

RAPPORT DE RECHERCHE

Prêt pour l'élimination : une décennie décisive pour le leadership canadien en matière d'élimination du dioxyde de carbone



Acronymes et abréviations

BECCS

Bioénergie avec captage et stockage du carbone

BiCRS

Stockage et élimination du carbone par la biomasse

CCfDs

Contrats sur le carbone pour la différence

CCUS

Capture, utilisation et stockage du carbone

CDR

Élimination du dioxyde de carbone

CO₂

Dioxyde de carbone

CO₂eq

Équivalent en dioxyde de carbone

DAC

Capture directe de CO₂ dans l'air

DOE

Département de l'énergie des États-Unis

PIB

Produit intérieur brut

GES

Gaz à effet de serre

Gt

Gigatonne

GIEC

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

IRA

Loi sur la réduction de l'inflation

CII

Crédit d'impôt à l'investissement

UTCATF

Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie

MRV

Mesure, rapportage et vérification

Mt

Mégatonne

R-D

Recherche et développement

R-D-D

Recherche, développement et démonstration

CCNUCC

Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques

À propos de Carbon Removal Canada

Carbon Removal Canada (CRC) est une initiative politique indépendante axée sur la mise à l'échelle rapide et responsable des solutions d'élimination du carbone nécessaires pour atteindre les objectifs climatiques du Canada. Basé à Toronto, en Ontario, CRC est un projet de la Clean Prosperity Foundation et le premier groupe au Canada à se consacrer à l'élaboration de politiques et au renforcement des systèmes afin de créer un secteur innovant et inclusif de l'élimination du carbone.

Carbon Removal Canada

Un projet de la Clean Prosperity Foundation
33 Bloor Street East, 5th Floor
Toronto, ON M4W 3H1

Nous reconnaissons avec respect que ce rapport a été produit sur les territoires traditionnels, ancestraux et non cédés de nombreuses nations, notamment les Mississaugas de Credit, les Anishinaabeg, les Chippewa, les Haudenosaunee et les Wendat, dont les liens profonds avec cette terre se poursuivent encore aujourd'hui.

©2023 Clean Prosperity Foundation

Tous droits réservés. Il est permis de reproduire en tout ou en partie cette publication à des fins non commerciales, à condition de citer la source

Citation recommandée : Bushman, T. & Merchant, N. (2023). *Ready for Removal: A Decisive Decade for Canadian Leadership in Carbon Dioxide Removal*. [Prêt pour l'élimination : une décennie décisive pour le leadership canadien en matière d'élimination du dioxyde de carbone] [Carbon Removal Canada](#).

Remerciements

Carbon Removal Canada tient à remercier les personnes suivantes pour avoir été les réviseurs techniques de ce rapport et pour avoir offert leurs commentaires critiques et leurs points de vue.

Remarque : Le contenu de ce rapport n'est attribuable à aucun des réviseurs techniques. Les opinions exprimées ici sont celles de Carbon Removal Canada et ne reflètent pas nécessairement celles des réviseurs ou de leurs employeurs.

Michael Bernstein – Directeur exécutif, Clean Prosperity

Dale Beugin – Vice-président directeur, Institut canadien du climat

Caroline de Bossart – Directrice, Fondation Grantham

Emily Chiang – Professeur associé, Université de Guelph

Rachel Doran – Vice-présidente de la politique et de la stratégie, Clean Energy Canada

Dr. Julio Friedmann – Scientifique en chef, Carbon Direct

Geoff Holmes – Consultant indépendant

J.P. Jepp – Directeur, Nexus Climat et Stratégie énergétique

Stacy Kauk – Responsable du développement durable, Shopify

Anu Khan – Directeur adjoint de la science et de l'innovation, Carbon180

Ugbaad Kosar – Directeur de la justice environnementale, Carbon180

Colin McCormick – Directeur de l'innovation, Carbon Direct

Sean McCoy – Professeur adjoint, Université de Calgary, Initiative CanCO2Re

Dr. Sara Nawaz – Directrice de recherche, American University

Stefan Pauer – Gestionnaire, Analyse technologique et économique, Énergie propre Canada

Liam St. Louis – Consultant, Carbon Removal Canada

Jennifer Wagner – Programme de bourse en affaires, Breakthrough Energy

Frances Wang – Responsable de programme, Quadrature Climate Foundation

Ed Whittingham – Consultant indépendant

TABLE OF CONTENTS

Résumé exécutif.....	4
SECTION 1 : POURQUOI L'ÉLIMINATION DU DIOXYDE DE CARBONE?	5
Rôle de la CDR	6
Émissions résiduelles	10
Émissions historiques	11
SECTION 2 : POURQUOI LE CANADA?	13
Impact économique	13
Tirer parti des avantages stratégiques du Canada	16
SECTION 3 : POURQUOI MAINTENANT?	19
Un écosystème d'innovation florissant	20
Un environnement politique en plein essor	22
SECTION 4 : QUELLE EST LA PROCHAINE ÉTAPE?	24
Bâtir sur une base solide	24
Comblir le fossé politique.....	26
SECTION 5 : ANNEXE	32
Tableau A-1 : Aperçu des méthodes CDR	32
Tableau A-2 : Sélection d'estimations bibliographiques concernant les besoins en CDR au Canada d'ici à 2050	39
Tableau A-3 : Sociétés de CDR au Canada (liste non exhaustive)	40
Méthodologie	43
Notes de fin d'ouvrage.....	44



Résumé exécutif

L'élimination du dioxyde de carbone (CDR) est intentionnelle, il s'agit d'un processus conduit par l'homme qui consiste à éliminer le dioxyde de carbone (CO₂) déjà présent dans l'atmosphère et à le stocker pour des siècles ou plus. Il s'agit d'un complément indispensable à des réductions importantes des émissions dans l'ensemble de l'économie, car même lorsque la société aura atteint des émissions nettes nulles, il faudra encore retirer de l'atmosphère des milliards de tonnes de CO₂ pour atteindre les objectifs mondiaux en matière de température.

Conformément à l'engagement du Canada à l'égard des objectifs de l'Accord de Paris, cela signifie qu'il faut construire une industrie prête à éliminer de l'atmosphère des centaines de millions de tonnes de CO₂ par an d'ici le milieu du siècle. Une industrie à cette échelle jouera un rôle important pour aider le Canada à atteindre ses objectifs climatiques nationaux en compensant les émissions résiduelles qu'il est techniquement difficile ou excessivement coûteux d'atténuer directement, ou pour les sources d'émissions pour lesquelles il n'existe actuellement aucune possibilité d'atténuation. Plus important encore, cela permettra au Canada de réduire sa part d'émissions historiques et de contribuer aux besoins mondiaux en matière de CDR au cours de ce siècle.

Le Canada dispose d'une abondance de terres, de vastes côtes et d'un important potentiel de stockage géologique nécessaire pour réaliser la CDR à grande échelle. À cela s'ajoutent une offre d'énergie propre, une main — d'œuvre qualifiée, des systèmes de connaissances traditionnels et une culture de l'innovation qui sont essentiels à la création d'un secteur de la CDR robuste.

Si les décideurs politiques prennent des mesures ciblées pour favoriser la création de cette industrie essentielle dès maintenant, ils peuvent mobiliser l'écosystème d'innovation du Canada pour soutenir le secteur de la CDR et saisir une opportunité économique majeure. Une analyse commandée par Carbon Removal Canada a estimé qu'une industrie de la CDR éliminant des centaines de millions de tonnes de CO₂ de l'atmosphère d'ici 2050 pourrait **créer plus de 300 000 emplois, ajouter 143 milliards de dollars au PIB** et soutenir d'autres secteurs industriels essentiels tels que la construction, la fabrication d'équipements, l'acier et le ciment.

Le gouvernement du Canada, en étroite collaboration avec les provinces et les territoires, devrait mettre en œuvre des politiques qui créent un signal fort de la demande de CDR, accélèrent les progrès technologiques et permettent un déploiement rapide et responsable des projets de CDR. En cette décennie de formation de la CDR, les décisions politiques prises aujourd'hui affecteront la trajectoire de cette industrie pour les décennies à venir. Si le Canada veut développer l'industrie de la CDR pour contribuer à la lutte contre le changement climatique, des mesures considérables doivent être prises au cours de cette décennie pour atteindre l'échelle requise d'ici le milieu du siècle. **Le moment est venu pour les décideurs politiques, en partenariat avec la communauté élargie des acteurs de la CDR, de prendre des mesures audacieuses en faveur de cette solution passionnante et nécessaire pour le climat.**

Section 1

Pourquoi l'élimination du dioxyde de carbone?



Depuis la révolution industrielle, l'humanité a émis environ 2,5 trillions de tonnes de CO₂, ce qui a entraîné une accumulation dans l'atmosphère de ce gaz à effet de serre (GES) qui piège la chaleur¹.

La concentration actuelle de CO₂ dans l'atmosphère est sans précédent depuis plusieurs millions d'années² et a un impact profondément négatif sur la planète. Actuellement, la température moyenne à la surface du globe dépasse d'environ 1,3 °C les niveaux préindustriels³. Si l'on tient compte de l'ensemble des engagements nationaux pris à ce jour en matière de climat, le réchauffement d'ici la fin du siècle devrait se situer entre 1,7 °C (respect de tous les engagements en matière de climat) et 2,6 °C (respect des seuls engagements crédibles en matière de climat)^{4,5}.

En réponse à la hausse des températures, 196 nations se sont engagées à atteindre les objectifs de l'Accord de Paris en 2015, ce qui signifie limiter l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe à moins de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels, avec l'ambition supplémentaire de maintenir le réchauffement en dessous de 1,5 °C⁶. Malheureusement, les émissions annuelles mondiales de CO₂ continuent d'augmenter (atteignant près de 41 milliards de tonnes de CO₂ [GtCO₂] en 2022⁷) et éloignent le monde de la réalisation des objectifs de Paris en matière de climat. La société a progressé trop lentement en matière d'atténuation et, bien que la réduction des émissions doive rester l'objectif principal de l'effort mondial de lutte contre le changement climatique, nous devons également cultiver d'autres solutions pour gérer le problème. La CDR, qui consiste à extraire le CO₂ de l'atmosphère et à le stocker pendant des siècles, voire plus, est un outil indispensable pour atteindre les objectifs climatiques mondiaux, parallèlement à des stratégies agressives de réduction des émissions.

L'**objectif de ce rapport** est d'aider à identifier le rôle et l'ampleur potentielle de la CDR nécessaire au Canada, de mettre en évidence les avantages économiques qui pourraient être exploités en tirant parti des avantages nationaux pour positionner le Canada en tant qu'acteur majeur de cette nouvelle industrie, et de recommander ce que les décideurs politiques devraient faire pour maximiser cette opportunité de leadership mondial.

