, lesquels nécessitent des investissements de base pour préparer un éventuel déploiement, et lesquels sont mieux servis par un soutien provisoire et un suivi temporaire.

L'ordre des éléments est voulu. Le développement du réseau électrique est en tête de liste non pas parce que les autres secteurs ne sont pas importants, mais parce qu'un réseau décarboné et étendu est la condition préalable à tout progrès dans presque tous les autres domaines. Là où les conditions économiques et technologies sont réunies, il s'agit d'opérer un déploiement rapide et à grande échelle.

Tableau 2. Par où commencer? Une hiérarchisation stratégique des priorités du Canada en matière de décarbonation.

Secteurs	Actions prioritaires	Avantage en matière de compétitivité économique
Priorités immédiates pour une décarbonation stratégique		
Électricité	Accélérer le déploiement des infrastructures électriques et des interconnexions régionales ; développer l'éolien, le solaire, l'hydroélectricité et le nucléaire ; investir dans le stockage et la gestion de la demande. Donner la priorité aux mesures de financement du réseau qui maintiennent l'électricité à un prix abordable à mesure que le réseau se développe : les avantages en matière de coûts à long terme pour les ménages et l'industrie dépendent de la manière dont les coûts d'infrastructure sont structurés et amortis.	Élevé L'électricité peu coûteuse, fiable et à faibles émissions de carbone du Canada constitue un avantage concurrentiel important dans un monde où la volatilité des prix de l'énergie et l'intensité des émissions de carbone jouent un rôle de plus en plus important dans les décisions concernant les sites industriels.
Mobilité des personnes (véhicules légers et transport collectif)	Favoriser l'adoption rapide des VE. Investir dans des infrastructures de recharge, des mesures incitatives à l'achat et des systèmes de transport en commun électrifiés qui réduisent les coûts de transport pour les ménages pour les navetteurs urbains qui ne possèdent pas de véhicule.	Élevé Le Canada peut s'assurer une position concurrentielle au sein des chaînes d'approvisionnement des VE et des batteries, ainsi que dans la fabrication d'équipements de transport en commun, en s'appuyant sur une capacité de production établie, une main-d'œuvre qualifiée et un accès à des minéraux critiques.
Bâtiments	Effectuer un déploiement à grande échelle de thermopompes en ciblant les contextes où elles sont concurrentielles sur le plan des coûts, et notamment les ménages qui utilisent présentement des combustibles de chauffage coûteux tels que le mazout, le propane et les plinthes électriques. Développer des programmes de rénovation écoénergétique. Veiller à ce que de nouveaux bâtiments soient construits afin d'éviter de devoir procéder à des rénovations écoénergétiques à l'avenir.	Élevé Favorise la création d'emplois qualifiés à grande échelle. Peut développer un potentiel d'exportation de matériaux de construction à faibles émissions de carbone, ainsi que des solutions de rénovation écoénergétique et de l'expertise en matière de construction.

Secteurs	Actions prioritaires	Avantage en matière de compétitivité économique
Opportunités à moyen terme pour accélérer les progrès		
Aluminium	Électrifier le chauffage industriel ; accélérer l'adoption de la technologie d'anode inerte pour éliminer les émissions liées aux procédés industriels ; tirer parti de l'avantage du Canada en matière d'électricité à faibles émissions de carbone.	Élevé L'un des atouts industriels à court terme les plus solides du Canada. L'accès à une énergie hydroélectrique fiable et bon marché confère aux producteurs d'aluminium canadiens un avantage durable en termes de coûts et d'intensité en carbone, car les acheteurs à l'échelle mondiale accordent une plus grande importance à la résilience de la chaîne d'approvisionnement et aux émissions intrinsèques.
Véhicules moyens et lourds	Accélérer le déploiement des VU moyen à batterie électrique par l'acquisition de parcs de véhicules et l'investissement dans la recharge, tout en soutenant les démonstrations et le déploiement précoce de VU lourds à batterie électrique et à pile à hydrogène. Investir dans des corridors de recharge et des infrastructures de ravitaillement en hydrogène, en veillant à réduire les coûts au fil du temps pour les applications où le coût total de possession peut devenir concurrentiel.	Moyen Le Canada dispose déjà d'une capacité de production et d'une chaîne d'approvisionnement en véhicules commerciaux. L'avantage à court terme consiste à renforcer les capacités nationales grâce à l'électrification des parcs de véhicules, aux autobus de ville, aux systèmes de transmission et à l'infrastructure de recharge, avec la possibilité de transformer cette envergure nationale en atout à l'exportation.
Carburants de remplacement	Soutenir la R-D et la production à l'échelle pilote ; développer des cadres réglementaires ; donner la priorité aux applications aéronautiques et maritimes où l'électrification n'est pas viable et où les surcoûts peuvent être absorbés ou structurés dans le cadre d'ententes d'approvisionnement à long terme.	Moyen Possibilités à long terme dans le domaine des carburants de remplacement. La base agricole et forestière du Canada offre des avantages potentiels en ce qui concerne les matières premières. L'avantage concurrentiel réside dans la capacité à prendre rapidement position dans les chaînes d'approvisionnement de carburants d'aviation durables et d'autres biocarburants, alors que les acheteurs à l'échelle mondiale commencent à conclure des ententes d'approvisionnement à long terme.

