



SNC • LAVALIN

MARS 2021



Ingénierie Net Zéro

RAPPORT TECHNIQUE CANADIEN



Ingénierie
Net Zéro

En partenariat avec notre planète

NOTRE PLAN DIRECTEUR POUR UN AVENIR CARBONEUTRE



Table des matières

1. QUELLE EST LA SITUATION AU CANADA AUJOURD'HUI ?	1
A. Facteurs déterminants	1
B. Conséquence de l'inaction	2
C. Approche et méthodologie	2
D. Contexte canadien	3
E. Tendances canadiennes des émissions de GES	5
F. Cadre stratégique canadien	5
G. Considérations relatives à la COVID-19	6
H. Quelle est la situation actuelle au Canada ?	7
H1. Pétrole et gaz	7
H2. Transports	9
H3. Bâtiments	10
H4. Industrie lourde	12
H5. Agriculture et foresterie	13
H6. Gestion des déchets	14
H7. Électricité	15
2. RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DANS TOUS LES SECTEURS ÉCONOMIQUES	17
A. Pétrole et gaz	17
A1. Méthodes de réduction des GES	17
A2. Qu'est-ce qui nous attend à long terme ?	18
B. Transports	19
B.1 Méthodes de réduction des GES	19
B.2. Qu'est-ce qui nous attend à long terme ?	21
C. Bâtiments	22
C1. Méthodes de réduction des GES	22
C2. Qu'est-ce qui nous attend à long terme ?	24

D.	Industrie lourde	25
	D1. Méthodes de réduction des GES.....	25
	D2. Qu'est-ce qui nous attend à long terme?	26
E.	Agriculture et foresterie	28
	E1. Méthodes de réduction des GES.....	28
	E2. Qu'est-ce qui nous attend à long terme?	28
F.	Gestion des déchets	29
	F1. Méthodes de réduction des GES.....	29
	F2. Qu'est-ce qui nous attend à long terme?	29
3.	LE PORTRAIT ÉLECTRIQUE CANADIEN	31
A.	Instantané du secteur de l'électricité	31
	A1. Bouquet de production d'électricité	31
	A2. Demande d'électricité	34
	A3. Commerce de l'énergie.....	34
	A4. Transport et distribution de l'électricité	34
	A5. Structure du marché de l'électricité	37
B.	Bouquet énergétique actuel	40
	B1. Hydroélectricité	40
	B2. Énergie nucléaire	43
	B3. Gaz naturel.....	43
	B4. Énergie éolienne	44
	B5. Énergie solaire.....	44
	B6. Énergie houlomotrice, marémotrice et géothermique	44
C.	Un Canada, un réseau de transport	46
D.	Difficultés de réalisation	48
E.	Qu'est-ce qui nous attend à long terme?	50
	E1. Électrification totale.....	50
	E2. Soutien au développement accéléré de nouveaux projets d'énergie propre	51
	E3. Réseau de transport pancanadien	51

E4.	Réseau intelligent et Internet des objets pour mieux gérer les actifs de distribution	51
E5.	Stockage d'énergie à l'échelle du réseau.....	51
E6.	Centrales électriques à cycle combiné à l'hydrogène	51
E7.	Production décentralisée d'énergie renouvelable et construction de microréseaux	51
E8.	Recherche et développement sur la production d'énergie propre	51
4.	TRANSITION VERS UNE ÉCONOMIE CARBONEUTRE	53
A.	Vers un système carboneutre en 2050	53
B.	À quoi ressemblera un système carboneutre en 2050 ?	56
B1.	Électrification.....	57
B2.	Production d'électricité	58
C.	Transport d'électricité.....	62
C1.	Hydrogène.....	63
C2.	Système carboneutre en 2050	63
D.	Besoin urgent et immédiat de projets d'infrastructure	65
E.	Mesures immédiates recommandées	66
	CONTRIBUTEURS DU RAPPORT	69
	ANNEXE 1 APERÇU DES TECHNOLOGIES ÉMERGENTES EN VUE DE LA CARBONEUTRALITÉ	71
A	Hydrogène	71
A1.	Que sont l'hydrogène vert et l'hydrogène bleu ?	71
A2.	Quel est le rôle de l'hydrogène dans la décarbonisation ?	72
A3.	Techniques de production d'hydrogène	73
A4.	Défis du déploiement de l'hydrogène.....	74
B.	Captage du carbone.....	75
B1.	QU'EST-CE QUE LE CAPTAGE ET STOCKAGE DU CARBONE (CSC) ? ..	75
B2.	Aperçu du processus	76
B3.	Techniques et défis du CSC	76

C.	Numérisation : Internet des objets, mégadonnées et intelligence artificielle	79
C1.	Avantages des mégadonnées, de l'Internet des objets et de l'intelligence artificielle pour la décarbonisation	80
C2.	L'exemple des services d'électricité numériques.	80
D.	Stockage d'énergie	82
D1.	Avantages du stockage d'énergie pour la décarbonisation	83
D2.	Défis du stockage d'énergie.	83

RÉFÉRENCES 85

Figures

FIGURE 1	TENDANCES DES ÉMISSIONS DE GES PAR SECTEUR ÉCONOMIQUE [RÉF. 5]	4
FIGURE 2	VENTILATION DES ÉMISSIONS DE GES DU SECTEUR PÉTROLIER ET GAZIER [RÉF. 9]	6
FIGURE 3	TENDANCES DES ÉMISSIONS DE GES DANS LE SECTEUR DES TRANSPORTS – CANADA [RÉF. 12]	8
FIGURE 4	ÉVOLUTION HISTORIQUE DANS LE SECTEUR DES BÂTIMENTS	10
FIGURE 5	VENTILATION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE DU SECTEUR DES BÂTIMENTS COMMERCIAUX [RÉF. 15]	11
FIGURE 6	RÉPARTITION DES ÉMISSIONS DE GES DU SECTEUR DE L'ÉLECTRICITÉ [RÉF. 12]	15
FIGURE 7	INTENSITÉ DES ÉMISSIONS DE GES DE L'ÉLEVAGE DE BÉTAIL CANADIEN [RÉF. 38]	27
FIGURE 8	BOUQUET DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ DU CANADA. RNC 2017 [RÉF. 40]	32
FIGURE 9	DEMANDE TOTALE D'ÉLECTRICITÉ AU CANADA, 2017 [RÉF. 49]	35
FIGURE 10	CAPACITÉ DE TRANSFERT ACTUELLE ET PROPOSÉE EN MW ENTRE LES PROVINCES CANADIENNES ET LES ÉTATS AMÉRICAINS [RÉF. 50]	37
FIGURE 11	STRUCTURE DU MARCHÉ PROVINCIAL ET EXPLOITANTS DE RÉSEAU	39
FIGURE 12	POTENTIEL D'HYDROÉLECTRICITÉ AU CANADA [RÉF. 51]	41
FIGURE 13	PRODUCTION D'ÉNERGIE NUCLÉAIRE AU CANADA AJOUTÉE AU RÉSEAU DEPUIS 1971 [RÉF. 54]	42

FIGURE 14	AJOUT DE PUISSANCE ÉOLIENNE AU RÉSEAU DE 2008 À 2019 [RÉF. 40]	45
FIGURE 15	AJOUT DE PUISSANCE SOLAIRE AU RÉSEAU DE 2008 À 2019 [RÉF. 40]	45
FIGURE 16	CONCEPT DE RÉSEAU CANADIEN EST-OUEST	47
FIGURE 17	CONSTRUCTION DE LA CAPACITÉ DE PRODUCTION : BESOINS HISTORIQUES ET BESOINS FUTURS	56
FIGURE 18	COMPARAISON DE LA PRODUCTION ENTRE 2020 ET 2050 PAR SOURCE	60
FIGURE 19	VISION DU RÉSEAU ÉNERGÉTIQUE CARBONEUTRE EN 2050	64
FIGURE 20	EFFICACITÉ DES PROCÉDÉS RELATIFS À L'HYDROGÈNE	75
FIGURE 21	CAPTAGE ET STOCKAGE DU CARBONE (CSC) [REF. 101]	78
FIGURE 22	RÉSEAU ÉLECTRIQUE CONVENTIONNEL	81
FIGURE 23	RÉSEAU ÉLECTRIQUE MODERNE	82
FIGURE 24	SERVICES OFFERTS PAR LE STOCKAGE PAR BATTERIE	83

Tableaux

TABLEAU 1	SECTEUR AGRICOLE — SOURCES D'ÉMISSIONS ET PUIITS PAR ACTIVITÉ [RÉF. 22]	13
TABLEAU 2	CONTRIBUTION DES ÉMISSIONS PAR PROCESSUS AU CANADA — SECTEUR DE L'AGRICULTURE [RÉF. 20]	14
TABLEAU 3	CONTRIBUTION DES ÉMISSIONS PAR PROCESSUS AU CANADA — SECTEUR DE LA GESTION DES DÉCHETS [RÉF. 5]	14
TABLEAU 4	DÉFIS ET POSSIBILITÉS DANS LE SECTEUR DU BÂTIMENT	24
TABLEAU 5	DIFFICULTÉS DE RÉALISATION D'UN PROJET	50
TABLEAU 6	APERÇU DES TECHNIQUES DE CAPTAGE DU CSC	77
TABLEAU 7	PROJETS DE CSC AU CANADA	79

An aerial photograph of a city skyline at sunset. The sun is low on the horizon, casting a warm, golden glow over the buildings. The CN Tower is the most prominent structure, standing tall on the right side of the frame. The city is densely packed with skyscrapers and residential buildings. In the foreground, a large body of water is visible, with several boats and a pier. The overall atmosphere is serene and modern.

PROMOUVOIR UN AVENIR CARBONEUTRE

1. Quelle est la situation au Canada aujourd'hui ?

A. Facteurs déterminants

En décembre 2019, le gouvernement du Canada a annoncé son intention de rendre l'économie nationale carboneutre d'ici 2050. La réalisation de cet objectif ambitieux pourrait mettre un terme à la contribution du Canada au réchauffement planétaire et aider à faire du pays un chef de file mondial en matière de technologies et de pratiques à faibles émissions dans tous les secteurs économiques.

Les énormes changements nécessaires auront une incidence sur tous les aspects de notre vie, que ce soit notre façon de voyager, de chauffer notre maison et d'assurer la sécurité alimentaire et sanitaire de nos collectivités ou encore de produire notre électricité, d'exécuter nos procédés industriels ou de puiser de façon responsable dans nos riches ressources naturelles – toutes les facettes de notre existence seront, d'une certaine façon, touchées par cette révolution.

Au cœur de cette transformation absolument nécessaire se trouve la question suivante : « comment pouvons-nous passer à un système sans émissions nettes tout en poursuivant les progrès économiques et sociaux exigés au cours des 30 prochaines années ? » En cette époque où notre économie et nos industries subissent les contrecoups de la catastrophique crise de la COVID-19, nous avons l'occasion de repenser notre façon de faire les choses.

Une approche fragmentaire ne fonctionnera pas. Le Canada doit opter pour une solution globale, qui arrive au bon moment dans tous les secteurs économiques. Une bonne stratégie se concentrera simultanément sur la réduction de la demande

et sur la décarbonisation de l'approvisionnement en énergie. Si nous voulons que le pays atteigne réellement la carboneutralité, nous devons nous appuyer sur les principes suivants :

- Le déploiement simultané de technologies émergentes et perturbatrices – ce qui ne se produira pas sans une intervention gouvernementale d'envergure ;
- Une meilleure coordination entre les industries, les secteurs, les gouvernements provinciaux et les collectivités ;
- Des cadres économiques et financiers bien définis, et des outils tels que des taxes sur le carbone et autres mesures incitatives, afin de stimuler le changement nécessaire ;
- L'établissement d'une législation pancanadienne visant à réduire la demande énergétique dans tous les domaines de l'environnement bâti, ainsi que l'implantation de mesures d'efficacité énergétique et la remise en état des actifs actuels de cet environnement.

En tant qu'ardente partisane des objectifs de développement durable des Nations Unies, SNC-Lavalin s'est engagée à soutenir activement la conception de solutions carboneutres dans le monde. En 2019, elle a publié un rapport technique intitulé Engineering Net Zero [réf. 1], qui souligne à l'intention du gouvernement du Royaume-Uni les risques et les difficultés techniques devant être surmontés pour atteindre la carboneutralité en 2050.

Atteindre cette cible d'envergure requiert un sentiment d'urgence qu'on ne saurait surestimer.

Une action immédiate, efficace et concertée s'impose à tous les niveaux de la société, de l'industrie et du gouvernement, et nous croyons fermement que les Canadiens sauront relever le défi.

B. Conséquence de l'inaction

Le réchauffement de la planète menace notre mode de vie, que ce soit en raison de la hausse du niveau de la mer, qui entraîne des déplacements de population, ou de phénomènes météorologiques extrêmes, qui causent des dommages importants aux sociétés et mènent à l'instabilité socioéconomique. Si les émissions mondiales continuent d'augmenter, on prévoit que le maintien du statu quo conduira à une hausse de 4 à 5 °C de la température moyenne mondiale d'ici 2100, entraînant des impacts climatiques graves et généralisés [réf. 2], tels que des risques accrus d'inondation, l'impossibilité de pratiquer des activités extérieures dans certaines régions, la perte de biodiversité et des extinctions massives et des menaces à l'approvisionnement alimentaire, qui ont des répercussions disproportionnées sur les populations pauvres ou vulnérables. Une hausse de température de 4 °C [réf. 3] pourrait exposer près de 70 % de la population mondiale à d'importants risques de crue des cours d'eau. Nous sommes également confrontés à des risques de franchir des « points irréversibles », ce qui « pourrait entraîner des changements climatiques considérables et extrêmement persistants [réf. 2] ».

Nous avons aujourd'hui l'occasion d'inverser la tendance. Pour cela, nous pourrions alimenter une grande partie de nos activités actuelles par de l'électricité propre ; l'abandon des sources d'énergie émettrices de gaz à effet de serre (GES) a d'ailleurs lentement commencé. Cependant, nous approchons des limites de ce que la technologie actuelle permet de réaliser en ce qui concerne la carboneutralité pour les secteurs énergivores, comme le pétrole et le gaz, l'industrie lourde et le transport lourd.

Toutefois, comme l'a souligné le Forum économique mondial [réf. 4], la transition vers un système carboneutre n'est pas suffisamment rapide, et les répercussions économiques de la crise de la COVID-19 pourraient interrompre la récente dynamique de la lutte contre les changements climatiques. Nous avons besoin de plans de relance nationaux qui viennent soutenir les initiatives de transition énergétique vers la carboneutralité.

C. Approche et méthodologie

L'environnement figurant parmi les priorités des Canadiens, les industries ont désormais comme mission de trouver des moyens de réduire leurs émissions et leurs répercussions environnementales grâce à l'innovation. Les leçons retenues de cette démarche aideront à faire des industries canadiennes les chefs de file des technologies à émissions de carbone faibles ou nulles. Toutefois, un objectif aussi ambitieux ne sera pas facile à atteindre sans des efforts et des investissements soutenus dans des solutions économiquement viables.

Dans notre réalité canadienne, nous devons accorder une attention particulière aux questions suivantes :

- Comment mettre fin à l'utilisation de combustibles émetteurs de GES dans les régions éloignées ?
- Qu'en est-il du secteur des transports des marchandises, qui est essentiel à la livraison des biens, mais qui dépend beaucoup des combustibles fossiles pour ses besoins énergétiques ?
- Dans le secteur du bâtiment, sera-t-il possible de moderniser à temps tous les biens au moyen de mesures d'efficacité énergétique ?
- Comment la production des matières premières de base s'adaptera-t-elle à la nouvelle réalité ?
- Qu'en est-il des limites des installations de captage du carbone ?
- Les technologies de remplacement sont-elles vraiment carboneutres ?
- Dans quelle mesure pouvons-nous compter sur les puits de carbone, comme les nouvelles forêts et les terres agricoles ?
- Les marchés des combustibles de remplacement (p. ex. l'hydrogène) seront-ils en place à temps ?

Nous tentons de répondre à certaines de ces questions dans les sections qui suivent.

S'appuyant sur l'expertise de SNC-Lavalin dans divers domaines technologiques, ce rapport recommande des mesures clés nécessaires pour relever les défis de taille qui attendent le Canada sur les plans de la conception, de l'ingénierie, de la construction et de l'exploitation et de l'entretien, parallèlement à une transformation fondamentale des comportements et des modes de vie de la société, si l'on veut réduire les émissions de carbone. Grâce à son expérience directe dans la planification, la conception et l'exécution de projets de grande envergure dans les secteurs de l'électricité, de l'agriculture, des transports, des hydrocarbures, de la construction, de l'industrie, de la gestion des déchets et du traitement de l'eau, notre entreprise dispose d'un point de vue unique sur l'interdépendance entre le changement de comportement, la demande énergétique et la distribution de l'énergie à l'échelle mondiale.

Cette analyse est étayée par des consultations internes auprès d'experts en la matière de SNC-Lavalin et éclairée par les publications du gouvernement du Canada et de l'industrie, et elle examine les projets prioritaires qui peuvent être déployés à court terme.

D. Contexte canadien

Le Canada bénéficie d'un territoire vaste, qui contribue à la diversité de ses ressources, mais qui pose également le problème de conditions météorologiques et d'un relief difficiles, dont il faut tenir compte dans le choix, la conception et le déploiement de nouvelles technologies. Sa population est concentrée dans le Sud, regroupée dans une poignée de grandes villes, mais elle est également répartie dans des collectivités éloignées éparpillées sur un vaste territoire, dont beaucoup dépendent des combustibles fossiles pour le chauffage et le transport sur de grandes distances. De plus, l'augmentation de la population et l'expansion des collectivités accroissent les émissions de GES rejetées par les transports, les bâtiments, l'agriculture, l'élimination des déchets et la gestion de l'eau.

Le Canada est aussi un pays riche en ressources naturelles, et son économie comprend d'importants secteurs énergivores qui émettent beaucoup de GES, comme l'industrie pétrolière et gazière, les mines, les pâtes et papiers, le fer et l'acier, le ciment, les fonderies et le raffinage ainsi que l'industrie chimique, qui sont de gros employeurs d'un océan à l'autre.

Ses ressources en hydrocarbures ont toujours été coûteuses à produire et à exporter comparativement à celles d'autres pays, mais elles constituent néanmoins un segment important de son économie diversifiée.

Pour ces raisons, l'économie canadienne est très gourmande en énergie ; elle a produit en 2018 des émissions nettes de 729 Mt éq. CO₂, soit 19,7 t éq. CO₂ par habitant, ce qui fait du pays l'un des plus gros émetteurs de GES par habitant au monde, même si cette proportion a baissé par rapport à 2005 (elle était alors de 22,6 t éq. CO₂/habitant) [réf. 5].

Les réseaux électriques du Canada, qui sont en grande partie alimentés par l'hydroélectricité et le nucléaire, sont actuellement gérés à l'échelle provinciale et au moyen d'interconnexions est-ouest limitées. Le pays bénéficie d'un surplus d'énergie, mais la plupart des interconnexions électriques visent à exporter l'électricité vers son voisin du sud, les États-Unis, tandis que la planification et l'équilibre des réseaux interprovinciaux demeurent très restreints, sauf pour quelques interconnexions clés.

Malgré le vaste territoire, les entreprises d'électricité canadiennes ont pu relever le défi du transport de cette ressource sur de longues distances. Hydro-Québec est un exemple parfait d'utilisation de lignes de transport à très haute tension (735 kV) pour acheminer l'hydroélectricité des régions éloignées du Nord vers les agglomérations à forte demande du sud de la province et vers les États-Unis, pour son exportation. Les grands projets de transport et de distribution ont profité à la province d'un point de vue économique et ont permis le développement économique des collectivités éloignées.

En ce qui concerne le stockage naturel du carbone, on a estimé qu'en 2018, l'aménagement forestier et les perturbations naturelles sur les terres forestières aménagées ont entraîné une absorption nette de GES de 146,2 Mt éq. CO₂, dont 129 Mt éq. CO₂ provenant des produits ligneux récoltés, mais aussi des terres humides et des établissements, résultant en une capacité d'absorption de 13 Mt éq. CO₂ [réf. 5].

En raison de ses abondantes ressources d'électricité non productrices de GES, le Canada fait partie d'un groupe très sélect de pays capables d'électrifier la plupart de leurs secteurs pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050. Néanmoins, l'électrification complète n'est pas envisageable pour certaines industries énergivores qui n'auront pas facilement accès au réseau électrique, comme les exploitations minières éloignées, le transport routier lourd et certains procédés industriels, ainsi que pour les collectivités éloignées. Il s'agit alors de développer, dans ces secteurs qui demeureront dépendants des combustibles fossiles, des procédés et des technologies plus propres, comme le captage et le stockage du carbone (CSC) ou d'utiliser des combustibles de remplacement, comme l'hydrogène, pour maintenir les activités tout en atteignant la carboneutralité. Cette approche rendrait ces activités notablement plus coûteuses, ce qui pourrait servir de catalyseur à l'innovation, mais risquerait également de nuire à la compétitivité de ces secteurs, une conséquence indésirable qu'il faut éviter.

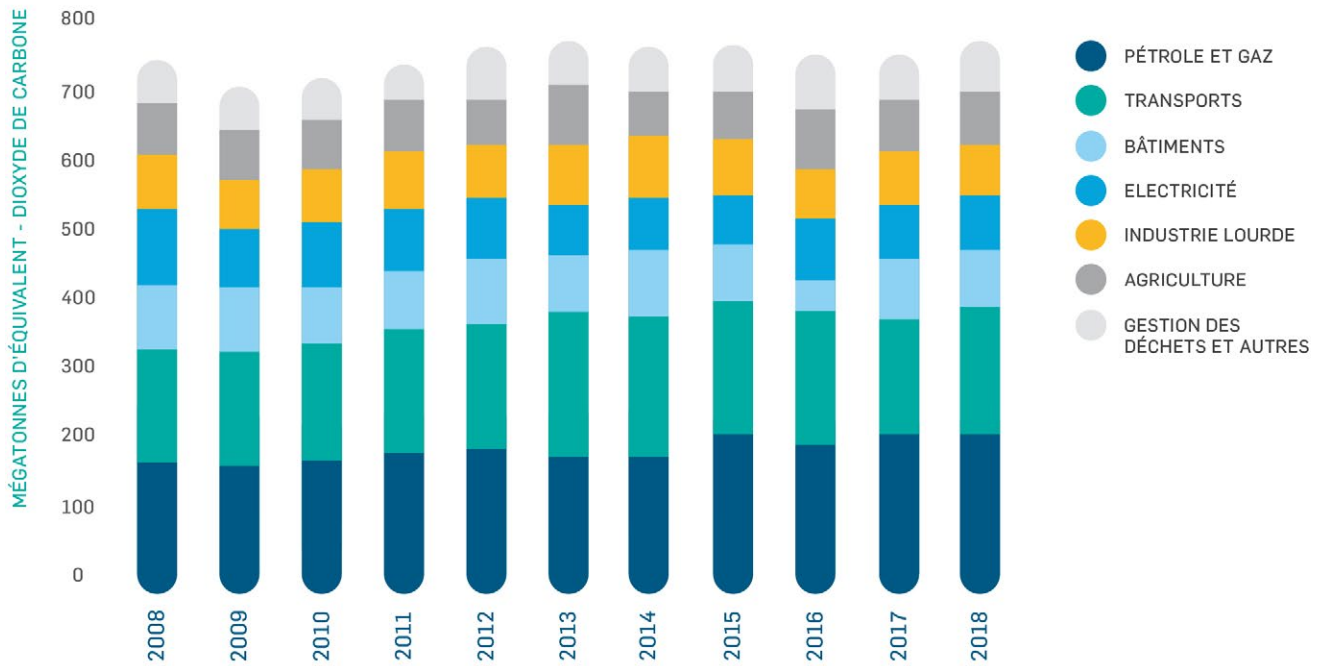


FIGURE 1 TENDANCES DES ÉMISSIONS DE GES PAR SECTEUR ÉCONOMIQUE [RÉF. 5]

Ce ne sont là que quelques-uns des défis uniques que le Canada devra relever pour faire la transition vers une économie entièrement carboneutre. Toutefois, si ce changement est correctement mis en œuvre, il offrira également de grandes possibilités de croissance et de développement économique pour de nombreuses années à venir.

E. Tendances canadiennes des émissions de GES

La figure 1 illustre les tendances historiques des émissions de GES par secteur économique. Les émissions totales au Canada sont en grande partie stables depuis 2005, malgré la croissance économique et démographique. Bien que ce constat soit encourageant, il souligne également le défi monumental qui nous attend : nous allons dans la bonne direction, mais pas assez vite. Deux secteurs ont connu une augmentation considérable, soit le pétrole et le gaz et les transports, tandis que d'autres, comme l'électricité, ont enregistré une baisse marquée.

F. Cadre stratégique canadien

Le Canada s'est engagé à lancer des initiatives de décarbonisation, et plusieurs cadres sont déjà en place pour réduire les émissions dans tous les secteurs.

Parmi ces initiatives, mentionnons le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques (Cadre pancanadien), qui vise une réduction de 30 à 40 % des émissions d'ici 2030 [réf. 6] et la Stratégie canadienne de développement à faibles émissions de gaz à effet de serre à long terme pour le milieu du siècle [réf. 7], plus ambitieuse. Le récent engagement à l'égard de la carboneutralité vise à éliminer le solde final de CO₂ d'ici 2050, ce qui sera complexe sur les plans technique et économique.

Une modification de cette ampleur des cibles à long terme aura des répercussions sur les politiques à court terme et sur les priorités d'investissement du gouvernement dans tous les secteurs économiques. Elle nécessite une approche stratégique bien conçue et axée sur les changements clés dans tous les domaines.

Pour qu'une politique ou une initiative soit réussie, elle doit tenir compte des dépendances intersectorielles. Par exemple, la transition vers des systèmes électrifiés pour les transports, l'exploitation minière et les procédés industriels ne sera pas possible sans la mise en place d'un système électrique carboneutre pour répondre à la demande d'électricité connexe. Il est également important que l'économie soit solide pour que ces transformations ne créent pas un fardeau financier qui étouffe le développement.

Une politique bien conçue cherchant à réduire les émissions devra accorder la priorité à l'électrification générale, ainsi qu'aux procédés clés comme l'hydrogène et le captage du carbone. La planification devra faire appel aux intervenants intersectoriels et interprovinciaux, et les conseils devront être fondés sur des preuves scientifiques exhaustives.

Cependant, le concept de carboneutralité ne semble pas avoir été parfaitement défini. Notre examen initial des rapports accessibles au public n'a pas révélé de stratégie détaillée sur la façon dont le Canada atteindra cet objectif d'ici 2050. Le Cadre pancanadien [réf. 6] publié en 2016 énonce de nombreuses initiatives stratégiques visant à réduire les émissions de CO₂, mais ne prévoit ni l'implantation détaillée de ces politiques ni leur incidence sur les émissions.

Une remise en question stratégique à long terme de la structure du secteur énergétique est nécessaire pour dépasser les simples projets incitatifs et se diriger vers un système économique dans lequel les investisseurs et les promoteurs favorisent le déploiement de technologies carboneutres partout au pays. Comme il est probable que l'objectif de carboneutralité remettra en question les hypothèses historiques, il devra se trouver au cœur des développements sectoriels.

G. Considérations relatives à la COVID-19

Au moment de la rédaction du présent rapport, la COVID-19 continue à avoir des effets. La pandémie a des répercussions certaines sur une grande partie de nos vies, sur la façon dont nous interagissons avec nos familles, nos amis et nos collègues, sur notre relation avec le reste du monde. En quelques mois seulement, nos vies ont été radicalement modifiées, et nous essayons de réinventer des concepts de base, comme le lieu de travail, les déplacements pour les affaires et les loisirs, les chaînes d'approvisionnement, les systèmes de santé ou les communications.

On ne sait pas encore si cette situation transformera fondamentalement notre mode de vie. Dans tous les cas, elle a certainement accéléré des révolutions qui étaient déjà amorcées, comme le passage au travail à distance, le magasinage en ligne ou les réunions et les rencontres virtuelles. L'intérêt des consommateurs pour les produits locaux a également augmenté parce que les chaînes d'approvisionnement internationales sont perçues comme risquées, mais aussi par solidarité avec les entreprises locales qui ont été touchées par les fermetures. Indirectement, elle aura également une incidence sur les émissions de carbone dues aux nouveaux paradigmes sociaux et économiques.

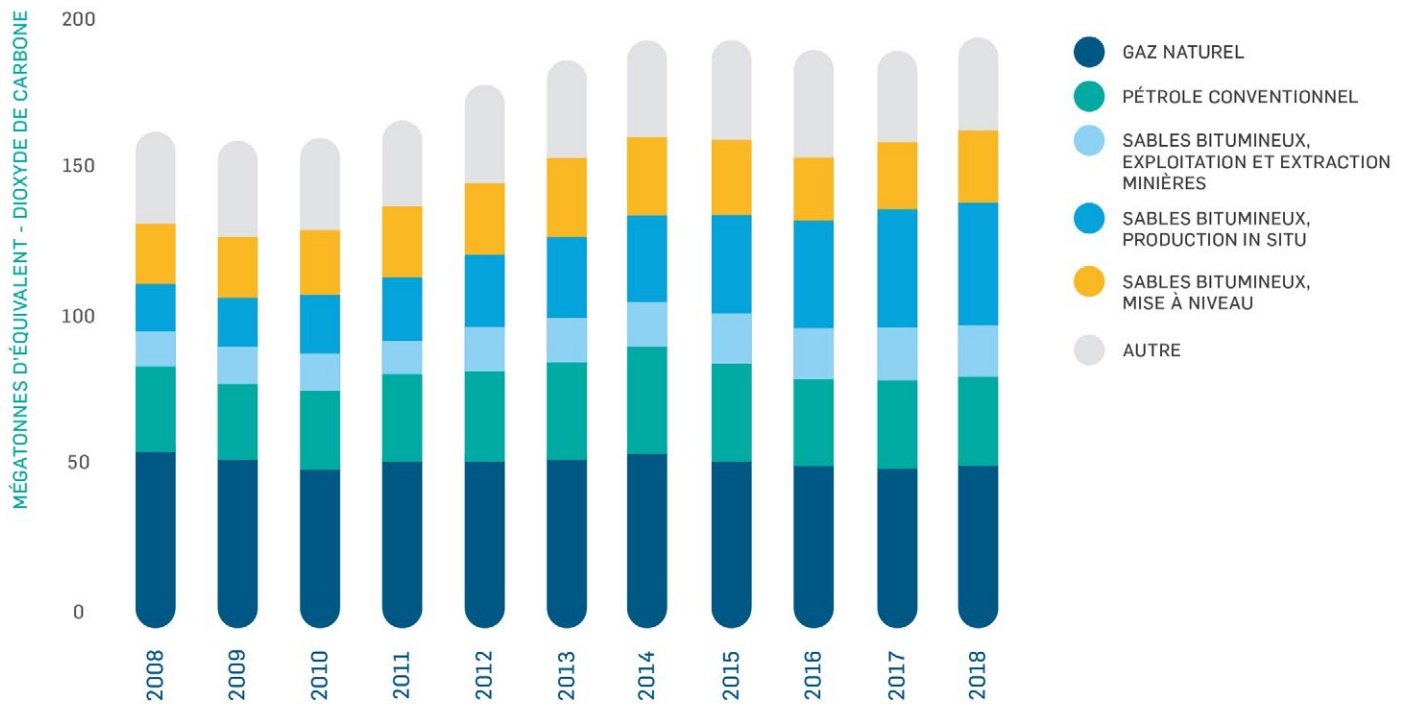


FIGURE 2 VENTILATION DES ÉMISSIONS DE GES DU SECTEUR PÉTROLIER ET GAZIER [RÉF. 9]

Dans le présent rapport, la crise causée par la COVID-19 est traitée comme un événement qui accélère les tendances préexistantes à moyen terme. On suppose également que les projections sur un horizon de 30 ans sont toujours valables. En fait, les plans sur 30 ans sont conçus de manière à comporter un degré de résilience leur permettant de demeurer pertinents même en cas de perturbation à court terme. L'objectif devrait plutôt être de présenter un plan solide pour la transition vers une économie carboneutre en 2050, suffisamment stable pour des innovations, des investissements et des projets d'envergure qui prennent une décennie ou plus à se concrétiser, mais assez souple pour qu'il puisse être révisé en cas de perturbations majeures en cours de route.

La pandémie de COVID-19 a démontré que les forces de la nature peuvent nous submerger en très peu de temps.

Nous ne disposons que d'un étroit créneau pour prendre les mesures qui préviendront une catastrophe encore plus grave à cause des changements climatiques. Cette fois-ci, nous sommes prévenus et nous devons agir maintenant. Ce document souligne l'énorme travail à accomplir d'ici 2050 pour atteindre la carboneutralité au Canada.

H. Quelle est la situation actuelle au Canada ?

Cette section donne un aperçu des secteurs économiques canadiens ainsi que des principales questions liées à la décarbonisation.

L'évaluation est étayée par la Stratégie canadienne de développement à faibles émissions de gaz à effet de serre à long terme pour le milieu du siècle [réf. 7], le Cadre pancanadien [réf. 6] et le rapport sur la décarbonisation en profondeur (Pathways to deep decarbonization in Canada) [réf. 8], complétés par nos observations sur les questions que nous jugeons essentielles à la décarbonisation de chaque secteur. Par souci de cohérence, l'analyse offerte dans le présent rapport associe les émissions de GES du Canada aux secteurs déjà définis par le gouvernement fédéral [réf. 5].

H1. PÉTROLE ET GAZ

Le secteur pétrolier et gazier, qui affiche le plus fort taux d'émissions de carbone de tous les secteurs au Canada, jouera un rôle central dans la transition vers une économie carboneutre du point de vue de la prospérité économique, de l'innovation et de la sécurité des ressources. Avant tout, nous devons nous concentrer sur la réduction des émissions de GES dans l'atmosphère, qui résultent en grande partie de la combustion de combustibles fossiles. Cela nécessitera une approche intersectorielle.

Le secteur pétrolier et gazier a connu une croissance importante au Canada ces dix dernières années, ce qui a également entraîné une augmentation des émissions de GES à cause des sables bitumineux qui émettent beaucoup plus de GES que le pétrole classique (figure 2). En effet, les émissions provenant de la production de pétrole classique ont augmenté de 24 % entre 1990 et 2018, contre 456 % pour les émissions issues de la production de sables bitumineux, dont plus de la moitié résultant de la production in situ [réf. 9]. La production de gaz naturel à partir de sources non conventionnelles, par exemple par fracturation multiétapes, aurait également augmenté de façon significative.

Avant la COVID-19, « l'industrie mondiale des hydrocarbures commençait à émerger de l'une des plus grandes récessions de son histoire » et il y avait « tout lieu de penser que le regain des activités d'investissement [se poursuivrait] à l'échelle mondiale ». Cependant, malgré la demande mondiale continue de pétrole et de gaz, le Canada perd des parts de marché en raison des coûts de production élevés, qui sont encore amplifiés par le manque d'accès aux conduites de distribution [réf. 11]. Néanmoins, selon les dernières prévisions énergétiques de la Régie de l'énergie du Canada [réf. 10], la production de pétrole brut devrait atteindre un pic en 2039, avant de baisser jusqu'en 2050, quoique son niveau demeurerait au-dessus des valeurs actuelles. On prévoit que la production de gaz naturel atteindra son maximum en 2040. Ceci porte à croire que le Canada aura besoin d'une stratégie à long terme de captage du carbone.

À l'heure actuelle, les émissions de GES du secteur pétrolier et gazier sont plafonnées à 100 Mt éq. CO₂ dans le cadre d'initiatives gouvernementales comme le Cadre pancanadien [réf. 6]. De plus, les installations de production sont beaucoup plus efficaces qu'il y a dix ans. À cela s'ajoutent les mécanismes provinciaux et fédéraux de plafonnement et d'échange, qui visent à inciter les industries à accroître leur efficacité. Néanmoins, dans le contexte de l'objectif de carboneutralité en 2050, des émissions résiduelles de 100 Mt éq. CO₂ dans l'industrie des sables bitumineux ne sont pas viables.

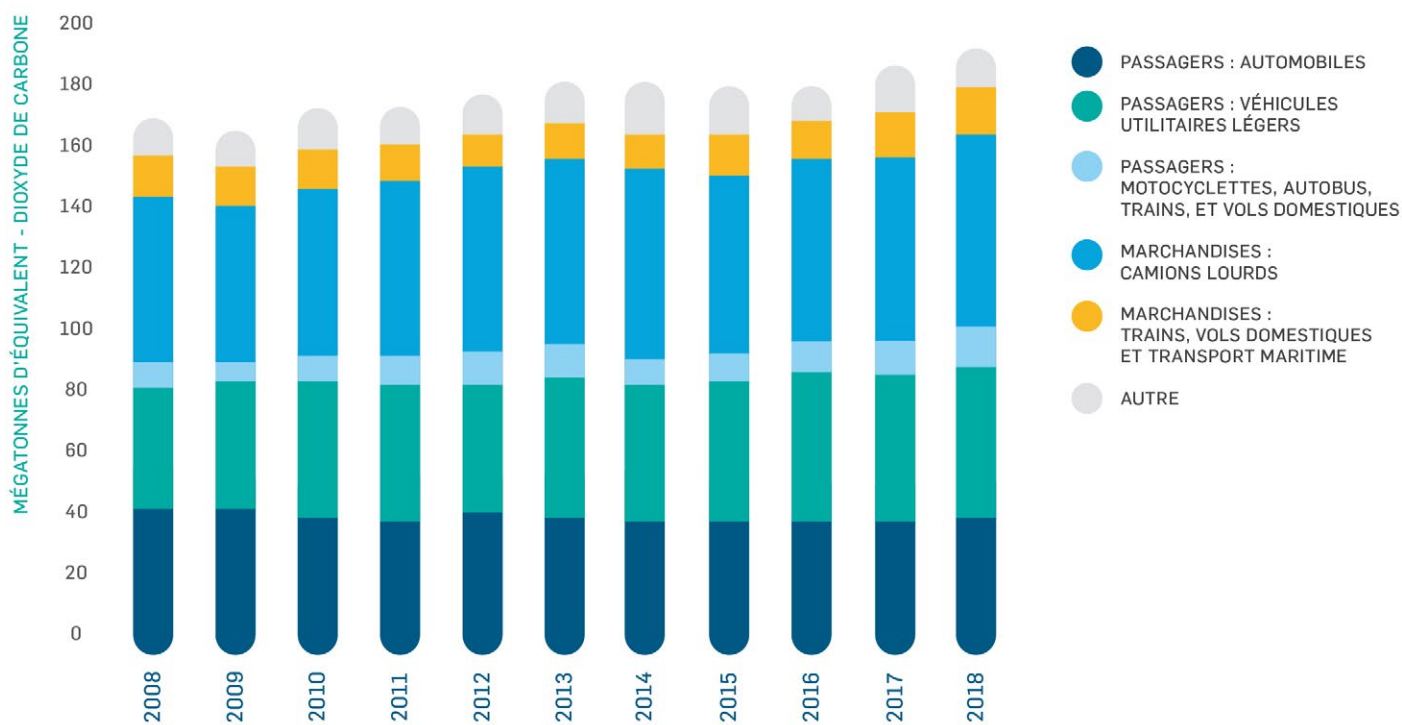


FIGURE 3 TENDANCES DES ÉMISSIONS DE GES DANS LE SECTEUR DES TRANSPORTS — CANADA [RÉF. 12]

H2. TRANSPORTS

En 2018, le secteur des transports représentait environ 25 % (185 Mt éq. CO₂) des émissions du Canada, ce qui en faisait le deuxième émetteur de carbone après le secteur pétrolier et gazier [réf. 5]. Bien que l'efficacité énergétique ait augmenté dans ce secteur au fil des ans, la situation ne s'est pas améliorée, car les émissions de GES qui lui sont attribuables ont continué de croître, avec une hausse de 19 % entre 2010 et 2018 [réf. 12].