CDR – le processus qui consiste à extraire le CO₂ de l'atmosphère et à le stocker pendant des siècles, voire plus, est un outil indispensable, parallèlement aux stratégies agressives de réduction des émissions, pour atteindre les objectifs climatiques mondiaux.

Le Canada aura besoin d'une CDR à l'échelle de la mégatonne qui passera rapidement de dizaines à des centaines de millions de tonnes de CO₂ par an au cours des prochaines décennies afin de contribuer à la réalisation des objectifs climatiques nationaux et mondiaux.



Les ressources naturelles du Canada, ses actifs en matière d'énergie propre, son potentiel de stockage géologique, sa culture de l'innovation et d'autres avantages stratégiques le placent dans une position qui lui permet d'accroître l'impact positif de la CDR sur le climat tout en réalisant des gains économiques.

Les actions à court terme sont importantes ; les décisions politiques prises aujourd'hui auront une influence à long terme sur l'avenir de l'industrie de la CDR au Canada. Des actions immédiates sont nécessaires en ce qui concerne la définition des objectifs, les incitations politiques, les structures réglementaires, la mise en œuvre des programmes et la mobilisation d'un soutien financier adéquat (entre autres facteurs). Il s'agit d'une décennie décisive pour soutenir la CDR et les solutions climatiques de manière plus générale, afin que la société puisse préparer les options les plus prometteuses pour un déploiement à grande échelle.

Rôle de la CDR

La société est confrontée au double défi de réduire radicalement les émissions de CO₂ (et d'autres GES) dans l'atmosphère tout en éliminant simultanément de l'atmosphère le CO₂ qui s'est accumulé au fil du temps au-delà des niveaux préindustriels. Bien que l'on s'attende à ce que l'on parvienne à un niveau net zéro pour mettre fin rapidement au réchauffement en l'espace de plusieurs années⁹, la société sera toujours « enfermée » dans l'ampleur des effets négatifs sur le climat associés au niveau particulier de réchauffement à ce niveau. Chaque fraction de degré compte et la différence entre les impacts climatiques prévus pour un réchauffement de 1,5 °C et de 2 °C est frappante¹⁰. Cela souligne la nécessité urgente d'arrêter d'émettre de nouveaux GES dans l'atmosphère qui s'ajoutent au stock cumulatif d'émissions tout en développant un ensemble de technologies et de stratégies qui peuvent commencer à éliminer les émissions historiques de CO₂ de l'atmosphère. La

Image reproduite avec l'aimable autorisation de : Carbon Engineering



La CDR est un complément vital et nécessaire, mais pas un substitut, à des réductions profondes et rapides des émissions mondiales de GES.

CDR est un complément vital et nécessaire aux réductions profondes et rapides des émissions mondiales de GES, mais ne doit pas s'y substituer et ne doit pas être utilisée comme moyen de dissuasion¹¹. En effet, plus la société réussira à réduire ses émissions, moins il faudra éliminer le CO₂ historique de l'atmosphère pour atteindre les objectifs en matière de climat.

La CDR est un processus intentionnel, mené par l'homme, qui consiste à éliminer le CO₂ de l'atmosphère et à le stocker pendant des siècles ou plus, d'une manière qui ne peut pas être facilement inversée. Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a clairement exprimé la nécessité de la CDR pour atteindre les objectifs climatiques mondiaux et a défini son rôle comme suit :

1. la réduction des émissions nettes de CO₂ ou d'autres GES dans l'atmosphère à court terme ;
2. la nécessité « inévitable » de compenser les émissions résiduelles¹² qui sont difficiles à éliminer de l'économie pour atteindre des émissions nettes nulles ; et
3. l'obtention d'émissions nettes négatives à plus long terme¹³.

La CDR figure dans tous les scénarios compatibles avec les objectifs de l'Accord de Paris¹⁴ et offre la possibilité de réduire les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère grâce à des émissions nettes négatives durables et à des températures moyennes à la surface du globe plus basses. Pour ce faire, il faudra développer une nouvelle entreprise d'une taille comparable à celle de l'industrie pétrolière et gazière¹⁵, mais qui fonctionne à l'envers pour éliminer les émissions historiques de CO₂ de l'atmosphère à l'échelle de la gigatonne¹⁶ par an.

La CDR est le seul moyen dont dispose la société pour s'attaquer aux émissions historiques et peut donc servir d'outil de gestion des risques permettant de limiter le dépassement de la température¹⁷ par rapport aux objectifs climatiques mondiaux et de réduire potentiellement le temps passé dans une période de dépassement. Il est important de noter que la CDR se distingue de la capture, de l'utilisation et du stockage du carbone (CCUS). Alors que la CCUS cherche à empêcher de nouvelles émissions de CO₂ de pénétrer dans l'atmosphère à partir de diverses sources d'émission, la CDR cherche à éliminer de l'atmosphère le CO₂ déjà émis¹⁸.

La CDR et la CCUS sont deux ensembles distincts de technologies qui existent pour résoudre deux aspects différents du problème climatique :



L'élimination du dioxyde de carbone (CDR) cherche à **éliminer de l'atmosphère le CO₂** déjà émis



La capture, l'utilisation et le stockage du carbone (CCUS) cherche à **empêcher de nouvelles émissions de CO₂** de pénétrer dans l'atmosphère

Définir le besoin de la CDR au Canada

Atteindre l'échelle requise pour la CDR est un défi de taille (**tableau 1**) et nécessitera le déploiement d'un large portefeuille de solutions (**figure 1**) ; les méthodes conventionnelles seules (telles que la plantation d'arbres) ne suffiront vraisemblablement pas¹⁹. La CDR anthropique totale est estimée à environ 2 000 millions de tonnes de CO₂ (MtCO₂) par an au niveau mondial, dont la grande majorité est produite par des interventions terrestres telles que la foresterie, avec seulement 2 MtCO₂ par an couverts par des méthodes de CDR à plus long terme telles que la capture directe de l'air (DAC)²⁰. Dans un avenir où les impacts climatiques s'aggravent et où les systèmes biologiques sont de plus en plus sollicités, les solutions de CDR à plus longue durée de vie doivent être prioritaires²¹. Les flux financiers devront également augmenter considérablement pour aider à réaliser le potentiel d'échelle de la CDR au Canada et dans le monde. **On estime que seulement 200 millions de dollars américains ont été investis dans de nouvelles capacités de CDR mondialement entre 2020 et 2022²², une somme dérisoire comparée aux 1,7 trillion de dollars américains qui devraient être investis dans les énergies propres en 2023²³.**

TABLEAU 1 : ESTIMATION DES BESOINS CUMULÉS EN MATIÈRE DE CDR AU NIVEAU MONDIAL EN FONCTION DE L'OBJECTIF DE TEMPÉRATURE DE 1,5 °C, 2020 - 2100

Type de scénario	Besoin total de CDR (toutes les options d'élimination) (GtCO ₂)
<1,5 °C (dépassement nul ou limité)	740 (420 – 1 100)
<1,5 °C (dépassement important)	850 (590 – 1 300)

Remarque : Ces estimations contiennent des incertitudes inhérentes, et d'autres estimations de la littérature peuvent varier en fonction de la méthodologie et des hypothèses. Les données sont présentées sous forme de valeur médiane et de fourchette de valeurs de 5 à 95 %.

Source : Smith et coll., 2023²⁴

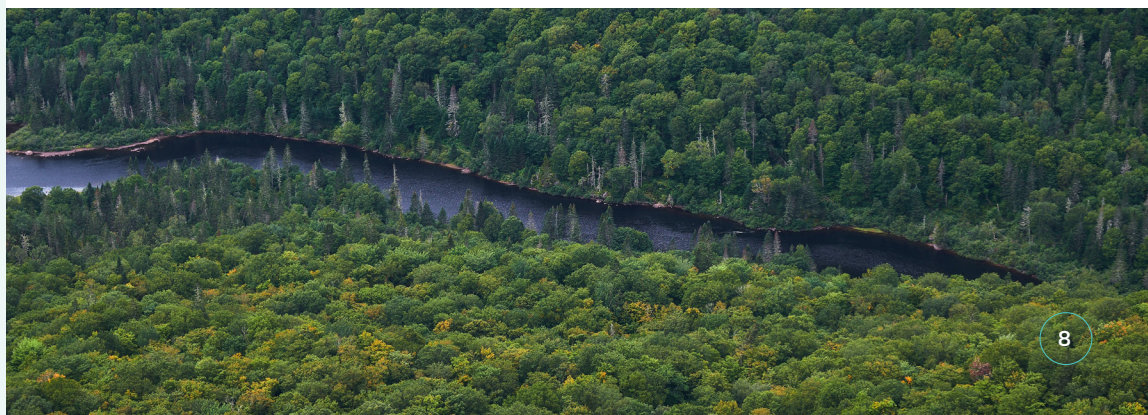




FIGURE 1 : APERÇU DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE CDR

1

MINÉRALISATION DU CARBONE

Le CO₂ est absorbé dans les roches au-dessus ou au-dessous de la surface pour être stocké sous forme minérale solide.

2

BIOCHARBON

Biomasse végétale transformée en un solide riche en carbone pour diverses utilisations.

3

CAPTURE DIRECTE DE CO₂ DANS L'AIR

Utilisation de produits chimiques et de matériaux spéciaux qui fixent sélectivement le CO₂ de l'air ambiant.

4

AMÉLIORATION DE L'ALTÉRATION DES ROCHES

Des roches concassées épandues sur des terres agricoles ou d'autres zones pour capturer le CO₂.

5

CAPTURE DIRECTE DE L'OCÉAN

Traitement direct de l'eau de mer par électrochimie pour éliminer le CO₂.

6

RENFORCEMENT DE L'ALCALINITÉ DES OCÉANS

Matière alcaline ajoutée à la couche superficielle de l'océan pour neutraliser le CO₂ dissous.

7

CULTURE DE MACROALGUES

Culture d'algues marines en milieu marin en vue de leur immersion au fond de l'océan ou de leur récolte pour diverses applications liées à la biomasse.

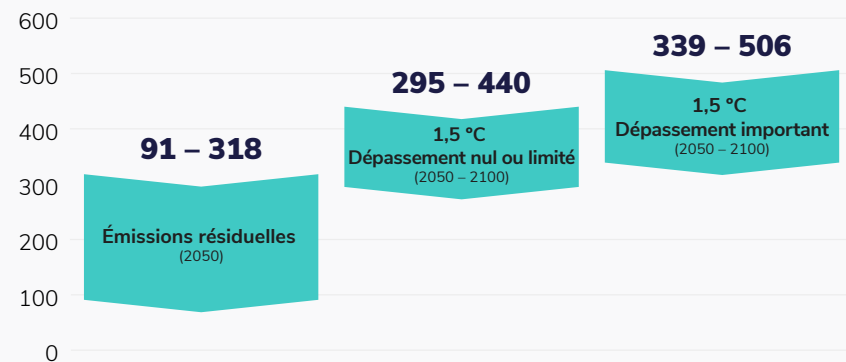
Cette section décrit deux besoins essentiels pour la CDR (**figure 2**) :

1. de déployer la CDR pour compenser les émissions résiduelles qui pourraient subsister dans l'ensemble de l'économie canadienne au milieu du siècle, afin de contribuer à la réalisation de l'objectif d'émissions nettes nulles d'ici à 2050 ; et
2. de déployer la CDR pour traiter les émissions historiques, permettant ainsi au Canada de faire sa juste part pour aider le monde à se conformer aux objectifs mondiaux en matière de climat²⁵.