Secteurs	Actions prioritaires	Avantage en matière de compétitivité économique
Hydrogène	Les mesures à court terme devraient porter sur le renforcement de la demande pour les utilisations stratégiques et sur la réduction des coûts de production à mesure que l'échelle augmente. Financer des projets de démonstration; élaborer une stratégie d'exportation; donner la priorité aux applications pour lesquelles l'électrification n'est pas viable, telles que le chauffage industriel et le transport par véhicules lourds.	Élevé L'abondance d'électricité propre, le gaz naturel à bas prix et l'accès aux voies d'exportation de l'Atlantique et du Pacifique confèrent au Canada une position crédible en tant que futur fournisseur d'hydrogène à faible teneur en carbone. Il s'agit d'un avantage économique et stratégique, car les économies alliées cherchent à diversifier leurs importations d'énergie et à entretenir des relations d'approvisionnement plus sûres.
Sidérurgie	Soutenir le déploiement rapide de fours électriques à arc et investir dans la R-D et dans des projets pilotes pour la réduction directe à l'hydrogène. La technologie n'est pas encore concurrentielle sur le plan des coûts; les mesures prioritaires devraient porter sur les démonstrations, les infrastructures et le développement du marché, plutôt que sur les réductions de coûts à court terme.	Moyen Le Canada est en mesure de combiner l'électricité propre avec un accès à des intrants clés en amont — un avantage qui devrait gagner en importance à mesure que les normes d'approvisionnement se resserrent et que les acheteurs deviennent plus conscients du contenu en carbone.
Ciment et béton	Soutenir les programmes pilotes de CSC; promouvoir les préparations de ciment à faibles émissions de carbone et l'efficacité des matériaux dans la construction. Le secteur de la construction est très sensible aux prix, et le ciment à faibles émissions de carbone entraîne présentement un surcoût qui se répercute sur les coûts des bâtiments — l'application de mesures de soutien en faveur de son adoption est essentielle pour éviter de répercuter prématurément les coûts sur les utilisateurs finaux.	Moyen Une occasion de développer une expertise technique transférable à l'échelle mondiale dans l'intégration du CSC et la préparation de ciment à faibles émissions de carbone. Cela crée un potentiel de compétitivité en tant que partenaire technologique, d'investissement et de projet dans le secteur de la construction, dans un contexte de pression croissante en faveur de la décarbonation.
Exploitation minière	Électrifier les opérations minières et tester des équipements fonctionnant à l'hydrogène lorsque cela est possible. L'électrification dans des sites isolés nécessite un investissement initial important, mais permet de réaliser des économies de carburant à long terme et de réduire l'exposition à la volatilité du prix du diesel.	Moyen Les ressources en minéraux critiques du Canada constituent un atout concurrentiel important. L'avantage réside dans la protection et la maximisation de leur valeur alors que les économies alliées rebâtissent leurs chaînes d'approvisionnement autour de sources plus fiables et à plus faible empreinte carbone.

Secteurs	Actions prioritaires	Avantage en matière de compétitivité économique
Chantiers à long terme à surveiller et à préparer		
Produits chimiques et plastiques	Électrifier le chauffage industriel là où c'est réalisable et soutenir la démonstration de vapocraqueurs électrifiés et du captage du carbone dans les installations chimiques; développer les infrastructures de recyclage mécanique et chimique, normaliser l'étiquetage et la collecte des plastiques, et élargir et améliorer les programmes de responsabilité élargie des producteurs (REP); faire progresser la recherche sur les matières premières à faibles émissions de carbone (hydrogène à faible teneur en carbone, carbone capté et biomasse) afin de remplacer à long terme les intrants d'origine fossile.	Faible À plus long terme, l'électricité propre du Canada et son accès au gaz naturel pourraient lui permettre de se tailler une place dans la production chimique électrifiée et dans les matières premières à base d'hydrogène à faible teneur en carbone, même si la plupart des technologies de décarbonation de base en sont encore au stade du projet pilote ou de la démonstration.
Agro-alimentaire	Réduire les émissions de méthane; électrifier les opérations en amont; intégrer le CSC dans les principales installations.	Moyen Grâce à sa position actuelle solide d'exportateur dans le domaine de l'agroalimentaire, le Canada a comme avantage concurrentiel de garder une longueur d'avance sur le resserrement des exigences en matière de carbone et de durabilité sur les marchés à forte valeur ajoutée, ce qui lui permet de préserver son accès à ces marchés et de renforcer sa position dans les segments haut de gamme.
Pétrole et gaz	Réduire les émissions de méthane; électrifier les opérations en amont; intégrer le CSC dans les principales installations.	Moyen Le secteur pétrolier et gazier du Canada reste un atout économique important, avec des infrastructures et des relations commerciales bien établies. Un enjeu de compétitivité consiste à maintenir l'accès aux marchés où l'intensité des émissions affecte de plus en plus la valeur.