Comme on pouvait s'y attendre, la plupart des émissions provenant des transports au Canada découlent du transport routier, qui comprend le transport personnel (utilitaires et camions légers) et le transport par véhicule lourd [réf. 5]. En fait, « [l]es émissions produites par les utilitaires légers et les camions de marchandises ont continué d'augmenter. Ces hausses s'expliquent par l'augmentation des ventes [...] » [réf. 12].

Comme l'illustre la figure 3, bien que les Canadiens utilisent aujourd'hui des moyens de transport plus efficaces, ce n'est pas suffisant pour compenser la hausse du nombre de véhicules sur la route et du kilométrage parcouru, qui a entraîné une augmentation des émissions.

Dans la réalité d'aujourd'hui, de plus en plus de gens achètent des camions légers et des VUS par souci de commodité [réf. 12]. L'impact est évident si l'on examine la tendance relative aux émissions enregistrées pour les utilitaires légers de transport de passagers, qui montre une augmentation durable d'une année à l'autre, malgré les gains d'efficacité attribuables à l'application des normes sur les carburants. Cela a des répercussions négatives sur les émissions du secteur des transports, car ces types de véhicules ont tendance à être moins écoénergétiques que les véhicules plus petits et plus compacts.

En 2019, le nombre total de véhicules immatriculés au Canada dépassait les 35 millions. Le segment des véhicules légers, qui comprend les automobiles, les camions légers et les fourgonnettes, représente environ les deux tiers de ces véhicules, tandis que les véhicules moyens et lourds en constituent environ 5 %. Ces derniers émettent à peu près la même quantité de GES, comme indiqué à la figure 3, parce que leurs moteurs sont plus gros et qu'ils parcourent de plus grandes distances [réf. 13]. Par conséquent, du point de vue des émissions de GES, le secteur des véhicules moyens et lourds requiert autant d'attention que celui des véhicules légers. L'augmentation des émissions des camions lourds, constante depuis 1990, est directement liée à l'accroissement de la population et du commerce mondial.

H3. BÂTIMENTS

Le secteur canadien des bâtiments a une longue histoire de développement constant. En plus de la hausse de la construction résidentielle et commerciale observée au début des années 1990, on a également constaté ces dernières années une augmentation des bâtiments à usage mixte, ainsi qu'une croissance dans le secteur commercial [réf. 14].

La chronologie qui suit illustre l'évolution des exigences d'efficacité énergétique concernant la construction immobilière au cours des 20 dernières années [réf. 14, réf. 5, réf. 6] :

Le secteur canadien des bâtiments, qui comprend les bâtiments résidentiels, commerciaux, institutionnels et industriels, contribue de façon importante aux émissions de GES. Il produit environ 12 % du total, ce qui en fait le troisième émetteur en importance après les secteurs du pétrole et du gaz et des transports [réf. 5].

BÂTIMENTS INDUSTRIELS

Les bâtiments industriels abritent une grande variété d'activités et de processus. La complexité des diverses exigences relatives aux procédés industriels constitue une difficulté lorsqu'il s'agit d'élaborer des critères applicables à grande échelle aux bâtiments. Les nouveaux bâtiments industriels doivent se conformer à des exigences minimales fixées par des codes, mais sont dispensés des cibles de conformité plus rigoureuses, comme la voie de conformité facultative du code du bâtiment de la Colombie-Britannique, le BC Energy Step Code.

En raison de l'absence de normes ou de lignes directrices pour les bâtiments industriels, ces derniers présentent à la fois des risques et des possibilités dans le secteur des bâtiments. L'intégration de l'exploitation des bâtiments aux processus internes peut offrir d'intéressantes possibilités pour la transition vers une économie carboneutre, grâce à l'utilisation créative de l'énergie résiduelle et de la production d'électricité locale. Certaines des mesures exigent d'importants investissements de capitaux et dépendent uniquement des procédés industriels. La modernisation des bâtiments industriels posera les mêmes défis que celle des autres types de bâtiments.

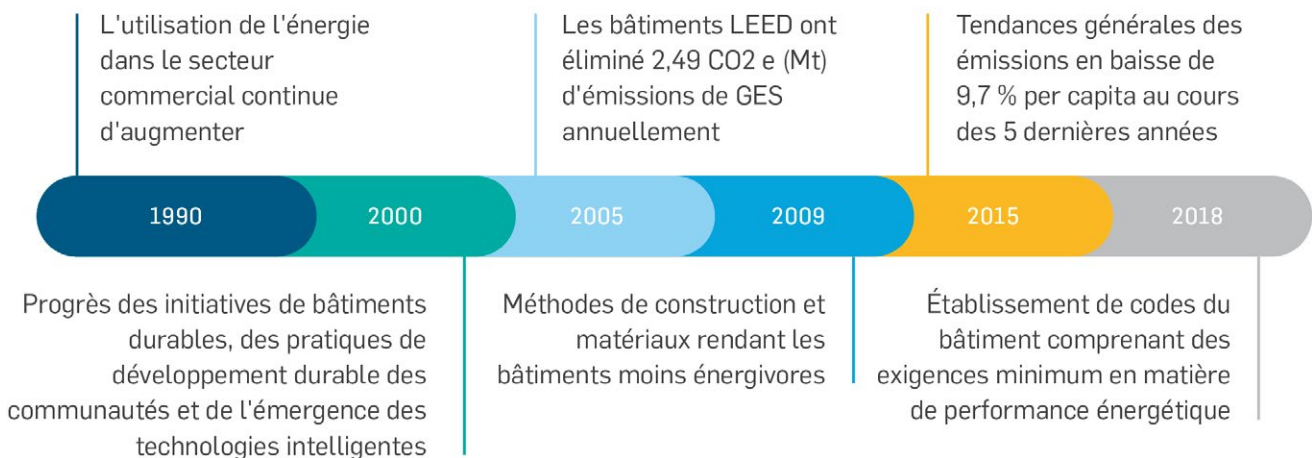


FIGURE 4 ÉVOLUTION HISTORIQUE DANS LE SECTEUR DES BÂTIMENTS

BÂTIMENTS COMMERCIAUX

Le secteur commercial comprend les bureaux, les espaces de vente au détail, les entrepôts et les immeubles institutionnels. La figure 5 présente une ventilation de la consommation d'énergie du secteur.

Le passage à des bâtiments commerciaux moins énergivores peut être attribué à l'avancée des normes et certifications relatives aux bâtiments, comme le processus de certification LEED. Les bâtiments construits après 2009 sont en moyenne 15 % moins gourmands en énergie que ceux bâtis entre 2000 et 2009 [réf. 15]. Bien qu'un virage vers une meilleure efficacité énergétique ait été amorcé, il faut fixer des objectifs supplémentaires dans le secteur commercial afin de garantir aux propriétaires un équilibre entre efficacité énergétique et rendement du capital investi.

Une approche purement volontaire, comme LEED, qui est laissée aux forces du marché, ne sera pas aussi efficace qu'une réglementation en matière de rendement pour changer la façon dont les bâtiments sont conçus, en partie en raison de la longueur de la période de récupération de l'investissement pour les propriétaires qui cherchent à se moderniser. En revanche, l'efficacité énergétique a été intégrée dans l'infrastructure bâtie en Europe par le biais d'une législation obligatoire sur le rendement énergétique.

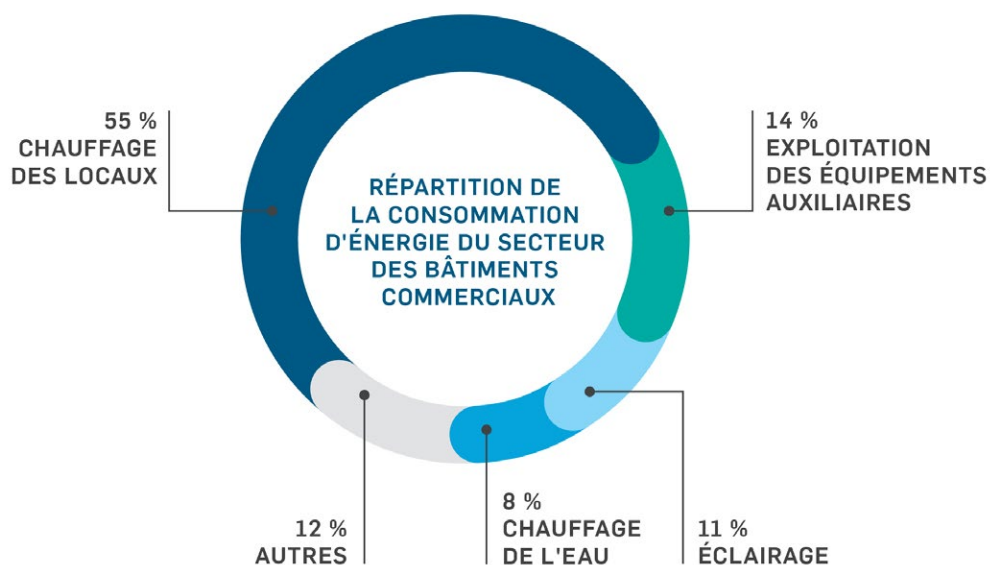


FIGURE 5 VENTILATION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE DU SECTEUR DES BÂTIMENTS COMMERCIAUX [RÉF. 15]

SECTEUR RÉSIDENTIEL

Les bâtiments résidentiels au Canada représentent 14 % de la consommation d'énergie de la population, soit plus que les 12 % du secteur commercial [réf. 15]. Autrefois, les ménages canadiens avaient recours à des modes de chauffage traditionnels, comme les combustibles fossiles, mais avec les nouvelles maisons dotées de systèmes écoénergétiques, nous nous dirigeons lentement vers un chauffage utilisant des solutions propres (électricité issue des énergies renouvelables, géothermie et chauffage urbain, énergie solaire thermique, etc.).

La consommation d'énergie d'un ménage canadien se répartit de la manière suivante [réf. 16] :

- Chauffage des locaux (62,4 % de la demande totale d'utilisation finale) ;
- Chauffage de l'eau (18,7 % de la demande totale d'utilisation finale) ;
- Énergie nécessaire à l'alimentation des appareils ménagers, à l'éclairage et à la climatisation (18,9 % de la demande totale d'utilisation finale).

Partout au Canada, de nombreuses résidences utilisent l'électricité pour le chauffage, et c'est dans les provinces froides de l'Est qu'on trouve les taux d'utilisation les plus élevés. Pour réaliser des changements dans le secteur du bâtiment afin de réduire les émissions de GES, il sera essentiel d'investir dans le chauffage des locaux et de l'eau.

Le secteur résidentiel comprend de nombreux immeubles vieillissants partout au Canada, qui doivent être modernisés selon des mesures d'efficacité. Il nécessitera de faire des investissements considérables dans les matériaux à faibles émissions de carbone intrinsèque, en plus de veiller à ce que tous les nouveaux aménagements soient conçus de façon à répondre à des normes d'efficacité énergétique plus élevées.

H4. INDUSTRIE LOURDE

Selon le gouvernement canadien, le secteur de l'industrie lourde produit actuellement 10,8 % des émissions de GES du Canada, avec 79 Mt éq. CO₂ par année [réf. 5]. Depuis l'Accord de Paris, on examine au Canada les moyens possibles de les réduire dans les secteurs pétrolier et gazier et des transports, mais moins dans l'industrie lourde. Cela est lié au fait que les aciéries, les raffineries, les mines, les usines de papier, les cimenteries et diverses usines de produits chimiques emploient des procédés industriels différents et présentent un profil de production de GES différent. Des moyens particuliers de réduire les émissions de carbone font l'objet de discussions dans diverses industries, mais il n'y a pas de solution universelle pour atteindre l'objectif de carboneutralité dans l'ensemble de ce secteur.

Les émissions de GES dans l'industrie lourde ont diminué de façon constante au cours des 30 dernières années, principalement en raison de la baisse de la dépendance aux combustibles fossiles, d'une plus grande efficacité énergétique et de l'amélioration des procédés dans les divers secteurs d'activité. Selon l'Agence internationale de l'énergie [réf. 17], si toutes les usines de la planète étaient modernisées pour utiliser les meilleures technologies actuellement disponibles, la consommation d'énergie mondiale (et les émissions de GES) baisserait seulement d'environ 20 %. Ceci est dû au fait que la concurrence et les tendances du marché ont déjà poussé une partie importante de ce secteur à utiliser les processus de production les plus récents. Pour atteindre la carboneutralité, il faudra des processus, des technologies et des solutions novateurs pour éliminer les 80 % d'émissions de GES restants.

H5. AGRICULTURE ET FORESTERIE

Dans le domaine de l'agriculture, le Canada, comme d'autres pays, doit relever le défi de disposer d'aliments nutritifs, abordables et fiables pour répondre aux besoins de sa population de façon durable dans les décennies à venir. Le pays est particulièrement dépendant des importations alimentaires, en plus d'exporter quelques produits clés, une situation qui doit être soigneusement considérée lorsqu'on détermine les mesures qui permettraient au secteur agricole d'atteindre la carboneutralité.

À l'échelle mondiale, les Nations Unies estiment que la demande alimentaire « nécessitera une augmentation substantielle de la production globale d'aliments de 70 pour cent d'ici 2050 » [réf. 18] [réf. 19]. Le Canada a le privilège de posséder la deuxième masse continentale en importance et d'abondantes ressources d'eau douce, pour une population relativement réduite. Toutefois, cette donnée peut être trompeuse, puisque seule une petite partie des terres disponibles convient à la production alimentaire. On estime aussi que le pays possède une réserve de biocapacité élevée, c'est-à-dire que son empreinte écologique due à la production alimentaire peut être adéquatement compensée par un secteur agricole bien géré [réf. 20].

En plus de l'agriculture, le secteur forestier canadien représente une importante source d'emplois et de revenus et a le potentiel, s'il est bien géré, de servir de puits de CO₂. Comme 42 % de son territoire est déjà couvert de forêts, le Canada est naturellement un des plus gros producteurs de produits forestiers au monde et se classe au deuxième rang en matière d'exportation.

Les émissions de GES produites par l'agriculture et la foresterie peuvent être divisées en plusieurs processus producteurs ou absorbeurs de GES, comme l'illustre le tableau 1 [réf. 22].

PROCESSUS	PRODUITS LIBÉRÉS
Fermentation entérique provenant de l'élevage de bétail	Méthane
Gestion du fumier	Méthane et oxyde nitreux
Oxydation des sols fertilisés	Oxyde nitreux
Combustion de produits agricoles et forestiers à des fins non énergétiques	Dioxyde de carbone
Restauration des terres et remise en état (puits)	Dioxyde de carbone

TABLEAU 1 SECTEUR AGRICOLE — SOURCES D'ÉMISSIONS ET PUIITS PAR ACTIVITÉ [RÉF. 22]

Selon le gouvernement du Canada, « le territoire agricole canadien est depuis environ 1990 un puits de CO₂ en valeur nette. Il reste que, récemment encore, cette réduction de CO₂ sur le territoire agricole était contrebalancé par les pertes de carbone imputables à de nouvelles mesures de conversion agricole de forêts ou de prairies. Ce n'est que depuis l'an 2000 en gros que ce territoire est devenu un puits net de CO₂ une fois pris en compte cette conversion à l'agriculture. » [réf. 22].

On estime que les émissions directes des secteurs agricole et forestier demeureront relativement constantes — entre 76 et 79 Mt éq. CO₂ par an — entre 2020 et 2030. Il est possible de répartir les principaux contributeurs selon l'activité, comme le montre le tableau 2 [réf. 20].

PROCESSUS	CONTRIBUTION
Combustion et émissions non liées à l'énergie en agriculture et en foresterie	23%
Production de bétail	49%
Cultures agricoles	28%

TABLEAU 2 CONTRIBUTION DES ÉMISSIONS PAR PROCESSUS AU CANADA – SECTEUR DE L'AGRICULTURE [RÉF. 20]

H6. GESTION DES DÉCHETS

Avec des émissions de GES de 18 Mt éq. CO₂ en 2018, soit 2,4 % du total, le secteur de la gestion des déchets est le plus faible émetteur de tous les secteurs. Les émissions de GES dans ce domaine peuvent être divisées de la façon illustrée au tableau 3, la principale source étant l'élimination des déchets solides municipaux dans les sites d'enfouissement et de déchets ligneux dans les sites d'enfouissement destinés aux déchets de bois industriels [réf. 5].

PROCESSUS	CONTRIBUTION
Élimination des déchets solides	69,2 %
Traitement biologique des déchets solides	2,6 %
Traitement et rejet des eaux usées	6,3 %
Incinération et brûlage à ciel ouvert des déchets	2,3%
Sites d'enfouissement de déchets de bois industriels	19,6 %

TABLEAU 3 CONTRIBUTION DES ÉMISSIONS PAR PROCESSUS AU CANADA – SECTEUR DE LA GESTION DES DÉCHETS [RÉF. 5]

Bien que cela ne transparaisse pas dans les chiffres sur les émissions de GES concernant ce secteur, nous devons analyser notre comportement sociétal en ce qui concerne nos habitudes de consommation. Selon Environnement et Changement climatique Canada [réf. 7], « [A]u Canada, le gaspillage alimentaire évitable est évalué à 31 milliards de dollars par année », le réacheminement des matières organiques demeurant très faible comparativement à des pays comme l'Allemagne ou les États-Unis. Sur le plan mondial, le gaspillage alimentaire et la surconsommation en général sont sans aucun doute des facteurs importants d'émissions de GES, et il faut s'y attaquer par l'éducation, la sensibilisation, ainsi que par des encouragements économiques, afin de réaliser le changement social nécessaire pour atteindre et maintenir des cibles de carboneutralité.

En outre, il faut rester conscients de notre dépendance à l'égard des produits pétrochimiques, comme les produits de plastique à usage unique, que nous devons réduire ou éliminer dans notre vie quotidienne, sur notre chemin vers la carboneutralité. L'annonce du gouvernement canadien d'interdire l'utilisation des plastiques à usage unique d'ici 2030 est une étape importante vers cette fin [réf. 23].

H7. ÉLECTRICITÉ

Les émissions de GES du secteur de l'électricité (figure 6) ont considérablement diminué en raison de la mise hors service des centrales au charbon en Ontario en 2014. Actuellement, alors que le charbon entre dans environ 7 % de la production d'électricité au Canada, il est la source des deux tiers des émissions totales du secteur. Par conséquent, la fermeture des centrales au charbon en Alberta, en Saskatchewan, en Nouvelle-Écosse et au Nouveau-Brunswick devrait entraîner une réduction importante des émissions de GES dans le domaine.

La production d'électricité au Canada est de plus en plus verte : 60 % provient de l'hydroélectricité, 15 % du nucléaire et environ 7 % des autres sources d'énergie renouvelable. La production d'énergie renouvelable a connu une hausse constante de 16 % entre 2010 et 2018 et devrait augmenter considérablement au cours de la prochaine décennie, car les énergies renouvelables deviennent très concurrentielles par rapport aux sources énergétiques conventionnelles et dans le contexte de la réduction des émissions de GES.

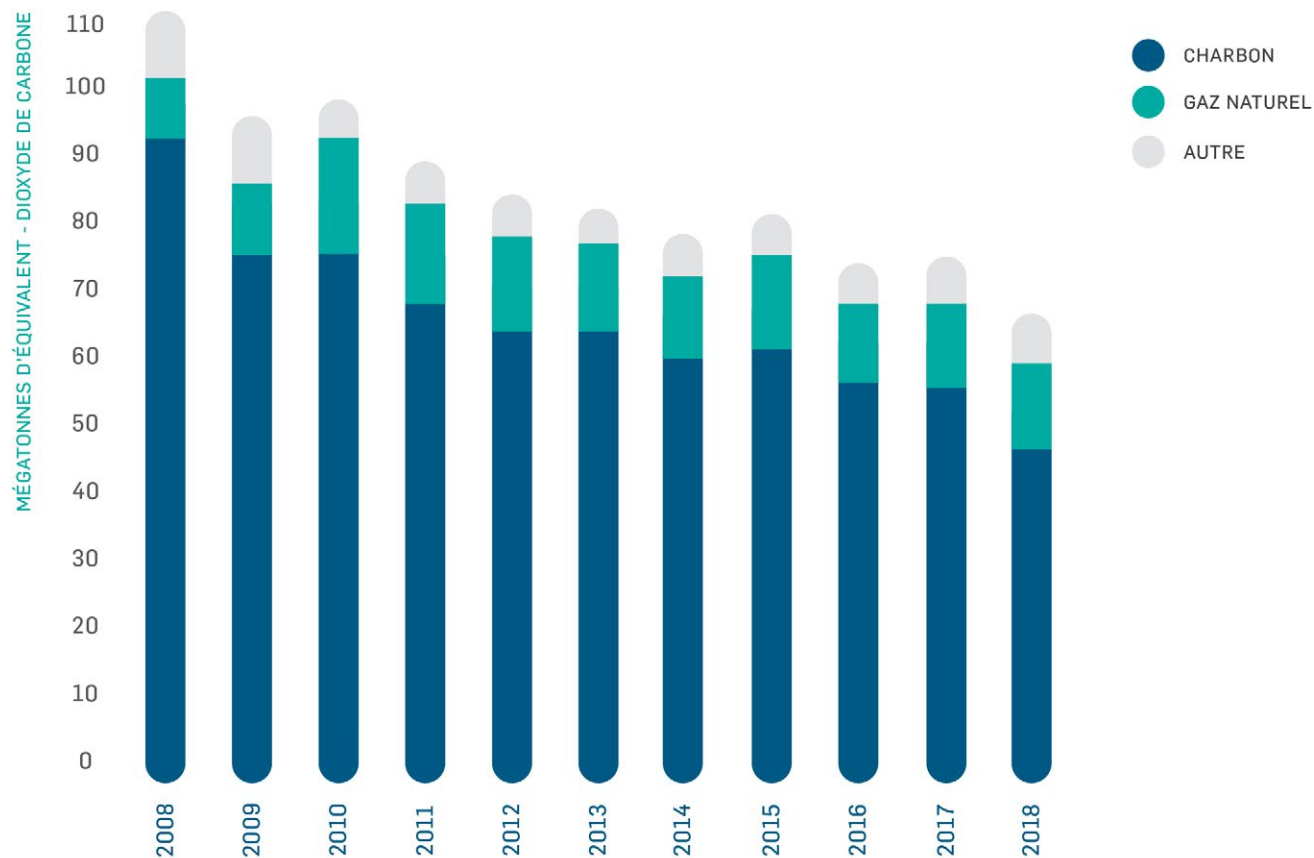


FIGURE 6 RÉPARTITION DES ÉMISSIONS DE GES DU SECTEUR DE L'ÉLECTRICITÉ [RÉF. 12]



AGIR AUJOURD'HUI POUR QUE DEMAIN SOIT CARBONEUTRE

2. Réduction des émissions dans tous les secteurs économiques

A. Pétrole et gaz

A1. MÉTHODES DE RÉDUCTION DES GES

Les initiatives lancées par le gouvernement ces dernières années ont permis de maintenir la hausse des émissions de GES à un rythme inférieur à celui de la croissance de la production. Ces programmes comprennent la réduction des émissions de méthane et d'hydrofluorocarbures (HFC) et l'amélioration de l'efficacité des procédés industriels, ainsi que l'investissement dans les technologies d'avenir décrites dans le Cadre pancanadien [réf. 6]. À l'échelle provinciale, plusieurs initiatives ont été mises sur pied ; par exemple, la *Climate Technology Task Force* [réf. 24], l'*Alberta Emission Offset System* [réf. 25] et le *Technology Innovation and Emissions Reduction Regulation* [réf. 26].

La décarbonisation du secteur pétrolier et gazier passe par la réduction des émissions de GES du cycle de production complet, qui commence par la ventilation du procédé et se concentre sur quelques étapes critiques. L'extraction du pétrole, par exemple, comporte plusieurs étapes énergivores, comme le recours aux camions pour le transport ainsi que le broyage des roches en fluides. Il existe déjà plusieurs options de réduction des GES, comme la modernisation des installations avec des technologies écoénergétiques utilisant des combustibles plus propres et les mécanismes de taxation du carbone imposés par les gouvernements, mais leurs résultats économiques ne sont pas toujours intéressants pour les investisseurs et risquent de rendre déraisonnables les coûts d'exploitation des projets.

Les coûts de ces mesures pourraient continuellement pousser les prix de la production du pétrole et du gaz vers le haut, et rendre les produits pétroliers et gaziers canadiens non concurrentiels sur le marché mondial. Le plan de carboneutralité devra réaliser un difficile équilibre afin d'assurer la transformation économique graduelle des régions et des collectivités qui dépendent fortement du marché des hydrocarbures pour leur prospérité économique.

Les sources renouvelables, qui pourraient fournir de l'énergie propre aux procédés d'extraction du pétrole et du gaz, ne se sont pas toujours révélées économiquement réalisables, et leurs coûts et leur empreinte ont ralenti leur mise en œuvre dans ce secteur en raison du prix au seuil de rentabilité relativement élevé du pétrole canadien.

De nombreuses sociétés pétrolières européennes ont pris la responsabilité de décarboniser et se diversifient au détriment des activités pétrolières et gazières.

Cela soulève la question de savoir si l'élimination complète des émissions de GES dans l'extraction des combustibles fossiles sera un jour économiquement viable ou si elle a été jugée inaccessible par ces grands acteurs et les a ainsi poussés à désinvestir du secteur d'ici 2050.

A2. QU'EST-CE QUI NOUS ATTEND À LONG TERME ?

Il est probable que la production de sables bitumineux demeurera stable et que l'exploitation des mines actuelles connaîtra de nombreuses améliorations, mais il est peu probable que de nouvelles mines soient mises en valeur compte tenu de la réglementation environnementale et de la tendance générale de l'industrie. Par contre, on assistera probablement à une augmentation de la production pétrolière extracôtière, car l'accès aux ressources extracôtières est de plus en plus rentable. La production extracôtière pourrait rejeter moins d'émissions de carbone que l'exploitation des sables bitumineux si les sites étaient principalement alimentés à partir de la côte par les sources d'électricité propres dont disposent les provinces littorales.

Les procédés émergents, comme le CSC et l'hydrogène, pourraient s'avérer des solutions viables pour décarboniser l'extraction pétrolière et gazière à l'intérieur des terres; toutefois, l'innovation constante s'est révélée un défi dans le secteur pétrolier, notamment en raison de l'instabilité des marchés mondiaux. La fluctuation des prix du pétrole crée une menace supplémentaire sur les projets d'innovation, qui peuvent prendre de 10 à 15 ans avant que leur efficacité ne soit prouvée. Le gouvernement et l'industrie doivent appuyer l'élaboration de nouvelles technologies pendant les baisses de prix du pétrole et du gaz afin de soutenir l'innovation et de continuer sur cette lancée.

L'extraction pétrolière et gazière se poursuivra probablement à l'échelle mondiale tant qu'existera une demande de la part de diverses industries essentielles, comme l'alimentation et l'agriculture, les soins de santé, les communications ou les transports. Mais on ne sait pas encore si la production canadienne de pétrole et de gaz jouera un rôle dans le marché de demain. Les coûts élevés de la production pétrolière et gazière au Canada, et en particulier de l'extraction des sables bitumineux, indiquent le contraire et la situation risque d'être exacerbée par une réglementation accrue et par la taxe sur le carbone.

Néanmoins, nous ne devons pas perdre de vue la responsabilité sociale partagée de trouver des façons de répondre aux besoins de la société d'une manière respectueuse de l'environnement lors de la transition vers une économie carboneutre.

Dans l'ensemble, bon nombre des initiatives clés de réduction des émissions de carbone liées à l'extraction de pétrole et de gaz ont déjà débuté au Canada. Elles visent notamment à accroître l'efficacité des procédés industriels, à réduire les émissions de ces procédés au moyen de nouveaux outils technologiques, à plafonner la production de pétrole et de sables bitumineux, comme cela a déjà été fait, et à miser davantage sur le CSC. Toutefois, étant donné la tendance des émissions de GES ces dernières années, il est évident que les investissements dans ces technologies et procédés nouveaux doivent être considérablement accélérés pour atteindre la carboneutralité en 2050.

Tout plan réaliste d'atteinte de cet objectif dans le secteur pétrolier et gazier exigera des cibles intermédiaires plus claires et une répartition détaillée des solutions. Dans ce contexte, il est important de noter que les nouvelles technologies se heurtent souvent à d'exigeantes formalités en matière de délivrance de permis et prennent beaucoup de temps à mettre en œuvre, un problème qu'il faut régler de toute urgence. En outre, les investissements réalisés dans la technologie jusqu'à présent sont largement insuffisants pour un objectif aussi ambitieux. Un soutien sans failles sera nécessaire pour simplifier la réglementation, augmenter le financement du développement technologique et maintenir des cibles intermédiaires et des indicateurs de rendement clé clairement définis.

Enfin, la création de marchés de l'hydrogène qui incitent les exploitants pétroliers et gaziers à se tourner vers cette nouvelle ressource est un élément important de la solution. Il faut accélérer la recherche sur l'hydrogène, et si cette ressource est jugée viable, sa commercialisation doit s'accompagner d'une chaîne d'approvisionnement résiliente et accessible et de prix prévisibles.

TIRER PARTI DES SOLUTIONS INTERSECTORIELLES

La réduction des émissions de carbone dans le secteur pétrolier et gazier dépendra sans aucun doute des progrès et des investissements dans d'autres secteurs, notamment l'électricité et les transports. En ce qui concerne l'électricité, il faut une énergie sans émissions et abordable pour alimenter les sites. Pour ce qui est des transports, les véhicules doivent transitionner vers une combinaison d'énergie électrique et de carburants propres.

De plus, le comportement des consommateurs doit radicalement changer pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles. Au Canada, la plupart des gens conduisent encore des véhicules à essence, et un nombre important d'immeubles résidentiels et commerciaux sont encore chauffés au gaz naturel. L'habitude de gaspiller entraîne une utilisation inefficace des plastiques et d'autres produits à base de pétrole. Il est urgent de lancer des projets visant à réduire la demande intérieure indirecte de produits pétroliers et gaziers.

B. Transports

B.1 MÉTHODES DE RÉDUCTION DES GES

Le secteur des transports offre d'énormes possibilités de réduction des émissions de GES grâce à l'électrification et à l'utilisation de carburants de remplacement comme l'hydrogène. L'élimination de la dépendance aux combustibles fossiles dans ce secteur permet non seulement de réduire les émissions rejetées par les tuyaux d'échappement, mais aussi celles provenant de la production de ces combustibles.

On dispose aujourd'hui des moyens technologiques d'électrifier entièrement les véhicules légers et moyens, les trains et les autobus. Bien qu'il subsiste des défis importants en ce qui concerne l'infrastructure de bornes de recharge, la durée de vie des batteries, l'autonomie et la durabilité, la situation s'est déjà améliorée et les fabricants d'automobiles et les services publics investissent de façon considérable dans l'électrification rapide et complète de ce secteur.

TRANSPORT ROUTIER

En 2018, les automobiles et les camionnettes ont rejeté 89,3 Mt éq. CO₂, soit 48 % de toutes les émissions de GES produites par le secteur. Ces véhicules sont des candidats de choix pour l'électrification à l'aide des technologies actuelles, ce qui réduira considérablement le carbone rejeté.

L'industrie du transport terrestre de marchandises est un autre grand émetteur de GES, avec 39 Mt éq. CO₂ (soit 21 % des émissions rejetées par le secteur) [réf. 27]. Les longues distances parcourues et le tonnage transporté par cette industrie présentent des défis pour l'électrification des véhicules. Les camions, qui sont responsables de la plupart des émissions du transport terrestre de marchandises, pourraient être particulièrement bien adaptés à la conversion aux piles à hydrogène au moyen de la technologie actuelle. La conversion des trains de marchandises aux carburants de remplacement est plus difficile et nécessite des données et des recherches approfondies.

Entre-temps, il est possible de réduire les émissions du transport routier en améliorant la consommation de carburant grâce à la mise en place de normes d'émissions pour les véhicules légers et les camions lourds. On pourrait atteindre une réduction de 30 % des émissions d'ici 2030 par rapport au niveau de 2005 dans le transport routier si les constructeurs automobiles respectaient des normes d'efficacité énergétique pour les véhicules à moteur à combustion interne. Toutefois, pour atteindre cet objectif ambitieux, il faudra des solutions techniques plus novatrices, en particulier pour le camionnage lourd [réf. 28].

AVIATION

Avec 20 Mt éq. CO₂, l'aviation civile représentait environ 11 % des émissions totales de GES produites en 2017, à cause de l'utilisation de carburéacteur [réf. 27]. L'électrification de ce secteur n'est pas envisageable en raison de l'autonomie limitée des batteries et du surcroît de poids qu'elles imposeraient aux avions. La faisabilité des avions à hydrogène a été testée au moyen d'études et de prototypes. Bien que cette évolution ait un certain attrait, son ampleur nécessiterait le remplacement global des parcs d'aéronefs, une revue de l'infrastructure aéroportuaire mondiale et l'obligation d'équiper tous les aéroports de départ et de destination pour pouvoir les accueillir.

Il existe une solution de recharge qui peut être mise en œuvre progressivement afin de tirer parti de l'équipement et de l'infrastructure actuels, le carburéacteur synthétique sans émissions [réf. 29]. Les carburants synthétiques produisent la même quantité de GES lorsqu'ils sont brûlés que le carburéacteur conventionnel ; l'amélioration découle du fait que sa production absorbe le CO₂, ce qui entraîne une réduction globale des émissions de CO₂.

TRANSPORT MARITIME

Avec 6 Mt éq. CO₂, le secteur maritime représentait environ 3 % des émissions du secteur des transports en 2017 [réf. 27]. Les distances franchies et le tonnage transporté par cette industrie, ainsi les conditions difficiles et l'éloignement dans lesquels ce transport s'effectue, posent des difficultés technologiques et opérationnelles importantes pour l'utilisation de batteries et de piles à hydrogène. La solution possible est l'emploi de petits réacteurs nucléaires semblables à ceux qui équipent actuellement certains navires militaires et une poignée de navires commerciaux dans le monde. Le problème ici n'est pas la disponibilité technologique, mais plutôt les obstacles associés au déploiement nucléaire commercial. En général, les centrales nucléaires répondent aux exigences de sûreté, d'autorisation, de

sécurité physique et de prévention des accidents du lieu et de la région où elles sont situées. Dans le cas d'une application civile mobile, il faudrait apporter des changements importants à la réglementation et au processus de délivrance de permis. Il est donc peu probable que le transport maritime se convertisse à la propulsion nucléaire de sitôt.

Plusieurs gouvernements provinciaux et le gouvernement fédéral ont imposé des obligations concernant les carburants de source renouvelable dans l'essence et le diesel. En vertu de la réglementation fédérale actuelle, les carburants offerts par les fournisseurs et les importateurs doivent avoir une teneur minimale en carburant de source renouvelable de 5 % pour l'essence et de 2 % pour le diesel [réf. 28].

Afin d'améliorer le pronostic actuel, le gouvernement du Canada a édicté quatre politiques assurant la transformation des émissions.

Ces quatre piliers sont [réf. 6] :

- Établir et mettre à jour des normes d'émissions pour les véhicules et améliorer l'efficacité des véhicules et des réseaux de transport ;
- Accroître le nombre de véhicules propres sur les routes canadiennes ;
- Soutenir le passage d'un mode de transport à plus faibles émissions en investissant dans l'infrastructure ;
- Investir dans la recherche et le développement de carburants plus propres.

B2. QU'EST-CE QUI NOUS ATTEND À LONG TERME ?

Les véhicules de nouvelle technologie, comme les véhicules électriques, à hydrogène, automatisés et connectés, ont le potentiel de réduire les émissions provenant du transport routier. Cette transformation comporte son lot de difficultés, notamment le coût, la disponibilité de l'infrastructure et de la capacité de fabrication, en plus des limites techniques, telles que l'autonomie et la durabilité des véhicules ainsi que la durée de vie des batteries.

Étant donné l'ampleur des émissions qu'il rejette, le secteur canadien des transports offre d'excellentes possibilités de réduction rapide des émissions globales de GES à l'aide de technologies éprouvées. L'électrification des automobiles et des véhicules de transport en commun et l'introduction de l'hydrogène dans l'industrie du camionnage peuvent réduire d'environ 82 % (150 Mt éq. CO₂) les émissions produites par le secteur. Il est également possible d'abaisser encore les émissions de GES par l'élimination de la production des carburants fossiles servant actuellement à faire fonctionner ces véhicules.

Les principales mesures fondamentales qui rendraient possible la transformation du secteur des transports d'ici au milieu du siècle sont les suivants :

ÉLECTRIFICATION

Le secteur des transports est de plus en plus relié au secteur de l'électricité, en plus de ses interdépendances traditionnelles avec le secteur pétrolier et gazier. Plus le parc automobile canadien s'électrifiera, plus il sera impératif de tirer parti du réseau électrique. Cette évolution posera toutefois plusieurs défis à l'infrastructure électrique actuelle.

L'installation de bornes de recharge dans tout le réseau nécessitera des mises à niveau stratégiques pour répondre aux nouvelles charges. De plus, pour rendre le réseau électrique le plus efficace possible, il faudra utiliser de nouvelles technologies afin de créer un réseau intelligent et de permettre aux véhicules d'agir comme moyen de stockage d'énergie et de soutenir la gestion de la charge. Enfin, utiliser les véhicules comme batteries potentielles donnera la possibilité d'ajouter des ressources intermittentes au réseau, comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne, ce qui rendra la production d'électricité moins dépendante des combustibles fossiles.

HYDROGÈNE BLEU ET VERT

L'électrification complète afin de disposer d'un réseau sans émissions pourrait exiger jusqu'à 700 TWh/an de nouvelle électricité de source renouvelable, en plus des 400 TWh/an nécessaires actuellement, ce qui demanderait l'aménagement d'une nouvelle infrastructure de production d'électricité offrant une capacité de production, de transport et de distribution double de ce que nous possédons aujourd'hui. La construction d'une telle infrastructure électrique ferait face à de nombreuses difficultés pratiques ; d'autres sources d'énergie propre sont donc nécessaires pour atteindre l'objectif de carboneutralité dans les transports [réf. 30].

Par conséquent, on s'attend à ce que l'hydrogène bleu et vert constitue une nouvelle source de carburant propre pour ce secteur. Cette transformation exigerait également une nouvelle infrastructure massive.

L'électrification du secteur des transports exige donc clairement un déploiement synchronisé de la production et de la distribution d'hydrogène bleu et vert, afin de profiter d'économies d'échelle. Cette planification multidisciplinaire est essentielle et aura des répercussions importantes sur d'autres secteurs économiques comme les transports, l'électricité et le pétrole et le gaz.