Dans l'idéal, la quantité de CDR nécessaire pour parvenir à des émissions nettes nulles serait minime, de sorte que l'industrie puisse déployer ses capacités et ses efforts pour limiter le dépassement de la température et nettoyer les émissions historiques.

FIGURE 2 : BESOIN POTENTIEL DE CDR AU CANADA DANS DIFFÉRENTS CAS D'UTILISATION

Besoins en CDR (MtCO₂/an) par cas d'utilisation



Remarque : Les barres suivantes se rapportent à la quantité estimée de CDR qui pourrait être nécessaire au Canada pour gérer ses émissions résiduelles d'ici le milieu du siècle, et contribuent également aux besoins mondiaux de CDR pour atteindre les objectifs de température fixés à Paris, sur la base de sa part des émissions historiques. Si l'on exclut la barre des émissions résiduelles, les limites inférieures concernent uniquement les émissions de combustibles fossiles et les limites supérieures concernent les émissions de l'ensemble de l'économie (utilisation de combustibles fossiles et changement d'affectation des terres). Une méthodologie détaillée est présentée en annexe.

Source : Carbon Removal Canada, 2023

Émissions résiduelles

Il existe une incertitude considérable quant à la quantité d'émissions résiduelles qui subsisteront au milieu du siècle et qui nécessiteront le recours à la CDR pour parvenir à des émissions nettes nulles. Une analyse des stratégies nationales à long terme soumises à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)²⁶ a révélé que les émissions résiduelles au Canada devraient représenter environ 20 % de son niveau d'émissions de 2019²⁷ ou 149 MtCO₂-eq²⁸ d'ici 2050²⁹. Des études de modélisation antérieures ont également cherché à estimer la demande implicite de CDR au Canada pour l'aider à atteindre son objectif climatique du milieu du siècle et à traiter les émissions résiduelles (**tableau A-2**).

D'après ces études, le besoin estimé ou implicite de CDR au Canada d'ici 2050 **varie largement entre 91 et 318 MtCO₂ par an**³⁰. Alors que les émissions résiduelles sont susceptibles de demeurer dans l'ensemble de l'économie d'ici 2050, la demande implicite de CDR pour le Canada varie considérablement.³¹

Si les émissions résiduelles s'approchent de zéro d'ici le milieu du siècle, la capacité de CDR qui n'est pas utilisée pour les émissions résiduelles contribuerait plutôt à la nécessité urgente de réduire les émissions historiques de l'atmosphère.



Si le Canada continue de connaître une activité record en matière d'incendies de forêt comme en 2023 — avec des émissions résultantes qui pourraient être plus de trois fois supérieures à celles de tous les autres secteurs de l'économie combinés^{32,33} — le besoin de CDR pour traiter les émissions résiduelles pourrait être considérablement plus élevé.

Il sera donc impératif que le Canada adopte un portefeuille complet de solutions de CDR qui favorise le stockage durable du carbone à long terme³⁴.

Émissions historiques

Compte tenu de la nécessité d'une CDR à grande échelle pour éviter ou limiter le dépassement de la température, le Canada devrait également s'efforcer de poursuivre la CDR conformément aux besoins mondiaux totaux en la matière pour avoir une chance d'atteindre l'objectif de 1,5 °C à long terme (**tableau 1**). Si le monde veut éviter les pires impacts du changement climatique, la société devra aller au-delà des émissions nettes zéro et éliminer de l'atmosphère des milliards de tonnes de CO₂ cumulées d'ici la fin de ce siècle³⁵. Sur le plan fonctionnel, la société ne peut pas commencer à s'attaquer à ses émissions historiques jusqu'à ce qu'elle dépasse les émissions nettes de zéro, afin de parvenir à des émissions nettes négatives durables à l'échelle mondiale³⁶.

Bien qu'il soit compliqué d'attribuer une proportion de ce fardeau d'émissions historiques au niveau national, nous pensons qu'une approche appropriée consisterait à contribuer aux besoins mondiaux en matière de CDR au cours de ce siècle sur la base du pourcentage d'émissions historiques dont le Canada est responsable depuis l'ère préindustrielle. Cette approche permettrait au Canada d'assumer équitablement sa « juste part » de CDR et de contribuer aux solutions du changement climatique en fonction de sa contribution au problème, et pourrait servir de modèle à d'autres pays.

Si le monde veut éviter les pires conséquences du changement climatique, la société devra aller au-delà de l'objectif net zéro et éliminer de l'atmosphère des milliards de tonnes de CO₂ cumulées d'ici à la fin de ce siècle.

Le Canada est responsable d'environ 73 GtCO₂ d'émissions historiques cumulées depuis l'ère préindustrielle^{37,38,39,40,41}. Ces niveaux d'émissions correspondent à environ trois pour cent des émissions historiques mondiales dans l'ensemble de l'économie ou à deux pour cent des émissions historiques mondiales dues à l'utilisation de combustibles fossiles uniquement.

Compte tenu d'un besoin total estimé de 740 GtCO₂ pour rester en dessous de 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement limité, ou de 850 GtCO₂ pour rester en dessous de 1,5 °C avec un dépassement important d'ici 2100^{42,43,44}. Le Canada aurait besoin d'une capacité annuelle approximative de **295 à 440 MtCO₂ ou de 339 à 506 MtCO₂ de 2050 à 2100**, respectivement, une fois les émissions nettes nulles atteintes.

L'ampleur potentielle de la CDR nécessaire au Canada est considérable. Même si le milieu du siècle semble encore loin, pour atteindre la limite inférieure des fourchettes décrites dans cette section (environ 300 MtCO₂ par an d'ici 2050), il faudra développer dès maintenant les capacités de la CDR.



Par exemple, si la CDR devait atteindre les taux de croissance annuels remarquables de plus de 20 % enregistrés par l'industrie solaire⁴⁵, le Canada devrait avoir au moins 5 MtCO₂ par an de la CDR en cours de développement d'ici 2030 pour avoir une chance d'atteindre 300 MtCO₂ par an d'ici 2050.

Section 2

Pourquoi le Canada?



L'expansion de la CDR au Canada n'est pas seulement un moyen d'atteindre les objectifs de réduction nette de la consommation d'énergie et de contribuer à notre développement économique, mais il s'agit aussi d'**une opportunité économique majeure pour le Canada.**

Au niveau mondial, l'industrie de la CDR commence à attirer des milliards de dollars de financement dans les secteurs public⁴⁶ et privé⁴⁷. Une analyse commandée par Carbon Removal Canada⁴⁸ a montré que la mise à l'échelle de la CDR à l'aide de DAC dans la fourchette des besoins annuels estimés d'élimination définis à la section 1 **pourrait créer 300 000 emplois et 143 milliards de dollars de produit intérieur brut (PIB) d'ici à 2050.** Le Canada dispose d'avantages stratégiques qui lui permettent de mettre immédiatement à profit cette opportunité économique.

Impact économique

La lutte contre le changement climatique est largement considérée comme la plus grande opportunité économique de l'époque actuelle⁴⁹. **Au niveau mondial, la demande de CDR durable⁵⁰ pourrait atteindre 80 à 900 MtCO₂ en 2040 pour une valeur de marché de 20 à 135 milliards de dollars américains⁵¹.** Cet énorme potentiel de marché pourrait grandement profiter aux entreprises, innovateurs, travailleurs et investisseurs canadiens.

La poursuite de la CDR pourrait créer un nouveau moteur de croissance économique attrayant pour le Canada, qui créerait des centaines de milliers d'emplois de qualité. L'analyse commandée par Carbon Removal Canada a montré que l'élimination d'une mégatonne de CO₂ par an créait plus de 1 000 emplois (près de 1 800 emplois par installation d'une mégatonne pendant les périodes de construction) et contribuait pour plus de 460 millions de dollars au PIB. Les emplois ainsi créés couvrent un large éventail d'industries et de spécialisations, des produits chimiques à la construction, en passant par l'ingénierie et les transports.

L'élimination d'une mégatonne de CO₂ par an a permis de créer plus de 1 000 emplois et contribué plus de 460 millions de dollars au PIB.

FIGURE 3 : EMPLOIS CRÉÉS PAR L'INDUSTRIE À PARTIR D'UNE CAPACITÉ DE 312 MTCO₂ DAC AU CANADA D'ICI 2050

213 000 **44 000**

Construction Opérations

33 000 **17 000**

Ingénierie Transport

13 000 **11 000**

Équipement Énergie

1 000

Autres activités manufacturières

 **332 000**

emplois potentiels
créés

Source : Carbon Removal Canada, 2023.
Compilation à partir des données de Navius Research.

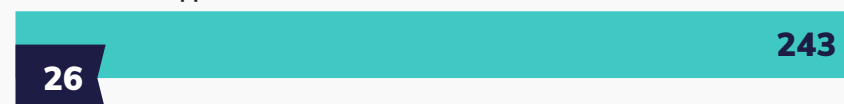
Une analyse de scénario a été utilisée pour modéliser le système énergétique canadien dans lequel la capacité annuelle totale de CAD au Canada atteindrait 312 MtCO₂ d'ici 2050. Ce scénario se situe dans la fourchette de l'estimation de la CDR nécessaire pour les émissions historiques au Canada présentées dans la section 1 (bien qu'une quantité encore plus importante de CDR puisse être nécessaire pour réduire les émissions historiques). L'élimination d'une mégatonne de CO₂ par an a permis de créer plus de 1 000 emplois et plus de 460 millions de dollars au PIB.

La modélisation a montré que 312 MtCO₂ par an de CDR pourraient conduire à la création de plus de 330 000 emplois et de 143 millions de dollars de PIB d'ici 2050 (**figure 3 et figure 4**)⁵². Ces gains économiques se répartissent entre l'aménagement et la construction d'installations de DAC et l'exploitation ultérieure de ces installations. Même après la phase de construction d'investissement, les avantages économiques de l'exploitation continue des installations de DAC au Canada ont été considérables, contribuant 117 milliards de dollars au PIB et créant 89 000 emplois permanents d'ici 2050.