MÉLANGE DE BIOCARBURANTS

Une autre partie de la solution consisterait à remplacer dans le camionnage lourd et le transport maritime le diesel par des mélanges de biocarburants, soit l'éthanol et le biodiesel. Selon les études canadiennes sur la décarbonisation en profondeur, la teneur en biocarburant du mélange devra augmenter de façon constante, passant du faible pourcentage (2 à 5 %) actuellement exigé par la réglementation fédérale et provinciale à environ 90 % d'ici 2050 [réf. 8].

En 2016, le Canada se classait au cinquième rang mondial pour la production de biocarburants liquides, avec 1 700 millions de litres d'éthanol et 430 millions de litres de biodiesel. Le biocarburant représente environ 4,5 % de l'approvisionnement en énergie primaire totale au Canada. On s'attend à ce que sa contribution augmente graduellement en raison des changements prévus à la réglementation sur les carburants propres et de vastes ressources en biomasse du Canada [réf. 31].

Il convient toutefois de noter que la source des biocarburants est essentielle. En effet, la production de biocarburants dans le monde a donné naissance à des pratiques douteuses, avec la coupe de forêts pour cultiver les plantes entrant dans sa composition, ce qui menace les écosystèmes et va à l'encontre des initiatives environnementales et des efforts en cours pour atteindre la carboneutralité. Le Canada devrait être en mesure de produire des biocarburants sur son territoire et de garantir un approvisionnement en biocarburants éthiques à partir du marché international.

TRANSFERT MODAL DANS LE SECTEUR DU TRANSPORT DES MARCHANDISES

Le transfert modal consiste à délaissier le plus possible le camionnage lourd au profit du transport ferroviaire, qui utilise des moteurs électriques à haut rendement. Cette transformation peut réduire considérablement les émissions de GES du camionnage lourd à long terme, mais nécessitera des investissements importants dans l'infrastructure ferroviaire [réf. 28].

L'Association des chemins de fer du Canada estime qu'on pourrait réduire les émissions de GES annuelles de 5,6 Mt éq. CO₂ par le transfert d'à peine 15 % des marchandises transportées du camionnage au train. Les économies supplémentaires entraînées par la réduction de la congestion routière et de l'usure des réseaux routiers rendraient encore plus avantageux le transfert modal.

VÉHICULES AUTOMATISÉS ET CONNECTÉS

Les véhicules automatisés et connectés offriront des avantages environnementaux considérables, l'intelligence artificielle évoluant graduellement pour aider à résoudre les problèmes de congestion dans les grandes villes et pour améliorer l'efficacité énergétique et l'utilisation des véhicules. La fusion entre les véhicules autonomes et les services de covoiturage qui s'effectue actuellement, conjuguée à un changement sociétal, entraînerait une énorme réduction du nombre de véhicules légers sur la route [réf. 28].

Cependant, les véhicules automatisés et connectés nécessiteront des investissements majeurs dans l'infrastructure, afin de rendre possible l'adoption généralisée de la technologie, et leur déploiement devra être planifié et coordonné avec d'autres infrastructures au sein des villes et des collectivités intelligentes de demain.

C. Bâtiments

C1. MÉTHODES DE RÉDUCTION DES GES

Le gouvernement du Canada a envisagé plusieurs solutions prêtes au déploiement dans son rapport de 2018 intitulé Tracer la voie jusqu'en 2030 : Feuille de route pour la transformation du marché de l'équipement écoénergétique dans le secteur du bâtiment, Appuyer la transition vers une économie à faibles émissions de carbone [réf. 32]. La stratégie canadienne Canada pour les bâtiments [réf. 33] est un élément du Cadre pancanadien qui engage les gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux à élaborer et à adopter des codes du bâtiment qui accroissent l'efficacité énergétique. Elle renferme

des moyens d'améliorer l'efficacité des nouveaux bâtiments, comme la conception de maisons et de bâtiments commerciaux sans émissions grâce à des technologies fondées sur des modèles informatiques. D'autres approches sont aussi possibles, comme la modernisation des bâtiments existants, la collecte et le partage des données sur la consommation énergétique et l'amélioration de l'efficacité énergétique des électroménagers, de l'équipement et des fenêtres [réf. 32].

L'amélioration de l'efficacité des bâtiments permettra de réduire les émissions de GES, directement grâce à la baisse de la consommation de gaz naturel et autres combustibles émetteurs de GES et indirectement en réduisant la charge sur le réseau électrique due au chauffage.

Voici quelques exemples de technologies écoénergétiques qui méritent également de faire l'objet d'une recherche et développement plus approfondi.

CHAUFFAGE DES LOCAUX

Le chauffage des locaux représente plus de la moitié de la consommation d'énergie de notre pays dans les bâtiments résidentiels et commerciaux. Les appareils tels que les générateurs d'air chaud à condensation, les thermopompes géothermiques, les thermopompes à air pour climats froids, les thermopompes à gaz et autres dispositifs utilisant des procédés de pointe (p. ex. la thermie solaire, la microproduction combinée de chaleur et d'électricité) peuvent aider à réduire les émissions de carbone découlant de ce type de chauffage [réf. 32].

CHAUFFAGE DE L'EAU

Partout au Canada, le chauffage de l'eau constitue la deuxième source de consommation d'énergie dans les maisons, selon les données nationales sur les utilisateurs finaux recueillies par Ressources naturelles Canada en 2014. Les solutions actuelles de chauffage de l'eau comprennent les chauffe-eau à réservoir de stockage à condensation, les chauffe-eau à thermopompe électrique et au gaz, ainsi que d'autres procédés de pointe qui peuvent aider à réduire les émissions de carbone

découlant du chauffage de l'eau. Par exemple, le déploiement de chauffe-eau à thermopompe électrique augmenterait considérablement l'efficacité du chauffage par rapport aux résistances chauffantes électriques, mais ces systèmes ont peu été adoptés jusqu'à présent. Par conséquent, il faudra mener d'autres activités de promotion et de recherche et développement concernant les solutions de chauffage de l'eau [réf. 32].

FENÊTRES

Dans les bâtiments résidentiels, jusqu'à 35 % des pertes de chaleur peuvent être attribuées aux fenêtres. Les solutions modernes sont composées de différentes méthodes d'isolation à l'intérieur des panneaux de fenêtres afin de contenir ces pertes. Il s'agit notamment des blocs fenêtres à vitrage isolant comportant plusieurs panneaux de verre, des revêtements à faible coefficient d'émissivité, du remplissage de la cavité du vitrage par un gaz inerte (p. ex. argon ou krypton), de l'emploi de matériaux de charpente non métalliques et isolés thermiquement, ainsi que du calfeutrage et des mécanismes de verrouillage améliorés. D'autres systèmes de fenêtres à haute efficacité font actuellement l'objet de recherche et développement.

L'utilisation de normes d'efficacité énergétique en conjonction avec le système actuel de rabais sur l'énergie domestique devrait se poursuivre et s'effectuer à plus grande échelle [réf. 33], car les fenêtres demeurent l'une des principales causes de perte de chaleur dans les bâtiments.

ÉCLAIRAGE

Les récentes avancées dans le domaine de l'éclairage constituent un autre exemple remarquable d'amélioration de l'efficacité énergétique. Les ampoules fluocompactes et les ampoules à diodes électroluminescentes (DEL) consomment beaucoup moins d'énergie que les ampoules à incandescence traditionnelles [réf. 32]. De plus, elles sont maintenant un choix plus économique et pourraient constituer des dispositifs faciles à adopter.

C2. QU'EST-CE QUI NOUS ATTEND À LONG TERME ?

Le gouvernement du Canada devra jouer un rôle de premier plan dans l'adoption de codes du bâtiment plus stricts, en commençant par son parc actuel d'actifs, afin de tracer la voie pour les provinces. La recherche et développement d'innovations créatrices devra être pilotée par un groupe de travail solide afin de créer rapidement des changements entraînant la réduction des émissions de GES.

De plus, l'expérience au Royaume-Uni a montré que la clé pour une transformation plus vaste sur le marché était d'introduire une législation sur le rendement énergétique comportant des mesures obligatoires, car les forces du marché penchent souvent vers les investissements de capitaux initiaux les plus faibles.

DÉFIS ET POSSIBILITÉS

Atteindre l'objectif de carboneutralité dans le secteur du bâtiment d'ici 2050 demandera sans aucun doute de relever certains défis. En revanche, ce domaine recèle de possibilités qu'il devra rapidement saisir. Ces possibilités sont résumées au tableau 4.

DÉFIS	POSSIBILITÉS
<ul style="list-style-type: none"> • Normalisation et uniformisation de la réglementation en matière d'efficacité énergétique et adoption de codes du bâtiment dans tout le Canada. Actuellement, aucun code national de l'énergie ne s'applique aux bâtiments. • Adoption de politiques (mécanismes de tarification, approvisionnement, modèles de partenariat et réglementation). • Rapports entre coûts en capital et coûts d'exploitation. • Acceptation des coûts initiaux de modernisation et de construction. • Soutien continu des programmes de rabais et d'encouragement en matière d'énergie. • Passage de la chaîne d'approvisionnement à des technologies écoénergétiques et à des équipements et des matériaux à faibles émissions de GES. • Transformation des comportements sociaux dans les collectivités résidentielles, commerciales et institutionnelles. • Mécanismes déclenchant la mise à niveau des bâtiments existants. • Collectivités éloignées hors réseau. 	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration du bien-être collectif et de la productivité économique. • Municipalités et villes intelligentes offrant des modes de vie durables. • Immeubles à efficacité énergétique maximum grâce à des toitures faites de panneaux solaires [réf. 7]. • Dispositifs de chauffage urbain pour les bâtiments résidentiels et commerciaux utilisant des combustibles sans émissions. • Mobilisation rapide, sensibilisation et leadership dans les collectivités autochtones. • Financement supplémentaire pour les technologies écoénergétiques. • Modernisation des vieux bâtiments inefficaces. • Encouragements des services publics locaux pour stimuler le changement de combustible.

TABLEAU 4 DÉFIS ET POSSIBILITÉS DANS LE SECTEUR DU BÂTIMENT

À long terme, un mélange de production d'énergie verte sera combiné avec une version révisée du Code national du bâtiment et des normes de rendement obligatoire. Parmi les autres facteurs qui détermineront les résultats, on retrouvera un rendement intéressant de l'investissement pour les propriétaires et les promoteurs et un changement de comportement des gens en ce qui concerne la consommation d'énergie. Il sera également possible de brancher un plus grand nombre de collectivités au réseau grâce à la transition vers l'énergie urbaine, mais cela doit commencer par une réglementation axée sur le rendement dans toutes les industries.

TIRER PARTI DES SOLUTIONS INTERSECTORIELLES

L'électrification du secteur du bâtiment devrait être assortie d'une intensification des mesures d'efficacité énergétique, puisque les ménages canadiens continuent de consommer plus d'énergie chaque année. La demande d'électricité des villes devrait aussi rapidement augmenter à mesure que celles-ci se densifient. Le soutien du secteur de l'électricité sera essentiel pour le plan à long terme du secteur des bâtiments.

D. Industrie lourde

D1. MÉTHODES DE RÉDUCTION DES GES

Les principes guidant les moyens de réduire les GES dans le secteur de l'industrie lourde se sont traditionnellement concentrés sur l'efficacité énergétique et sur la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles. Sur le plan de l'efficacité énergétique, les capteurs et les systèmes SCADA qui suivent la consommation d'énergie et les pertes à tous les stades de la production sont aujourd'hui largement disponibles et l'informatique en nuage permet une analyse et une optimisation de processus beaucoup plus complexes. En ce qui concerne les combustibles fossiles, les améliorations comprennent non seulement l'électrification des procédés industriels, mais aussi une baisse de la consommation de ces combustibles. Par exemple, la foresterie et l'industrie des pâtes et papiers ont réussi à réduire leur dépendance aux combustibles fossiles de 75 % en se tournant vers la biomasse produite par leurs propres activités [réf. 34]. Alors qu'ailleurs dans le monde, l'industrie pétrochimique et les raffineries utilisent surtout le pétrole comme source d'alimentation, les usines canadiennes ont graduellement adopté le gaz naturel. L'exploitation du nickel au Canada produit moins de la moitié des émissions rejetées dans les autres pays [réf. 35].

Il est maintenant largement admis que même si les mesures d'électrification, d'efficacité énergétique et de réduction des combustibles fossiles sont nécessaires, elles ne seront pas suffisantes pour atteindre l'objectif ambitieux de carboneutralité fixé pour 2050. Il faudra concevoir d'autres procédés et technologies et réaliser des innovations en matière de combustion.

L'étude détaillée menée par le Dr Bataille [réf. 35], codirecteur du projet Deep Decarbonization Pathways Project (DDPP) et professeur auxiliaire à l'Université Simon Fraser, révèle qu'il existe des moyens d'atteindre la carboneutralité dans l'industrie lourde et cerne trois principales méthodes :

1. Remplacer l'utilisation des combustibles fossiles par une solution carboneutre :

Les premières solutions à être étudiées sont le recours à la biomasse et à l'hydrogène. La combustion de la biomasse est limitée par les ressources naturelles environnant l'installation et a également tendance à influencer sur la qualité de l'air. En revanche, l'hydrogène peut être utilisé comme combustible propre, mais il devra être fabriqué en grandes quantités, soit par électrolyse soit par reformage du gaz naturel. La production de forts volumes d'hydrogène dépend de la disponibilité et de la fiabilité d'une source abondante d'énergie propre et renouvelable, et le Canada est exceptionnellement bien placé à cet égard. D'autres substituts aux combustibles fossiles sont également envisagés, comme les hydrocarbures synthétiques, mais leur mise en application sera purement et simplement limitée par la capacité de production [réf. 34].

2. Appliquer le captage et le stockage du carbone aux émissions de GES résiduelles des procédés industriels :

Le procédé de CSC pourrait être appliqué au carbone produit par le procédé industriel, mais ne constituerait pas une solution concurrentielle pour les installations industrielles de moyenne et faible envergure. En outre, il faudrait résoudre les limites de la capacité de stockage, éventuellement par l'acheminement de conduites de CO₂ vers des sites de stockage centraux. Bien que le captage du carbone puisse contribuer à réduire considérablement les émissions dans l'industrie lourde, il ne devrait toutefois être considéré que comme une étape intermédiaire vers une solution plus durable à long terme.

3. Aboutir à de nouveaux processus industriels :

Une étude sur l'évolution des processus de fabrication du ciment, du verre, du fer et de l'acier, de transformation des métaux, d'exploitation minière, des raffineries, de production de produits chimiques et des pâtes et papiers a révélé des lacunes en matière de recherche et développement dans l'industrie lourde et que la plupart des options techniques envisagées nécessiteront une intense R-D et des projets pilotes [réf. 35]. Un autre facteur crucial est la faisabilité de la modernisation des usines industrielles par de nouveaux procédés en cours d'élaboration. À l'heure actuelle, les options proposées n'ont mené à aucune technologie qui permettrait une rénovation facile et économique. Aucune des technologies de réduction des émissions actuellement envisagées ne constitue une solution à long terme facilement accessible.

Le principal défi demeure l'utilisation des combustibles fossiles. Bien que des progrès aient été réalisés, le volume de combustibles fossiles qui reste à compenser rend le remplacement par des hydrocarbures synthétiques ou par l'hydrogène peu pratique à court terme. La seule option viable à long terme semble la mise en œuvre de tout nouveaux procédés industriels dans les nouvelles installations afin d'offrir une solution durable pour la fabrication sans émissions de carbone de produits de base courants.

D2. QU'EST-CE QUI NOUS ATTEND À LONG TERME ?

Une chose que l'on peut affirmer avec quasi-certitude, c'est que même une fois le concept d'économie circulaire implanté et même si l'on suppose qu'on aura besoin de moins de matières premières, la nécessité de matières telles que l'acier et le ciment continuera d'augmenter. Dans une société à faibles émissions de carbone, la production de ces biens nécessitera une solution viable avec peu ou sans émission de carbone.

Des projets pilotes ont déjà commencé au Canada, comme Elysis, une entreprise conjointe de Rio Tinto, Alcan, Apple et des gouvernements du Québec et du Canada, décrit comme le premier procédé de fusion de l'aluminium sans émissions de carbone au monde, qui prétend produire de l'aluminium en ne rejetant que de l'oxygène pur dans l'environnement [réf. 36]. Un autre exemple est CarbiCrete, un projet visant à produire du béton sans rejeter de carbone [réf. 37]. Il faudra toutefois du temps (et de l'argent) pour élaborer des solutions viables pouvant être mises en œuvre à grande échelle.

Il est clair qu'à l'échelle internationale, des solutions viables sont attendues des pays qui ont (i) d'importantes sources d'électricité propre, fiable et bon marché, (ii) d'abondantes ressources naturelles et (iii) les connaissances techniques et le savoir-faire pour transformer ces ressources naturelles en matériaux utilisables par l'industrie. Le Canada fait partie d'un groupe très restreint de pays répondant à ces critères.

Les gouvernements fédéral et provinciaux doivent reconnaître la position unique du pays dans ce marché et mettre sur pied un plan d'investissement dans la décarbonisation qui traduit leur confiance dans les réalisations à long terme qu'il permettra pour le secteur national de l'industrie lourde. Un plan de recherche et développement doit également être mis en place pour tirer parti du bassin unique de talents techniques du Canada et encourager l'établissement de relations actives avec la communauté industrielle afin de réduire le temps nécessaire pour commercialiser toutes les innovations techniques viables. Enfin, étant donné que la production de matériaux à faibles émissions (et finalement, sans émissions) de carbone dépend fortement de la capacité du réseau électrique à fournir une électricité propre et fiable, il est recommandé que les plans à long terme concernant l'énergie et l'industrie lourde soient coordonnés en conséquence [réf. 35].

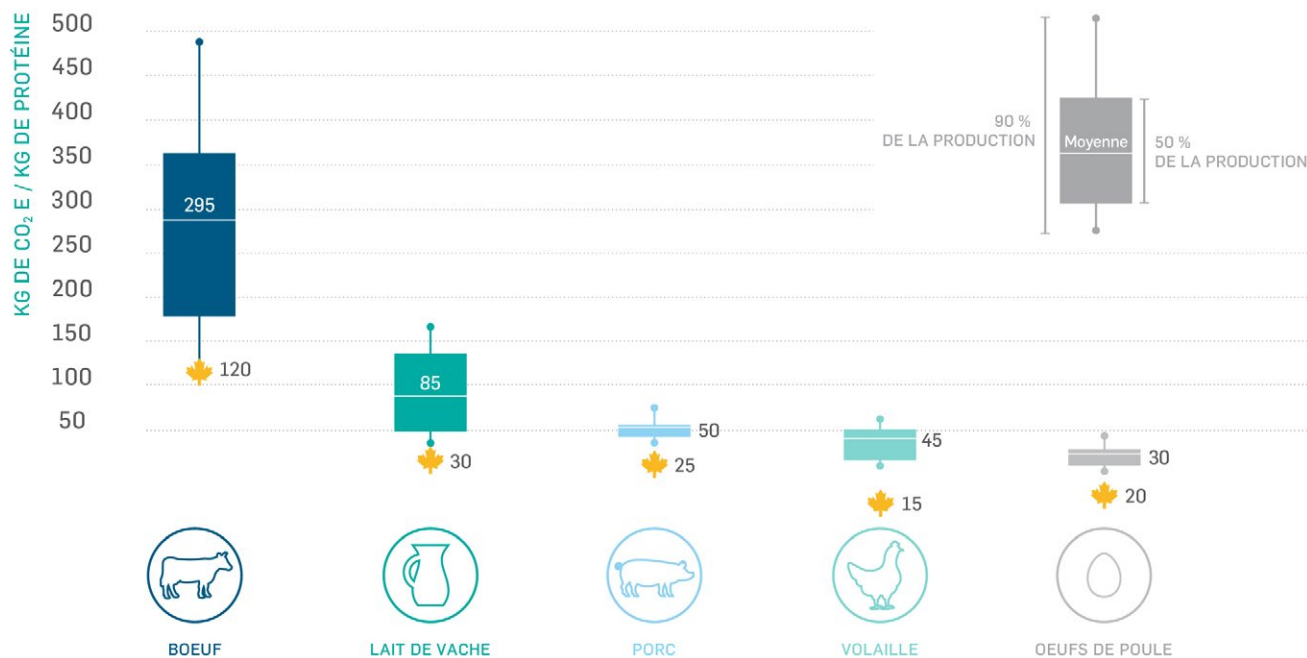


FIGURE 7 INTENSITÉ DES ÉMISSIONS DE GES DE L'ÉLEVAGE DE BÉTAIL CANADIEN [RÉF. 38]

E. Agriculture et foresterie

E1. MÉTHODES DE RÉDUCTION DES GES

Ces 15 dernières années, la production alimentaire au Canada a plus que doublé, tandis que les émissions sont demeurées relativement constantes. Les progrès technologiques et les pratiques clés ont entraîné des réductions importantes des émissions par unité de production alimentaire.

À l'échelle provinciale, les émissions et l'absorption de CO₂ correspondent à la production agricole prédominante de chaque région. Un autre portrait des émissions alimentaires est fourni par la teneur en CO₂ inhérente aux différentes protéines animales par kilogramme indiquées à la figure 7 [réf. 38].

En raison de l'amélioration des processus et de la gestion du bétail, l'intensité des émissions de GES de la production canadienne de protéines animales est l'une des plus faibles au monde. Cela place les exportations canadiennes de bœuf et d'autres produits d'origine animale dans des conditions privilégiées du point de vue de cette intensité.

Néanmoins, les procédés éprouvés devront être appliqués partout et de façon uniforme. Notamment :

- Amélioration des pratiques culturales qui maximisent le stockage du carbone dans le sol tout en réduisant au minimum les émissions d'oxyde nitreux provenant des engrais. Il est possible de réduire les émissions nettes de CO₂ des sols fertilisés grâce à des pratiques de labourage, de fertilisation et d'élimination des matières organiques bien maîtrisées et qui maximisent la rétention de CO₂ et des engrais azotés dans le sol.
- Amélioration de l'efficacité et de la rapidité de la production des protéines animales. Les méthodes accroissant l'efficacité de l'élevage du bétail incluent l'équilibrage des aliments pour animaux afin de réduire les émissions entériques et dues au fumier. De plus, l'optimisation de la reproduction et de l'élevage aide à accroître l'efficacité, ce qui réduit le nombre d'animaux improductifs et le temps nécessaire pour que les bêtes arrivent à maturité.

- Gestion du fumier. La gestion du fumier peut accroître la récupération des éléments nutritifs et réduire les émissions qui y sont associées.
- Restauration des terres. Le rétablissement des forêts et des terres agricoles est un mécanisme évident de stockage de CO₂ directement à partir de l'atmosphère. Toutefois, il dépend de la disponibilité des terres pouvant être converties en puits de carbone net.

E2. QU'EST-CE QUI NOUS ATTEND À LONG TERME ?

Au cours des 30 prochaines années, d'autres améliorations de l'intensité des émissions de GES des produits agricoles et forestiers devront être apportées au moyen de solutions intersectorielles. La vigueur des industries agricole et forestière au Canada devrait être mise à profit pour améliorer l'empreinte carbone d'autres secteurs, comme l'énergie. Les initiatives suivantes semblent notamment les plus prometteuses :

- Utilisation de résidus biologiques agricoles à des fins énergétiques (chauffage des locaux et électricité). Un des principaux domaines recelant du potentiel est l'utilisation de résidus organiques provenant des activités agricoles et forestières à des fins énergétiques. Des procédés tels que la production combinée de chaleur et d'électricité et la production décentralisée peuvent être utilisés efficacement, surtout dans les lieux éloignés. À certains endroits, lorsque les combustibles fossiles constituent la principale source d'énergie, l'utilisation de résidus organiques pourrait avoir des retombées positives sur l'environnement et l'économie.
- Croissance végétale naturelle et restauration des terres de sites industriels comme les mines. Le Canada possède une grande quantité de sites qui ont été déboisés par le passé pour extraire d'autres produits naturels. Ces sites, une fois mis hors service, peuvent être convertis en forêts servant de puits de carbone.

- Stockage du biocarbone en utilisant le bois comme matériau de construction. L'utilisation du bois comme matériau de construction transforme les bâtiments en réservoirs de stockage à long terme du carbone, ce qui évite ou retarde les émissions de GES qui résulteraient de la combustion de ces matériaux.

F. Gestion des déchets

F1. MÉTHODES DE RÉDUCTION DES GES

D'un point de vue économique, les motivations à détourner les déchets des sites d'enfouissement ou à les en éliminer partout au Canada sont maigres en raison des coûts déjà faibles [réf. 7]. Il faudra régler cette question au moyen d'encouragements et d'un cadre commun applicable à l'échelle municipale.

CAPTAGE DU GAZ DANS LES SITES D'ENFOUISSEMENT

Le captage du carbone s'est révélé efficace dans le secteur de la gestion des déchets. Seulement 12 des 26 Mt éq. CO₂ de CH₄ produites ont été rejetées dans l'atmosphère en 2018, le reste ayant été capturé, brûlé ou utilisé comme source d'énergie [réf. 5].

BIOMASSE

La biomasse est un moyen d'accroître l'utilisation efficace de nos ressources, grâce à la combustion de matières mises au rebut, comme les déchets de bois, afin de produire de l'énergie et des biocarburants. Bien que l'utilisation de la biomasse produise des émissions de GES, on peut faire valoir que cette ressource rejetée aurait autrement été incinérée et qu'elle permet d'extraire de l'énergie supplémentaire à partir d'un processus déjà entamé.

De plus, grâce à la vigueur des secteurs économiques comme la foresterie, le Canada dispose d'une abondance de ressources facilement accessibles pour produire de la biomasse et des biocarburants. Avec les futures technologies de captage du carbone, la biomasse peut jouer un rôle important dans un système carboneutre, si elle est utilisée dans un cadre d'interventions visant à réduire les déchets [réf. 39]. Une réglementation et une surveillance devront être instaurées pour veiller à ce que l'industrie de la biomasse ne soit pas incitée involontairement à accroître la déforestation dans le simple but de produire du biocarburant, un processus qui est en soi un émetteur net de GES.

F2. QU'EST-CE QUI NOUS ATTEND À LONG TERME ?

Dans le cadre de l'adoption d'un système carboneutre, le secteur des déchets mettra l'accent sur « les avantages conjoints de la prévention et du détournement des déchets et du captage des gaz dans les sites d'enfouissement » [réf. 7], de concert avec d'autres avancées dans le domaine du captage du carbone et du brûlage dans les sites d'enfouissement et avec les encouragements économiques et la réglementation interprovinciale nécessaires pour que cet objectif se concrétise.

Le concept d'économie circulaire proposé dans [réf. 39] met l'accent sur le cycle de vie complet des produits, dans le but de réduire le gaspillage, d'accroître l'efficacité des ressources et de maintenir un environnement commercial concurrentiel qui stimule l'innovation, et sur la volonté générale de réduire les effets environnementaux de la production et de la consommation. Il s'agit d'un concept efficace et ambitieux, qui nécessitera des efforts considérables à divers niveaux de l'industrie et du gouvernement afin de mieux comprendre le cycle de vie de chaque produit de consommation et la recherche de façons économiquement raisonnables d'améliorer le processus, de l'extraction à la consommation des ressources, en passant par la production.



STRATÉGIES ET SOLUTIONS POUR UN AVENIR CARBONEUTRE

3. Le portrait électrique canadien

A. Instantané du secteur de l'électricité

A1. BOUQUET DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Aujourd'hui, la production électrique au Canada (figure 8) s'effectue à partir de modes relativement propres : plus de 80 % de la production provient déjà de sources non émettrices, dont l'hydroélectricité, le nucléaire, l'éolien et l'énergie solaire [réf. 40].

Globalement, les émissions totales de GES liées à l'électricité au Canada ont diminué de 39 % entre 2000 et 2016 en raison de l'accroissement de la production à partir de sources non émettrices [réf. 40]. La majeure partie de cette réduction est attribuable au remplacement complet des centrales au charbon en Ontario par de l'énergie nucléaire, ce qui a permis d'abaisser les émissions canadiennes de 35 Mt éq. CO₂ annuellement [réf. 41].

Cependant, la transition du Canada vers un système carboneutre entraînerait une augmentation considérable de la demande d'électricité, ce qui exigerait la construction annuelle de nouvelles installations de production, de transport et de distribution électriques à un rythme largement supérieur à ce que nous avons connu ces dernières années. Face à l'immensité de la demande à venir, il est nécessaire d'intervenir pour faire en sorte de gérer les risques, car la demande d'électricité augmentera rapidement en raison de l'électrification des différents secteurs économiques, en particulier des transports, des bâtiments et de la production d'hydrogène vert.

Pour mettre les choses en perspective, selon le rapport sur la décarbonisation en profondeur et des études similaires [réf. 7, réf. 8, réf. 42], le Canada devra produire en 2050 environ 1 000 TWh/an de plus par rapport à la demande actuelle pour répondre aux

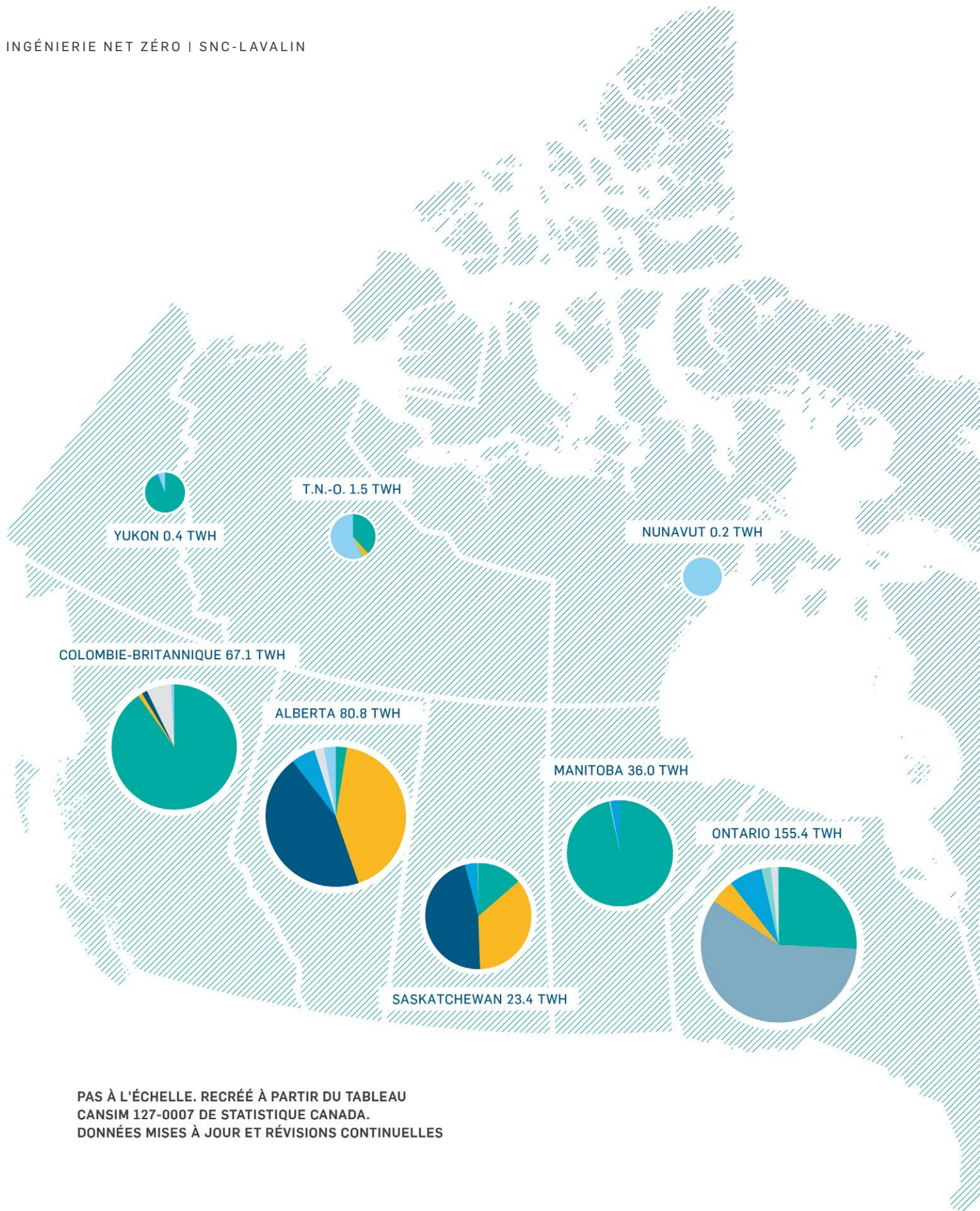
besoins d'électrification des autres secteurs. Durant la transition, certaines régions du Canada demeureront extrêmement dépendantes de la production à partir des combustibles fossiles, soit le gaz naturel, qui joue un rôle important dans la stabilisation du réseau électrique et dans la réponse à la variation à court terme de la demande. Cependant, en raison de l'incertitude concernant les politiques de soutien à l'électrification, cette production massive d'électricité n'est pas encore prise en compte dans les plans de ressources intégrés établis à l'échelle provinciale.

Le Canada s'est engagé à éliminer progressivement toutes les autres centrales au charbon d'ici 2030.

Il s'agit certainement d'un pas important dans la bonne direction, qui se traduira par des émissions de GES moindres, même si ces centrales sont remplacées par des centrales au gaz naturel.

Les provinces qui peuvent compter sur des ressources hydroélectriques, comme l'Ontario, le Manitoba, le Québec et la Colombie-Britannique, sont bien placées pour disposer d'un portefeuille énergétique entièrement propre avant l'échéance de 2050, à condition qu'elles continuent d'investir dans l'entretien de leurs installations actuelles et d'exploiter d'autres ressources renouvelables comme l'énergie éolienne, solaire, houlomotrice ou marémotrice. Néanmoins, il ne faut pas sous-estimer l'ampleur des difficultés pour accéder à ces ressources supplémentaires, comme l'aspect financier et environnemental, l'acceptation par la population, le temps de mise au point des projets et l'éloignement des sites.

Le défi est encore plus grand pour l'Alberta, la Saskatchewan, la Nouvelle-Écosse et le Nouveau-Brunswick, pour lesquels la transition vers un bouquet de production d'électricité plus verte d'ici 2050 nécessitera un changement majeur dans les procédés d'approvisionnement en énergie.



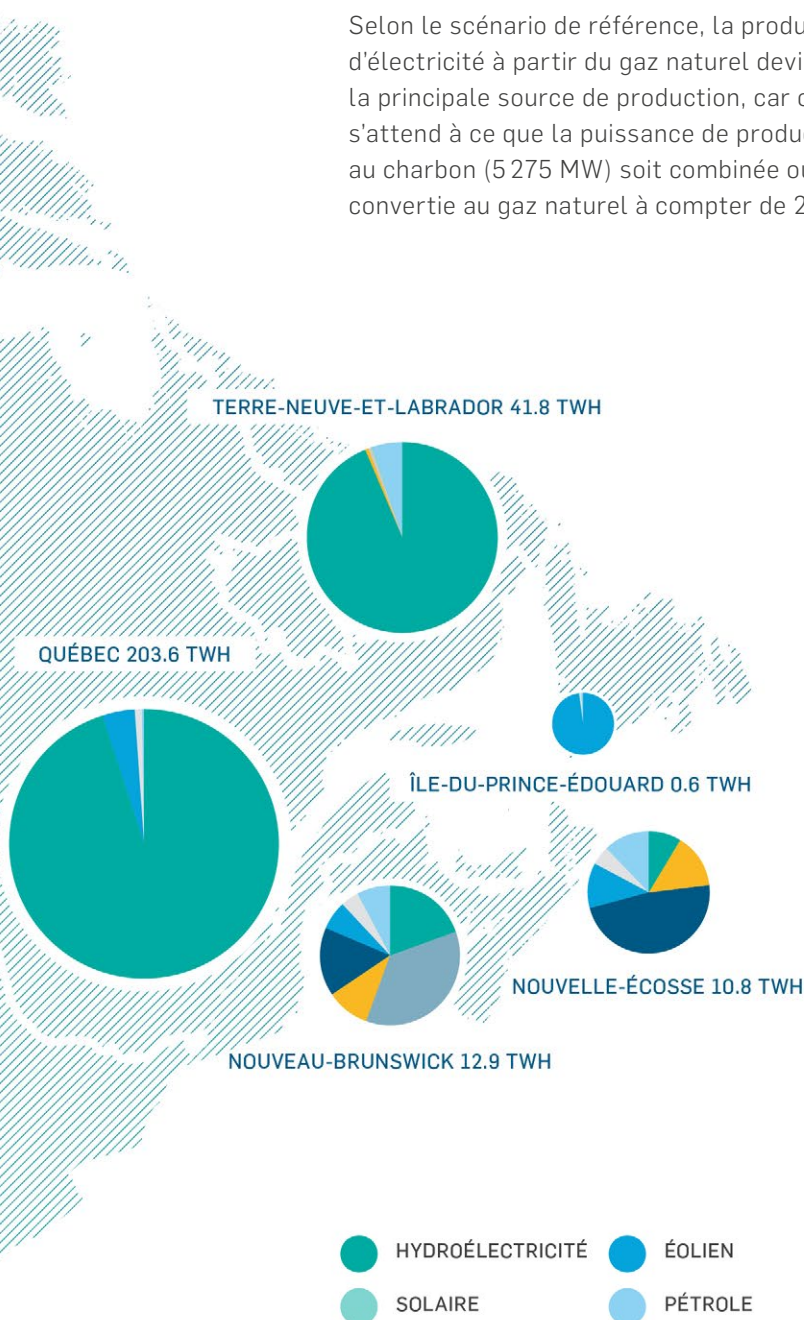
PAS À L'ÉCHELLE. RECRÉÉ À PARTIR DU TABLEAU CANSIM 127-0007 DE STATISTIQUE CANADA. DONNÉES MISES À JOUR ET RÉVISIONS CONTINUELLES

FIGURE 8 BOUQUET DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ DU CANADA. RNC 2017 [RÉF. 40]

En Alberta, le scénario de référence concernant l'accroissement de la production d'électricité publié par l'Alberta Electric System Operator souligne l'incertitude entourant les discussions stratégiques et les répercussions de la nouvelle combinaison de production électrique. Cette mise en garde établie, ce scénario envisage une augmentation de la puissance de production d'environ 13 GW.

Selon le scénario de référence, la production d'électricité à partir du gaz naturel deviendra la principale source de production, car on s'attend à ce que la puissance de production au charbon (5 275 MW) soit combinée ou convertie au gaz naturel à compter de 2021.

On prévoit que la production d'énergie renouvelable supplémentaire (éolien et solaire) sera fournie au moyen de mécanismes de marché concurrentiels non subventionnés et d'ententes d'achat d'électricité avec les entreprises [réf. 43]. L'élaboration du scénario de référence sur 20 ans n'a pas permis d'analyser explicitement l'incidence du Système fédéral de tarification fondé sur le rendement. Ce dernier exige que les installations de production de gaz naturel d'une puissance supérieure à 50 MW construites après le 31 décembre 2020 n'émettent pas plus de 370 t de CO₂/GWh en 2021, et réduisent linéairement leurs émissions par la suite pour atteindre zéro en 2030. À l'échelle provinciale, le gouvernement de l'Alberta a annoncé un programme d'innovation technologique et de réduction des émissions à l'intention des gros émetteurs finaux, notamment pour le secteur de l'électricité. La province s'est donné le mandat de produire 30 % d'électricité de source renouvelable d'ici 2030, et prévoit éliminer progressivement le charbon et ajouter 5 000 MW d'énergie renouvelable dans le cadre de son programme d'électricité de source renouvelable (Renewable Electricity Program) [réf. 44].