FIGURE 4 : POTENTIEL DE CRÉATION D'EMPLOIS ET DE PIB DE LA CAPACITÉ DAC AU CANADA DE 312 MTCO₂ AU CANADA D'ICI 2050

● Emplois créés (en milliers) ● PIB milliards 2021 \$

Phase de développement



Opérations en cours



Source : Carbon Removal Canada, 2023. Compilation à partir des données de Navius Research.

Une telle expansion de la CDR pourrait soutenir de nombreux autres secteurs industriels essentiels au Canada, notamment la construction, la fabrication d'équipements, la production de ciment et la fabrication d'acier, la production de ciment et la sidérurgie. Le modèle a estimé que l'investissement dans la DAC créerait une demande de 23 milliards de dollars dans le secteur de la construction, et ajouterait plus de 1 milliard de dollars à la demande de fabrication d'équipement, 2,5 milliards de dollars pour l'acier et 170 millions de dollars pour le ciment (**figure 5**).

FIGURE 5 : NOUVEAU POTENTIEL D'INVESTISSEMENT DANS LES INDUSTRIES DE 312 MTCO₂ DE CAPACITÉ DE DAC AU CANADA D'ICI 2050

Nouveaux investissements (2021 \$) en 2050

 **23G \$**

Construction

 **1G \$**

Fabrication d'équipement

 **2,5G \$**

Acier

 **170M \$**

Ciment

Source : Carbon Removal Canada, 2023.
Compilation à partir des données de Navius Research.

En outre, l'Alberta et la Saskatchewan pourraient être les principaux bénéficiaires l'investissement du Canada dans la CDR, étant donné qu'ils possèdent la grande majorité de l'espace interstitiel pour le stockage géologique du CO₂ au Canada et qu'ils abritent de nombreux travailleurs du secteur du pétrole et du gaz, dont l'expertise pourrait être directement transférée à l'industrie de la CDR. Les avantages du développement d'une industrie nationale de la CDR pourraient également avoir des répercussions économiques positives en dehors du DAC. Par exemple, une analyse de **Charm Industrial**, une entreprise de CDR qui convertit les matières premières de la biomasse en une bio-huile qui est injectée sous terre, a révélé que les activités de l'entreprise pourraient créer 200 000 emplois et contribuer au PIB à hauteur de 20 milliards USD d'ici à 2040 dans les secteurs de l'agriculture, de la sylviculture, de la logistique et de l'industrie manufacturière⁵³.

Carbon Removal Canada a l'intention de mener des recherches supplémentaires pour estimer les impacts économiques de l'élargissement d'un portefeuille de méthodes de CDR au Canada. Ces études pourraient identifier les possibilités de création d'emplois spécifiques à une région du Canada en analysant un ensemble varié de méthodes de réduction des émissions de carbone, telles que la biomasse, l'extraction et le stockage du carbone (BiCRS), la CDR des océans et la minéralisation du carbone. Des recherches supplémentaires sont également nécessaires pour informer sur l'accès équitable aux opportunités d'emploi créées par une industrie CDR en pleine croissance et sur la meilleure façon de s'associer avec les communautés indigènes dans la gestion et la propriété des projets CDR afin de promouvoir des gains économiques inclusifs.

Tirer parti des avantages stratégiques du Canada

Le Canada dispose d'un certain nombre d'avantages stratégiques qui peuvent être exploités pour tirer parti des possibilités économiques offertes par la CDR et contribuer à la réalisation des objectifs nationaux et mondiaux en matière de climat.



Ressources naturelles

Le Canada est le deuxième plus grand pays du monde en termes de superficie (y compris les eaux territoriales) et possède le plus long littoral de la planète^{54,55}. Le Canada abrite également la troisième plus grande superficie forestière de tous les pays⁵⁶ et ses terres agricoles représentent plus de six pour cent de sa superficie totale⁵⁷. Cette vaste zone géographique pourrait servir de terrain fertile pour des projets de démonstration et des projets à l'échelle commerciale dans toute la gamme des méthodes CDR, et positionner le Canada comme un centre de déploiement mondial dans cette nouvelle industrie.



Énergie propre

Le Canada dispose d'une abondance de ressources énergétiques propres qui peuvent être exploitées à des fins de CDR. Environ 82 % de l'électricité produite au Canada en 2021 provenait de sources d'énergie non fossiles⁵⁸, et le Canada est déjà un leader mondial en matière de capacité hydroélectrique⁵⁹. D'ici 2050, la proportion de la production d'électricité propre au Canada devrait passer à 99 % si le pays veut atteindre son objectif de consommation nette zéro tout en relevant le défi de la croissance future de la charge sur le réseau⁶⁰. Le Canada pourrait donc être mieux placé que d'autres pays pour atteindre son objectif de consommation nette zéro. Le Canada pourrait donc être mieux placé que d'autres pays pour tirer parti de l'énergie propre existante d'une manière non concurrentielle avec les efforts d'atténuation et pour produire la nouvelle énergie propre nécessaire à la mise en place rapide d'un vaste secteur de CDR.



Stockage géologique

Le Canada dispose d'une importante ressource potentielle de stockage géologique du CO₂⁶¹ estimée entre 198 et 678 GtCO₂ dans plusieurs provinces et zones extracôtières fédérales qui devront équilibrer les cas d'utilisation d'atténuation et de RCD⁶². La majeure partie de cette ressource de stockage est située dans des formations salines en Saskatchewan et en Alberta, le bassin sédimentaire de l'Ouest canadien ayant à lui seul une capacité de stockage potentielle d'environ 600 GtCO₂ (**figure 6**)⁶³. Si cette ressource était convertie en capacité pratique, le Canada pourrait stocker entre 360 et plus de 1 000 ans d'émissions annuelles actuelles de CO₂ pour l'ensemble de l'économie^{64,65}. Cette ressource de stockage potentielle est considérable par rapport à d'autres pays au niveau national⁶⁶.



Main-d'œuvre qualifiée

Le Canada dispose d'une main-d'œuvre hautement qualifiée dans toute une série de secteurs, qui possède le savoir-faire technique nécessaire à la construction de grands projets d'infrastructure et à l'implantation d'industries à grande échelle. En particulier, le Canada compte des dizaines de milliers de travailleurs possédant le type d'expertise du sous-sol nécessaire au secteur de la CDR. Les entreprises de CDR peuvent exploiter les compétences transférables du pétrole et du gaz, de l'exploitation minière et d'autres industries pertinentes telles que la sylviculture. Le Canada est également considéré comme une destination mondiale capable d'attirer des travailleurs très talentueux et instruits qui pourraient contribuer à la création d'une industrie CDR robuste.



Recherche et innovation

Cette culture de l'innovation et de l'esprit d'entreprise doit maintenant être exploitée pour saisir l'opportunité économique que représente la CDR⁶⁷. Les universités canadiennes sont au cœur de l'écosystème d'innovation en R-D et peuvent contribuer à faire avancer la science et à maximiser les possibilités de la CDR, grâce à des programmes tels que l'initiative **CanCO2Re Initiative**⁶⁸. Les incubateurs et les accélérateurs de technologies propres du Canada sont également essentiels au succès de cette industrie naissante, tels que l'accélérateur de CDR **Mission from MaRS CDR Accelerator** et le programme **Foresight's CarbonNEXT** qui peuvent aider à transformer les innovations de CDR à l'échelle du laboratoire en possibilités commerciales.

FIGURE 6 : POTENTIEL DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE AU CANADA

- Réservoirs de pétrole de gaz
- Formations salines
- Veines de charbon inexploitées



Remarque : La conversion de cette ressource de stockage géologique en capacité nécessite une caractérisation de la géologie spécifique au site et une évaluation de la capacité de cette géologie à retenir en toute sécurité le CO₂ injecté à des taux pratiques. Dans les environnements pélagiques, les facteurs réels du projet, tels que la distance par rapport au rivage et la profondeur de la colonne d'eau, pourraient augmenter le coût d'accès aux ressources de stockage⁶⁹.

Source : Carbon Removal Canada, 2023. Compilé à partir de données du National Energy Technology Laboratory du ministère de l'Énergie des États-Unis⁷⁰ et du gouvernement du Canada⁷¹.

Section 3

Pourquoi maintenant?



Les gouvernements fédéraux, provinciaux et territoriaux doivent agir rapidement pour créer un environnement politique et réglementaire favorable à la CDR, faute de quoi les innovateurs canadiens risquent d'établir des opérations et de déployer des projets à l'étranger.

Le Canada est particulièrement bien placé pour introduire une nouvelle ère industrielle et pour jouer un rôle majeur dans l'expansion de la CDR. Toutefois, le Canada doit agir rapidement, car l'industrie de la CDR évolue rapidement en matière de technologie, de politique et de modèle d'entreprise dans les pays du monde entier.

Le développement d'une industrie de la CDR pourrait aider le Canada à assumer une position de leader mondial en matière de climat, promouvoir la compétitivité économique, débloquer de nouveaux marchés d'exportation et créer de nouveaux emplois dans l'ensemble de l'économie, tant dans les zones urbaines que rurales. Les États-Unis, l'UE et la Chine cherchent tous à se tailler une place de leader dans ce domaine.

Pour le Canada, le coût d'opportunité de l'avancement de la CDR est de renoncer aux avantages économiques, sociaux et environnementaux potentiels d'une position de leader dans ce nouveau secteur. Compte tenu du paysage actuel de l'élaboration des politiques dans d'autres juridictions (comme les États-Unis et l'UE), le Canada doit prendre des actions supplémentaires pour catalyser une industrie nationale de la CDR et donner un coup de pouce nécessaire à son système d'innovation CDR naissant pour rester compétitif sur la scène mondiale.

Par conséquent, les gouvernements fédéraux, provinciaux et territoriaux doivent agir rapidement pour créer un environnement politique et réglementaire favorable à la CDR, sous peine de voir les innovateurs canadiens s'implanter et déployer des projets en dehors de leur pays du Canada, ce qui commence déjà à se produire dans le secteur des énergies propres^{72,73}. Il existe un réel besoin de rester économiquement compétitif avec les pays pionniers. Heureusement, le Canada montre des signes précurseurs prometteurs pour la création d'une industrie CDR dynamique, grâce aux activités du secteur privé et l'existence de certaines politiques publiques favorables⁷⁴, mais le maintien de ces tendances positives n'est possible que si le Canada choisit activement de prendre les devants sur cette question par le biais d'une action gouvernementale audacieuse.

Trois entreprises canadiennes – Planetary Technologies, Carbon Engineering et CarbonCure Technologies – ont été parmi les premières à entrer sur le marché sur la scène mondiale dans les domaines de la CDR de l'alcalinité des océans, de DAC et de l'utilisation du CO₂ par la minéralisation du carbone, respectivement, et incarnent les possibilités de l'innovation canadienne dans cette nouvelle industrie.

L'action des gouvernements, des chercheurs et des innovateurs sera également nécessaire pour aider à relever les défis actuels dans le secteur naissant de la CDR. L'un des principaux défis actuels est le coût relativement élevé des projets CDR de longue durée, qui peut atteindre des centaines de milliers de dollars par tCO₂, capturé pour les projets en phase initiale, qui nécessiteront une innovation généralisée et un apprentissage par la pratique pour aider à réduire les coûts. Les exigences en matière d'énergie posent également des défis aux diverses méthodes de la CDR, telles que la DAC, qui nécessitent une abondance d'énergie propre et bon marché (électrique et thermique) qui doit également être utilisée pour réduire les émissions dans l'ensemble de l'économie. En conséquence, les projets de la CDR devraient chercher à réduire leurs besoins en consommation d'énergie dans toute la mesure du possible. Un troisième défi est le manque de cadres solides de mesure, de suivi et de vérification (MRV) pour aider à valider l'efficacité scientifique des méthodes CDR tout au long du cycle de vie d'un projet. Des cadres MRV robustes, dont certains sont en phase initiale de développement, seront essentiels pour établir la confiance sur le marché entre les développeurs de projets CDR, les investisseurs, les acheteurs de crédits carbone et le public. Un quatrième défi concerne les risques écologiques potentiels associés au stockage et au transport du CO₂, et la nécessité d'élaborer des stratégies pour éviter les fuites de CO₂ ou d'autres impacts sur l'environnement. Un dernier défi majeur concerne la nécessité d'un engagement communautaire plus ciblé et d'une recherche en sciences sociales pour aider à informer tous les aspects de la planification et de l'exécution des projets qui respectent les besoins et les préoccupations des communautés locales. Aucun de ces défis ne peut être entièrement résolu en laboratoire et nécessite des preuves de concept à une échelle qui peut générer des enseignements précieux pour un ensemble diversifié de parties prenantes et d'éclairer le développement ultérieur de la CDR.

Un écosystème d'innovation florissant

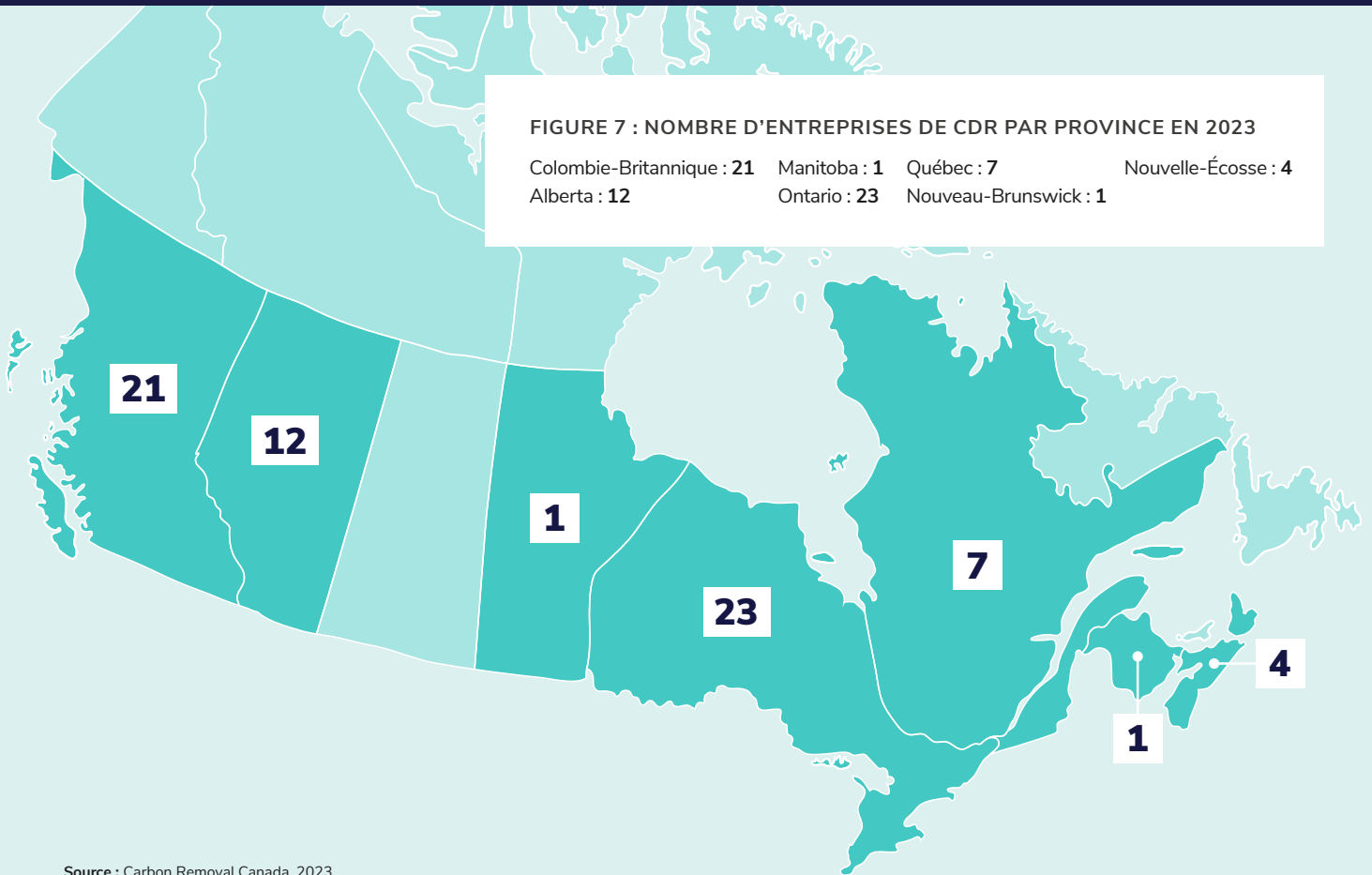
Un nombre croissant d'entreprises sont prêtes à tirer parti de l'opportunité économique d'un environnement politique et réglementaire complet et favorable à la CDR (**tableau A-3**). En octobre 2023, on estimait à 69 entreprises de CDR en activité à différents niveaux de préparation commerciale et de types de projets dans plusieurs provinces du Canada (**figure 7**). La plupart de ces entreprises se concentrent sur l'utilisation du CO₂⁷⁵ et le BiCRS, avec d'autres types de projets notables comme la DAC et le BiCRS, dont la DAC et la minéralisation ou l'altération des roches (**figure 8**). Trois entreprises canadiennes — Planetary Technologies⁷⁶, Carbon Engineering⁷⁷ et CarbonCure Technologies⁷⁸ — ont été parmi les premières à entrer sur la scène commerciale mondiale dans les domaines de l'amélioration de l'alcalinité des océans, de l'utilisation de DAC et du CO₂ et de la minéralisation du carbone, respectivement, et incarnent les possibilités de l'innovation dirigée par le Canada dans cette nouvelle industrie.

Image reproduite avec l'aimable autorisation de : Planetary Technologies



FIGURE 7 : NOMBRE D'ENTREPRISES DE CDR PAR PROVINCE EN 2023

Colombie-Britannique : 21 Manitoba : 1 Québec : 7 Nouvelle-Écosse : 4
 Alberta : 12 Ontario : 23 Nouveau-Brunswick : 1

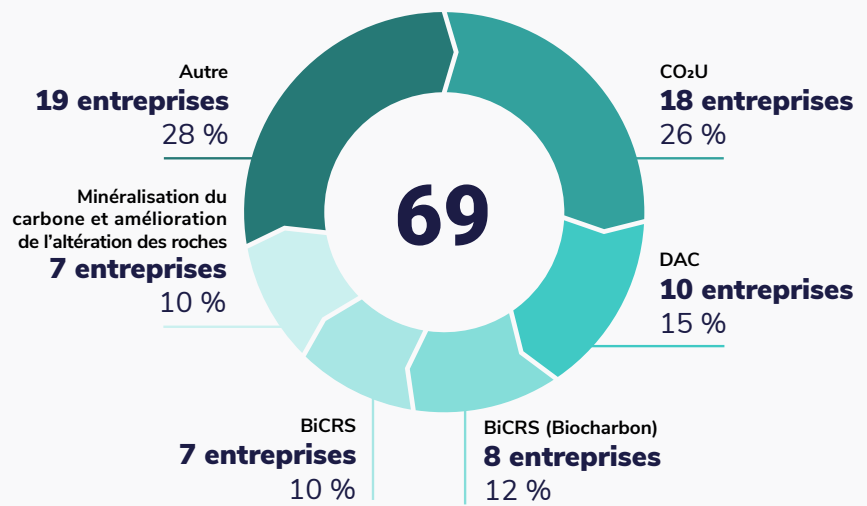


Source : Carbon Removal Canada, 2023

 **69**

entreprises de CDR
au Canada

FIGURE 8 : NOMBRE ET POURCENTAGE D'ENTREPRISES DE CDR AU CANADA PAR MÉTHODE EN 2023



Source : Carbon Removal Canada, 2023



La CDR est en demande

On estime à 95 le nombre d'entreprises au Canada qui ont mis en place ou se sont engagées à développer des des objectifs fondés sur des données scientifiques à compter d'octobre 2023.

Bien que le paysage du développement n'en soit qu'à ses débuts, certains projets ont déjà été annoncés au Canada, notamment **Airex Energy Inc.** (installation de biocharbon à Port-Cartier, Québec)⁷⁹ et les partenariats de **Deep Sky's** avec **Captura** (installation pilote de capture directe des océans dans l'est du Québec)⁸⁰ et avec **Mission Zero Technologies** (installation de DAC au Québec)⁸¹. D'autres entreprises canadiennes de CDR telles que **CarbonCure Technologies**⁸² et **Carbon Engineering**⁸³ ont également commencé à développer des projets à l'étranger. Du côté de la demande des entreprises telles que Shopify^{84,85} et BMO Financial Group⁸⁶ se sont engagées à acheter plus de 100 000 tonnes de CDR auprès des développeurs de projets par le biais du marché volontaire du carbone^{87,88}. On estime à 95 le nombre d'entreprises canadiennes qui ont fixé des objectifs scientifiques ou qui se sont engagées à le faire d'ici octobre 2023⁸⁹, et pour lesquelles la CDR pourrait contribuer à atteindre ces objectifs et à renforcer le signal de la demande sur le marché.



Des entreprises telles que Shopify et BMO Financial Group se sont engagées à acheter plus de 100 000 tonnes de CDR aux développeurs de projets, ce qui a donné un élan catalytique au marché de la CDR.