En Saskatchewan, SaskPower s'est engagée à réduire les émissions découlant de la production d'énergie de 40 % par rapport au niveau de 2005, d'ici 2030. Comme c'est le cas en Alberta, la réduction se fera par le déploiement de la production d'électricité à partir du gaz naturel et d'un mélange de solaire et d'éolien aux étapes du transport et de la distribution. La recherche et développement porte également sur la possibilité de construire une centrale géothermique [réf. 45].

Le gouvernement de la Nouvelle-Écosse a fixé comme objectif d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050, par l'entremise de la Sustainable Development Goals Act (SGDA) [réf. 46], qui est entrée en vigueur le 20 octobre 2019. Le plan intégré des ressources [réf. 47] de Nova Scotia Power Inc. évalue l'incidence de l'incertitude des cibles de GES et des politiques environnementales au moyen de trois scénarios : un scénario de comparaison (avec l'analyse de 2018 comme situation de référence), un scénario de carboneutralité en 2050 et un scénario accéléré de carboneutralité d'ici 2045. Le scénario de comparaison, qui n'est pas conforme à la SGDA, exigerait le remplacement des centrales électriques au charbon par des centrales au gaz naturel et au diesel. Dans ce scénario, l'ajout d'énergie renouvelable est limité en raison des contraintes d'exploitation du réseau, qui restreindraient la capacité d'intégrer des ressources intermittentes. Les scénarios de carboneutralité pour 2050 et 2045 examinent des options incluant l'intégration régionale pour importer de l'énergie propre du Labrador, la gestion de la demande et la production d'énergie propre décentralisée.

Enfin, Énergie NB est en train de mettre à jour son Plan intégré des ressources (PIR). L'objectif du PIR 2020 [réf. 48] est de garantir qu'au moins 40 % de l'énergie est produite à partir de sources renouvelables. Sa version de 2017 prévoyait la mise hors service des centrales au charbon de la province d'ici 2041 ou plus tôt si la modification de la réglementation fédérale l'exigeait.

A2. DEMANDE D'ÉLECTRICITÉ

La demande annuelle d'électricité au Canada est d'environ 500 TWh (figure 9) ; elle est destinée à plus de 75 % aux secteurs résidentiel et industriel. Le transport ne représente qu'un peu plus de 1 % de l'utilisation et l'agriculture, 2 %. Sous l'effet de l'électrification de tous les secteurs économiques et de l'agriculture, la demande devrait augmenter de façon importante. Cette hausse offrira aux services publics d'électricité une bonne occasion de compenser en partie la réduction prochaine de la consommation due à l'implantation de la facturation nette, des microréseaux et de la production en amont du compteur. Pour relever le défi de la carboneutralité, cette demande supplémentaire devra provenir de ressources renouvelables non émettrices.

A3. COMMERCE DE L'ÉNERGIE

Le Canada est un exportateur net d'énergie propre vers les États-Unis, les exportations étant assurées par plusieurs interconnexions de transport d'électricité entre les deux pays. Le Québec, l'Ontario et le Manitoba sont des exportateurs nets d'énergie renouvelable, tandis que la Colombie-Britannique est un importateur net. Les exportations globales d'électricité (principalement de source renouvelable) augmentent graduellement, une tendance qui devrait se poursuivre en raison de la nécessité aux États-Unis d'accroître la proportion d'énergie renouvelable dans le bouquet de production électrique. Toutefois, la tendance est restreinte par la capacité d'interconnexion. En outre, les projets de lignes de transport d'électricité font face à plusieurs contraintes concernant la délivrance des permis et l'environnement des deux côtés de la frontière.

A4. TRANSPORT ET DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ

Bien que les interconnexions de transport d'électricité entre les provinces canadiennes et les États-Unis soient nombreuses — 37 interconnexions à haute tension (500 kVc.c. et 230 kVc.a.), elles sont limitées entre les réseaux provinciaux. La faiblesse des interconnexions interprovinciales découle des différences de politique énergétique entre les provinces.

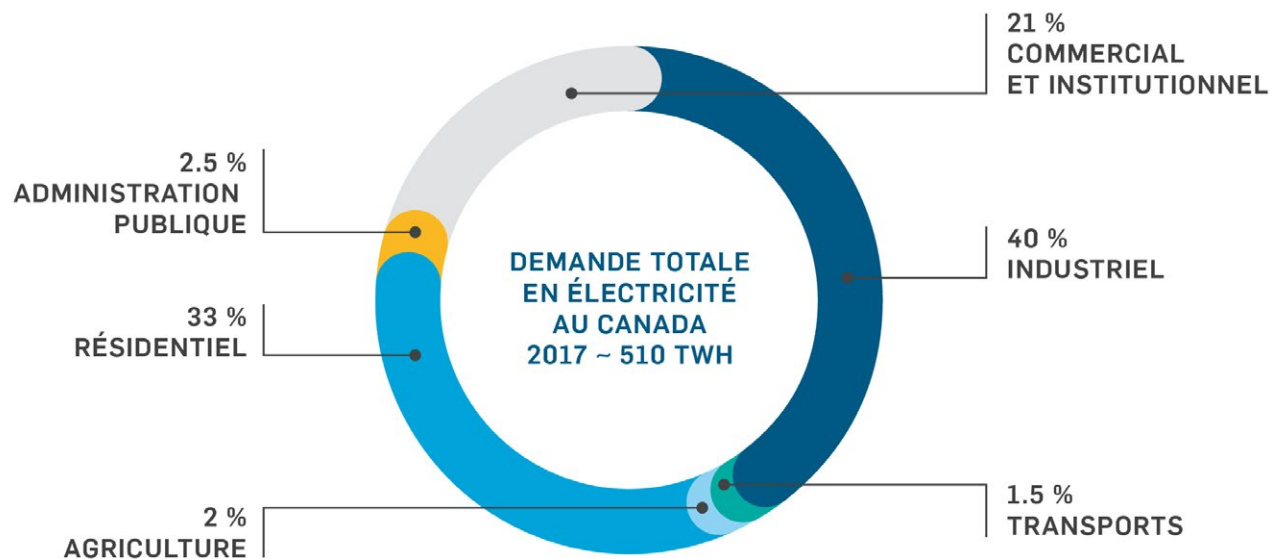


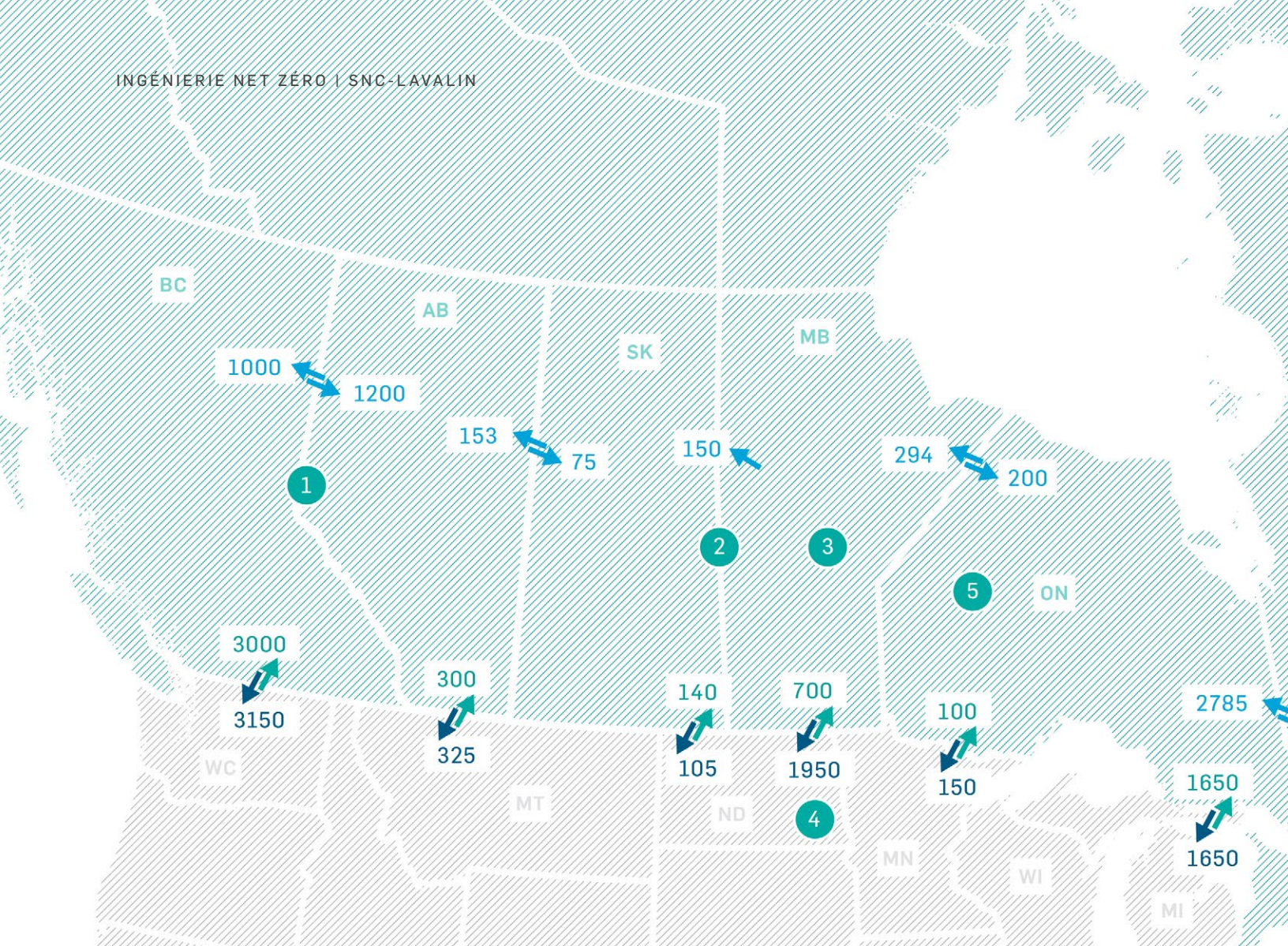
FIGURE 9 DEMANDE TOTALE D'ÉLECTRICITÉ AU CANADA, 2017 [RÉF. 49]

Les réseaux provinciaux actuels comportent des limites techniques qui les empêchent d'intégrer les grandes quantités d'énergie renouvelable nécessaires pour atteindre la cible de carboneutralité. Ces limites comprennent l'absence de souplesse de la production, alors qu'elle permettrait d'intégrer d'importantes sources intermittentes supplémentaires, et la congestion des corridors de transport à proximité des sites présentant le plus fort potentiel d'exploitation de l'énergie éolienne, solaire, houlomotrice et marémotrice.

Par exemple, en Alberta, la capacité totale d'intégration des nouvelles sources d'énergie renouvelable dans le sud est estimée à 470 MW, alors que le centre-est ne peut intégrer aucune nouvelle production. Ces valeurs sont bien en deçà des exigences de la province en matière de capacité d'énergie renouvelable. Les autres provinces canadiennes font face au même obstacle, et l'infrastructure de transport existante suffira seulement à intégrer une fraction de la production d'énergie renouvelable nécessaire pour atteindre la carboneutralité.

De plus, les moyens de transport et de distribution vieillissent ; la majeure partie d'entre eux datant de plus de 50 ans. Il est donc urgent d'appuyer les investissements dans les interconnexions à l'échelle interprovinciale et avec les États-Unis et de renouveler l'infrastructure. Sans de tels investissements, il n'est pas garanti que l'on pourra atteindre la cible de carboneutralité. Les investissements immédiats à grande échelle dans les réseaux électriques sont des mesures « sans regret » pour le Canada, qui pourraient procurer des avantages dans tous les scénarios possibles de consommation énergétique carboneutre. La figure 10 présente la capacité de transfert actuelle et proposée entre les provinces canadiennes et les états américains.

Du côté de la distribution, on traîne encore en ce qui concerne l'utilisation des technologies de réseau intelligent et de l'Internet des objets et de l'adaptation aux difficultés posées par l'intégration de l'énergie renouvelable décentralisée. La majeure partie du développement dans les services publics rattachés à ces nouvelles technologies est encore exploratoire et une pression réglementaire est nécessaire pour accélérer leur intégration.



1. En pratique, la quantité d'électricité que l'Alberta peut importer simultanément de la Colombie-Britannique et du Montana est limitée à 1 100 MW en raison des contraintes internes du réseau.

2. Ligne en construction entre le Manitoba et la Saskatchewan

3. Ligne proposée entre le Manitoba et le Minnesota

4. Ces chiffres représentent la capacité de transfert du Minnesota et du Dakota du Nord combinés.

5. Ligne proposée entre l'Ontario et la Pennsylvanie (1 000 MW)

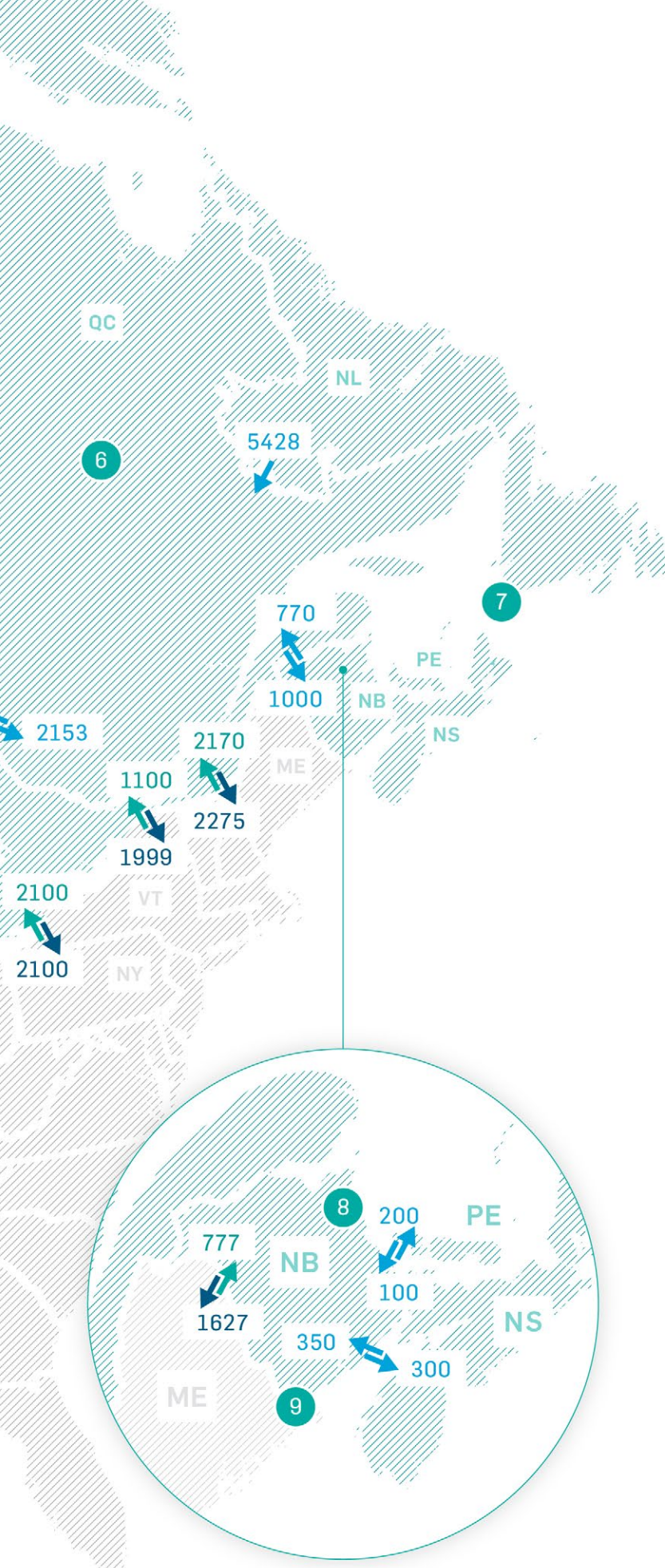
6. Quatre lignes proposées du Québec aux États-Unis :

- vers New York (1 000 MW)
- vers le Vermont (1 000 MW)
- vers le New Hampshire (1 000 MW)
- vers le New Hampshire (1 200 MW)

7. Ligne existante entre Terre-Neuve et la Nouvelle-Écosse (500 MW)

8. Deux lignes proposées entre le Nouveau-Brunswick et l'Île-du-Prince-Édouard (totalisant 360 MW) pour remplacer la ligne actuelle

9. Ligne proposée du N.-B. au Massachusetts (1 000 MW)



A5. STRUCTURE DU MARCHÉ DE L'ÉLECTRICITÉ

Le marché de l'électricité au Canada est constitué de réseaux planifiés et réglementés par les provinces, avec une structure mixte de marché et de propriété. Les différences de bouquets énergétiques et de structures du marché entre les provinces accroissent la difficulté de la collaboration interprovinciale. La figure 11 résume la structure actuelle du marché de l'électricité par province.

Les producteurs d'électricité fournissent une foule d'attributs, dont l'énergie électrique, la capacité et les services auxiliaires (tension et fréquence), qui font en sorte que le réseau fonctionne adéquatement. Au Canada, l'énergie est actuellement gérée sous forme de marchés dans lesquels les producteurs ne sont payés que pour l'attribut énergétique et qui s'appuient sur une composition classique de la production pour fournir les autres attributs nécessaires à l'exploitation résiliente du réseau, et qui sont inhérents aux producteurs conventionnels.

Ces producteurs, par exemple, soutiennent la stabilité du réseau grâce à leurs machines tournantes, qui fournissent de l'inertie au réseau, et à une production d'électricité contrôlable pour faire rapidement face aux fluctuations de la demande. Une exploitation stable du réseau exige alors un bouquet énergétique judicieux composé de producteurs conventionnels et d'une production intermittente d'énergie renouvelable, comme l'énergie éolienne, solaire, houlomotrice ou marémotrice. Ainsi, un marché uniquement axé sur l'énergie pénalise la production classique en faveur de la production d'énergie renouvelable en l'absence d'une juste compensation pour la capacité et les services auxiliaires fournis par le nucléaire et l'hydroélectricité.

FIGURE 10 CAPACITÉ DE TRANSFERT ACTUELLE ET PROPOSÉE EN MW ENTRE LES PROVINCES CANADIENNES ET LES ÉTATS AMÉRICAINS [RÉF. 50]



COLOMBIE-BRITANNIQUE

- Libre accès au marché de gros et industriel
- Société d'État intégrée verticalement desservant 94 % des clients

ALBERTA

- Mise en commun obligatoire des installations de production
- Libre accès au marché de gros et de détail depuis 2001
- Marché de gros entièrement concurrentiel

ONTARIO

- Dégrouper de l'industrie en 1998
- Libre accès au marché de gros et de détail depuis 2002
- Modèle hybride de réglementation et d'achèvement

FIGURE 11 STRUCTURE
DU MARCHÉ PROVINCIAL
ET EXPLOITANTS
DE RÉSEAU

SASKATCHEWAN

- Libre accès au marché de gros
- Société d'État intégrée verticalement

MANITOBA

- Libre accès au marché de gros
- Société d'État intégrée verticalement

TERRE-NEUVE-ET-LABRADOR

- Société d'État intégrée verticalement et entreprise de distribution appartenant à des investisseurs

NOUVEAU-BRUNSWICK

- Libre accès au marché de gros
- Société d'État intégrée verticalement

ÎLE-DU-PRINCE-ÉDOUARD

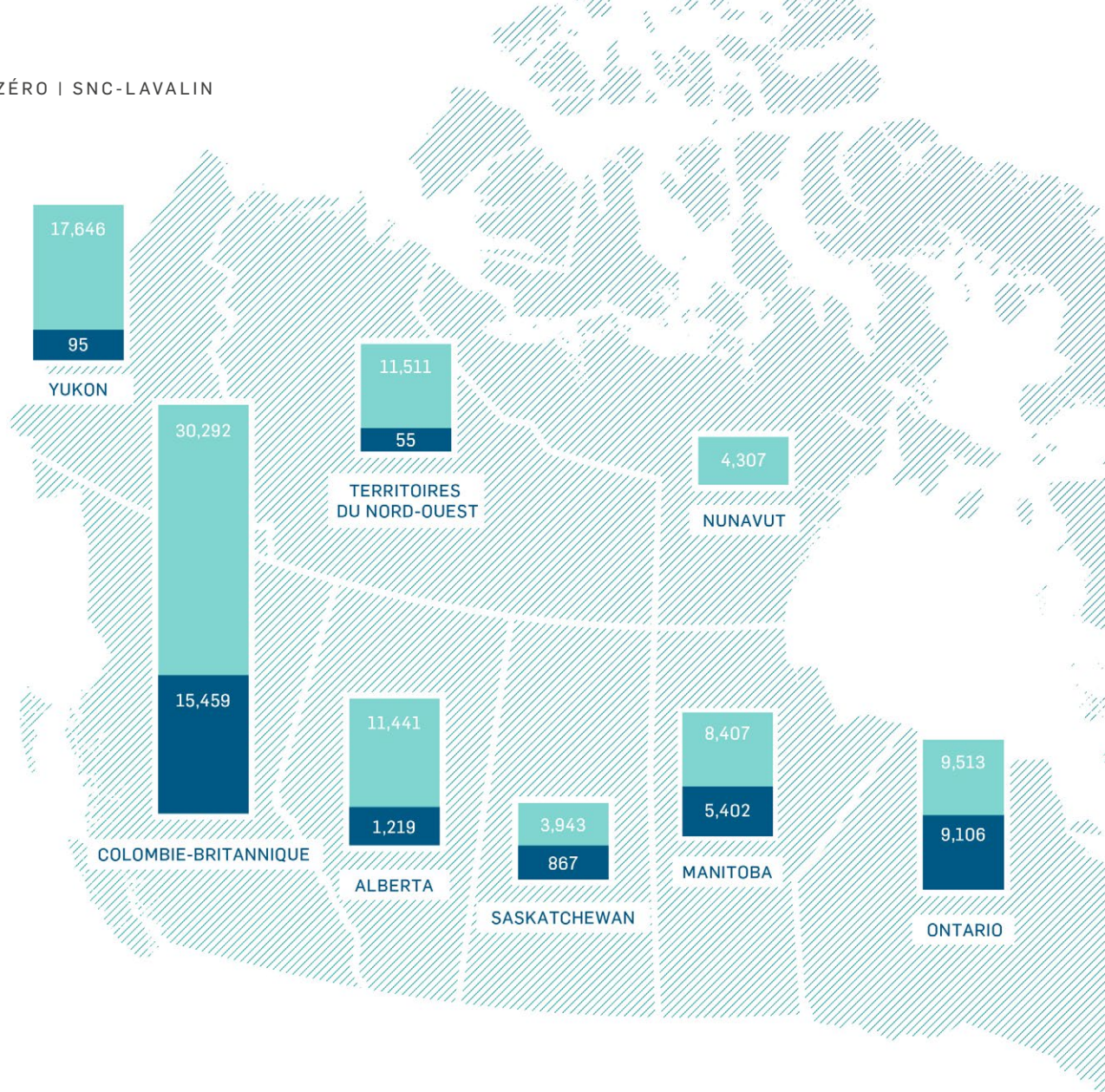
- Achat d'électricité sur le marché de la Nouvelle-Angleterre et contrat à long terme avec le Nouveau-Brunswick

NOUVELLE-ÉCOSSE

- Libre accès au marché de gros
- Entreprise de services publics appartenant à des investisseurs basée sur le coût du service

QUEBEC

- Libre accès au marché de gros
- Société d'État intégrée verticalement
- Expansion du développement des producteurs d'électricité indépendants



Il est nécessaire de réformer le marché afin de permettre aux producteurs de tirer parti de l'avantage combiné de la disponibilité de l'énergie, d'une puissance ferme et de services auxiliaires pour encourager les acteurs du marché à exploiter des ressources qui assurent le bon fonctionnement du système, ainsi que le stockage de l'énergie ; qui en lui-même permettra une plus grande intégration des énergies renouvelables. Il est à noter que l'Ontario et l'Alberta ont déjà amorcé un renouvellement du marché et que d'autres provinces canadiennes devraient suivre.

B. Bouquet énergétique actuel

B1. HYDROÉLECTRICITÉ

Plus de 60 % de l'électricité produite au Canada est issue des ressources hydroélectriques. La Colombie-Britannique, le Manitoba, le Québec et Terre-Neuve sont riches en ces ressources et les ont exploitées de façon responsable au cours des dernières décennies. Ces dernières années, toutefois, les nouveaux projets hydroélectriques (à l'exception des petits projets au fil de l'eau) se sont heurtés à des obstacles sociaux, environnementaux et économiques importants, ainsi qu'à des exigences réglementaires sévères, ce qui a abouti à des périodes de développement relativement longues.

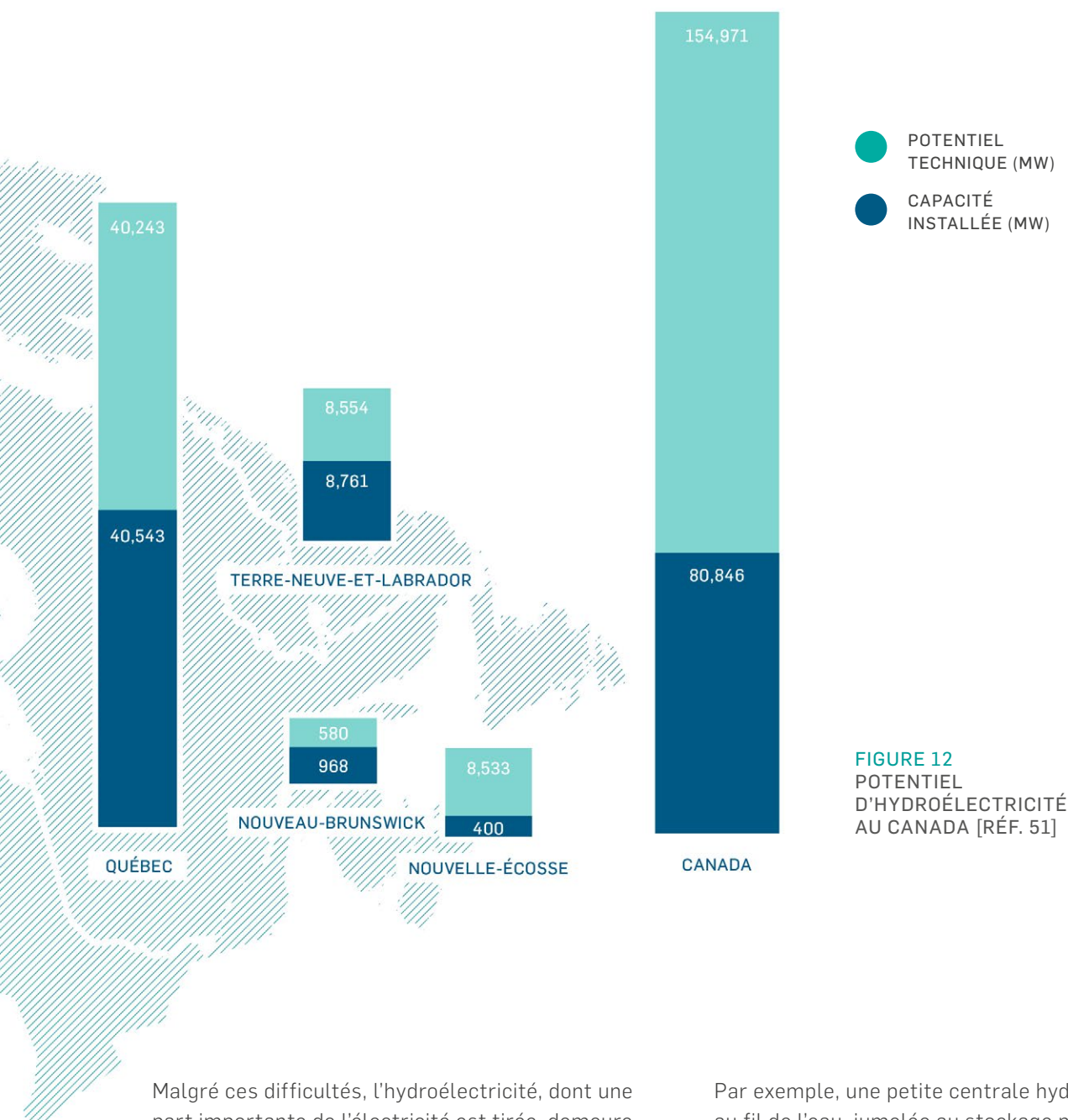


FIGURE 12
POTENTIEL
D'HYDROÉLECTRICITÉ
AU CANADA [RÉF. 51]

Malgré ces difficultés, l'hydroélectricité, dont une part importante de l'électricité est tirée, demeure une source d'énergie propre très attrayante pour le Canada. Le procédé hydroélectrique a également un rôle important à jouer dans le stockage de l'énergie en vrac, l'hydroélectricité à réserve pompée représentant environ 99 % du marché mondial du stockage d'énergie.

En ce qui concerne l'avenir, un système carboneutre obligera le Canada à entretenir et à renouveler les installations de production hydroélectrique existantes, tout en aménageant de nouveaux sites de stockage de cette énergie, qui contribueront à assurer la régularité nécessaire à l'intégration de sources d'énergie renouvelable intermittentes.

Par exemple, une petite centrale hydroélectrique au fil de l'eau, jumelée au stockage par batterie et à une centrale solaire (dans la mesure du possible), pourrait aider les collectivités éloignées à atteindre la carboneutralité et à éliminer leur dépendance au diesel.

Selon la figure 12, le potentiel technique pour la mise en valeur de l'hydroélectricité est à peu près le double de la puissance hydroélectrique exploitée jusqu'à présent [réf. 51]¹. Les développements supplémentaires se heurtent cependant à de gros problèmes, comme l'éloignement de l'emplacement des ressources, l'impact environnemental qui en découle et l'insuffisance de la capacité de transport.

1 VEUILLEZ NOTER QUE LA PRODUCTION INSTALLÉE DE NOUVELLE-ÉCOSSE PROVIENT DE LA RÉF. 47

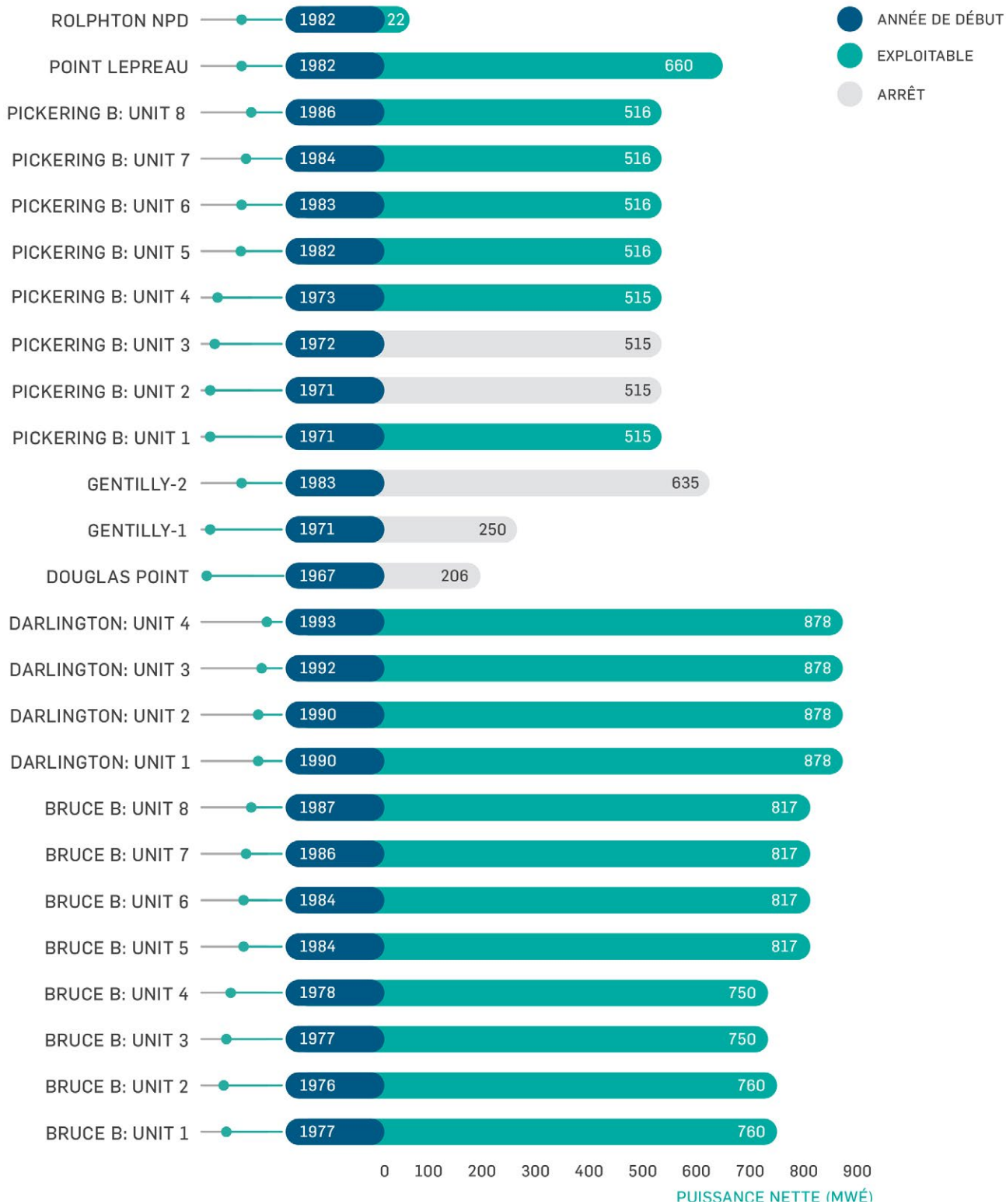


FIGURE 13 PRODUCTION D'ÉNERGIE NUCLÉAIRE AU CANADA AJOUTÉE AU RÉSEAU DEPUIS 1971 [RÉF. 54]

B2. ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Actuellement, l'énergie nucléaire représente environ 15 % de la production totale d'électricité au Canada. Les centrales en service sont situées dans deux provinces : l'Ontario (où le nucléaire représente 60 % de l'énergie électrique produite) [réf. 52] et le Nouveau-Brunswick (où le nucléaire constitue 40 % de l'énergie électrique produite) [RÉF. 53].

L'énergie nucléaire ne dépend pas des conditions météorologiques, climatiques ou solaires, elle a une très petite empreinte par mégawatt produit et tous les concepts sont propres. Des centrales nucléaires pourraient être aménagées à peu près n'importe où au pays. De plus, en raison de la chaleur qu'elles produisent, elles peuvent être utilisées à des fins industrielles qui nécessitent de la vapeur, ou une combinaison de vapeur et d'électricité, notamment pour produire de l'hydrogène de façon relativement efficace.

La dernière centrale nucléaire construite au Canada a été achevée en 1993. En 2025, six réacteurs en exploitation atteindront la fin de leur vie utile et seront définitivement déclassés. Cela enlèvera de façon permanente au réseau plus de 3 000 MW d'électricité sans émissions. L'ajout de capacité de production nucléaire au fil des ans est présenté à la figure 13.

Le développement et la construction nucléaires exigent une vaste évaluation environnementale, un permis de conception délivré par la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) et de longs délais pour la fabrication, la construction et la mise en service d'éléments lourds. Même pour une conception de centrale relativement bien maîtrisée et qui réclame peu de recherche et développement, le processus actuel prend de 8 à 10 ans entre la détermination du site et la production d'électricité.

L'industrie nucléaire a récemment introduit les petits réacteurs modulaires (PRM), capables de produire de 10 à 300 MW. Bien que cette technologie soit certainement prometteuse, bon nombre des idées les plus novatrices exigent également la délivrance de permis et l'aménagement de nouvelles installations de combustible qui prennent, elles-mêmes, de 4 à 5 ans pour la conception, l'obtention de permis et la construction, en plus des 8 à 10 années mentionnées précédemment. Par conséquent, les PRM avancés ne seront probablement pas raccordés au réseau avant le milieu des années 2030. Une fois que la conception de ces réacteurs aura fait ses preuves et que ceux-ci commenceront à être déployés à grande échelle, ils pourront jouer un rôle important dans la transformation du bouquet énergétique canadien, en particulier pour les régions éloignées hors réseau qui dépendent actuellement de la production au diesel.

On prévoit que l'énergie nucléaire fournira une partie importante de l'électricité nécessaire pour soutenir n'importe lequel des scénarios carboneutres pour 2050 [réf. 7, réf. 8, réf. 42]. Toutefois, compte tenu des délais liés à l'élaboration des nouveaux projets nucléaires et à l'obtention des permis de conception et environnementaux, il est crucial qu'on ne perde plus de temps d'ici 2050.

B3. GAZ NATUREL

Le gaz naturel continuera d'être une source importante de production d'électricité, car il procure au réseau électrique la stabilité nécessaire pour assurer son bon fonctionnement et fournir une énergie vraiment acheminable — ce qui permet à la centrale de répondre rapidement à la demande réelle. D'ici 2030, de 10 à 15 % de la production totale d'électricité au Canada devrait être tirée du gaz naturel, étant donné les plans provinciaux à long terme qui visent à remplacer la production au charbon par une combinaison de production à partir du gaz naturel et d'énergies renouvelables.

Afin de satisfaire les exigences strictes prévues de la carboneutralité, les grands équipementiers s'engagent à moderniser leurs turbines à gaz pour qu'elles fonctionnent entièrement à l'hydrogène (H₂) dans dix ans [réf. 58, réf. 59, réf. 60]. Certaines des grandes turbines à gaz offertes sur le marché peuvent déjà fonctionner avec un mélange de gaz naturel et jusqu'à 50 % d'hydrogène. Pour les petites turbines, le pourcentage est encore plus élevé. Avec l'évolution de la technologie, ces turbines devraient pouvoir entièrement fonctionner à l'hydrogène renouvelable [réf. 58], éliminant ainsi les émissions de GES qui seraient autrement rejetées par la combustion du gaz naturel. De plus, il serait possible de produire de l'hydrogène vert à partir de l'électrolyse à l'aide des énergies renouvelables.

Une autre possibilité d'éliminer les émissions de GES est d'utiliser le procédé de captage et de stockage postcombustion dans les centrales électriques au gaz naturel. Le CSC dans les turbines au gaz naturel continue d'ailleurs de faire l'objet d'améliorations et d'innovations. Par exemple, des piles à combustible supplémentaires peuvent capter le carbone tout en augmentant la puissance de la centrale aux cycles thermiques. Le dioxyde de carbone fait alors partie du processus de combustion en étant renvoyé dans la chambre de combustion et partiellement stocké.

L'utilisation potentielle de H₂ dans les turbines à gaz, en plus des nombreuses nouvelles technologies prometteuses concernant le CSC, peut aider le Canada à atteindre sa cible de carboneutralité en 2050 pour le secteur de l'électricité.

B4. ÉNERGIE ÉOLIENNE

Toutes les provinces canadiennes produisent de l'électricité d'origine éolienne. En 2019, la puissance de production éolienne installée au Canada atteignait 13 413 MW, soit un peu moins de 5 % de l'énergie électrique totale produite [réf. 61]. La conception d'éoliennes de grandes dimensions permet d'exploiter plus d'énergie, de réduire les coûts marginaux des projets éoliens et d'améliorer la compétitivité par rapport aux autres technologies de production. Le Canada possède encore de très grandes possibilités de développement de l'énergie éolienne.