Un environnement politique en plein essor

Le Canada s'est fixé comme objectif climatique de réduire ses émissions de GES de 40 à 45 % d'ici 2030 (par rapport aux niveaux de 2005) dans le cadre de sa contribution déterminée au niveau national (CDN) et s'est doté d'un mandat législatif pour parvenir à des émissions nettes de GES de zéro d'ici 2050 dans le cadre de la Loi canadienne sur la responsabilité en matière d'émissions nettes de zéro de 2021⁹⁰. À l'heure actuelle, le Canada a réduit ses émissions d'environ 8 % par rapport aux niveaux de 2005 et a enregistré un niveau d'émissions de 670 MtCO₂e pour l'ensemble de l'économie en 2021⁹¹. Grâce à sa stratégie à long terme soumise à la CCNUCC⁹² et à sa stratégie de gestion du carbone⁹³, le Canada s'attend à ce que la CDR soit un outil important pour aider à atteindre des émissions nettes zéro⁹⁴. Cependant, les progrès politiques récents aux États-Unis et dans l'Union européenne soulignent la nécessité d'accélérer les progrès en matière de soutien politique et réglementaire à la CDR au Canada.

États-Unis

Les États-Unis ont fait d'énormes progrès pour soutenir le développement d'une industrie nationale de CDR. Grâce à l'adoption de la loi sur l'investissement dans l'infrastructure et l'emploi (IRA), le gouvernement américain a annoncé des engagements historiques pour aider à financer l'industrie de la CDR à un niveau inégalé par tout autre pays à ce jour. Un financement de 3,7 milliards de dollars US soutiendra plusieurs initiatives stratégiques, notamment un concours de prix précommerciaux pour la DAC, le développement de quatre centres régionaux de DAC, des subventions pour les applications d'utilisation du CO₂ et le développement des meilleures pratiques MRV pour aider à valider les méthodes de CDR et promouvoir l'intégrité scientifique⁹⁵. L'IRA comprend une autre incitation économique puissante : un crédit d'impôt de 180 USD pour les projets de DAC qui stockent le CO₂ de manière permanente.

Le ministère américain de l'énergie (DOE) a également annoncé un financement de 35 millions de dollars US pour l'achat direct de crédits issus de projets CDR dans le cadre d'un programme pilote d'achat⁹⁶, ce qui constitue le tout premier programme fédéral d'achat de CDR.

Les propositions législatives annoncées par le Congrès américain pourraient également soutenir ces efforts, notamment le Carbon Dioxide Removal Research and Development Act qui établirait un programme de recherche, de développement et de démonstration (RD-D) multiagences sur 10 ans pour le CDR⁹⁷. Ces initiatives sont également soutenues par le Carbon Negative Shot du DOE, qui cherche à stimuler l'innovation dans le domaine de la CDR pour parvenir à une élimination à l'échelle de la gigatonne à un coût inférieur à 100 USD par tonne métrique nette de CO₂-eq⁹⁸.

Union européenne

L'UE fait également des progrès remarquables dans la promotion d'une industrie paneuropéenne de la CDR. L'UE développe notamment un cadre de normes gouvernementales à la pointe de l'industrie pour aider à valider les résultats des projets CDR par le biais de son cadre de certification de l'élimination du carbone (Carbon Removal Certification Framework). Le cadre proposé fournit un moyen volontaire de définir et de certifier des projets CDR de haute qualité d'une manière standardisée⁹⁹. Horizon Europe et le Fonds pour l'innovation, deux des principaux instruments de financement de la recherche et de l'innovation dans l'UE, ont toujours apporté un soutien financier direct et indirect aux projets de CDR et pourraient jouer un rôle de soutien plus important à l'avenir^{100,101}. La Commission européenne est également tenue de proposer un objectif climatique 2040 pour l'UE en 2024, qui inclurait des spécifications sur la manière de traiter la CDR parallèlement aux efforts de réduction des émissions en vue de parvenir à des émissions nettes nulles¹⁰². En outre, la Commission européenne devrait déterminer comment la CDR pourrait jouer un rôle formel dans le système d'échange de quotas d'émission de l'UE¹⁰³.

Avec l'aimable autorisation de : CarbonCure



Section 4

Quelle est la prochaine étape?



Bien que le Canada dispose d'une base solide pour développer un secteur CDR, les décideurs politiques devront prendre des mesures supplémentaires et audacieuses pour le potentiel du Canada en tant que leader dans le domaine de la CDR.

L'élaboration des politiques joue un rôle important au début de l'industrie de la CDR. Les politiques doivent être inclusives et chercher à créer un écosystème de soutien entre une multitude d'acteurs, y compris les gouvernements, le secteur privé, les universités, les organisations non gouvernementales, les accélérateurs de technologies propres, les philanthropies, les communautés autochtones, les syndicats et la main-d'œuvre canadienne qualifiée. Des politiques qui encouragent l'engagement actif de la communauté pour obtenir l'autorisation d'entreprendre des projets de CDR, favorisent la justice environnementale, et fournissent des orientations sur des accords équitables pour le partage des coûts et des bénéfices seront cruciales pour le succès de cette nouvelle industrie.

Bâtir sur une base solide

Heureusement, le Canada dispose déjà de plusieurs incitations politiques et de cadres réglementaires qui peuvent servir de base à une industrie nationale robuste de la CDR.

✓ Tarification industrielle du carbone

La tarification industrielle du carbone a été développée pour la première fois en Alberta en 2007. Elle est soutenue depuis longtemps dans tout le Canada et constitue l'épine dorsale de la politique climatique industrielle canadienne. Le système utilise un mécanisme de tarification de prix axé sur les résultats pour inciter les émetteurs industriels à réduire leurs émissions de GES et permet aux juridictions d'adopter le système de tarification fédéral ou d'élaborer leur propre système de tarification^{104,105}. D'ici 2030, le prix fédéral du carbone devrait atteindre 170 \$ par tonne de CO₂-eq, ce qui pourrait constituer une puissante incitation à la décarbonisation, y compris à la CRD.

✓ **Stratégie de gestion du carbone**

Publiée en septembre 2023, cette stratégie reconnaît l'importance de la CDR pour compenser les émissions résiduelles et traiter les émissions historiques. Elle reconnaît également la nécessité de promouvoir la durabilité du stockage et se concentre sur les approches CDR basées sur la technologie qui ont besoin d'un soutien gouvernemental crucial (y compris les méthodes basées sur les océans). Pour l'avenir, la stratégie définit des domaines d'action clés, notamment l'avancement des objectifs de RD-D, la réduction des coûts, l'expansion des applications d'utilisation du CO₂, l'élaboration de normes et la cartographie détaillée des options de stockage géologique¹⁰⁶.

✓ **Crédit d'impôt à l'investissement du CCUS**

Le budget 2023 a annoncé l'intention du gouvernement de mener des consultations sur l'élaboration d'un crédit d'impôt à l'investissement (CII) pour les CCUS. Le projet de proposition législative pour le CII CCUS comprend un soutien pour les projets de CDR en offrant des crédits d'impôt à hauteur de 60 % des dépenses admissibles jusqu'en 2030 et de 30 % jusqu'en 2040¹⁰⁷. La conception finale du CII CCUS devrait être achevée prochainement.

✓ **Protocoles de compensation des GES**

Des efforts menés par les gouvernements sont en cours pour inclure les projets CDR dans les protocoles fédéraux de compensation publiés, en développant de nouveaux protocoles¹⁰⁸. Le gouvernement fédéral élabore actuellement un protocole pour la DAC, en tenant compte des BECCS et d'autres méthodes pour l'élaboration de futurs protocoles¹⁰⁹.

✓ **Réglementations existantes en matière de stockage du carbone**

Plusieurs provinces ont mis en place des réglementations sur le stockage du CO₂, notamment l'Alberta, la Colombie-Britannique et la Saskatchewan (avec des efforts en cours pour élaborer un protocole réglementaire pour l'Ontario)^{110,111}. Ces provinces sont donc éligibles au CII CCUS et pourraient servir de lieux de déploiement initial pour divers projets CDR.

✓ **Initiative Mission Innovation**

Le gouvernement canadien est l'un des co-responsables du domaine de Mission d'élimination du dioxyde de carbone dans le cadre de l'initiative Mission Innovation, aux côtés des États-Unis et du Royaume d'Arabie saoudite, ce qui peut contribuer à promouvoir l'innovation technologique dans le domaine de l'élimination du dioxyde de carbone à l'échelle mondiale. L'objectif de ce domaine de mission est de porter la CDR à 100 MtCO₂ par an à l'échelle mondiale d'ici à 2030, en se concentrant dans un premier temps sur le BiCRS, la minéralisation du carbone et la DAC^{112,113}.

Comblent le fossé politique

La plupart des technologies CDR en sont encore à leurs premiers stades de développement. Pour atteindre l'échelle nécessaire d'ici le milieu du siècle, la CDR devra suivre le chemin parcouru par d'autres technologies à faible teneur en carbone, telles que l'énergie solaire photovoltaïque (PV) — mais elle devra s'étendre encore plus rapidement que l'énergie solaire. Les décideurs politiques pourraient tirer et adapter les leçons de la croissance de l'industrie solaire pour réaliser des percées similaires dans la baisse des coûts et les courbes d'apprentissage en utilisant des mécanismes politiques de poussée technologique, de flux de connaissances et d'attraction de la demande¹¹⁴.

Pour mieux comprendre les politiques spécifiques de la CDR que le Canada devrait mettre en œuvre, Carbon Removal Canada a mené plus de 70 entretiens avec des représentants de la société civile, des universitaires, des dirigeants autochtones et des entreprises de CDR, tout en s'inspirant de leçons tirées de la mise à l'échelle d'autres technologies à faible teneur en carbone à croissance rapide.

L'un des objectifs généraux du secteur de la CDR au cours de cette décennie doit être de développer de manière responsable la première série de projets à grande échelle qui servent à la fois de preuve de concept et commencent à créer une dynamique susceptible de faire baisser les coûts au fur et à mesure que l'industrie commence à prendre de l'ampleur. Si le Canada veut jouer un rôle de premier plan dans le domaine de la CDR, nous recommandons que les décideurs politiques se fixent un objectif concret pour la mise en place de la CDR au cours de cette décennie, avec une cible de l'ordre de 5 MtCO₂ de capacité de CDR activement développée d'ici 2030. Comme nous l'avons mentionné dans la section 1, sans développer cette gamme de capacités CDR d'ici 2030, il est difficile de voir comment le Canada pourrait atteindre l'ampleur de la CDR nécessaire d'ici 2050.

Nous recommandons aux décideurs politiques de créer un objectif concret pour développer la CDR au cours de cette décennie, avec un objectif de l'ordre de 5 MtCO₂ de capacité CDR activement développée d'ici à 2030.

✓ — Sur la base de nos recherches, Carbon Removal Canada recommande aux décideurs de prendre des mesures pour soutenir le secteur de la CDR dans trois domaines clés :

1. stimuler la demande du marché ;
2. accélérer l'offre et les progrès technologiques ; et
3. permettre un déploiement rapide et responsable des projets de CDR.