La figure 14 illustre la puissance éolienne installée ajoutée au Canada depuis 2008.

Le Canada possède également un grand potentiel de développement de projets éoliens extracôtiers sur les côtes Est et Ouest. Les vents au large ont tendance à produire plus d'énergie que les vents de terre en raison de profils de vent plus élevés et plus stables. Une seule turbine extracôtière de 12 MW peut fournir de l'énergie à plus de 20 000 foyers.

Toutefois, des réseaux de transport plus robustes et des interconnexions provinciales supplémentaires seront nécessaires à une plus grande intégration des éoliennes.

B5. ÉNERGIE SOLAIRE

La contribution de l'énergie solaire à la production canadienne reste faible. En 2019, la puissance solaire installée dépassait 3 GW et représentait approximativement moins de 1 % de la production totale d'électricité au Canada [réf. 40]. Mais en raison de la baisse des coûts des installations solaires, on s'attend à ce que cette ressource contribue davantage à la production d'énergie renouvelable. Le caractère modulaire et la baisse des prix de la production d'énergie solaire permettront d'accroître la production décentralisée et de soutenir le développement de microréseaux pour les collectivités éloignées et hors réseau.

La figure 15 illustre la puissance solaire installée ajoutée au Canada chaque année depuis 2008.

B6. ÉNERGIE HOULOMOTRICE, MARÉMOTRICE ET GÉOTHERMIQUE

Il est possible d'exploiter à des fins électriques l'énergie des océans par l'entremise des vagues et des marées. Le Canada possède une centrale marémotrice de 20 MW (centrale marémotrice d'Annapolis Royal) dans la baie de Fundy, en Nouvelle-Écosse. On peut également produire de l'électricité à partir de l'énergie géothermique dans l'Ouest canadien. Cependant, la recherche et le développement approfondis sont nécessaires pour atteindre pleinement le potentiel de ces ressources de production.

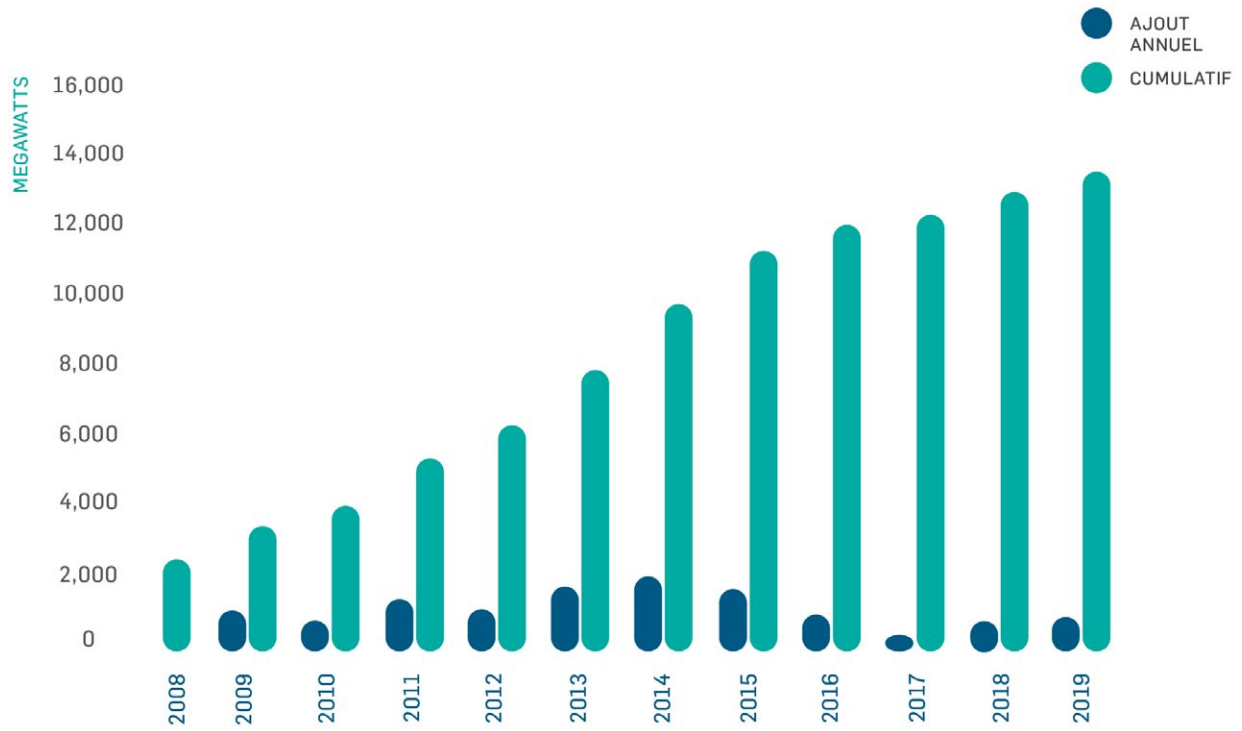


FIGURE 14 AJOUT DE PUISSANCE ÉOLIENNE AU RÉSEAU DE 2008 À 2019 [RÉF. 40]

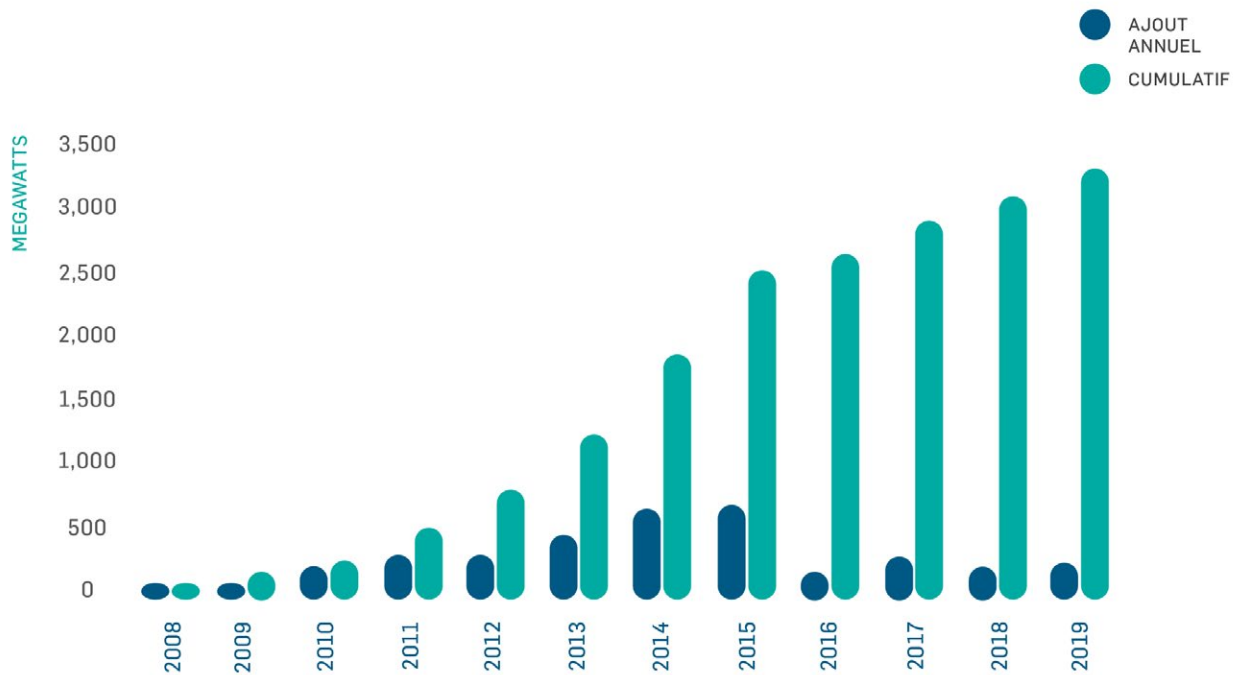
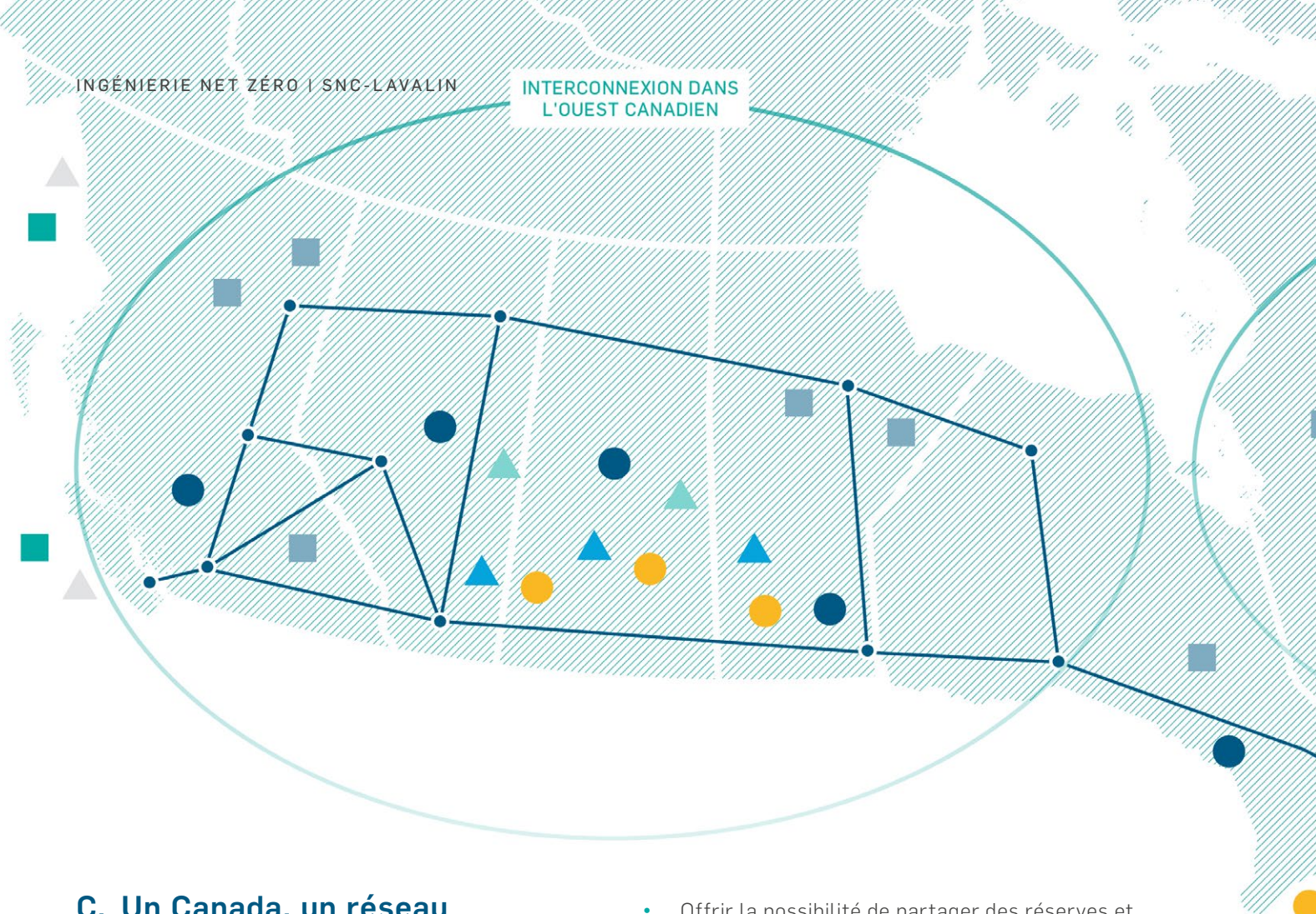


FIGURE 15 AJOUT DE PUISSANCE SOLAIRE AU RÉSEAU DE 2008 À 2019 [RÉF. 40]



C. Un Canada, un réseau de transport

Il est essentiel de renouveler et d'élargir l'infrastructure de transport et de distribution afin de pouvoir produire davantage d'énergie renouvelable si l'on veut atteindre la cible de carboneutralité pour le secteur de l'électricité. Des efforts supplémentaires sont nécessaires pour mettre en place un réseau de transport d'électricité est-ouest à l'échelle nationale. La réalisation de ce réseau de transport intégré pourrait apporter les avantages suivants [réf. 50] :

- Aider les provinces à atteindre la carboneutralité en leur donnant accès à de l'énergie propre lorsqu'il n'est pas possible de le faire autrement ;
- Soutenir une plus grande intégration des ressources énergétiques renouvelables ;
- Permettre l'échange d'avantages économiques entre les provinces exportatrices d'énergie et les provinces importatrices ;

- Offrir la possibilité de partager des réserves et d'importer de l'énergie pendant les heures de pointe, ce qui réduirait la nécessité de construire une capacité de production supplémentaire ;
- Éviter le gaspillage d'énergie et la perte de production d'électricité de source renouvelable.

Le réseau est-ouest canadien (figure 16) comprendrait trois composants principaux : la boucle de l'Atlantique, les interconnexions de l'Ouest et des interconnexions supplémentaires avec les États-Unis.

BOUCLE DE L'ATLANTIQUE

La boucle de l'Atlantique a été présentée dans le discours du Trône de 2020 comme un outil qui aiderait le Canada atlantique à éliminer progressivement la production d'électricité à partir du charbon. Une fois achevée, cette boucle pourrait fournir de l'électricité propre à la région à partir de la centrale nucléaire de Point Lepreau et de l'hydroélectricité du Québec et du Labrador.

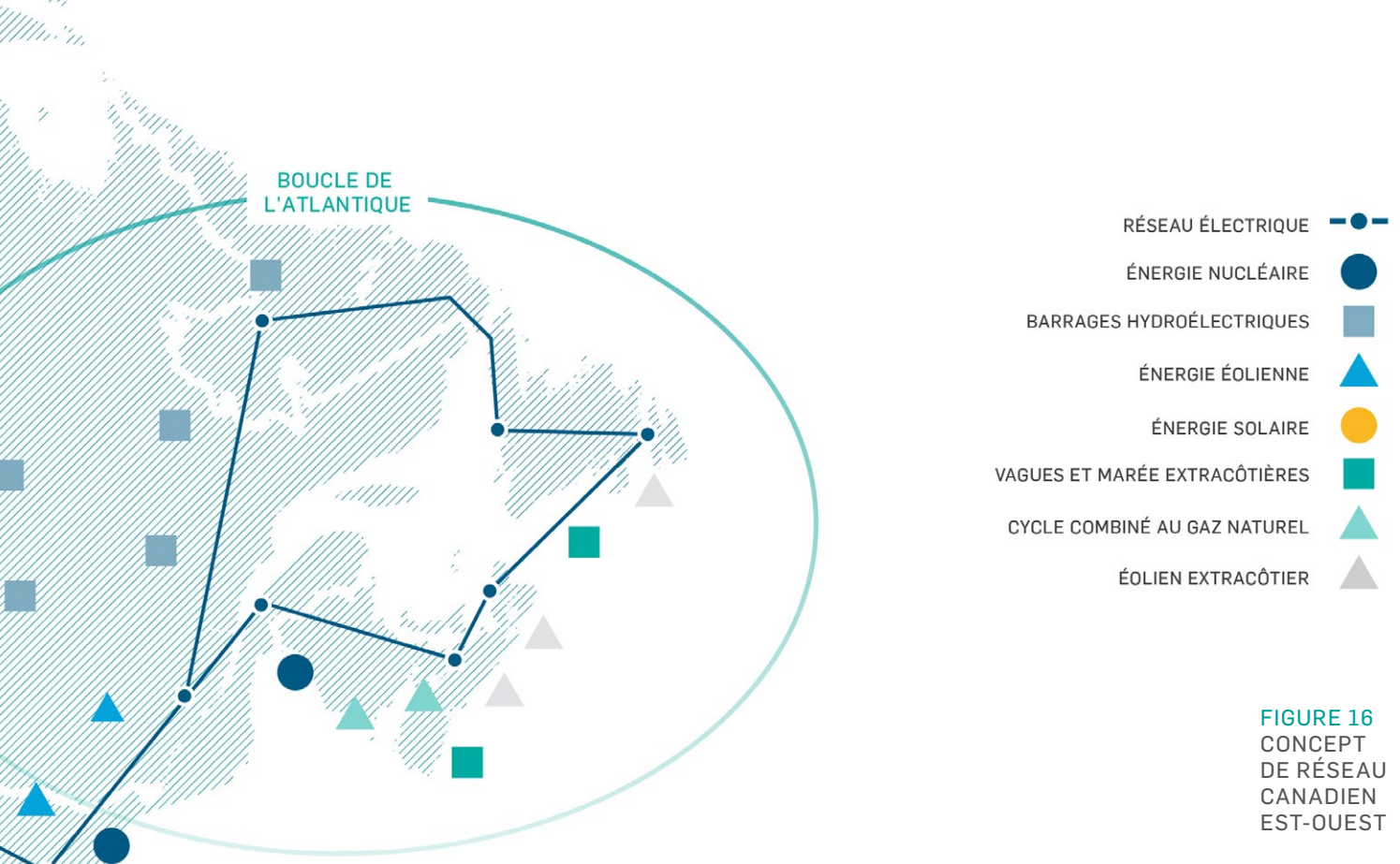


FIGURE 16
CONCEPT
DE RÉSEAU
CANADIEN
EST-OUEST

INTERCONNEXIONS DE L'OUEST

Un principe semblable pourrait aider l'Alberta et la Saskatchewan à remplacer la production de charbon par de l'hydroélectricité propre importée de Colombie-Britannique et du Manitoba. Les options suivantes sont évaluées plus en détail dans l'Initiative de collaboration régionale et d'infrastructure stratégique de l'électricité (CRIE) pour la région de l'Ouest [réf. 62] :

- Deux options pour une nouvelle interconnexion entre la Colombie-Britannique et l'Alberta, les interconnexions Nord et Sud ;
- Trois options d'interconnexion entre le Manitoba et la Saskatchewan, une ligne à 500 kV et deux lignes à 230 kV ;
- Une nouvelle liaison haute tension à courant continu entre l'Alberta et la Saskatchewan.

L'étude a conclu que les projets de transport interprovincial examinés pourraient réduire les émissions de GES de 0,5 à 1,2 Mt éq. CO₂ par année.

INTERCONNEXIONS SUPPLÉMENTAIRES AVEC LES ÉTATS-UNIS À PARTIR DU NOUVEAU-BRUNSWICK, DU QUÉBEC ET DE L'ONTARIO

Des interconnexions additionnelles entre le Nouveau-Brunswick, le Québec et l'Ontario et les États-Unis pourraient intensifier le soutien à l'intégration des énergies renouvelables et aux échanges d'énergie avec ce pays.

Les interconnexions suivantes ont été proposées :

- Deuxième interconnexion à 345 kV entre le Nouveau-Brunswick et la Nouvelle-Angleterre [réf. 63] ;
- Interconnecteurs haute tension à courant continu entre le Québec et la Nouvelle-Angleterre/ New York. Plusieurs projets ont été proposés et en sont actuellement à différentes étapes de développement ;
- Interconnecteur haute tension courant continu entre l'Ontario et les États-Unis. L'interconnecteur proposé pour le lac Érié consiste en un lien sous-marin de 1 000 MW sur 117 km entre l'Ontario et la Pennsylvanie. [réf. 64].

La figure 16 présente une carte simplifiée d'un réseau de transport est-ouest pancanadien.

D. Difficultés de réalisation

Les nouveaux projets de production d'énergie propre à grande échelle et leur infrastructure de transport se heurtent à de nombreuses difficultés en matière de planification et de développement, qui nécessiteraient la collaboration des gouvernements fédéral et provinciaux avec toutes les parties prenantes.

Le tableau 5 présente les principales difficultés en matière de planification et de réalisation ainsi que des recommandations pour les résoudre.

DIFFICULTÉ	DESCRIPTION	RECOMMANDATION
DIFFICULTÉS DE PLANIFICATION		
La planification intégrée des ressources et les mises à jour des projections de la demande prennent trop de temps — de trois à cinq ans la plupart du temps.	Les projections actuelles concernant l'électricité ne font pas état d'une demande d'ajout de capacité importante pour le réseau électrique du Canada. Toutes les projections doivent être mises à jour afin d'être conformes à un système carboneutre en 2050 et aux exigences d'électrification pour atteindre cet objectif.	Le cycle de planification intégrée des ressources doit être plus court pour que le secteur de l'électricité puisse suivre le rythme de l'électrification d'autres secteurs économiques, qui peut accélérer rapidement. Les plans de réalisation d'une capacité de production propre devraient être prêts et en place.
Chaque secteur aborde la planification de façon indépendante	La planification de la carboneutralité se caractérise par une forte interdépendance et nécessitera l'électrification de nombreux secteurs, une forte utilisation du captage et du stockage du carbone et une planification consolidée pour l'ajout d'une forte capacité de production d'électricité et de nombreux actifs de transport et de distribution.	En collaboration avec les provinces, les territoires et l'industrie, concevoir un plan très détaillé vers la carboneutralité au Canada. Fonder un comité fédéral-provincial ayant le pouvoir de renforcer la coopération régionale et interprovinciale qui veillerait à ce que les projets proposés en électricité soient harmonisés avec le plan global et actualiserait continuellement ce plan pour y intégrer les nouvelles technologies et les avancées.

DIFFICULTÉ	DESCRIPTION	RECOMMANDATION
Les facteurs du marché ne peuvent pas stimuler une réduction continue des émissions de GES	Le coût combiné pour mettre sur pied le transport et la distribution, bâtir une nouvelle capacité de production d'électricité propre, remplacer les véhicules alimentés aux combustibles fossiles par des véhicules électriques et établir une nouvelle infrastructure, dont des bornes de recharge, entre autres, est très élevé. Il est peu probable que les moteurs économiques naturels pousseront le marché à adopter ces changements au rythme requis pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050.	Le gouvernement doit établir une réglementation et offrir des encouragements pour favoriser l'adoption à grande échelle de l'électricité et de l'hydrogène dans les secteurs des transports et des bâtiments.
Problèmes de cohésion	Des problèmes de cohésion apparaissent en raison du manque d'harmonisation des règles du marché des exploitants de réseaux. Ce manque d'homogénéité complique l'interprétation des ententes ou des conceptions techniques entre les provinces importatrices et les provinces exportatrices.	Le comité fédéral-provincial de planification devrait être désigné pour harmoniser les règles du marché entre les provinces importatrices et exportatrices. Il soutiendrait une évaluation équitable des avantages des interconnexions électriques et réglerait la façon de bâtir et d'exploiter ces interconnexions.

DIFFICULTÉS DE RÉALISATION

Approbations réglementaires et environnementales	Les défis sociaux et environnementaux ont une grande incidence sur la viabilité des projets. Un projet d'interconnexion peut prendre plus de 10 ans en raison de la difficulté à obtenir une approbation environnementale. Les enjeux rencontrés pendant le processus environnemental comprennent les questions de propriété foncière, le choix du site et la consultation des peuples autochtones.	Une mobilisation en amont des parties prenantes et un processus efficace de consultations publiques permettent d'identifier rapidement les enjeux et d'intégrer les besoins, ce qui peut contribuer à diminuer les risques d'opposition.
---------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

DIFFICULTÉ	DESCRIPTION	RECOMMANDATION
Soutien du public	Tous les grands projets d'infrastructure font face à des retards et à des problèmes de viabilité en raison des consultations publiques et de la prise en compte de son opinion. Pour de nombreux grands projets, le manque de planification des consultations a entraîné une opposition au projet, souvent lié à des coûts importants, des retards et, dans bien des cas, des annulations.	Lancer une série de campagnes de sensibilisation publique qui démontre l'urgence de l'objectif de carboneutralité et l'importance de la contribution de chaque projet d'infrastructure à l'atteinte de cet objectif en considération des besoins des parties prenantes.
Les grands projets exigent d'importants investissements de capital et des profils de risque élevés	Avec l'intensification de la privatisation, les services publics et les entreprises privées sont moins susceptibles d'entreprendre des projets d'infrastructure qui exigent un gros capital initial, comportent des risques plus élevés en ce qui a trait aux coûts et à l'exactitude des échéanciers et ont de longs délais de rendement du capital investi. Par conséquent, les grands projets hydroélectriques et nucléaires semblables à ceux qui constituent l'épine dorsale de la production énergétique de base du Canada sont devenus des entreprises rares ces 30 dernières années.	Un fonds national pour l'énergie propre appuyé par le gouvernement fédéral et administré par la Banque de l'infrastructure du Canada, par exemple, pourrait accroître la confiance du public et encourager les provinces à participer à la création d'un réseau unifié.

TABLEAU 5 DIFFICULTÉS DE RÉALISATION D'UN PROJET

E. Qu'est-ce qui nous attend à long terme ?

Les mesures suivantes seront requises pour atteindre l'objectif de carboneutralité d'ici 2050 en ce qui concerne l'approvisionnement en électricité :

E1. ÉLECTRIFICATION TOTALE

La coordination visant à aboutir à des solutions intersectorielles pour l'électrification complète des secteurs des transports, des bâtiments, de l'agriculture et d'autres secteurs économiques aidera le Canada à atteindre la cible de carboneutralité et à équilibrer la baisse des revenus des services publics due à la gestion de la demande, à la conservation de l'énergie, à la production décentralisée et à la facturation nette.

E2. SOUTIEN AU DÉVELOPPEMENT ACCÉLÉRÉ DE NOUVEAUX PROJETS D'ÉNERGIE PROPRE

Comme mentionné plus haut, pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050, le Canada devra tripler sa capacité de production d'énergie au cours des 30 prochaines années. Cela s'ajoute à la capacité de remplacement requise face à l'arrivée en fin de vie des centrales au charbon, au gaz et nucléaires. Le défi que représente l'accroissement de la capacité de production à un tel rythme est sans précédent dans l'histoire du Canada.

E3. RÉSEAU DE TRANSPORT PANCANADIEN

Il s'agit de réduire les obstacles réglementaires et de construire un réseau de transport intégré, qui comprendrait la boucle de l'Atlantique, les interconnexions de l'Ouest et des interconnexions supplémentaires avec les États-Unis. De plus, les réseaux provinciaux locaux devront être renforcés pour permettre une plus grande intégration de la production d'énergie renouvelable.

E4. RÉSEAU INTELLIGENT ET INTERNET DES OBJETS POUR MIEUX GÉRER LES ACTIFS DE DISTRIBUTION

L'intensification de l'utilisation d'un réseau intelligent et de l'Internet des objets permettra une intégration accrue des ressources énergétiques renouvelables ainsi que la gestion et la conservation de l'énergie à l'échelle de la distribution. Ces technologies soutiendront également les actifs de distribution en résolvant des problèmes tels que l'électrification des transports, la production intermittente et le vieillissement de l'infrastructure, tout en maintenant et en améliorant la fiabilité du réseau et la qualité de l'approvisionnement.

E5. STOCKAGE D'ÉNERGIE À L'ÉCHELLE DU RÉSEAU

Des encouragements sont nécessaires pour concevoir des solutions de stockage d'énergie à l'échelle du réseau qui procureraient la souplesse nécessaire pour intégrer une production d'énergie renouvelable intermittente, notamment hydroélectricité à réserve pompée. Pour ce faire, on pourrait combiner de nouveaux sites propices à aménagement hydroélectrique à réserve pompée et la détermination des projets hydroélectriques actuels dans lesquels il serait possible d'accroître, ou de réduire, le stockage de façon responsable sur les plans socioenvironnemental et économique.

E6. CENTRALES ÉLECTRIQUES À CYCLE COMBINÉ À L'HYDROGÈNE

Offrir des mesures incitatives pour les centrales au gaz naturel à cycle combiné afin que les turbines à gaz soient modernisées de façon à intégrer un certain pourcentage de combustion d'hydrogène, avec la capacité d'augmenter graduellement ce pourcentage à mesure que les équipementiers améliorent le procédé. Avec cette solution, il serait possible de maintenir l'infrastructure de la centrale tout en réduisant les émissions de GES.

E7. PRODUCTION DÉCENTRALISÉE D'ÉNERGIE RENOUVELABLE ET CONSTRUCTION DE MICRORÉSEAUX

La réduction des coûts de la production décentralisée d'énergie renouvelable et du stockage d'énergie soutiendra les efforts des collectivités éloignées et des sites d'extraction des ressources pour éliminer progressivement la production de diesel et bâtir des microréseaux qui favorisent la production d'énergie non émettrice, durable et fiable.

E8. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT SUR LA PRODUCTION D'ÉNERGIE PROPRE

Soutenir la recherche et le développement concernant les technologies de production, de transport et de distribution d'énergie qui appuient l'atteinte de la cible de carboneutralité, notamment l'hydrogène vert, le CSC, les PRM, l'énergie éolienne extracôtière, l'énergie géothermique, l'énergie houlomotrice et l'énergie marémotrice.



NOTRE PLAN DIRECTEUR POUR UN AVENIR CARBONEUTRE

4. Transition vers une économie carboneutre

A. Vers un système carboneutre en 2050

Le gouvernement du Canada élabore actuellement le cadre de la carboneutralité pour 2050, et il devra brosser le portrait de l'économie carboneutre pour 2050. Dans ce contexte, nous croyons que les catalyseurs suivants sont essentiels au succès de cette initiative.

Nos recommandations sont éclairées par un examen des plans et des rapports du gouvernement concernant la décarbonisation, par la consultation d'experts des domaines techniques d'intérêt et par une analyse approfondie des initiatives en cours à l'échelle mondiale, adaptées au contexte canadien.

TRANSITION VERS UNE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ 100 % SANS ÉMISSIONS NETTES :

Le Canada bénéficie de l'accès à une grande quantité d'énergie à émissions de carbone faibles ou nulles, et ces sources d'énergie devraient constituer l'épine dorsale de notre économie carboneutre. On doit commencer par les options hydroélectriques, nucléaires et la production thermique à l'hydrogène, qui sont nécessaires pour assurer la stabilité du réseau électrique. Elles fournissent également la capacité requise pour une plus grande intégration des technologies concernant les énergies renouvelables, comme l'énergie éolienne, solaire, houlomotrice ou marémotrice. Hormis l'hydroélectricité, qui dépend de l'emplacement, le nucléaire est la seule source de production d'électricité de base sans émissions de GES garantissant la sécurité de l'approvisionnement et constitue un élément essentiel d'un système énergétique stable. Si le gaz naturel demeure dans le bouquet de 2050, il devra être accompagné du captage du carbone. Le stockage d'énergie peut également jouer un rôle important dans certains scénarios, afin d'optimiser la planification du réseau électrique.

ÉLECTRIFICATION DE TOUS LES SECTEURS — LE CHOIX DU MOMENT EST CRUCIAL :

La mise sur pied d'un réseau électrique carboneutre permettrait de réaliser d'importants gains en matière de GES grâce à l'électrification des divers secteurs axés sur le consommateur, où les technologies ont déjà fait leurs preuves. Qu'il s'agisse de promouvoir les véhicules électriques ou les bâtiments écoénergétiques à faibles émissions, un virage majeur vers des secteurs entièrement électrifiés s'impose. Le choix du moment de ces initiatives est crucial, car nous devons faire en sorte que le comportement des consommateurs corresponde à l'offre d'électricité sans émissions. Dans ce contexte, il est essentiel que des systèmes de production « prêts à être déployés », comme les PRM, soient disponibles pour que ce changement se produise.

PLANIFICATION À L'ÉCHELLE DU PAYS ET COLLABORATION INTERPROVINCIALE :

Les Canadiens souscrivent au principe d'un avenir à faibles émissions et durable, et un changement a été amorcé d'un océan à l'autre. Toutefois, pour maximiser le rendement des investissements dans les nouveaux modes de production, il faut coordonner les initiatives. Une entité de planification centralisée et intégrée aux fins du développement d'un réseau électrique canadien interconnecté doit offrir une plateforme permettant la consultation, la collaboration et l'échange de données entre les organismes provinciaux. Les ententes interprovinciales sur les principales interconnexions électriques, la normalisation des véhicules électriques et des infrastructures de bâtiments intelligentes, ainsi que le partage des mégadonnées, sont des facteurs clés d'une économie carboneutre. Cet organisme devrait également envisager de fournir une approche intégrée de la planification des systèmes, qui vise à optimiser l'utilisation des ressources et de l'énergie partout au Canada.

MOBILISATION DU MILIEU DES AFFAIRES ET DE L'INDUSTRIE :

Il ne peut pas y avoir de révolution carboneutre sans participation active du milieu des affaires. Des cadres d'affaires détaillés doivent être établis pour appuyer la transformation du marché dans tous les secteurs, pour rationaliser les projets de réduction des GES et pour accélérer le développement de chaînes d'approvisionnement viables. Les décideurs sont encouragés à s'asseoir avec les entreprises pour comprendre les obstacles qu'elles rencontrent dans le déploiement de technologies perturbatrices et novatrices. Des plans détaillés offrant des prévisions et des engagements dans chaque secteur sont ensuite nécessaires pour que la transition ait lieu. Les premiers à se lancer prendront de très gros risques commerciaux en s'aventurant sur des territoires techniques pour lesquels ils ont une expertise limitée, où les chaînes d'approvisionnement sont inexistantes et où l'incertitude règne. Les cadres doivent donc assurer la stabilité nécessaire au soutien de l'investissement et assurer un rendement du capital investi pour toutes les parties prenantes, tant sur le plan financier que sur le plan des progrès scientifiques.

UN ENGAGEMENT INÉBRANLABLE — ET RAPIDE — À L'ÉGARD DE L'INNOVATION :

Une économie carboneutre signifie que les technologies qui en sont à leurs balbutiements aujourd'hui seront pleinement déployées, opérationnelles et rentables d'ici 2050, sans qu'il soit encore nécessaire de les subventionner. Parmi celles-ci, mentionnons l'amélioration du procédé de captage du carbone, le déploiement rapide de systèmes de gestion de l'énergie ou des algorithmes intelligents pour l'optimisation de l'acheminement et de l'utilisation de l'électricité.

À ce jour, des avancées technologiques importantes sont encore nécessaires pour réaliser la vision pour 2050 énoncée dans la plupart des plans. Comme la plupart des installations énergétiques et industrielles lourdes ont des cycles de vie de plusieurs décennies, il est urgent de commencer à lancer des projets pilotes et des projets de démonstration dans tous les secteurs. Il sera essentiel de soutenir ces nouvelles technologies durant la transition, car si aucune analyse de rentabilisation n'a encore été faite jusqu'ici, une telle analyse sera certainement réalisée dans les décennies à venir. Ces entreprises novatrices devraient également être résilientes face aux fluctuations des économies mondiales, et un sentiment de stabilité et d'engagement doit être véhiculé partout au Canada afin de maximiser les avantages à long terme d'une société à faibles émissions de carbone et l'engagement continu du milieu des affaires.

MISE SUR PIED DE MARCHÉS STABLES DE L'HYDROGÈNE (OU D'AUTRES COMBUSTIBLES DE REMPLACEMENT) :

Un élément important de la décarbonisation de notre économie est le traitement des procédés et des activités industriels énergivores et souvent implantés dans des endroits éloignés. Des combustibles de remplacement ont déjà été déployés pour réduire les émissions dans les secteurs tels que le transport de marchandises, les procédés industriels et la production thermique de remplacement. Un marché de l'hydrogène dynamique et économiquement durable est crucial pour que ces industries puissent passer à la carboneutralité. Cette initiative permettra également au Canada de puiser dans son surplus d'électricité pour produire de l'hydrogène à partir de l'électrolyse, un procédé entièrement propre.

LEADERSHIP DES COMMUNAUTÉS AUTOCHTONES ET TRANSITION ÉQUITABLE :

L'abandon des combustibles fossiles au profit d'une économie carboneutre dépend entièrement des personnes qui peuplent nos collectivités diversifiées. Toute solution doit garantir un résultat juste et équitable. Les décideurs et les dirigeants industriels devront travailler avec les collectivités partout au Canada et leur offrir les moyens de stimuler le changement par le biais de consultations, du développement économique ainsi que de la formation de la main-d'œuvre et de la création d'emplois dans de nouveaux champs d'expertise. Le rôle des dirigeants locaux est essentiel pour parvenir aux meilleures solutions économiquement durables et à un avenir sûr qui préserve notre environnement. Les moyens de décarboniser les collectivités éloignées sur le vaste territoire canadien, grâce à la transition vers des carburants sans émissions et à l'électricité de source renouvelable, sont un élément de la solution qui reflète les défis uniques du Canada sur la voie de la carboneutralité.

CHANGEMENT SOCIAL : Le défi qui nous attend nous obligera à repenser nos actions à chaque étape. Qu'il s'agisse de nos habitudes de consommation, de la façon dont nous construisons et exploitons nos installations ou de la manière dont nous mesurons nos succès, tout sera remis en question. Les consommateurs auront un effet majeur sur la transition vers la carboneutralité en réduisant leur consommation de ressources inutiles et en adoptant de nouveaux outils technologiques, tels que les véhicules électriques, les bâtiments intelligents et écoénergétiques ainsi que les procédés énergétiques à émissions de carbone faibles ou nulles. En cette époque où l'information non vérifiée circule librement dans les médias, il est crucial de donner aux Canadiens les moyens de faire les bons choix, de façon indépendante. L'éducation et l'autonomisation de la population sont d'autres impératifs pour maintenir le cap.

B. À quoi ressemblera un système carboneutre en 2050 ?

Le système carboneutre de 2050 devrait être alimenté par de l'électricité propre et par un solide secteur de l'hydrogène, tous deux épaulés par le captage et le stockage du carbone (CSC). Les éléments d'un tel écosystème respectueux de l'environnement devront comprendre un robuste réseau de transport et de distribution d'énergie et un important stockage d'énergie sous toutes ses formes (électrique, hydrogène, thermique, etc.). La gestion de la demande et la conservation des ressources seront possibles grâce à l'Internet des objets et à l'utilisation optimisée de nos ressources.

Cette section présente une vue d'ensemble de ce à quoi pourrait ressembler un système carboneutre en 2050. Elle donne une idée du nombre considérable de projets, d'investissements, de politiques et de transformations sociales nécessaires pour réaliser cette vision.

Pour bien comprendre l'ampleur du besoin en énergie propre supplémentaire, il faut savoir que les chiffres ne tiennent même pas compte du retrait des moyens de production actuels d'ici 2050. En plus des nouvelles installations dont il est question ci-dessous, il faut ajouter l'entretien et le renouvellement des actifs sans émissions existant et le remplacement des moyens actuels de production émetteurs de GES.