Les décideurs politiques devraient poursuivre ces domaines d'action en coopération avec les provinces, les territoires et les communautés autochtones. Nous proposons ci-dessous des points de départ pour chaque catégorie de politiques, et nous avons l'intention de développer ces idées dans nos travaux futurs.



1. STIMULER LA DEMANDE DU MARCHÉ

Le marché de CDR au Canada compte très peu d'acheteurs, en grande partie parce que même les technologies comme la DAC restent très chères (entre 600 et 1 000 dollars par tonne)¹¹⁵. Bien qu'il y ait eu quelques exemples notables d'entreprises telles que Shopify et BMO, la CDR nécessitera une demande beaucoup plus importante que ce que ces entreprises pionnières peuvent offrir. Comme pour la plupart des autres technologies en phase de démarrage, le soutien du gouvernement est nécessaire pour aider à établir l'industrie et à faire baisser les coûts des méthodes CDR. Le soutien des pouvoirs publics est également nécessaire pour préparer l'industrie à l'utilisation de la CDR. Il s'agit également d'une passerelle nécessaire pour préparer les solutions CDR à l'échelle et à leur inclusion finale dans les marchés de conformité et autres régimes réglementaires.

Le Canada peut utiliser plusieurs leviers politiques pour créer la demande du marché pour développer la CDR, notamment :



Achat direct

Le gouvernement du Canada devrait acheter directement des services CDR dans le cadre de projets pouvant être mis en place au Canada. Un tel programme d'achat stimulerait la demande, favoriserait la découverte des prix (surtout s'il est réalisé par le biais d'enchères inversées), débloquerait le financement du projet et aiderait le gouvernement du Canada à traiter certaines de ses émissions résiduelles (par exemple, les émissions liées à l'armée). Un programme d'achat de CDR serait également conforme aux recommandations de la stratégie d'écologisation de l'administration publique déjà présentée.



Contrats carbone pour la différence

Les contrats carbone pour la différence (CCfD) offrent aux émetteurs industriels une plus grande certitude quant aux incitations économiques liées à la tarification du carbone dans les années à venir. Les CCfD procureraient aux entreprises un avantage économique pouvant aller jusqu'à 170 dollars par tonne pour les entreprises qui achètent des CDR, ce qui donnerait un sérieux coup de pouce aux acheteurs potentiels et aiderait le Canada à combler une grande partie de l'écart d'incitation¹¹⁶ en matière de DAC avec les États-Unis.



Crédits d'impôt

Le gouvernement fédéral devrait renforcer le crédit d'impôt à l'investissement et créer un crédit d'impôt à la production complémentaire pour la CDR. Bien que la tarification du carbone associée aux CCfD et à un crédit d'impôt à l'investissement pour les DAC soit une incitation puissante, il y aurait toujours un écart d'incitation par rapport au crédit d'impôt 45Q disponible aux États-Unis. L'analyse de Clean Prosperity et de Transition Accelerator a démontré qu'en plus des CCfD, un supplément de crédit d'impôt à l'investissement ou un crédit d'impôt à la production d'une valeur d'environ 55 dollars par tonne serait nécessaire pour combler cet écart¹⁷.

2. ACCÉLÉRER L'OFFRE ET LES PROGRÈS TECHNOLOGIQUES

Le gouvernement du Canada, en collaboration avec des partenaires internationaux comme les États-Unis, peut jouer un rôle central dans le renforcement de l'innovation dans l'industrie de la CDR, en aidant les nouvelles technologies à passer du laboratoire au marché. Il sera essentiel de développer de nouvelles méthodes de CDR et de contribuer à l'amélioration des méthodes existantes si l'on veut que le secteur atteigne l'échelle nécessaire pour réaliser les objectifs du Canada en matière d'émissions nettes nulles d'ici 2050.

Le Canada a de solides antécédents en matière de soutien au développement de nouvelles technologies et peut tirer parti de ces mêmes antécédents en matière de développement de nouvelles technologies et peut tirer parti de ce même écosystème pour soutenir la CDR. Il est encourageant de constater que le Canada a déjà pris des mesures notables, notamment l'engagement, dans le budget 2021, de 319 millions de dollars sur sept ans pour le Programme d'innovation énergétique (PIE) de Ressources naturelles Canada, qui peut être utilisé en partie pour la CDR.

Nous recommandons au Canada de s'appuyer sur les travaux qu'il a réalisés jusqu'à présent :



Technologie CDR RD-D

Le gouvernement du Canada devrait réserver des fonds spécifiques pour la CDR à partir des fonds existants dans le cadre du NRCan Energy Innovation Program et/ou de nouveaux fonds. Le Canada doit poursuivre un programme de RD-D en matière de CDR qui soit complémentaire aux priorités de recherche dans les pays partenaires qui pourraient positionner stratégiquement le Canada en tant que chef de file des technologies émergentes dans le domaine en pleine évolution de la CDR. En outre, le gouvernement fédéral devrait continuer à investir dans la recherche en partenariat avec les gouvernements provinciaux et les gouvernements territoriaux afin d'identifier et de caractériser les sites de stockage de CO₂ en particulier dans le centre et l'est du Canada.



Soutien financier

Les projets de réduction des émissions de GES nécessitent d'énormes dépenses en capital. La construction d'une usine DAC par exemple, peut coûter plus de 1 milliard de dollars américains à construire et à exploiter, sur la base de la technologie actuelle¹¹⁸. Le gouvernement peut réduire les coûts des projets CDR et aider à attirer des capitaux privés en offrant divers types de soutien financier, y compris des prêts à des conditions de faveur et/ou des garanties de prêt par le biais des mécanismes de financement existants tels que la Banque canadienne de l'infrastructure, le Fonds de croissance du Canada et des mécanismes d'octroi potentiels comme le Net-Zero Accelerator Fund.



Création d'un centre CDR

Le gouvernement fédéral, en partenariat avec les provinces et territoires, devrait soutenir de multiples « centres CDR » qui peuvent lancer l'industrie canadienne de la CDR et démontrer le potentiel de cet ensemble de technologies. Il est important de noter que les centres CDR peuvent rassembler de multiples acteurs de la chaîne de valeur (fournisseurs de CDR, prestataires de transport, installations de stockage, main-d'œuvre, groupes communautaires, etc.) qui sont nécessaires pour rendre les projets CDR viables.

3. PERMETTRE UN DÉPLOIEMENT RAPIDE ET RESPONSABLE

Pour qu'un marché robuste de CDR se développe au Canada, la politique gouvernementale doit créer un environnement qui permette un déploiement rapide et responsable des technologies CDR.

Parmi les préoccupations les plus importantes, on peut citer :



Protocoles de CDR

Le gouvernement du Canada devrait poursuivre le développement d'un protocole DAC qui peut générer des crédits CDR dans le cadre du marché canadien des crédits compensatoires pour les GES. Il devrait également commencer à élaborer des protocoles pour d'autres méthodes de CDR, telles que le BiCRS, la minéralisation du carbone et l'amélioration de l'altération des roches, ainsi que des méthodes CDR océaniques, comme l'amélioration de l'alcalinité des océans (OAE). Ces protocoles doivent être élaborés de manière à garantir que les projets répondent à des normes scientifiques rigoureuses et à maximiser la probabilité que les crédits générés par les projets de CDR au Canada puissent être échangés entre les provinces et les frontières internationales. Permettre l'échange de crédits est essentiel à la croissance de l'industrie.



Opportunités de participation et partenariat des communautés autochtones

Les politiques gouvernementales devraient faciliter les accords impliquant des projets de CDR qui créent des opportunités de partenariat équitables pour les communautés autochtones. En outre, le gouvernement fédéral devrait collaborer avec les parties prenantes pour élaborer des cadres solides d'engagement et d'acceptation sociale. Cela inclut des normes industrielles sur la nécessité d'obtenir le consentement libre, préalable et éclairé des communautés autochtones, l'engagement des communautés sur ce qui constitue des projets de CDR co-bénéficiaires basés sur les connaissances écologiques traditionnelles pour aider à déterminer l'emplacement, le type et l'échelle du projet, et l'établissement d'accords et de plans de bénéfices communautaires entre les développeurs de projets de CDR et les communautés.



Choix du site, autorisation et responsabilité

Pour que le Canada soit un leader en matière de CDR, le processus d'implantation et d'autorisation des grandes infrastructures de CDR devra être rationalisé. Le gouvernement devrait appliquer des recommandations judicieuses¹¹⁹ pour donner la priorité aux infrastructures à faible émission de carbone aux projets CDR, appliquer les réglementations en vigueur et les délais d'obtention des permis et accroître la visibilité publique et la responsabilité de ces processus. En outre, le gouvernement devrait établir des lignes directrices pratiques pour gérer la responsabilité à long terme associée au stockage du carbone après la fermeture du projet. Le système actuel de l'Alberta pour la gestion de la responsabilité à long terme pourrait être utilisé pour encourager l'adoption de règles cohérentes à l'échelle nationale.

Chacune de ces recommandations devra faire l'objet d'une analyse approfondie pour créer des politiques susceptibles de stimuler l'expansion de CDR au Canada, elles constituent un point de départ solide pour le leadership canadien dans ce domaine naissant. On ne saurait trop insister sur l'importance d'agir maintenant. Il s'agit d'une décennie décisive qui déterminera l'avenir de la CDR dans la réalisation des objectifs climatiques au milieu du siècle et au-delà.