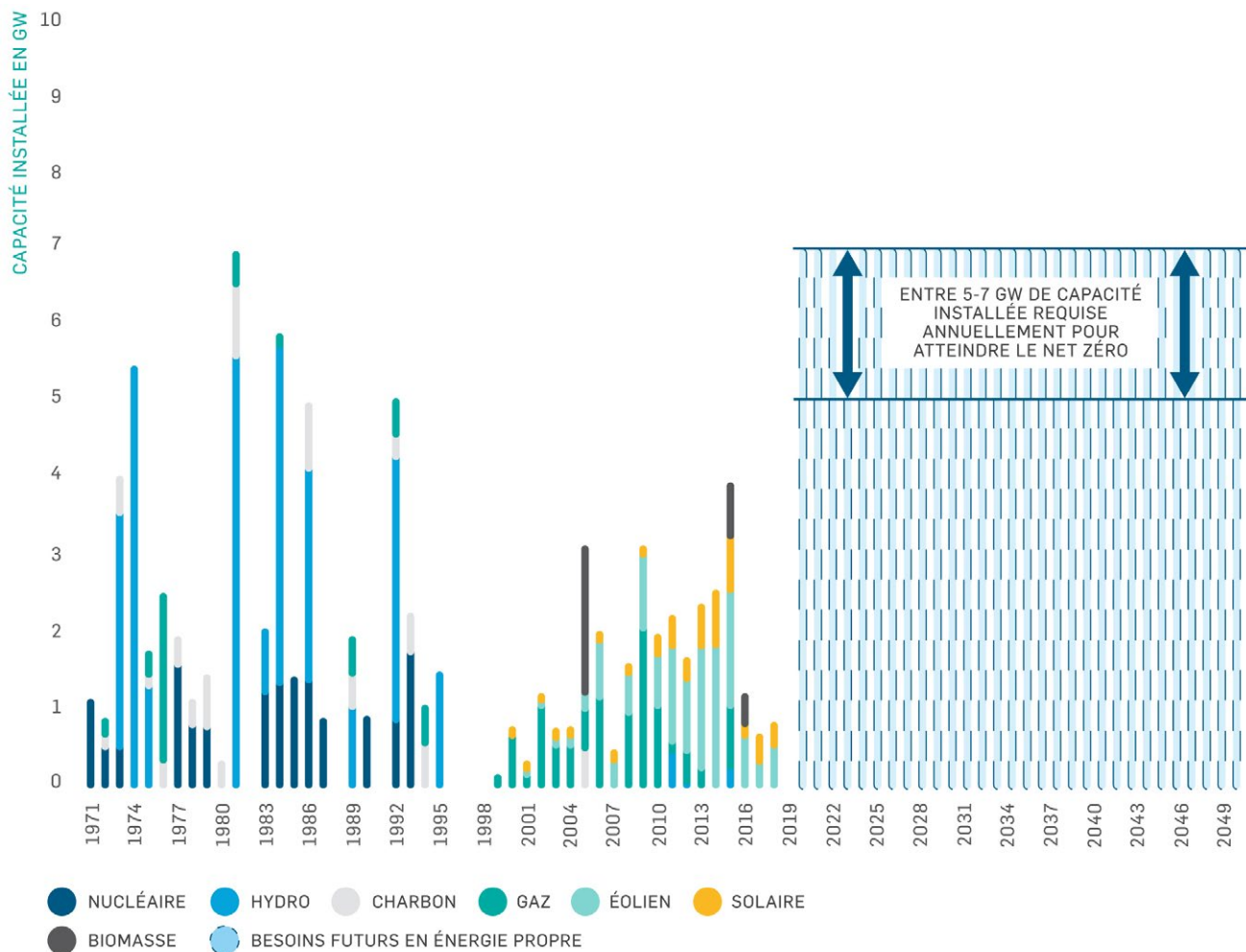


FIGURE 17 CONSTRUCTION DE LA CAPACITÉ DE PRODUCTION : BESOINS HISTORIQUES ET BESOINS FUTURS

B1. ÉLECTRIFICATION

Comme il est décrit tout au long de ce document, l'électrification des transports, des bâtiments et des procédés industriels lourds permettraient de réduire considérablement les émissions de GES. Plusieurs études sur la carboneutralité concluent que la demande annuelle d'électricité au Canada passerait de 500 TWh à quelque chose entre 1 250 et 2 000 TWh d'ici 2050 [réf. 7, réf. 8, réf. 42], la plupart des scénarios estimant une demande totale d'électricité d'environ 1 500 TWh. C'est notamment le cas du scénario Deep Decarbonization Pathways Project (DDPP) — High ambition, qui suppose une réduction des émissions d'ici 2050 de 88 % par rapport aux niveaux enregistrés en 2015. Le DDPP présume que la part de notre secteur de l'électricité dans la réponse à la demande d'énergie au Canada passera de 20 % à environ 43 % d'ici 2050.

Les besoins de production d'énergie d'un système carboneutre en 2050 consommant 1 500 TWh d'électricité correspondent à une puissance électrique installée potentielle d'environ 300 à 350 GW, une augmentation notable par rapport aux 150 GW installés aujourd'hui. Toute nouvelle installation de production d'électricité devra être exempte d'émissions de carbone ou comporter le CSC.

Même si nous considérons uniquement la composante de production d'électricité du futur système, le rythme de déploiement de la nouvelle puissance sera sans précédent dans l'histoire du Canada. En effet, le pays a en moyenne ajouté 2 GW par an de puissance de production électrique ces 50 dernières années. De plus, le maximum d'ajout de puissance de production a été d'environ 7 GW, il y a déjà 40 ans.

Pour atteindre l'objectif ambitieux d'une capacité de production de 300 à 350 GW d'ici 2050, le Canada devra accroître de façon importante sa puissance de production au cours des 30 prochaines années. Selon la quantité d'énergie renouvelable incluse dans le scénario, la hausse annuelle de puissance devra être de 5 à 7 GW au cours des 30 prochaines années, soit environ trois fois la puissance annuelle moyenne ajoutée ces 50 dernières années (figure 17).

Il convient de noter que les facteurs d'utilisation des énergies éolienne et solaire sont plus faibles en raison de l'intermittence de la production, de sorte que l'augmentation de la proportion de ses énergies exigera une puissance installée totale plus élevée pour atteindre la production globale. L'énergie nucléaire et l'hydroélectricité affichant des facteurs d'utilisation plus élevés, une hausse de leur part dans la production permettra de réduire la puissance totale installée.

Les chiffres qui suivent illustrent l'ampleur des défis qui nous attendent. Avec les facteurs d'utilisation types d'aujourd'hui, si l'on devait relever le défi au moyen d'un seul mode de production d'électricité, et sans tenir compte du remplacement des moyens de production actuels, il faudrait une production supplémentaire de 1 000 TWh, soit :

- 115 gros réservoirs hydroélectriques de 1 100 MW, soit une puissance semblable à celle du projet Site C de BC Hydro ;
- 114 gros réacteurs nucléaires de 1 000 MW (c.-à-d. 19 sites de la taille de celui de Bruce Power, en Ontario) ;
- 380 petits réacteurs modulaires de 300 MW ;
- 20 000 éoliennes de 10 MW ;
- 200 parcs de 100 éoliennes d'une puissance cumulée de 1 000 MW chacun ;
- Plus de 400 GW de puissance solaire cumulée.

Il s'agit donc d'une tâche monumentale, et le Canada n'a pas entrepris un travail de cette envergure depuis un moment. Il faut en effet remonter aux années 1970, 1980 et même 1990 pour retrouver le moment où le Canada s'est approché d'un tel niveau de construction d'infrastructure. Grâce à des innovations dans les techniques de construction, à la conception modulaire et à l'efficacité globale, le Canada pourrait donc relever le défi, en supposant que l'on se trouve dans une situation économique et politique favorable et que l'on dispose des facteurs habilitants, d'une planification cohérente à l'échelle du système national et, surtout, de la volonté de le faire.

B2. PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Il ne fait aucun doute qu'une très grande capacité de production d'électricité propre sera nécessaire pour permettre l'électrification des secteurs économiques et l'atteinte de l'objectif de carboneutralité d'ici 2050. Pour ce faire, le Canada devra tripler sa production électrique au cours des 30 prochaines années. Il faudra donc mettre au point simultanément toutes les technologies de production sans émissions possibles, y compris la production éolienne extracôtière dans l'Atlantique et le Pacifique, l'hydroélectricité dans les régions éloignées et le nucléaire au moyen de grandes centrales partout au Canada. L'examen ci-dessous s'appuie sur plusieurs études [réf. 7, réf. 8, réf. 10, réf. 42] qui avancent différents bouquets énergétiques pour obtenir des degrés variables de décarbonisation. Le but est de fournir un ordre de grandeur de la transformation requise pour atteindre la carboneutralité grâce à une électrification accrue.

HYDROÉLECTRICITÉ

La plupart des scénarios étudiés dans les publications recommandent une forte augmentation de la puissance hydroélectrique installée pour soutenir la demande d'électrification prévue et pour équilibrer la nature intermittente des autres ressources renouvelables, comme l'énergie éolienne, solaire, houlomotrice ou marémotrice. La hausse de la production hydroélectrique pourrait être obtenue en partie par l'amélioration de l'efficacité des turbines des centrales existantes. Aujourd'hui, environ 60 % de la production d'électricité au Canada est de l'hydroélectricité, à partir d'une puissance installée de 80 GW. D'après les publications, les nouvelles ressources hydroélectriques combleront environ la moitié des besoins en nouvelle électricité. Si l'on tient compte du fait que la construction de l'infrastructure hydroélectrique et le transport connexe prendrait au moins 10 ans, le pays aurait alors besoin d'un développement hydroélectrique d'environ 3,5 GW en moyenne par année entre 2030 et 2050.

ÉNERGIE NUCLÉAIRE

En 2017, l'énergie nucléaire était la deuxième source d'énergie propre en importance, avec une puissance installée de 13,5 GW, et fournissait environ 15 % de l'électricité au Canada au moyen de 19 réacteurs commerciaux principalement situés en Ontario. Le Canada est devenu un acteur important dans l'industrie nucléaire mondiale grâce, à partir des années 1950, aux investissements fédéraux dans la mise sur pied d'une technologie nucléaire commerciale nationale. Cela a mené à la conception et au déploiement des réacteurs CANDU® MD, un type de réacteur unique qui produit de l'électricité par brûlage d'uranium naturel non enrichi, une ressource naturelle abondante en Saskatchewan. Cependant, malgré le fait que le Canada continue à jouer un grand rôle dans le secteur nucléaire commercial mondial — plus de 200 entreprises canadiennes possèdent des capacités de conception, de fabrication et de construction d'équipement lourd —, aucun nouveau réacteur n'y a été construit depuis le début des années 1990.

Contrairement aux récentes prévisions de la Régie de l'énergie du Canada pour 2020 [réf. 10], plusieurs autres sources officielles et universitaires [réf. 7, réf. 8, réf. 42] prévoient une augmentation très importante de la production d'électricité d'origine nucléaire. Le Canada dispose à la fois d'une technologie actuelle susceptible d'être déployée à court terme et d'une technologie innovante de nouvelle génération en cours de mise au point pour une utilisation future. Toutefois, avec les délais de délivrance de permis et de déploiement d'aujourd'hui, il peut s'écouler de 8 à 10 ans avant que de l'électricité soit produite une fois le site choisi. Il sera important de tenir compte de ce délai dans les plans de système sans émissions nettes et de veiller à ce qu'un nombre suffisant de projets simultanés se déroulent en parallèle pour répondre à l'énorme demande prévue pour 2050.

Selon nous, pour répondre aux besoins supplémentaires d'électricité carboneutre, il faudrait lancer immédiatement le processus d'attribution des permis pour le choix de l'emplacement des réacteurs de la classe 1 000 MW. On pourrait alors raisonnablement prévoir que le premier réacteur de cette puissance entrerait en service d'ici 2030. Selon un scénario à rythme de construction modéré, on pourrait ensuite mettre en service un réacteur de cette classe chaque année jusqu'en 2050. Une fois la conception des PRM terminée, trois PRM de 300 MW pourraient être ajoutés au réseau annuellement à partir de 2035 environ, parallèlement aux réacteurs de la classe 1 000 MW. Ce scénario permettrait l'ajout de 35 GW d'électricité nucléaire au Canada d'ici 2050. Si on envisage un scénario de construction accéléré, il serait alors possible d'atteindre à l'échéance de 2050 une production électrique de 55 GW. Bien qu'ambitieux, le rythme de ce scénario est inférieur à la cadence actuelle de construction de centrales nucléaires de la Chine et de l'Inde. Pour que ces projections se réalisent, il faudra accroître la capacité des organismes réglementaires et de la chaîne d'approvisionnement nucléaires au Canada à court terme pour soutenir toutes les activités associées aux programmes de construction nucléaire. L'énergie nucléaire présentant un facteur d'utilisation élevé, les 35 à 55 GW de puissance installée obtenus se traduiraient par 275 à 440 TWh de nouvelle énergie nucléaire d'ici 2050.

ÉNERGIE ÉOLIENNE

Aujourd'hui, l'énergie éolienne est l'un des modes de production qui croît le plus rapidement au Canada et dans le monde. Le Canada a installé en moyenne 1 GW de puissance éolienne par année ces dix dernières années. Cette puissance a été atteinte sans pour autant que soit exploité le potentiel éolien extracôtier des côtes Est et Ouest. En raison de la baisse des coûts et de la hausse de la vitesse de construction (conformément à la réf. 10), le Canada pourrait installer 90 GW de puissance éolienne supplémentaires d'ici 2050. Compte tenu du facteur d'utilisation de l'éolien, cela se traduirait par environ 300 TWh d'électricité en plus. Cependant, les réseaux provinciaux actuels sont congestionnés et la capacité des réseaux de transport n'est pas suffisante pour acheminer l'énergie éolienne extracôticière vers les lieux de consommation. La mise en place d'un réseau de transport pancanadien solide et la modernisation du réseau de transport provincial seront donc cruciales pour le développement de l'énergie éolienne.

ÉNERGIE SOLAIRE

Bien que la production d'énergie solaire représente actuellement une petite partie de la puissance de production installée, on s'attend à ce que la décarbonisation des bâtiments, des industries lourdes et du secteur des transports stimule une augmentation rapide de la puissance solaire. Comparativement à d'autres modes de production, l'énergie solaire est modulaire et ne nécessite pas de réseaux de transport ou de distribution solides, car elle peut être installée en toute sécurité près de la charge finale. Comme les prix des panneaux solaires sont à la baisse et que leur efficacité est en hausse, la part de l'énergie solaire pourrait augmenter. En revanche, la technologie solaire affiche un faible facteur d'utilisation. Elle produit donc généralement moins d'énergie que l'hydroélectricité et l'énergie nucléaire, ce qui signifie que la part de l'électricité d'origine solaire demeurera basse dans le bouquet de 2050. En nous basant sur les publications, nous présumons que la production à partir de l'énergie solaire s'accroîtra pour fournir environ 60 TWh d'ici 2050.

GAZ NATUREL

L'utilisation de turbines à gaz simples et à cycle combiné continuera de jouer un rôle important dans la composition de la production d'électricité au Canada à court et à moyen terme, compte tenu de leur potentiel de déploiement rapide par rapport aux autres technologies de production et du rôle crucial que les centrales au gaz naturel jouent dans la stabilisation du réseau et dans la réponse face à l'évolution rapide de la demande. On prévoit également que les turbines à gaz remplaceront toutes les centrales au charbon restantes. Cette hypothèse se reflète dans les plans intégrés des ressources de l'Alberta, de la Saskatchewan, du Nouveau-Brunswick et de la Nouvelle-Écosse. Pour réduire et éventuellement éliminer les émissions de GES, les centrales électriques à cycle combiné devront être construites ou modernisées de façon à intégrer le CSC, ou être alimentées à l'hydrogène propre ou à un mélange de combustibles propres.

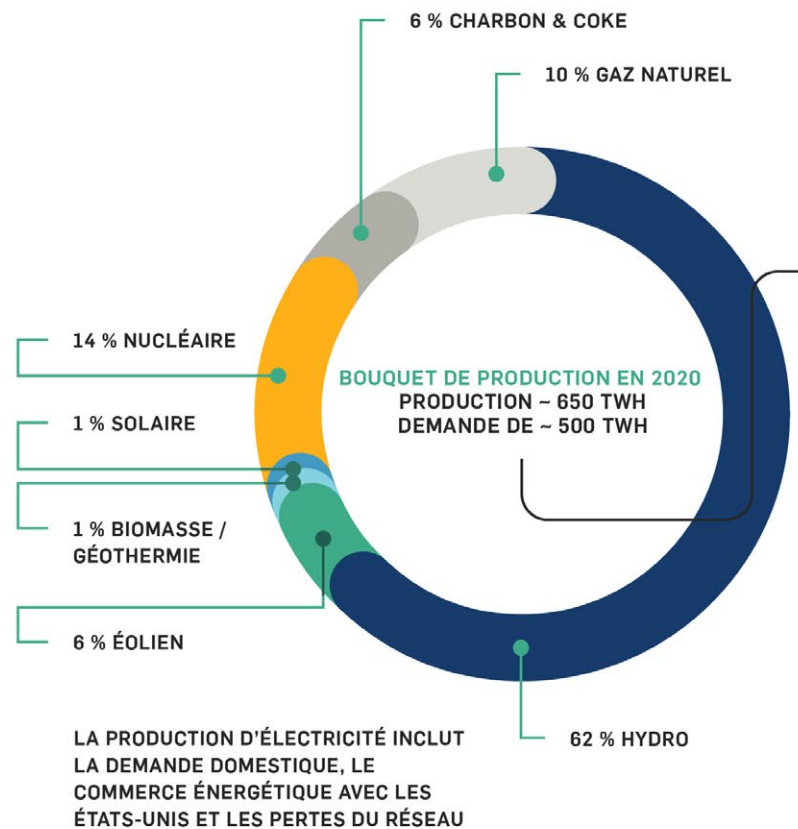
BIOÉNERGIE, ÉNERGIE HOULOMOTRICE ET ÉNERGIE MARÉMOTRICE

On s'attend à ce que les procédés de production novateurs, comme la bioénergie, l'énergie marémotrice et l'énergie houlomotrice, connaissent un développement rapide et contribuent à la combinaison énergétique lorsqu'ils arriveront à maturité. On ne s'attend toutefois pas à ce qu'ils concurrencent l'hydroélectricité ou l'énergie nucléaire aux fins de l'objectif 2050.

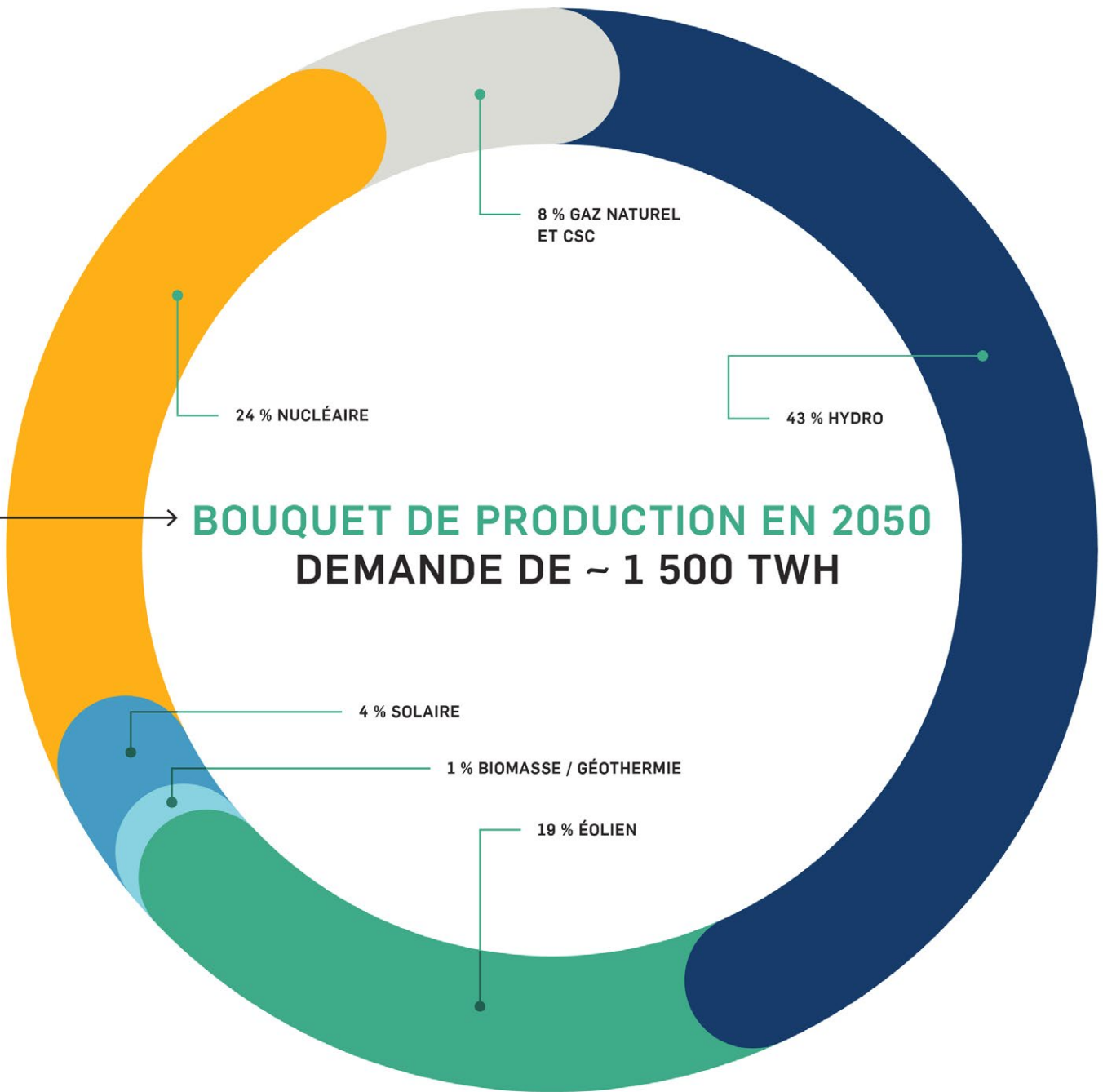
SCÉNARIO POSSIBLE POUR LE BOUQUET DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN 2050

À la figure 18, nous proposons un scénario présentant la répartition possible du bouquet d'énergie en 2050, partiellement à partir des données tirées des réf. 7, réf. 8, réf. 10 et réf. 42. Nous avons ajusté les chiffres en fonction des tendances décrites dans cette section pour chaque mode de production et les avons adaptés de façon à répondre à une demande prévue de 1 500 TWh, ce qui correspond à notre scénario net zéro.

FIGURE 18 COMPARAISON DE LA PRODUCTION ENTRE 2020 ET 2050 PAR SOURCE



Le Canada devra tripler sa capacité de production d'énergie au cours des 30 prochaines années.



Le bouquet de production d'électricité proposé à la figure 18 s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- La production d'électricité à partir du charbon et du coke et du pétrole est négligeable en 2050, comme le suggèrent les publications actuelles¹ ;
- La production au gaz naturel augmente conformément aux prévisions du rapport de la Régie de l'énergie du Canada (réf. 10), tout comme le captage et le stockage du carbone dans les GES produits. Ceci inclut le gaz naturel utilisé pour produire de l'hydrogène bleu ;
- Le secteur nucléaire canadien augmente selon le scénario de rythme de production modéré décrit plus haut, pour fournir environ 360 TWh de la demande, compte tenu également des centrales qui pourraient être mises hors service dans l'intervalle ;
- L'éolien et le solaire augmentent notablement, conformément aux publications disponibles, tout comme le volume de stockage d'énergie et de production d'hydrogène vert. L'énergie éolienne comprend aussi l'éolien extracôtier ;
- La croissance la plus forte provient du secteur hydroélectrique, par l'exploitation d'une partie des ressources naturelles du Canada.

C. Transport d'électricité

Les réseaux de transport d'électricité actuels ne permettent pas ce niveau d'intégration des ressources de production. En fait, de nombreux projets de production d'énergie renouvelable au Canada éprouvent des difficultés à prendre de l'ampleur en raison des contraintes de transport.

Par conséquent, on ne saurait surestimer la nécessité d'un réseau de transport et de distribution d'électricité plus robuste, capable de soutenir l'électrification de masse. Des réseaux intelligents, résilients, interconnectés et dotés d'une capacité de stockage sont cruciaux pour utiliser de façon plus importante l'énergie renouvelable intermittente et pour combler l'écart entre le niveau moyen de la demande et la capacité de pointe.

Par exemple, il est possible d'exploiter la capacité élevée de l'énergie éolienne extracôtière dans l'Atlantique, mais les lignes de transport d'électricité de l'Île-du-Prince-Édouard ou de la Nouvelle-Écosse sont limitées à 200 MW et 350 MW, respectivement. Du côté du Pacifique, la capacité d'interconnexion entre la Colombie-Britannique et l'Alberta est limitée à 1 000 MW. Les aménagements hydroélectriques font face à des contraintes de transport semblables, car la plupart des sites potentiels sont situés dans le nord du Canada et n'ont pas accès à un vaste réseau de transport pour acheminer l'électricité vers les lieux de consommation.

Une planification cohérente et intégrée des ressources qui suit la hausse de la demande d'électrification et qui englobe la planification de la production et du transport dans l'ensemble du Canada est essentielle à la réussite du projet de carboneutralité pour 2050. Comme il a été mentionné, les projets de transport, en particulier ceux qui transcendent les frontières provinciales et s'étendent jusqu'aux États-Unis, dans de nombreux États, exigent une planification de grande envergure, l'obtention de permis, une évaluation environnementale et une consultation publique avant le début de la conception et de la construction. Ces processus peuvent facilement ajouter 10 ans au développement global du projet.

La mise en place de réseaux plus musclés sera essentielle, compte tenu de la grande capacité de transport requis pour atteindre la cible de carboneutralité et de la disponibilité limitée des corridors de transport d'électricité. On pourrait augmenter la capacité des corridors grâce au déploiement de lignes supplémentaires de transport à haute tension à 1 000 kV, de lignes multiterminales de transport à haute tension à courant continu ou de réseaux haute tension à courant continu superposés. Ces nouvelles solutions technologiques pourraient compléter le réseau électrique à courant alternatif actuel, tout en accroissant la capacité des corridors existants en leur permettant d'acheminer des milliers de MW d'une province à l'autre.

1 LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ PROVENANT DU PÉTROLE N'APPARAÎT PAS DANS LA FIGURE DE 2020 PARCE QU'ELLE REPRÉSENTE UNE PROPORTION NÉGLIGEABLE DE LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE.

C1. HYDROGÈNE

Le Canada est l'un des pays où les coûts de production de l'hydrogène bleu, au moyen du CSC, et de l'hydrogène vert sont les plus bas au monde. Le coût de production de l'hydrogène bleu, à partir du gaz naturel avec CSC, est estimé à 10 \$/GJ (PCS) H₂ et celui de l'hydrogène vert à partir de l'hydroélectricité, à environ 20 \$/GJ (HHV) H₂. Au Canada, le coût de production de l'hydrogène bleu est faible par rapport à celui de l'hydrogène vert, mais on s'attend à ce que le coût de ce dernier diminue considérablement avec les progrès technologiques et l'amélioration de l'efficacité des procédés. Les prix de l'hydrogène semblent généralement concurrentiels par rapport au coût moyen du diesel de gros, à 20 \$/GJ (PCS) [réf. 65].

L'hydrogène bleu peut être produit de façon économique dans les centres pétroliers et gaziers de l'Alberta et de la Saskatchewan, tandis que l'hydrogène vert peut être produit dans les provinces qui ont accès à de l'hydroélectricité à faible coût, comme le Manitoba et le Québec.

Une étude récente [réf. 30] montre qu'un marché pancanadien de l'hydrogène pour utilisation finale pourrait répondre environ tiers de la consommation d'énergie primaire projetée au Canada. Pour atteindre ce niveau, la capacité de production du Canada devra être multipliée par huit, passant de 8 kt H₂/jour à environ 64 kt H₂/jour. En raison de toutes les avancées technologiques prévues en matière d'utilisation finale d'ici 2050, l'hydrogène pourrait être utilisé comme source de combustible pour le transport, les procédés industriels et le chauffage des bâtiments. L'augmentation de la capacité de production d'hydrogène grâce au gaz naturel et au procédé de captage, utilisation et stockage du carbone exigera du Canada une capacité de CSC d'environ 200 Mt CO₂ par an, soit cinq fois la capacité mondiale aujourd'hui.

C2. SYSTÈME CARBONEUTRE EN 2050

La figure 19 présente une vision du système carboneutre en 2050 au Canada. La production d'électricité s'effectuera à partir de sources non émettrices de GES, comme l'hydroélectricité, le nucléaire, l'éolien, le solaire, les vagues et la marée. À cela s'ajouteront des turbines au gaz naturel combinées au CSC, ou employant l'hydrogène, la bioénergie et d'autres combustibles non émetteurs qui pourraient voir le jour. Comme il a été mentionné précédemment, le Canada aurait besoin d'ajouter d'ici 2050 de 5 à 7 GW de puissance par année (en moyenne) pour répondre à la demande projetée de 1 000 TWh/an découlant de l'électrification des secteurs économiques.

Du côté de l'utilisation finale, on s'attend à ce que les hydrogènes bleu et vert remplacent les combustibles fossiles dans les transports, en particulier pour le camionnage lourd, et dans les procédés industriels.

Pour assurer l'équilibre entre la production d'électricité et la demande, le système carboneutre de 2050 devra être soutenu par un robuste réseau pancanadien permettant l'intégration de la production intermittente d'énergie renouvelable. Pour maximiser l'utilisation efficace des ressources, ce réseau reposera sur le stockage de l'énergie, la conservation de l'énergie, la réponse à la demande et le déploiement à grande échelle de réseaux intelligents et de l'Internet des objets.

Le CSC permettra de régler le reste des émissions de GES produites, tout en rendant possible la production d'hydrogène bleu dans les centrales au gaz naturel. Il donnera la possibilité d'équilibrer les émissions de GES dans des secteurs où il serait très difficile ou coûteux de délaissier les combustibles fossiles.

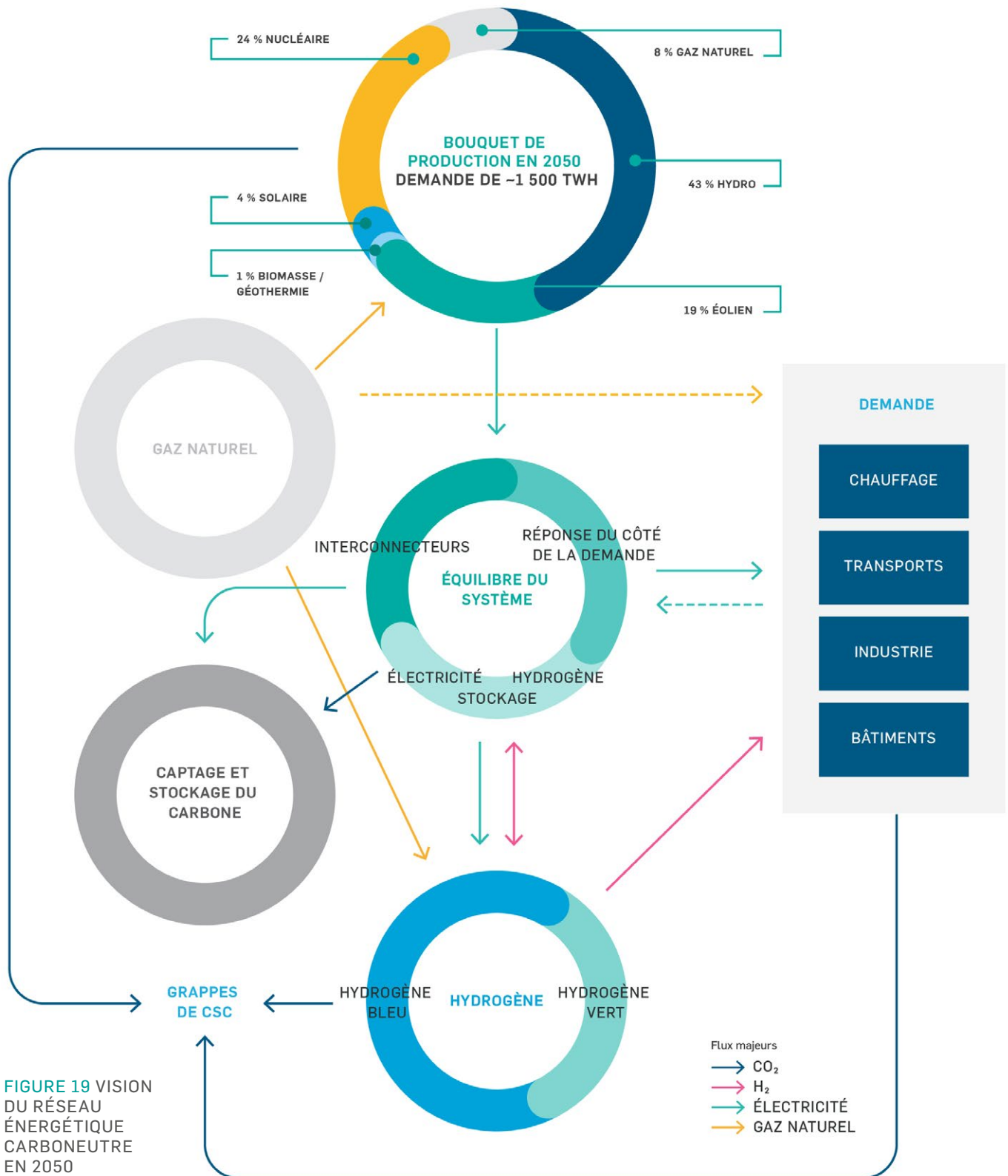


FIGURE 19 VISION DU RÉSEAU ÉNERGÉTIQUE CARBONEUTRE EN 2050

D. Besoin urgent et immédiat de projets d'infrastructure

Étant donné le très grand nombre de projets nécessaires pour réaliser la vision carboneutre de 2050, un échéancier de 30 ans peut être considéré comme quelque peu court dans le milieu de l'infrastructure, où l'achèvement de projets peut prendre de 5 à 10 ans entre la conception et la mise en service et où les installations ont une durée de vie de plus de 40 ans. En outre, comme aucun plan ne devrait être immuable, l'initiative carboneutre devra s'appuyer sur des initiatives et des investissements résilients « sans regret », qui sont logiques sur le plan scientifique et économique selon divers scénarios.

Nous présentons ci-dessous certains des éléments importants à considérer pour rationaliser et classer l'infrastructure nécessaire à un système intersectoriel carboneutre susceptible d'être immédiatement déployé :

1. Les projets devront être évalués en fonction de nombreux critères, y compris de points cruciaux, comme la création d'emplois au Canada par dollar dépensé, les exigences en matière d'emplacement et les avantages pour les collectivités locales, le rendement économique à long terme, l'harmonisation avec la stratégie énergétique à long terme, la minimisation du risque d'actifs abandonnés et la capacité d'accélérer le changement (p. ex. réseau de recharge des véhicules électriques dans les villes).
2. Pour ce qui est de la rapidité du déploiement des projets, et compte tenu des solutions « originales », les types de projets suivants sont susceptibles de figurer en tête de liste :
 - a. prolongation ou mise à niveau de projets existants ;
 - b. projets déjà en cours de planification et d'approbation réglementaire ;
 - c. dédoublements avec d'anciens projets ;
 - d. projets entièrement financés par le gouvernement, n'exigeant aucun investissement de la part d'une autre partie ;
- e. projets qui ne dépendent pas d'approvisionnements « à long terme » ou de chaînes d'approvisionnement étrangères étendues, qui peuvent être perturbées pendant un certain temps à cause de la COVID-19.
3. Les projets axés sur la création d'emplois et la revitalisation des collectivités inciteront probablement à ériger des installations de « faible technologie », situées dans des régions où le taux de chômage est élevé et nécessitant un approvisionnement de l'étranger minimal.
4. Projets offrant un rendement économique à long terme. L'évaluation des projets de stimulation nécessitera une analyse de l'impact économique mesurant correctement les résultats de la stimulation, qui ne seraient pas pris en compte dans une évaluation conventionnelle du rendement du capital investi à l'échelle du projet.
5. Projets qui renforcent généralement la résilience de nos systèmes, que ce soit en cas de cyberattaque, de catastrophe environnementale, d'incertitude économique ou d'autres menaces connues et inconnues. Dans le secteur de l'électricité, par exemple, cela pourrait correspondre aux mises à niveau du transport et de la distribution, aux actifs de production décentralisée, aux microréseaux et au stockage. La quantification et l'établissement des prix des avantages et des prix liés à la résilience du système sont essentiels à cet égard.
6. Projets qui entraîneront des changements accélérés dans la consommation d'énergie, mais qui n'attirent pas facilement les investissements privés initiaux, comme l'infrastructure qui dessert des utilisateurs inconnus multiples. Il peut s'agir des réseaux de recharge des véhicules électriques, de la production d'hydrogène, d'installations et de l'infrastructure de recharge en hydrogène, de l'infrastructure de transport et de captage du carbone et d'actifs de transport longue distance qui peuvent être partagés entre les promoteurs d'une région donnée, par exemple pour des projets d'exploitation des ressources dans le Nord.

PROGRAMME ACCÉLÉRER LES PROJETS D'INFRASTRUCTURE PRÊTS À DÉMARRER (ASRI)

Le programme ASRI [réf. 66] constitue le cadre de SNC-Lavalin pour aider les propriétaires d'actifs et les organismes et entités gouvernementaux responsables des investissements dans les infrastructures à cerner et à accélérer de façon responsable les projets qui stimuleront le plus l'économie. Le programme ASRI offre aux projets prêts à démarrer un processus accéléré, évolutif, flexible et plus collaboratif qui mobilise les diverses parties prenantes pour gérer en parallèle de nombreux éléments du cycle de vie de ces projets. Il améliore ainsi la flexibilité des projets, sollicite la chaîne d'approvisionnement plus tôt et permet de prévenir les pertes de temps et de valeur lors de la construction de bout en bout, tout en adhérant aux approches à faible empreinte carbone et en procurant un gain socioéconomique.

E. Mesures immédiates recommandées

Les plans gouvernementaux sont en cours d'élaboration pour donner suite de l'annonce de l'objectif de carboneutralité pour 2050 ; ces plans comprendront un ensemble de jalons à moyen et à long terme. Les plans détaillés devront pouvoir s'adapter aux diverses réalités socioéconomiques, tenir compte de nombreux scénarios technoéconomiques et demeurer résilients aux changements avec le temps. Néanmoins, des mesures importantes peuvent être prises immédiatement pour débloquer les technologies nécessaires à des réductions précises des émissions de GES, quel que soit le scénario.

L'électrification de tous les secteurs ainsi que l'utilisation ciblée de combustibles de remplacement sans émission sont au cœur de la transition vers la carboneutralité. Il est également nécessaire de mettre sur pied une base d'infrastructures soutenant la transition vers des véhicules et des trains, un chauffage et des services des bâtiments et des procédés industriels lourds et agricoles alimentés à l'électricité. De plus, des combustibles propres seront requis pour les activités nécessitant un considérable apport d'énergie, comme le transport de marchandises, le camionnage relatif à l'extraction pétrolière et gazière et les procédés industriels éloignés.

Pour mettre les choses en perspective, en 2017, le Canada a produit au total 652,3 TWh d'électricité, dont 9 % à partir du charbon et 10 % à partir du gaz, du pétrole et autres [réf. 67]. Cela signifie qu'environ 124 TWh (chiffres de 2017) d'électricité produite au moyen du charbon et du gaz au pays devront être remplacés par de l'électricité à émissions de carbone faibles ou nulles d'ici 2050.

De plus, une puissance électrique importante (estimée à environ 1 000 TWh) sera nécessaire pour répondre aux besoins de l'électrification intersectorielle et de la production de combustibles propres. Avec les facteurs d'utilisation spécifiques d'aujourd'hui, si l'on devait relever le défi au moyen d'un seul mode de production d'électricité, il faudrait une puissance supplémentaire de 1 000 TWh, soit :

- 115 gros réservoirs hydroélectriques de 1 100 MW, soit une puissance semblable à celle du projet Site C de BC Hydro ;
- 114 gros réacteurs nucléaires de 1 000 MW (c.-à-d. 19 sites de la taille de celui de Bruce Power) ;
- 380 petits réacteurs modulaires de 300 MW ;
- 20 000 éoliennes de 10 MW ;
- 200 parcs de 100 éoliennes d'une puissance cumulée de 1 000 MW chacun ;
- Plus de 400 GW de puissance solaire cumulée.

Selon cette hypothèse, l'ajout annuel global de puissance devra être de 5 à 7 GW au cours des 30 prochaines années, soit environ trois fois la puissance annuelle moyenne ajoutée ces 50 dernières années. Il s'agit donc d'une tâche monumentale, et le Canada n'a pas entrepris un travail de cette envergure depuis un moment.

Dans ce contexte, voici les mesures immédiates recommandées :

Établir un comité fédéral-provincial concernant le réseau électrique canadien afin d'assurer une fiabilité, une résilience et une efficacité accrues grâce aux liens interprovinciaux. Ce comité pourrait préparer le terrain à un réseau interconnecté est-ouest, qui équilibrerait les activités, garantirait une plus grande intégration des énergies renouvelables et soutiendrait efficacement l'électrification d'autres secteurs économiques.

Par conséquent, **des projets de construction devraient être lancés rapidement pour les sources d'énergie comme l'hydroélectricité et le nucléaire**, pour lesquelles la construction d'une seule centrale prend facilement plus de 10 ans. D'autres ressources renouvelables, comme l'éolien et le solaire, devraient être rapidement développées pour répondre à l'augmentation de la charge. De nouveaux procédés à énergie renouvelable se sont également révélés très prometteurs, notamment la production d'énergie éolienne, marémotrice et houlomotrice en mer.

Accélérer et financer des projets pilotes de captage et de stockage du carbone dans les plus brefs délais, car ils sont essentiels à l'élimination des émissions de GES restantes provenant des processus énergivores.

Accélérer les programmes actuels de recherche sur l'hydrogène (et sur d'autres combustibles de remplacement) et consolider le nombre de projets pilotes.

Consulter l'industrie durant l'élaboration du plan de carboneutralité pour 2050 afin de pouvoir lancer des efforts concrets, mesurables et coordonnés et de maximiser le rendement du capital investi pour les Canadiens, du point de vue financier comme des répercussions environnementales.

Sans une action et des investissements immédiats, il ne sera pas possible de parvenir à la carboneutralité d'ici 2050 — si nous continuons au rythme actuel, nous n'atteindrons jamais cet objectif. La carboneutralité ne peut être réalisée que par une transformation radicale de l'ensemble de notre système énergétique, qui englobe la production d'énergie, le chauffage, les transports et l'industrie. Il faut changer notre façon de gérer et d'utiliser le sol, de voyager et même de manger. Cela mettra à l'épreuve notre détermination financière, mais nous devons comparer le coût élevé de l'atteinte de la carboneutralité au coût de l'inaction.

Le réchauffement de la planète menace notre mode de vie, que ce soit en raison de la hausse du niveau de la mer, qui entraîne des déplacements de population, ou de phénomènes météorologiques extrêmes, qui causent des dommages importants aux sociétés et mènent à l'instabilité socioéconomique. Aujourd'hui, nous avons l'occasion d'inverser la tendance et de donner aux générations futures une chance de lutter contre ce qui pourrait déjà être considéré comme un fardeau inégal.



**TRAVAILLER
ENSEMBLE
À PROTÉGER
DEMAIN**

Contributeurs du rapport

Tarek Abdel-Galil

Directeur, Solutions réseaux

Ramy Azar

Vice-président, Ingénierie et Chef de la direction technique, Solutions réseaux et énergies renouvelables

John Chahwan

Directeur, Ingénierie, Réseaux électriques

Jose Restrepo

Chef mondial de l'ingénierie, Linxon


Souheil Sabbagh

Directeur, Stratégie et services-conseils, Télécommunications et sécurité

Les auteurs tiennent à remercier le comité directeur de SNC-Lavalin pour ses conseils tout au long de la rédaction de ce rapport, à savoir : **Chris Ball**, directeur général, Énergie nucléaire et énergie ; **Sam Boutziouvis**, vice-président, Relations gouvernementales et institutions de développement multilatérales ; **Dale Clarke**, président, Services d'infrastructures ; **Sébastien Mousseau**, vice-président principal, Énergie, réseaux et solutions industrielles ; **Sarah-Jane Stewart**, chef mondial du développement durable ; et **Sandy Taylor**, président, Énergie nucléaire.

Nous tenons également à remercier les collaborateurs et les experts en la matière de SNC-Lavalin pour leur précieux apport technique, notamment : **Stuart Adamson**, responsable de l'ingénierie mécanique, Ingénierie des infrastructures ; **Leslie Aitchison**, vice-présidente, Ingénierie et chef de la direction technique, Énergie thermique ; **Vinod Batta**, vice-président et directeur général, Solutions d'énergie ; **Richard Beake**, consultant en infrastructure ; **Richard Catlow**, directeur, Systèmes de transport de l'énergie ; **Frida Ceja-Gomez**, ingénieure en chef d'études de réseaux ; **Catherine Cottrell**, directrice, Développement de produits, Énergie nucléaire ; **Julianne den Decker**, vice-présidente, Réalisation de projets, Énergie nucléaire ; **Jean-François Gysel**, vice-président, Développement stratégique, Ingénierie des infrastructures ; **Simon Naylor**, vice-président principal, Ingénierie et services-conseils, Ressources ; **Elizaveta Petkevitch**, candidate à la profession d'ingénieur, Réseaux électriques ; **Gabriel Proulx**, directeur, Exploitation, Ressources ; **Sen Syamal**, directeur de l'Ingénierie des procédés, Pétrole et gaz ; **Kristina Sin**, coordonnatrice de projet, Transports collectifs et ferroviaires, **Michel Tremblay**, directeur de l'ingénierie, Hydro.

Enfin, nous souhaitons remercier le professeur **David Layzell**, directeur du *Canadian Energy Systems Analysis Research* (CESAR), à l'Université de Calgary, et président du Comité sur les groupes d'experts de la Société royale du Canada, qui a pris le temps de présenter certaines de ses précieuses conclusions et de discuter avec nous de l'initiative carboneutre.



**GUIDER
L'INDUSTRIE
EN DONNANT
L'EXEMPLE**

Annexe 1

Aperçu des technologies émergentes en vue de la carboneutralité

Nous assistons à l'émergence de technologies perturbatrices qui seront la clé d'une économie carboneutre. Bien que théoriquement réalisables, ces technologies sont souvent mal comprises, et les chaînes d'approvisionnement et l'expertise nécessaires pour les déployer de façon efficace et rentable manquent. Une solution technologique est loin de se limiter à la technologie elle-même ; elle inclut un écosystème économique complet, de l'expertise en planification et en exécution aux chaînes d'approvisionnement en matériaux, en passant par le personnel d'exploitation et d'entretien. Lorsqu'on considère le cycle de vie de certaines de ces technologies, il est évident qu'un nombre considérable de projets bien définis doivent être lancés maintenant et devront l'être dans les années à venir pour atteindre l'objectif ambitieux de carboneutralité en 2050.

A. Hydrogène

L'hydrogène peut servir à la fois de vecteur énergétique et de réserve d'énergie. Il peut contribuer à la décarbonisation de l'industrie, au chauffage domestique et aux transports. Il devra être produit en grande partie par reformage du méthane, qui dépend du captage et du stockage du carbone (CSC). L'hydrogène peut aussi provenir de l'électrolyse, un procédé entièrement propre qui permettrait au Canada de puiser dans son surplus d'énergie électrique renouvelable.

Par exemple, on produit de l'hydrogène à partir de l'énergie éolienne en Norvège depuis 20 ans, une solution qui pourrait être viable pour le Canada. Ce type de production d'hydrogène est traditionnellement utilisé dans les régions éloignées et rurales dotées de fortes ressources éoliennes [réf. 68, réf. 69].

A1. QUE SONT L'HYDROGÈNE VERT ET L'HYDROGÈNE BLEU ?

L'hydrogène a le potentiel de servir de vecteur d'énergie sans émissions à des fins industrielles, commerciales et domestiques, ouvrant ainsi la voie à une décarbonisation majeure de l'économie. La caractéristique remarquable de l'hydrogène est l'absence d'émissions de GES au point d'utilisation, contrairement à tous les autres combustibles, ce qui en fait un combustible idéal pour réduire la pollution atmosphérique, mettre fin au réchauffement de la planète et protéger l'environnement d'une manière économiquement viable.

L'hydrogène vert et l'hydrogène bleu diffèrent par leur méthode de production, mais partagent un rôle central commun dans la lutte contre les changements climatiques. L'hydrogène vert est un produit de l'électrolyse de l'eau et de l'énergie propre et s'appuyant sur ses abondantes sources d'énergie renouvelable, le Canada s'apprête à en faire un vecteur d'énergie de remplacement non émetteur pour le chauffage des bâtiments, la propulsion des véhicules et la fabrication des composés chimiques. Bien que l'hydrogène bleu soit produit à partir de sources d'énergie non renouvelables, le captage du carbone utilisé dans le processus empêche le CO₂ de s'échapper dans l'atmosphère, ce qui rend cette méthode de production d'hydrogène non polluante [réf. 70, réf. 71].

Du stockage à l'utilisation, en passant par la distribution et l'exportation mondiale, les avantages de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique sont nombreux et serviront de motivation pour relever les défis futurs.

A2. QUEL EST LE RÔLE DE L'HYDROGÈNE DANS LA DÉCARBONISATION ?

Le Canada est actuellement l'un des principaux producteurs mondiaux d'hydrogène, avec une production annuelle de 3 Mt [réf. 72]. À l'échelle mondiale, l'hydrogène est utilisé dans trois principaux secteurs : les raffineries, la production d'ammoniac et la transformation des métaux. Toutefois, il peut être employé de manières diverses et pourrait remplacer les sources polluantes actuelles :

VECTEUR ÉNERGÉTIQUE

L'hydrogène n'est pas une source d'énergie, mais plutôt un vecteur, de sorte qu'il peut servir au même but que l'électricité [réf. 72]. L'hydrogène produit peut être comprimé et distribué par un vaste réseau de conduites aux clients résidentiels, aux bâtiments commerciaux et aux usines. Ce traitement de l'hydrogène présente des similitudes avec celui réservé actuellement au gaz naturel, mais possède un avantage majeur sur le plan de l'impact environnemental.

TRANSPORTS

Le secteur des transports a entamé l'intégration de véhicules à pile à hydrogène, qui utilisent l'hydrogène comme carburant pour alimenter un moteur électrique, éliminant ainsi le besoin d'essence et de diesel. Ces véhicules fonctionnent grâce à l'électricité fournie par la pile montée à l'intérieur, qui combine l'hydrogène et l'oxygène. Les seuls sous-produits des piles à hydrogène sont de la vapeur d'eau et de la chaleur, qui ne sont pas nocives pour l'environnement [réf. 73]. Comparativement aux véhicules électriques conventionnels, les véhicules à hydrogène ne nécessitent pas de recharge électrique, mais plutôt le remplissage d'un réservoir avec de l'hydrogène comprimé, ce qui est plus rapide et

centralisé, et comparable au ravitaillement d'une voiture à essence [réf. 74]. Comme les véhicules conventionnels ne font pas partie de l'équation et que le développement des technologies de production d'hydrogène est un investissement intéressant pour de nombreuses industries, les véhicules à hydrogène pourraient concurrencer les véhicules électriques sur le marché. De même, en plus d'être une option adaptée aux voitures particulières, aux camions lourds et au train, l'hydrogène pourrait être intéressant en aéronautique. Le premier vol d'un avion de classe commerciale alimenté par une pile à hydrogène au monde s'est déroulé le 23 septembre 2020 [réf. 75].

EXPORTATION MONDIALE

L'hydrogène pourrait donner lieu à des accords commerciaux internationaux pour son exportation mondiale. Il peut être exporté sous forme liquide et gazeuse comprimée, et être converti en une substance chimique comme l'ammoniac (NH₃) pour le transport sur de longues distances. L'hydrogène liquéfié est obtenu par refroidissement de l'hydrogène gazeux à des températures très basses (-253 °C) et est transporté dans de gros camions-citernes cryogéniques isolés [réf. 76]. La nécessité de liquéfier l'hydrogène s'explique par le fait que les camions peuvent emporter une plus grande masse d'hydrogène lorsque celui-ci est sous forme liquide que sous forme gazeuse. L'hydrogène gazeux doit être comprimé avant d'être distribué et il est livré soit par conduites longue distance soit par camions, aussi appelés remorques porte-tubes [réf. 77]. Compte tenu des caractéristiques de stockage et de transport de l'hydrogène, le Canada est peut-être bien placé avec son surplus d'électricité sans émissions pour répondre à la demande mondiale d'hydrogène et se positionner comme un acteur important dans ce marché.

STOCKAGE

L'hydrogène peut être comprimé ou liquéfié et stocké en vue d'une utilisation ultérieure pendant les heures creuses de la production d'énergie en grande partie dépendante de sources renouvelables (énergie éolienne, solaire, houlomotrice et marémotrice). L'hydrogène stocké peut donc être ensuite expédié sur demande et offre une assurance en cas d'urgence. Les installations hors sol, le réseau de conduites et les réservoirs souterrains constituent des options viables pour son stockage [réf. 1]. À l'état gazeux, il nécessite des réservoirs à haute pression et plus d'espace que l'hydrogène liquide. Ce dernier, cependant, réclame des températures cryogéniques pour conserver son état [réf. 78]. Bien que son stockage en soit encore à ses balbutiements et présente un rendement inférieur à celui du stockage par batterie, l'hydrogène peut être conservé en grandes quantités en raison de sa densité énergétique élevée et pendant de plus longues périodes grâce à son faible taux d'autodécharge [réf. 79].

USAGES INDUSTRIELS

Comme il est mentionné précédemment, l'hydrogène produit est couramment utilisé pour la synthèse de l'ammoniac, qui est ensuite converti en engrais. L'hydrogène joue également un rôle en électronique comme agent réducteur et gaz porteur et est utilisé dans la production des matériaux nécessaires aux composants électroniques tels que les semi-conducteurs. De plus, il est actuellement utilisé dans les raffineries de pétrole pour transformer le pétrole brut en carburants raffinés, comme l'essence et le diesel, et aussi pour éliminer les contaminants. D'autres applications telles que la fabrication de verre plat et de carburant pour fusée montrent que l'hydrogène gazeux est déjà largement utilisé dans des industries distinctes. La fabrication d'acier figure sur la liste des procédés industriels qu'il pourrait révolutionner [réf. 80].

A3. TECHNIQUES DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE

Bien que l'hydrogène soit l'élément le plus abondant sur Terre, il est rare à l'état pur (H_2) et se trouve plutôt dans des composés chimiques comme l'eau (H_2O) et le méthane (CH_4). Pour produire de l'hydrogène gazeux, ces composés doivent subir des processus chimiques, comme l'électrolyse et le reformage avancé du gaz (ou le reformage du méthane à la vapeur), ce dernier étant le plus courant. Comme l'hydrogène est un combustible non émetteur, son impact sur l'environnement dépend de la méthode de production.

ÉLECTROLYSE

L'électrolyse de l'eau est la conversion des molécules d'eau (H_2O) en oxygène (O_2) et en hydrogène (H_2). Ce processus nécessite pour alimenter l'électrolyseur de l'énergie (un courant électrique), par exemple à partir d'une source renouvelable, du nucléaire ou de l'énergie récupérée à partir de la chaleur résiduelle. L'énergie renouvelable provient de sources comme l'hydroélectricité, le vent, le soleil, la biomasse et la géothermie. Cette méthode de production est entièrement propre, ce qui en fait un candidat de premier plan à la domination du secteur énergétique [réf. 81].

À l'heure actuelle, à peine 0,1 % de l'hydrogène est produit par électrolyse [réf. 82]. Cela peut s'expliquer par notre capacité de produire uniquement de petits volumes d'hydrogène de cette façon, ce qui laisse penser que cette méthode est aujourd'hui économiquement peu attrayante à grande échelle. Toutefois, on s'attend à ce que cela change avec les multiples recherches effectuées pour perfectionner la technique en améliorant son efficacité, auxquelles participent de nombreux représentants de l'industrie, et avec la réduction des coûts qui s'ensuivra.

REFORMAGE DU MÉTHANE À LA VAPEUR

Le reformage du méthane à la vapeur est le procédé d'obtention d'hydrogène à partir du méthane (CH₄), ce dernier étant issu de la production de charbon, de gaz naturel ou de pétrole [réf. 83, réf. 84]. Le procédé comporte trois réactions chimiques, soit la réaction du méthane avec l'eau, la conversion du gaz à l'eau et l'adsorption par variation de la pression. Dans la première étape, soumise à une forte pression, la vapeur à haute température réagit avec le méthane et un catalyseur pour produire du monoxyde de carbone (CO) et de l'hydrogène (H₂). Ensuite, pour obtenir de l'hydrogène supplémentaire, ce monoxyde de carbone réagit avec la vapeur pour produire à son tour du dioxyde de carbone (CO₂) et de l'hydrogène (H₂). Enfin, l'hydrogène est débarrassé de ses impuretés [réf. 83]. Comme l'indique le résultat des réactions chimiques qui se déroulent durant le reformage du méthane à la vapeur, cette méthode n'est pas exempte d'émissions de carbone. La production de l'hydrogène bleu doit donc inclure le captage et le stockage du carbone. Bien que le reformage du méthane à la vapeur soit une technique bien connue, il ne répond pas aux objectifs ambitieux d'une économie carboneutre, à moins qu'il ne soit combiné au CSC.

A4. DÉFIS DU DÉPLOIEMENT DE L'HYDROGÈNE

Pour faire de l'hydrogène un vecteur énergétique de premier plan dans notre économie, les promoteurs doivent apporter des ajustements considérables, comme construire des usines d'électrolyse, aménager l'infrastructure de conduites, bâtir des installations de stockage, améliorer les procédés de transport et coordonner la chaîne d'approvisionnement avec les demandes des consommateurs [réf. 85].

PRODUCTION À GRANDE ÉCHELLE

La production d'hydrogène vert nécessite des sources abondantes d'énergie renouvelable, des sources d'eau de qualité pour l'électrolyse et des usines d'électrolyse à proximité des centrales électriques. Heureusement, 82 % de l'énergie au Canada est de l'énergie propre, car elle est produite à partir de sources renouvelables et nucléaires [réf. 86].

Comme le Canada est riche en eau douce, le principal défi pour la production d'hydrogène est l'intégration des usines d'électrolyse dans le processus. De son côté, la production à grande échelle d'hydrogène par reformage avancé du gaz dépend fortement du développement de techniques telles que le CSC afin de permettre la production d'hydrogène bleu.

INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT ET DE STOCKAGE

La solution la plus économique pour le transport de l'hydrogène gazeux exige l'aménagement d'un réseau de conduites. Au lieu de bâtir un tout nouveau réseau, on pourrait réutiliser et modifier les 80 000 km de gazoduc et d'installations de stockage de gaz naturel existant au Canada afin de garantir la cohérence de l'équipement [réf. 87]. Toutefois, il faut tout d'abord mener des recherches et des essais pour s'assurer que les conduites supportent les contraintes imposées par l'hydrogène gazeux et ne se fracturent pas.

FACTEURS ÉCONOMIQUES

Bien que la production d'hydrogène vert puisse s'accroître à mesure que la sensibilisation aux changements climatiques augmentera, les coûts de production actuels réclament une innovation technologique importante pour rendre concurrentiels les prix de cet hydrogène. En outre, les coûts de production ne représentent qu'une partie du coût global du système de production d'énergie à base d'hydrogène.

EFFICACITÉ DU PROCESSUS COMPLET

Pour optimiser la conception du système, il faut tenir compte de l'efficacité potentielle de l'hydrogène dans l'ensemble du processus (figure 20). Selon son domaine d'application, l'hydrogène peut ne pas être la solution la plus efficace, car les pertes de conversion et les pertes du système se cumulent. Par exemple, la conversion de l'hydrogène en électricité ayant une efficacité de 25 %, il faut envisager d'autres sources d'énergie disponibles à un endroit donné pour les périodes de pointe [réf. 1].

B. Captage du carbone

Le CSC est également essentiel aux scénarios proposés de carboneutralité et représente le plus grand risque pour cet objectif, étant donné qu'il en est encore à ses débuts et qu'il n'y a pas de plan ferme pour développer une industrie du CSC au Canada ou à l'échelle mondiale, en dehors de quelques projets pilotes. Ce procédé peut servir à décarboniser plusieurs secteurs, comme la production d'électricité, l'industrie lourde, le chauffage, les transports et la gestion des déchets, et pour éliminer le CO₂ de l'atmosphère. Il se compose de trois opérations : le captage du CO₂, son transport et son stockage.

B1. QU'EST-CE QUE LE CAPTAGE ET STOCKAGE DU CARBONE (CSC) ?

Le CSC est un procédé qui recèle le potentiel d'éliminer les répercussions environnementales indésirables de l'utilisation des combustibles fossiles. On a recours au CSC pour le captage du CO₂ émis et son transport par conduites vers des sites de stockage de grande capacité, empêchant ainsi le CO₂ de s'échapper dans l'atmosphère.

L'attrait de cette solution pour mettre un terme au réchauffement de la planète est qu'elle ne nécessite peut-être pas la suspension de toutes les activités économiques actuelles liées au brûlage de combustibles fossiles, mais plutôt l'introduction d'une étape supplémentaire dans la chaîne.

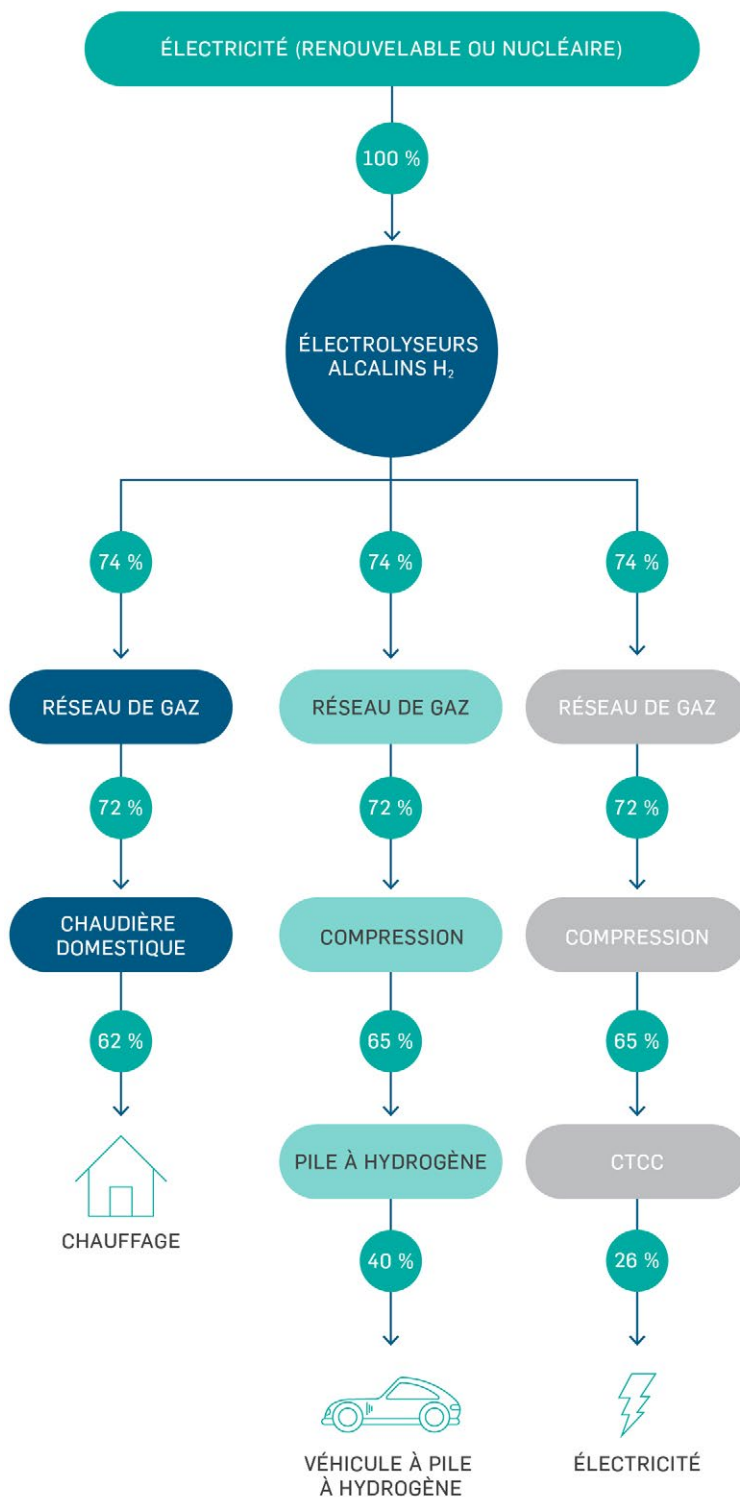


FIGURE 20 EFFICACITÉ DES PROCÉDÉS RELATIFS À L'HYDROGÈNE

Le CSC peut être utilisé pour décarboniser plusieurs secteurs, comme la production d'électricité, l'industrie lourde, le chauffage, les transports et la gestion des déchets, et pour éliminer le CO₂ de l'atmosphère. L'adoption d'un tel procédé permet la durabilité environnementale mondiale, ce qui laisse entrevoir des conditions environnementales prometteuses pour les générations à venir [réf. 88, réf. 1].

B2. APERÇU DU PROCESSUS

Le captage et stockage du carbone comporte trois étapes : le captage du CO₂, son transport et son stockage. Au lieu d'être stocké, le dioxyde de carbone peut aussi être utilisé dans des applications industrielles.

CAPTAGE

Le CO₂ est capté comme produit indésirable de la production d'électricité et d'activités industrielles, comme le raffinage du pétrole, la production d'ammoniac, la fabrication de ciment ou la production de fer et d'acier. Ce gaz contient souvent des impuretés desquelles il faut séparer le CO₂ pur [réf. 89].

TRANSPORT

Le CO₂ capté et purifié est liquéfié, ou amené à un état supercritique par compression, et transporté vers des installations de stockage ou en vue de son utilisation après acheminement par conduites ou par train, camion et navire. Les conduites constituent la méthode la plus efficace de transport terrestre d'un volume élevé de CO₂ sur de longues distances pour les usines dont la durée de vie est longue. Les conditions optimales pour le transport de CO₂ par conduites sont une température de plus de 32,1 °C et une pression supérieure à 72,9 atm [réf. 90]. Ce mode de transport du CO₂ est une pratique courante au Canada, notamment par la conduite de 240 km construite dans le cadre du projet de l'*Alberta Carbon Trunk Line* [réf. 91].

STOCKAGE

Le CO₂ est ensuite stocké à long terme dans des formations géologiques souterraines, comme des champs pétroliers et gaziers, des gisements de charbon non exploitables ou des réservoirs salins. Le stockage géologique est avantageux, car il permet d'entreposer de gros volumes de CO₂ provenant de différentes sources. Il existe également d'autres techniques de stockage, comme le stockage en profondeur dans l'océan ou dans la roche [réf. 92].

UTILISATION

Le captage et utilisation du carbone consiste à réutiliser le CO₂ recyclé provenant de la production d'électricité ou de procédés industriels chimiques ou agricoles pour la production d'engrais et d'énergie. Le CO₂ est également utilisé dans les boissons alimentaires, les réfrigérants et les gaz extincteurs. Les projets de récupération assistée des hydrocarbures pourraient encore accroître l'utilisation du dioxyde de carbone [réf. 90].

B3. TECHNIQUES ET DÉFIS DU CSC

Bien que la fiabilité des techniques actuelles ait été éprouvée au fil des décennies dans divers projets opérationnels, l'introduction du stockage du carbone à grande échelle pose un défi. En 2018, le Canada a émis environ 720 Mt de CO₂ [réf. 5]. Néanmoins, les technologies de CSC sont essentielles pour atteindre les objectifs fixés de carboneutralité.

TECHNIQUES DE CAPTAGE DU CO₂

Les techniques de captage sont regroupées en trois types : postcombustion, précombustion et combustion d'oxycombustibles. Ces techniques diffèrent dans la façon dont le CO₂ est produit durant un processus industriel, mais elles ont en commun l'objectif d'isoler le dioxyde de carbone des autres composés gazeux émis simultanément.

Les procédés industriels tels que la production d'acier libèrent du CO₂ pratiquement pur. Actuellement, on rejette généralement ce CO₂ dans l'atmosphère, bien que la nouvelle pratique consiste à comprimer, transporter et stocker ce gaz polluant [réf. 89].

TECHNIQUE DE CAPTURE	PROCESSUS	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Postcombustion	Séparation du CO ₂ des gaz émis par la combustion de combustibles fossiles.	Technique la plus avancée, modernisation facile, compatible avec les centrales en service.	Faible efficacité résultant de la faible concentration de CO ₂ dans le gaz capté.
Précombustion	Séparation du CO ₂ des gaz émis par le prétraitement (p. ex. gazéification) de combustibles fossiles.	Concentrations élevées de CO ₂ , haute efficacité.	Efficacité thermique la plus faible, pénalités énergétiques et dégradation de l'efficacité.
Combustion d'oxycombustibles	Séparation du CO ₂ des gaz émis par la combustion de combustibles fossiles dans l'oxygène (O ₂) plutôt que dans l'air.	Concentrations très élevées en CO ₂ (80 %), grande efficacité, nécessite un équipement de plus faibles dimensions.	La production d'O ₂ est énergivore et coûteuse ; possibilité de corrosion.

TABLEAU 6 APERÇU DES TECHNIQUES DE CAPTAGE DU CSC

Les techniques de captage sont coûteuses et représentent de 70 à 80 % des coûts totaux d'un système de CSC [réf. 90]. Il faudrait donc effectuer des recherches approfondies sur la réduction des coûts de captage du CO₂ issu des gaz de combustion avant de se fier entièrement au CSC comme solution pratique pour décarboniser l'économie. Heureusement, les gouvernements fédéral et provinciaux au Canada investissent dans le développement du CSC et quatre grands projets sont en cours.

TECHNIQUES DE SÉPARATION

Avant d'injecter le CO₂ rejeté dans le réseau de conduites, il faut l'isoler de toute impureté dans les gaz de combustion. Les techniques actuellement disponibles sont le dépoussiéreur par voie humide, les sorbants secs régénérables, les membranes, les produits cryogéniques et l'absorption modulée en pression et en température.

L'importance des techniques de séparation découle de la nécessité de faire circuler le CO₂ pur dans les conduites pour éviter les changements de température et de pression causés par les impuretés. De même, la présence d'eau peut entraîner la corrosion des conduites [réf. 90].

STOCKAGE

Idéalement, le dioxyde de carbone est stocké dans des formations géologiques souterraines qui possèdent plusieurs caractéristiques permettant un stockage permanent et sécuritaire de grandes quantités de CO₂. Le site souterrain doit être évalué en fonction des ressources de stockage, de l'injectivité, de l'intégrité et de la profondeur [réf. 94].

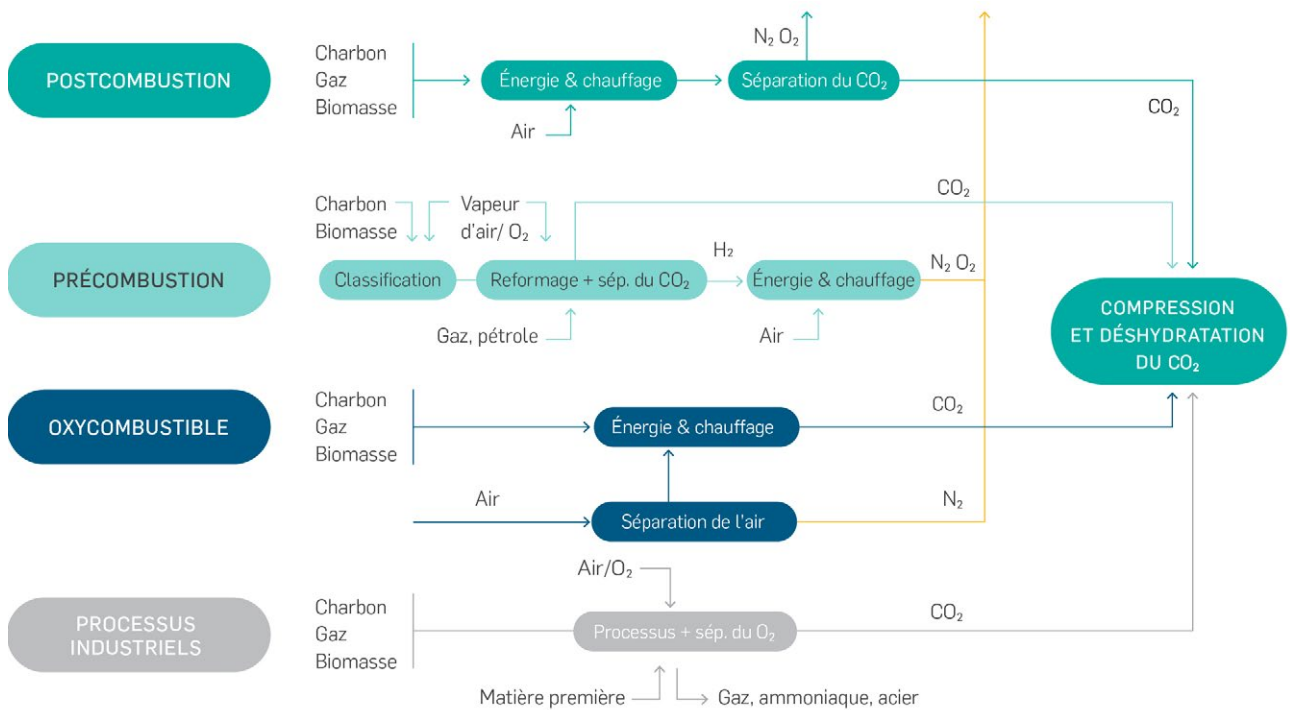


FIGURE 21 CAPTAGE ET STOCKAGE DU CARBONE (CSC) [REF. 101]

La ressource de stockage fait référence à la capacité du site de stocker le CO₂. La capacité potentielle de stockage de CO₂ au Canada est estimée à 132 milliards de tonnes [réf. 95]. Aux taux actuels d'émissions de CO₂, cela correspond à environ 235 ans de stockage. L'injectivité est le rythme auquel le CO₂ peut être injecté sur le site. L'intégrité d'une formation correspond à la sécurité de stockage et à la prévention des fuites; cette dernière pouvant être assurée par une couche solide entourant la formation. L'exigence de sécurité fait également référence à l'isolement des zones de stockage des sources d'eau potable par le biais de plusieurs couches d'étanchéité. La profondeur du site de stockage naturel doit procurer la température et la pression requises pour que le CO₂ soit stocké à l'état de fluide supercritique. À cet état, le CO₂ peut être stocké en quantités beaucoup plus grandes qu'à la surface [réf. 94].

RÉCUPÉRATION ASSISTÉE DES HYDROCARBURES (RAH)

La RAH est un procédé bien établi qui combine le stockage et l'utilisation du CO₂. Une fois transporté et injecté dans les champs pétroliers et gaziers, le CO₂ se dissout dans le pétrole résiduel, qui devient plus susceptible d'être extrait en se servant de la pression de l'eau comme force motrice. Le CO₂ injecté demeure stocké sous terre dans les réservoirs de pétrole et de gaz. De tels projets, où le CO₂ capté est utilisé pour améliorer la récupération du pétrole, se déroulent actuellement au Canada, dans les gros gisements de pétrole de l'Alberta des sables pétroliers et des gisements pétroliers [réf. 95, réf. 90].

EFFICACITÉ ET FACTEURS ÉCONOMIQUES

Les techniques actuelles de CSC ont montré qu'elles captent jusqu'à 90 % des émissions nettes de CO₂. Toutefois, des études portent à croire que nous ne sommes pas limités à ce rendement et que des taux de captage plus élevés, même supérieurs à 95 %, sont techniquement réalisables. Les techniques à émissions négatives sont également à l'étude, comme le captage direct de l'air, le boisement, le traitement des nuages avec des alcalis et plusieurs autres [réf. 96].

Il est certain que l'intégration de nouvelles techniques dans les processus existants entraînera des coûts importants de recherche, de développement et de réalisation. Toutefois, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a estimé que limiter le réchauffement planétaire à 2°C coûterait 138 % plus cher sans les techniques de captage du carbone, ce qui laisse entendre que ce procédé est inévitable dans un avenir proche [réf. 97].

B4. PROJETS CANADIENS DE CAPTAGE ET STOCKAGE DU CARBONE

À l'heure actuelle, le Canada compte quatre projets de CSC en exploitation ou en construction, d'une capacité de captage maximale de 6,4 Mt de CO₂ par année comme le montre le tableau 7 [réf. 98]. Bien que ces projets se soient révélés fructueux et efficaces, le CSC n'en est qu'au début de son intégration dans l'économie, car la capacité de captage actuelle équivaut à un peu plus de 1 % des émissions totales de CO₂ au Canada.

C. Numérisation : Internet des objets, mégadonnées et intelligence artificielle

L'analyse des données et l'apprentissage machine joueront un rôle important dans le milieu de l'infrastructure à mesure qu'un plus grand nombre d'appareils numériques seront interconnectés, ce qui permettra de recueillir des données précieuses. Les systèmes de gestion de l'énergie sont progressivement implantés dans le domaine industriel et on s'attend à les retrouver également dans le secteur résidentiel.

Compte tenu de la complexité du système carboneutre de 2050, un bon équilibre entre les secteurs est essentiel, et il n'y aura pas de système optimal sans analyse de données, apprentissage machine et intervention de l'intelligence artificielle pour la résilience. Le système devra être fondé sur une vision stratégique de l'ensemble de l'architecture du système et sur une évaluation du coût total de ce dernier, ce qui exigera la coordination entre le fédéral et les provinces. Toutefois, comme aucun plan n'est immuable, la plateforme de collecte, de suivi et d'analyse des données devra se montrer dynamique face à aux changements mondiaux et nationaux en matière de production, de demande et de rendement et à l'évolution de l'industrie et de la technologie.

PROJET	CAPACITÉ DE CAPTAGE DU CO ₂ (Mt/an)	SOURCE DE CO ₂	MILIEU DE STOCKAGE
Boundary Dam (Saskatchewan)	1,0	Centrale électrique au charbon	RAH au champ pétrolifère de Weyburn
Quest (Alberta)	1,2	Sables bitumineux	Aquifères salins
Alberta Carbon Trunk Line (Alberta)	1,5 à 2,0	Raffinerie de Sturgeon et usine d'engrais Agrium	RAH au gisement pétrolier Clive ou stockage dans des aquifères
Fort Nelson (Colombie-Britannique)	2,2	Usines de traitement de gaz naturel	Aquifères

TABLEAU 7 PROJETS DE CSC AU CANADA

C1. AVANTAGES DES MÉGADONNÉES, DE L'INTERNET DES OBJETS ET DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LA DÉCARBONISATION

La vision carboneutre pour 2050 nécessitera une collaboration intersectorielle, interprovinciale et interindustrielle d'une ampleur jamais vue jusqu'ici, et reposant sur un partage de données sûr et fiable. Pour parvenir à une façon efficace et économiquement viable de fonctionner en tant que société sans dépendre des combustibles fossiles, nous devons repenser l'ensemble de nos systèmes. Un plan de transformation robuste doit admettre que les systèmes actuellement en place sont le résultat de décennies de progrès et d'innovation itératifs et qu'ils se sont révélés résilients et prévisibles au fil du temps.

Pour que la transition requise ait lieu, il est nécessaire de bien comprendre nos systèmes actuels et les nouvelles technologies déployées, et cela commence par le déploiement de capteurs et la collecte et le suivi des données. Ces opérations donneront naissance à l'Internet des objets dans le milieu de l'infrastructure, qui permettra de surveiller et de contrôler les actifs physiques au moyen de plateformes logicielles.

Les données recueillies pourraient inclure les niveaux d'émissions de GES en temps réel, les besoins énergétiques, l'efficacité de la production et la surveillance de la chaîne d'approvisionnement, ainsi que des milliers d'autres points de données. Les ensembles de données ainsi constitués formeraient ce qu'on appelle des mégadonnées, en raison de la quantité massive d'information qu'elles fourniraient. Les mégadonnées combinées à des réseaux de télécommunications plus rapides et à une plus grande capacité de traitement informatique permettraient aux industries de prendre des décisions en temps réel dans le cadre de leurs activités, ce qui se traduirait par une efficacité accrue et une réduction de leurs émissions de carbone.

Grâce à l'analyse subséquente des données et à l'application des plus récents algorithmes d'intelligence artificielle, il serait possible de mieux comprendre ce qui fonctionne et ce qui ne fonctionne pas, et avoir une idée de la façon d'ajuster les procédés et les politiques en conséquence. Ainsi, l'intelligence artificielle pourrait jouer un rôle important dans la décarbonisation en raison de sa capacité à prévoir les besoins et les tendances futurs tout en révélant des modèles et en fournissant des aperçus utiles.

C2. L'EXEMPLE DES SERVICES D'ÉLECTRICITÉ NUMÉRIQUES

Les services d'électricité devront tenir compte des nombreux changements auxquels fait face leur secteur et de la transformation numérique en cours lorsqu'ils remplaceront ou moderniseront leurs actifs. La numérisation des services d'électricité promet d'optimiser l'offre et la demande d'électricité, de gérer la complexité du flux bidirectionnel de l'information générée par les compteurs intelligents, d'offrir une gestion de la charge des clients résidentiels à l'appui des programmes d'efficacité énergétique et de fournir des réseaux plus résilients face aux catastrophes naturelles et aux phénomènes météorologiques extrêmes [réf. 99].

Les postes intelligents permettront aux entreprises d'électricité de gérer efficacement l'énergie intermittente introduite dans le réseau par les sources d'énergie renouvelable, d'optimiser l'utilisation du stockage d'énergie et d'établir des communications bidirectionnelles avec les prosommateurs (c.-à-d. les consommateurs d'électricité qui fournissent également au réseau de l'énergie pour la production ou le stockage) et de produire des données utiles qui serviront à effectuer l'entretien prédictif de ces postes.

Sur le plan de la cybersécurité, les entreprises d'électricité devront protéger efficacement leur infrastructure essentielle contre les menaces nouvelles et évolutives. Le choix et l'intégration de la technologie adéquate, combinés à des procédures rigoureuses et à un changement culturel, sont vitaux pour minimiser les risques pour la sécurité.

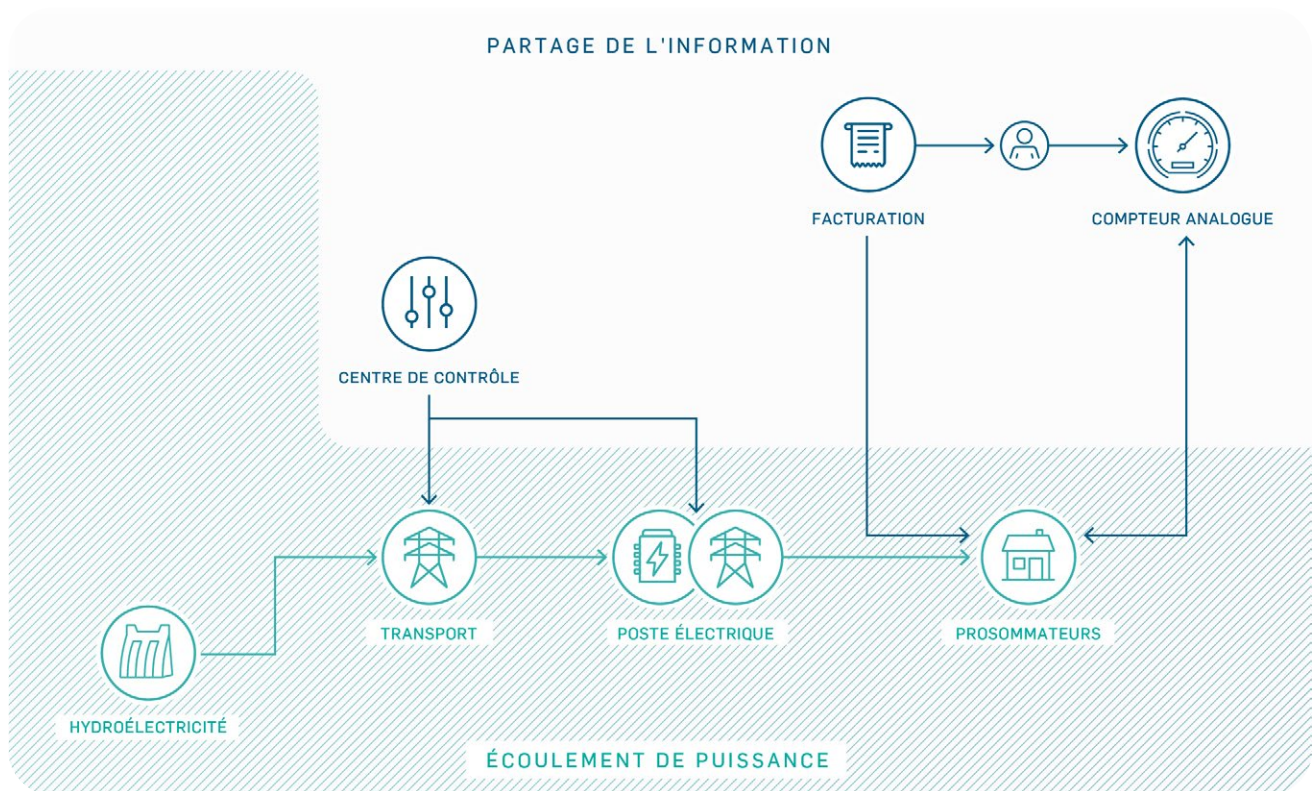


FIGURE 22 RÉSEAU ÉLECTRIQUE CONVENTIONNEL

La figure 22 et la figure 23 comparent les réseaux électriques conventionnels et modernes. Elles illustrent un exemple de réseau hydroélectrique, mais une structure semblable s'applique à d'autres sources de production conventionnelles comme l'énergie thermique ou le charbon. S'orienter vers un réseau moderne qui permet un flux d'énergie bidirectionnel fait en sorte que le principal goulot d'étranglement devient la numérisation. Un réseau moderne intègre la production d'énergie renouvelable en vrac, la production d'énergie renouvelable en amont du compteur, le stockage d'énergie, les microréseaux et les bornes de recharge pour véhicules électriques. Ce changement opérationnel exigera un énorme flux de données bidirectionnelles afin de faciliter la surveillance en temps réel des millions de points d'accès du réseau et de fournir les contrôles automatisés nécessaires pour maintenir la résilience et l'efficacité du fonctionnement.

C3. DÉFIS DE LA NUMÉRISATION DE L'INFRASTRUCTURE

Une grande partie de la réduction des émissions repose sur des technologies qui permettront d'amener l'infrastructure physique vers le monde numérique. Une telle transformation obligera les industries à mettre leur infrastructure à niveau. Cela comprendra le remplacement de l'équipement analogique désuet par un nouvel équipement numérique et la mise à niveau de l'infrastructure de télécommunications pour permettre la transmission des données.

Afin d'empêcher l'infrastructure et les données de tomber entre les mains de personnes malveillantes, il est impératif que les industries qui entreprendront une telle transformation s'assurent également de protéger leur infrastructure numérique contre les cyberattaques. Une fois ces changements apportés, elles pourront commencer à profiter des avantages de l'infrastructure numérique.

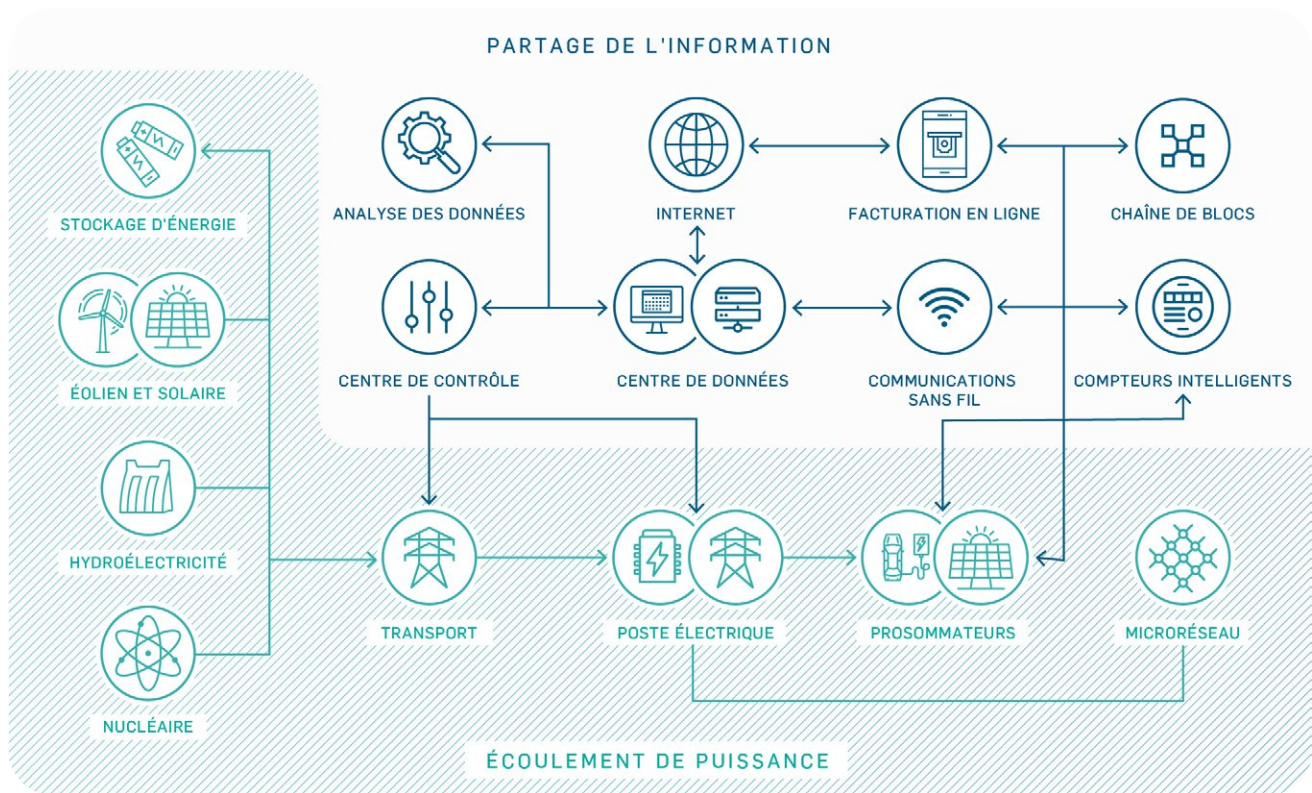


FIGURE 23 RÉSEAU ÉLECTRIQUE MODERNE

Il y a tout intérêt à investir dans les actifs numériques, comme l'ont prouvé plusieurs secteurs jusqu'à maintenant. Les ensembles de données qui pourraient être mis à la disposition des chercheurs renferment un énorme potentiel d'utilisation plus efficace du temps, des ressources et de l'énergie dans l'ensemble des processus. Nous avons aujourd'hui l'occasion de donner la première impulsion vers la numérisation complète des secteurs de l'infrastructure au Canada grâce à un financement ciblé et à des politiques tournées vers l'avenir qui favoriseront le déploiement de capteurs, le partage de données et l'application de la science aux données.

D. Stockage d'énergie

Une plus grande intégration de l'énergie issue de source renouvelable repose sur de robustes interconnexions électriques, sur la réponse du côté de la demande et sur le stockage de l'énergie. Les nouvelles techniques de stockage ont montré un certain potentiel ; cependant, il reste encore beaucoup de travail à accomplir en ce qui concerne l'efficacité énergétique, les facteurs économiques et la réglementation pour faire du stockage d'équilibrage à l'échelle du réseau, par exemple au moyen de batteries, d'air liquide ou d'air comprimé, une solution viable. De plus, le Canada bénéficie d'un relief propice au stockage hydroélectrique par pompage, ce qui pourrait grandement profiter au réseau canadien dans le cadre d'une planification à l'échelle du pays.

Les progrès réalisés dans les technologies de stockage par batterie pour les véhicules électriques constituent un autre élément important de la solution, et le parc combiné de véhicules pourra servir de système de stockage de l'énergie en vrac décentralisé qui interagira avec le réseau pour le chargement et le déchargement de l'énergie à des millions de points de connexion potentiels. Un projet actuellement mené sur l'île d'Orkney, en Écosse, démontre le potentiel technique de ce type de technologie de réseau intelligent [réf. 100].

D1. AVANTAGES DU STOCKAGE D'ÉNERGIE POUR LA DÉCARBONISATION

Le stockage d'énergie est un outil crucial pour l'intégration efficace des énergies renouvelables et l'exploitation des avantages de la production locale et d'une offre énergétique propre et résiliente.

Ce procédé continue de prouver son intérêt aux exploitants de réseau du monde entier qui doivent gérer l'intermittence de la production d'énergie solaire, éolienne, houlomotrice et marémotrice. Toutefois, la conception de systèmes avancés de stockage d'énergie s'est fortement concentrée dans certains marchés, principalement dans les régions où les économies sont très développées.

Le stockage d'énergie regroupe à la fois des procédés matures et des procédés qui semblent avoir beaucoup de potentiel de croissance. À ce jour, 99 % de l'énergie stockée en vrac dans le monde est de l'énergie hydroélectrique à réserve pompée. Bien que l'on s'attende à ce que ce type de stockage joue un rôle important dans ce marché au Canada, l'utilisation de batteries au lithium-ion et de batteries à circulation devrait augmenter ces 10 prochaines années, selon une trajectoire semblable à celle observée dans d'autres pays. Le stockage par batterie offre de nombreux services aux entreprises d'électricité, aux exploitants de systèmes et aux utilisateurs finaux. La figure 24 illustre l'éventail de services que ce mode de stockage peut fournir.

D2. DÉFIS DU STOCKAGE D'ÉNERGIE

Les obstacles au développement du stockage de l'énergie justifient une intervention politique pour promouvoir la concurrence entre les projets et les procédés et favoriser l'amélioration de la conception du marché, afin de mieux refléter l'intérêt de ses divers services auxiliaires. De plus, l'intégration normalisée avec les systèmes de gestion de l'énergie des services publics accuse toujours du retard et exige des progrès.

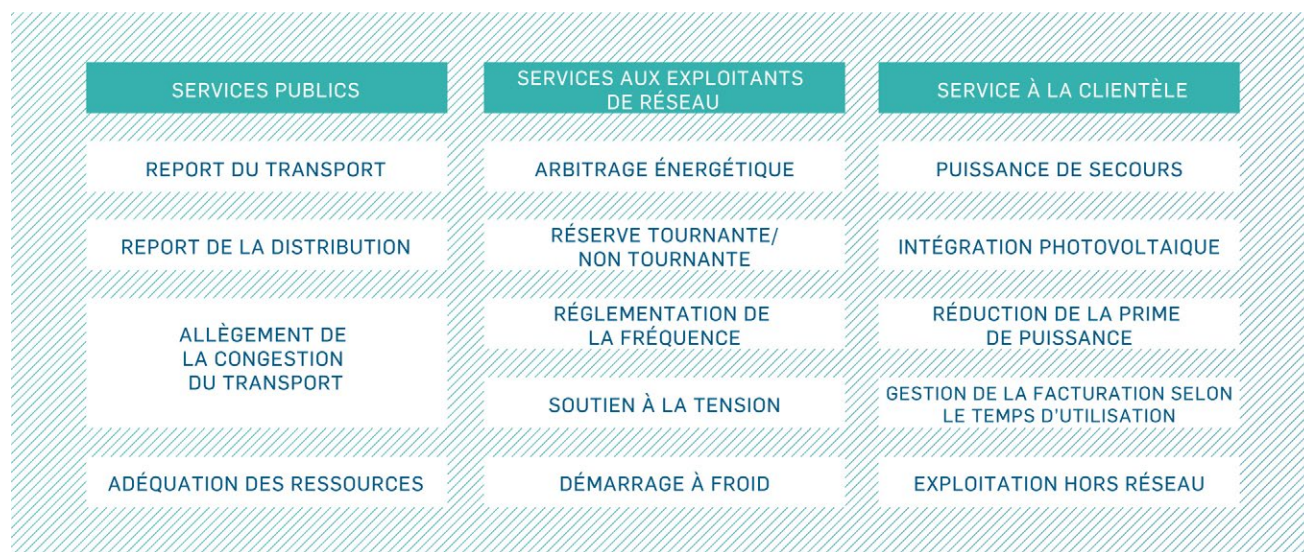


FIGURE 24 SERVICES OFFERTS PAR LE STOCKAGE PAR BATTERIE

A woman with long dark hair, wearing a bright red jacket, is shown in profile, looking out over a vast, hazy landscape at sunset. The sun is low on the horizon, creating a warm, golden glow. The background features rolling hills and sparse vegetation. The overall mood is contemplative and hopeful.

**ZÉRO
EXCUSES
POUR
NE PAS
ÊTRE
CARBO-
NEUTRES.**

Références

- Réf. 1** SNC-Lavalin et Atkins (2020). Engineering Net Zero Technical Report.
- Réf. 2** Committee on Climate Change (2019). Net Zero—The UK's contribution to stopping global warming.
- Réf. 3** Alfieri et coll. (2016). "Global projections of river flood risk in a warmer world", *Earth's Future*, vol. 5, p. 171–182. DOI : 10.1002/2016EF000485.
- Réf. 4** Forum économique mondial (2020). *Fostering Effective Energy Transition*, rapport sommaire, édition 2020.
- Réf. 5** Environnement et Changement climatique Canada (2020). *Rapport d'inventaire national 1990–2018 : Sources et puits de GES au Canada – Sommaire*.
- Réf. 6** Environnement et Changement climatique Canada (2016). *Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques : Plan canadien de lutte contre les changements climatiques et de croissance économique*.
- Réf. 7** Environnement et Changement climatique Canada (2016). *Stratégie canadienne de développement à faible émission de gaz à effet de serre à long terme pour le milieu du siècle*.
- Réf. 8** Bataille et coll. (2015). *Pathways to deep decarbonization in Canada*, Sustainable Development Solutions Network (SDSN) et Institute for Sustainable Development and International Relations (IDDRI).
- Réf. 9** Environnement et Changement climatique Canada (2020). *Émissions de gaz à effet de serre — Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement*.
- Réf. 10** Régie de l'énergie du Canada (2020). *Avenir énergétique du Canada en 2020 — Projections de l'offre et de la demande énergétiques à l'horizon 2050*.
- Réf. 11** Groupe de travail mixte (2018). *Rapport du Groupe de travail mixte sur la vision de l'avenir pour l'industrie canadienne de la production pétrolière et gazière – Rapport définitif*, Ressources naturelles Canada.
- Réf. 12** Gouvernement du Canada (2020). *Énergie et les émissions de gaz à effet de serre (GES)*. Sur Internet : <https://www.rncan.gc.ca/science-donnees/donnees-analyse/donnees-analyse-energetiques/faits-saillants-sur-lenergie/energie-emissions-gaz-effet-serre-ges/20074> (consulté le 29 septembre 2020).
- Réf. 13** Statistique Canada (2020). *Augmentation du nombre de véhicules sur les routes en 2019*. Sur Internet : https://www.rncan.gc.ca/science-donnees/donnees-analyse/donnees-analyse-energetiques/faits-saillants-sur-lenergie/energie-emissions-gaz-effet-serre-ges/20074?_ga=2.8297012.78104048.1615396036-1101137642.1615396036 (consulté le 26 octobre 2020)
- Réf. 14** Climate Transparency (2019). *Brown to Green the G20 Transition Toward a Net-Zero Emissions Economy*.
- Réf. 15** Office national de l'énergie (2019). *La transition énergétique du Canada : Évaluation du marché de l'énergie*.

- Réf. 16** Ressources naturelles Canada (2017). Secteur résidentiel — Québec — Tableau 2 : Consommation d'énergie secondaire et émissions de GES par utilisation finale. Sur Internet : <https://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/showTable.cfm?type=CP§or=res&juris=qc&rn=2&page=3> (consulté le 13 octobre 2020)
- Réf. 17** Agence internationale de l'énergie (2014). Energy Technology Perspectives 2014: Harnessing Electricity's potential.
- Réf. 18** Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (2009). Comment nourrir le monde en 2050.
- Réf. 19** Nations Unies, Département des affaires économiques et sociales, Division de la population (2015). World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables. Document de travail.
- Réf. 20** Yildirim, T., T. Bilyea et D. Buckingham (2019). Croissance écologique en agriculture, livre blanc préparé pour le Fonds pour une économie propre, L'Institut canadien des politiques agroalimentaires.
- Réf. 21** Eggelston, S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara et K. Tanabe (2006). Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, vol. 4 : Agriculture, foresterie et autres affectations des terres, Institute for Global Environmental Strategies. Chapitre 12 : Produits ligneux récoltés.
- Réf. 22** Gouvernement du Canada (2020). Gaz à effet de serre et agriculture. Sur Internet : <https://www.agr.gc.ca/fra/agriculture-et-environnement/pratiques-agricoles/changements-climatiques-et-agriculture/gaz-a-effet-de-serre-et-agriculture/?id=1329321969842> (consulté le 30 septembre 2020).
- Réf. 23** Gouvernement du Canada (2020). Le Canada fait un pas de plus vers l'objectif de zéro déchet de plastique d'ici 2030. Sur Internet : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/nouvelles/2020/10/le-canada-fait-un-pas-de-plus-vers-lobjectif-de-zero-dechet-de-plastique-dici-2030.html>
- Réf. 24** Gouvernement de l'Alberta (2016). Climate Technology Task Force. Sur Internet : <https://www.alberta.ca/climate-technology-task-force.aspx> (consulté le 30 septembre 2020).
- Réf. 25** Gouvernement de l'Alberta (2020). Alberta emissions offset system. Sur Internet : <https://www.alberta.ca/alberta-emission-offset-system.aspx> (consulté le 30 septembre 2020).
- Réf. 26** Gouvernement de l'Alberta (2020). Technology Innovation and Emissions Reduction Regulation. Sur Internet : <https://www.alberta.ca/technology-innovation-and-emissions-reduction-regulation.aspx> (consulté le 30 septembre 2020).
- Réf. 27** Ressources naturelles Canada (2017). Secteur des transports — Émissions de GES. Données de 2017. Sur Internet : <https://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/showTable.cfm?type=AN§or=aaa&juris=00&rn=5&page=1> (consulté le 18 novembre 2020).
- Réf. 28** Gouvernement du Canada (2017). La décarbonisation des transports au Canada, Rapport du Comité sénatorial permanent de l'énergie, de l'environnement et des ressources naturelles.

- Réf. 29** McKinsey & Company (2020). How airlines can chart a path to zero-carbon flying. Sur Internet : <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/how-airlines-can-chart-a-path-to-zero-carbon-flying> (consulté le 18 novembre 2020).
- Réf. 30** Layzell, D. B., C. Young, J. Lof, J. Leary et S. Sit (2020). "Toward Net-Zero Energy Systems in Canada: A Key Role for Hydrogen", L'Accélérateur de transition, vol. 2, no 3. Sur Internet : <https://transitionaccelerator.ca/towards-net-zero-energy-systems-in-canada-a-key-role-for-hydrogen/> (consulté le 18 novembre 2020).
- Réf. 31** IEA Bioenergy (2018). IEA Bioenergy Countries' Reports: Bioenergy policies and status of implementation, Canada—2018 update, septembre.
- Réf. 32** Ressources naturelles Canada (2018). Tracer la voie jusqu'en 2030 : Feuille de route pour la transformation du marché de l'équipement écoénergétique dans le secteur du bâtiment.
- Réf. 33** Ressources naturelles Canada (2017). Une construction intelligente : une stratégie canadienne pour les bâtiments. Sur Internet : https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/emmc/pdf/Building_Smart_fr.pdf (consulté le 18 novembre 2020).
- Réf. 34** Association des consommateurs industriels de gaz (s.d.). Options, Opportunities, and the Efficient Transition—A Report on the Technical Potential to Decarbonize Canada's Heavy Industry. Ébauche. Sur Internet : https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/energy-resources/Heavy_Industry_Decarbonization_-_Options,_opportunities_and_consideration....pdf (consulté le 18 novembre 2020).
- Réf. 35** Bataille, C., N. Melton et S. Stiebert (2016). The potential to decarbonize Canadian heavy industry: Technological and policy pathways for Canadian energy intense industry to thrive in a low carbon world. Document de travail. DOI : 10.13140/RG.2.1.3375.5121.
- Réf. 36** Elysis (2020). What is Elysis? Sur Internet : <https://www.elysis.com/en/what-is-elysis#carbon-free-smelting> (consulté le 16 octobre 2020).
- Réf. 37** CarbiCrete (2018). Diminuez votre empreinte carbone. Sur Internet : <http://carbicrete.com/fr/accueil/> (consulté le 16 octobre 2020).
- Réf. 38** Gerber, P.J. et coll. (2013). Lutter contre le changement climatique grâce à l'élevage : Une évaluation des émissions et des opportunités d'atténuation au niveau mondial, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Réf. 39** Génération Energy (2018). La transition énergétique du Canada : Concrétiser notre avenir énergétique ensemble, rapport du Conseil Génération Énergie, Ressources naturelles Canada.
- Réf. 40** Ressources naturelles Canada (2020). Cahier d'information sur l'énergie 2020-2021.
- Réf. 41** Green Ribbon Panel (2020). 2020 Green Ribbon Panel Report: Clean Air, Climate Change and Practical, Innovative Solutions, Policy Enabled Competitive Advantages Tuned for Growth.
- Réf. 42** Projet Trottier pour l'avenir énergétique (2016). Canada's Challenges and Opportunity: Transformations for major reductions in GHG emissions.

- Réf. 43** Alberta Electric System Operator (2019). AESO 2019—Long-term Outlook.
- Réf. 44** Gouvernement de l'Alberta (janvier 2020). Renewable Electricity Act, Statutes of Alberta, 2016, chapitre R-16.5.
- Réf. 45** SaskPower (2017). The Path to 2030: SaskPower Updates Progress on Renewable Electricity. Sur Internet : <https://www.saskpower.com/about-us/media-information/news-releases/2018/03/the-path-to-2030-saskpower-updates-progress-on-renewable-electricity> (consulté le 14 octobre 2020).
- Réf. 46** Assemblée législative de la Nouvelle-Écosse (2019). Bill No. 213 — An Act to Achieve Environmental Goals and Sustainable Prosperity.
- Réf. 47** Nova Scotia Power (2020). 2020 IRP—Interim Modelling Progress Workshop.
- Réf. 48** Énergie NB (2020). (2020). Plan intégré des ressources.
- Réf. 49** Statistique Canada (2019). Bulletin sur la disponibilité et écoulement d'énergie au Canada, Préliminaire 2017.
- Réf. 50** Maloney, J. (2017). Interconnexions électriques stratégiques, rapport du Comité permanent des ressources naturelles, 42e législature, 1re session, décembre 2017, Chambre des communes du Canada.
- Réf. 51** Hydroélectricité Canada (2020). Découvrir. Découvrez comment l'hydroélectricité est produite et quelle est son importance au Canada. Sur Internet : <https://waterpowercanada.ca/fr/decouvrir/> (consulté le 18 novembre 2020).
- Réf. 52** Ontario Power Generation (2020). Nuclear Power. Sur Internet : <https://www.opg.com/powering-ontario/our-generation/nuclear/> (consulté le 18 novembre 2020).
- Réf. 53** Régie de l'énergie du Canada (2020). Profils énergétiques des provinces et territoires — Nouveau-Brunswick. Sur Internet : <https://www.cer-rec.gc.ca/fr/donnees-analyse/marches-energetiques/profils-energetiques-provinces-territoires/profils-energetiques-provinces-territoires-nouveau-brunswick.html> (consulté le 18 novembre 2020).
- Réf. 54** Association nucléaire canadienne (2019). L'aide-moie du nucléaire au Canada.
- Réf. 55** Ontario Power Generation (2020). OPG marks major milestone in SMR development in Canada. Sur Internet : <https://www.opg.com/story/opg-marks-major-milestone-in-smr-development-in-canada/> (consulté le 14 octobre 2020).
- Réf. 56** Bramadat-Willcock, M. (2020). « Nuclear giants team up to develop reactors in Sask. and Ontario », Canada's National Observer (21 août 2020). Sur Internet : <https://www.nationalobserver.com/2020/08/21/news/nuclear-giants-team-develop-reactors-sask-and-ontario> (consulté le 14 octobre 2020).
- Réf. 57** SNC-Lavalin, et Candu Energy (s.d.). Candu SMR : The Original Canadian Solution. Sur Internet : https://www.snclavalin.com/~-/media/Files/S/SNC-Lavalin/download-centre/en/brochure/our-candu-smr_en.pdf (consulté le 18 novembre 2020).
- Réf. 58** Réf. 58 Lindstrand, N. (2019). « This Swedish scientist works toward fulfilling Siemens Energy's 2030 hydrogen pledge », Siemens Energy. Sur Internet : <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2019/hydrogen-capable-gas-turbine.html> (consulté le 14 octobre 2020).

- Réf. 59** General Electric (2020). Decarbonizing Power Generation—Hydrogen fueled gas turbines. Sur Internet : <https://www.ge.com/power/gas/fuel-capability/hydrogen-fueled-gas-turbines> (consulté le 14 octobre 2020).
- Réf. 60** Mitsubishi Power (s.d.). Hydrogen power generation advance toward commercial viability. Sur Internet : <https://power.mhi.com/special/hydrogen/index.html> (consulté le 14 octobre 2020).
- Réf. 61** CANWEA (2020). Marchés éoliens. Puissance installée. Sur Internet : <https://canwea.ca/fr/marches-eoliens/puissance-installee/> (consulté le 18 novembre 2020).
- Réf. 62** Initiative de collaboration régionale et d'infrastructure stratégique de l'électricité (2018). Région de l'Ouest — Résumé à l'intention des responsables des politiques, Ressources naturelles Canada.
- Réf. 63** Initiative de collaboration régionale et d'infrastructure stratégique de l'électricité (2018). Région de l'Atlantique — Résumé à l'intention des responsables des politiques, Ressources naturelles Canada.
- Réf. 64** ITC Holdings (2020). ITC Lake Erie Connector Project. Sur Internet : <https://www.itclakeerieconnector.com/> (consulté le 14 octobre 2020).
- Réf. 65** Asia Pacific Energy Research Centre (2018). Perspectives on Hydrogen in the APEC Region, juin 2018.
- Réf. 66** SNC Lavalin (s.d.). Accélérer des projets d'infrastructure prêts à démarrer. Sur Internet : https://www.snclavalin.com/~/_media/Files/S/SNC-Lavalin/download-centre/fr/brochure/asri-brochure-fr.pdf (consulté le 14 octobre 2020).
- Réf. 67** Ressources naturelles Canada (2017). Production par source, 2017. Sur Internet : https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/energy_fact/generation-by-source-electricity_03-2019.png (consulté le 14 octobre 2020).
- Réf. 68** Bru, T. (2020). Hydrogen in Norway, gouvernement de la Norvège. Sur Internet : <https://www.regjeringen.no/en/aktuelt/hydrogen-in-norway/id2704905/> (consulté le 14 octobre 2020).
- Réf. 69** International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (2011). IPHE Renewable Hydrogen Report—Utsira Wind Power and Hydrogen Plant.
- Réf. 70** Maiti, S.N. (2020). Green Hydrogen—An Overview of Current Development in Global Decarbonization, SNC-Lavalin.
- Réf. 71** Hydrogen Council (2017). Hydrogen scaling up—A sustainable pathway for the global energy transition.
- Réf. 72** Gouvernement du Canada (2016). Industrie canadienne — Hydrogène et piles à combustible. Foire aux questions. Sur Internet : https://www.ic.gc.ca/eic/site/hfc-hpc.nsf/fra/h_mc00138.html (consulté le 21 septembre 2020).
- Réf. 73** Département de l'Énergie des États-Unis (s.d.). Alternative Fuels Data Center—Fuel Cell Electric Vehicles. Sur Internet : https://afdc.energy.gov/vehicles/fuel_cell.html (consulté le 23 septembre 2020).
- Réf. 74** Union of Concerned Scientists (2015). How Do Hydrogen Fuel Cell Vehicles Work? Sur Internet : <https://www.ucsusa.org/resources/how-do-hydrogen-fuel-cell-vehicles-work> (consulté le 21 septembre 2020).

- Réf. 75** Frangoul, A. (2020). Hydrogen-powered passenger plane completes maiden flight in "world first". Sur Internet : <https://www.cnbc.com/2020/09/25/hydrogen-powered-passenger-plane-completes-maiden-flight.html> (consulté le 24 septembre 2020).
- Réf. 76** Département de l'Énergie des États-Unis (s.d.). Liquid Hydrogen Delivery. Sur Internet : <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/liquid-hydrogen-delivery> (consulté le 24 septembre 2020).
- Réf. 77** Département de l'Énergie des États-Unis (s.d.). Liquid Hydrogen Delivery. Sur Internet : <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/gaseous-hydrogen-delivery> (consulté le 25 septembre 2020).
- Réf. 78** Département de l'Énergie des États-Unis (s.d.). Hydrogen Storage. Sur Internet : <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> (consulté le 21 septembre 2020).
- Réf. 79** Pellow, M.A., C.J.M. Emmott, C.J. Barnhart et S.M. Benson (2015). « Hydrogen or batteries for grid storage?: A net energy analysis », *Energy and Environmental Science*, vol. 8, DOI:10.1039/c4ee04041d.
- Réf. 80** Hydrogen Europe (2017). Hydrogen in Industry. Sur Internet : (consulté le 21 septembre 2020).
- Réf. 81** Air Liquide (2020). Produire de l'hydrogène. Sur Internet : (consulté le 22 septembre 2020).
- Réf. 82** Agence internationale de l'énergie (2019). The Future of Hydrogen. Sur Internet : (consulté le 25 septembre 2020).
- Réf. 83** Département de l'Énergie des États-Unis (s.d.). Hydrogen Production : Natural Gas Reforming. Sur Internet : <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming> (consulté le 22 septembre 2020).
- Réf. 84** U.S. Environmental Protection Agency (s.d.). Greenhouse Gas Emissions—Overview of Greenhouse Gases. Sur Internet : <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases> (consulté le 22 septembre 2020).
- Réf. 85** Coyne, B. (2019). "Green hydrogen: How to get there?", *The Energyst* (19 août). Sur Internet : <https://theenergyst.com/green-hydrogen-how-to-get-there/> (consulté le 23 septembre 2020).
- Réf. 86** Gouvernement du Canada (2020). Faits sur l'électricité. Sur Internet : https://www.rncan.gc.ca/science-donnees/donnees-analyse/donnees-analyse-energetiques/faits-saillants-sur-lenergie/faits-lelectricite/20079?_ga=2.28793018.78104048.1615396036-1101137642.1615396036 (consulté le 23 septembre 2020).
- Réf. 87** Agence internationale pour les énergies renouvelables (2018). Hydrogen from Renewable Power: Technology Outlook for the Energy Transition.
- Réf. 88** Misra, S. et S.N. Maiti (s.d.). Carbon Capture Utilization and Storage—A Review on present technologies and practice, SNC-Lavalin.
- Réf. 89** Gouvernement du Canada (2016). Procédés de piégeage du CO₂. Sur Internet : (consulté le 28 septembre 2020).

- Réf. 90** Leung, D.Y.C, G. Caramanna, et M. M. Maroto-Valer (2014). « An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, p. 426-443. DOI : 10.1016/j.rser.2014.07.093.
- Réf. 91** Alberta Carbon Trunk Line (s.d.). ACTL System—Full System Scope. Sur Internet : (consulté le 28 septembre 2020).
- Réf. 92** Gouvernement du Canada (2020). Stockage du CO₂. Sur Internet : https://www.rncan.gc.ca/energie/sources-denergie-et-reseau-de-distribution/charbon-et-captage-et-stockage-du-carbone/captage-et-stockage-du-carbone/captage-et-stockage-du-carbone-stockage-du-co2/4300?_ga=2.264663049.78104048.1615396036-1101137642.1615396036 (consulté le 1er octobre 2020).
- Réf. 93** Union of Concerned Scientists (2020). Each Country's Share of CO₂ emissions. Sur Internet : (consulté le 28 septembre 2020).
- Réf. 94** Département de l'énergie des États-Unis — National Energy Technology Laboratory (s.d.). Sur Internet : (consulté le 29 septembre 2020).
- Réf. 95** Gouvernement du Canada (2016). Sables bitumineux : Le captage et le stockage du carbone. Sur Internet : (consulté le 29 septembre 2020).
- Réf. 96** Carbon Brief (2016). Explainer: 10 ways "negative emissions" could slow climate change. Sur Internet : <https://www.carbonbrief.org/explainer-10-ways-negative-emissions-could-slow-climate-change> (consulté le 30 septembre 2020).
- Réf. 97** Association mondiale du charbon (2018). Driving CCUS Deployment—The Pathway to Zero Emissions from Coal.
- Réf. 98** Régie de l'énergie du Canada (2016). Aperçu du marché : Les projets de CSC pourront bientôt retirer de l'atmosphère jusqu'à 6,4 millions de tonnes de CO₂ par année. Sur Internet : <https://www.cer-rec.gc.ca/fr/donnees-analyse/marches-energetiques/aperçu-marches/2016/aperçu-marche-projets-csc-pourront-bientot-retirer-latmosphère-jusqua-6-4-millions-tonnes-co2-annee.html> (consulté le 1er octobre 2020).
- Réf. 99** SNC Lavalin — Réseaux intelligents et cybersécurité (s.d.). Building the business case for Securing the Digital Utility Transformation. <https://www.snclavalin.com/fr-FR/markets-and-services/services/intelligent-networks-and-cybersecurity>
- Réf. 100** Keane, K. (2019). "Orkney 'smart energy' grid project launched", BBC. Sur Internet : <https://www.bbc.co.uk/news/uk-scotland-north-east-orkney-shetland-47785050> (consulté le 1er octobre 2020).
- Réf. 101** Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2005). Piégeage et stockage du dioxyde de carbone, rapport spécial du GIEC, Rapport du Groupe de travail III du GIEC.



ENGINEERINGNETZERO.COM/FR
SNCLAVALIN.COM