Section 5

Annexe

Tableau A-1 : Aperçu des méthodes CDR

Catégorie	Méthode	Description	Caractéristiques du stockage	Niveau de maturité technologique (TRL) (1–9)	Est. Potentiel d'élimination (GtCO ₂ /an)	Est. Coût à l'échelle (\$US/tCO ₂)
Foresterie	Boisement/reboisement (AF/RF)	Planter des arbres dans de nouvelles zones où ils n'existaient pas auparavant (boisement) ou replanter des arbres dans des zones où ils existaient (reboisement).	Classification : biologique (biotique) Type : organique (arbres, racines, sols) Durée de vie estimée : décennies à des siècles	8 – 9 ^a	0,5 – 10 ^a	0 – 240 ^a
	Agroforesterie	Intégration ciblée des systèmes agricoles et forestiers afin de promouvoir des synergies positives entre les facteurs économiques, sociaux et environnementaux.	Classification : biologique (biotique) Type : organique (arbres, racines, sols) Durée de vie estimée : décennies à des siècles	8 – 9 ^a	0,3 – 9,4 ^a	Données insuffisantes ^b
	Amélioration de la gestion des forêts	Techniques de gestion forestière active visant à améliorer la santé des forêts et à maintenir ou accroître les stocks de carbone, telles que les mécanismes de protection contre les maladies et les infestations de ravageurs.	Classification : biologique (biotique) Type : organique (arbres, racines, sols) Durée de vie estimée : décennies à des siècles	8 – 9 ^a	0,1 – 2,1 ^a	Données insuffisantes ^{b,c}
	Réduire les émissions de la déforestation et de la dégradation des forêts (REDD+)	Réduire ou prévenir la déforestation et promouvoir la gestion durable des forêts.	Classification : biologique (biotique) Type : organique (arbres, racines, sols) Durée de vie estimée : décennies à des siècles	8 – 9	0,4 – 5,8 ^a	0 – 50
Sols	Carbone du sol	Appliquer diverses techniques de gestion des sols visant à maintenir ou à accroître les stocks de carbone, telles que la culture sans labour et la plantation de couvertures végétales.	Classification : biologique (biotique) Type : organique ou inorganique (sols) Durée de vie estimée : décennies à des siècles	8 – 9 ^a	0,6 – 9,3 ^a	-45 – 100 ^a

Catégorie	Méthode	Description	Caractéristiques du stockage	Niveau de maturité technologique (TRL) (1–9)	Est. Potentiel d'élimination (GtCO ₂ /an)	Est. Coût à l'échelle (\$US/tCO ₂)
Autre	Carbone bleu côtier	Préserver ou développer les écosystèmes des zones côtières et océaniques, notamment les mangroves, les marais salants et les prairies sous-marines qui stockent le carbone dans les plantes et les sols.	<i>Classification</i> : biologique (biotique) <i>Type</i> : organique (arbres, racines, sols) <i>Durée de vie estimée</i> : décennies à des siècles	2 – 3 ^a	<1 ^a	Données insuffisantes ^{b,c}
	Tourbières et terres inondées	Prévenir la destruction des tourbières ou des zones humides et chercher à restaurer ces écosystèmes par des techniques telles que la réhumidification.	<i>Classification</i> : biologique (biotique) <i>Type</i> : organique (arbres, racines, sols) <i>Durée de vie estimée</i> : décennies à des siècles	8 – 9 ^a	0,5 – 2,1 ^a	Données insuffisantes ^{b,c}
Stockage et élimination du carbone par la biomasse (BiCRS)	Biocharbon	Biomasse végétale et déchets organiques chauffés en l'absence d'oxygène (ou dans un environnement à teneur limitée en oxygène) par pyrolyse pour former un solide stable, riche en carbone et plus résistant à la décomposition naturelle.	<i>Classification</i> : hybride <i>Type</i> : organique (biomasse) <i>Durée de vie estimée</i> : siècles à millénaires	6 – 7 ^a	0,3 – 6,6 ^a	10 – 345 ^a
	Biocarburants (2e génération avec capture et stockage)	Transformer la biomasse végétale non alimentaire et les déchets organiques en biocarburants par divers procédés et capter les émissions de CO ₂ correspondantes en vue de leur stockage ou de leur utilisation.	<i>Classification</i> : hybride <i>Type</i> : dépend de l'utilisation du CO ₂ capturé <i>Durée de vie estimée</i> : millénaires (stockage géologique)	Inconnu	Inconnu	Inconnu
	De la biomasse au H ₂ avec capture et stockage	Transformer la biomasse végétale et les déchets organiques en hydrogène par divers procédés et capter les émissions de CO ₂ correspondantes pour les stocker ou les utiliser.	<i>Classification</i> : hybride <i>Type</i> : dépend de l'utilisation du CO ₂ capturé <i>Durée de vie estimée</i> : millénaires (stockage géologique)	Inconnu	Inconnu	Inconnu
	Biohuile	Biomasse végétale et déchets organiques chauffés en l'absence d'oxygène (ou dans un environnement à teneur limitée en oxygène) par pyrolyse pour former une huile riche en carbone qui peut être injectée dans le sous-sol de la Terre, où elle se transforme en un solide stable.	<i>Classification</i> : hybride <i>Type</i> : organique (biomasse) <i>Durée de vie estimée</i> : millénaires	Inconnu	Inconnu	Inconnu

Catégorie	Méthode	Description	Caractéristiques du stockage	Niveau de maturité technologique (TRL) (1–9)	Est. Potentiel d'élimination (GtCO ₂ /an)	Est. Coût à l'échelle (\$US/tCO ₂)
	Bioproduction d'énergie avec CSC	Utilisation de la biomasse végétale et des déchets organiques pour produire de l'électricité et capter les émissions de CO ₂ correspondantes pour les stocker ou les utiliser.	<i>Classification</i> : hybride <i>Type</i> : dépend de l'utilisation du CO ₂ capturé <i>Durée de vie estimée</i> : millénaires (stockage géologique)	Inconnu	Inconnu	Inconnu
	Général (BECCS)	Utiliser la biomasse végétale et les déchets organiques pour produire de l'électricité, de la chaleur ou des combustibles et capter les émissions de CO ₂ correspondantes en vue de leur stockage ou de leur utilisation.	<i>Classification</i> : hybride <i>Type</i> : dépend de l'utilisation du CO ₂ capturé <i>Durée de vie estimée</i> : millénaires (stockage géologique)	5 – 6 ^a	0,5 – 11 ^a	15 – 400 ^a
	Enfouissement de biomasse verte	Enfouissement des ressources en biomasse dans des fosses spécialement conçues pour ralentir le processus de décomposition naturelle.	<i>Classification</i> : biologique (biotique) <i>Type</i> : organique (biomasse) <i>Durée de vie estimée</i> : données insuffisantes	Données insuffisantes	Données insuffisantes	Données insuffisantes
	Produits du bois récoltés	Le carbone intégré dans les produits du bois qui peuvent être utilisés à des fins telles que la construction de bâtiments après la récolte et la transformation des matières premières de la biomasse.	<i>Classification</i> : biologique (biotique) <i>Type</i> : organique (environnement bâti) <i>Durée de vie estimée</i> : décennies à siècles	8 – 9 ^a	0,2 – 1,3 ^a	Varie
Minéralisation	Minéralisation du carbone	Réaction de certaines roches et minéraux avec le CO ₂ pour former des carbonates solides au-dessus ou au-dessous de la surface de la Terre.	<i>Classification</i> : non biologique (abiotique) <i>Type</i> : inorganique (roches et minéraux) <i>Durée de vie estimée</i> : siècles	6 – 7 ^d	1 – 10 ^d	10 – >1 000 ^d
	Altération améliorée des roches	Transformer les roches et les minéraux réactifs au CO ₂ en grains de petite taille (pour accélérer le processus naturel d'altération des roches) et répandre la substance alcaline sur les terres agricoles ou autres pour stocker le CO ₂ dans les sols ou former des bicarbonates qui sont ensuite transportés vers les océans par les voies navigables pour y être stockés.	<i>Classification</i> : non biologique (abiotique) <i>Type</i> : inorganique (roches et minéraux, ions bicarbonates) <i>Durée de vie estimée</i> : siècles	3 – 4 ^a	2 – 4 ^a	50 – 200 ^a

Catégorie	Méthode	Description	Caractéristiques du stockage	Niveau de maturité technologique (TRL) (1–9)	Est. Potentiel d'élimination (GtCO ₂ /an)	Est. Coût à l'échelle (\$US/tCO ₂)
Océans	Injection directe de CO ₂ : eau de mer	Injection de CO ₂ liquide dans les profondeurs de l'océan dans certaines conditions de température et de pression pour favoriser la dissolution en ions carbonate et bicarbonate.	<p>Classification : Non biologique (abiotique)</p> <p>Type : inorganique (ions bicarbonate et carbonates)</p> <p>-Inorganique (CO₂ gazeux dissous, acide gazeux dissous, acide carbonique, ions carbonates, ions bicarbonate)</p> <p>-Inorganique (CO₂ gazeux dissous) → organique (absorption du CO₂ par la flore marine via la photosynthèse)</p> <p>Durée de vie estimée : millénaires</p>	Données insuffisantes	Données insuffisantes	Données insuffisantes
	Injection directe de CO ₂ : stockage géologique sous le fond marin	Injection de CO ₂ sous le fond marin en vue de son stockage dans diverses formations géologiques par le biais de divers mécanismes de piégeage.	<p>Classification : Non biologique (abiotique)</p> <p>Type : inorganique (roches et minéraux)</p> <p>Durée de vie estimée : millénaires (stockage géologique)</p>	Données insuffisantes	Données insuffisantes	Données insuffisantes
	Capture directe de l'océan	Utilisation de techniques électrochimiques pour éliminer le carbone de l'eau de mer et éventuellement introduire une base chimique produite dans les eaux de surface pour convertir le CO ₂ dissous en ions bicarbonate.	<p>Classification : Non biologique (abiotique)</p> <p>Type : inorganique (ions bicarbonate et carbonates) Inorganique (*mais pourrait mais pourrait en fin de compte aboutir à un stockage de organique si le CO₂ capturé est utilisé pour certaines applications telles que comme les serres pour cultiver biomasse végétale)</p> <p>Durée de vie estimée : Millénaires</p>	Inconnu	0,1 – >1 ^e	100 – >350 ^e

Catégorie	Méthode	Description	Caractéristiques du stockage	Niveau de maturité technologique (TRL) (1–9)	Est. Potentiel d'élimination (GtCO ₂ /an)	Est. Coût à l'échelle (\$US/tCO ₂)
	Culture de macroalgues	Culture de macroalgues (algues) en milieu marin pour capter le CO ₂ dissous dans l'eau de mer par photosynthèse.	<p>Type de classification Durabilité est. -Biologique (biotique)</p> <p>Type : organique ou inorganique (enfouis dans les sédiments marins ou reminéralisés [enfouissement de la biomasse])</p> <p>-Organique (biomasse qui coule)</p> <p>-Organique (biomasse en tant que bioproduit non énergétique tel que le biochar ou l'alimentation humaine et animale)</p> <p>-Organique (biomasse en tant que matière première énergétique) → inorganique (le CO₂ est capturé à partir d'un processus ou d'une installation émettrice pendant que la biomasse est transformée en un produit énergétique [électricité, chaleur, carburant])</p> <p>Durée de vie estimée : Siècles à millénaires (affaissement de la biomasse)</p>	Inconnu	0,1 – 1 ^e	25 – 125 ^e
	Fertilisation des éléments nutritifs	Ajout de macro- et/ou micronutriments aux eaux de surface des océans pour stimuler la prolifération du phytoplancton.	<p>Classification : biologique (biotique)</p> <p>Type : organique (biomasse marine)</p> <p>Durée de vie estimée : Siècles à millénaires</p>	1 – 2 ^a	1 – 3 ^a	50 – 500 ^a

Catégorie	Méthode	Description	Caractéristiques du stockage	Niveau de maturité technologique (TRL) (1–9)	Est. Potentiel d'élimination (GtCO ₂ /an)	Est. Coût à l'échelle (\$US/tCO ₂)
	Renforcement de l'alcalinité des océans (OAE)	Ajout de diverses substances alcalines dans les couches superficielles de l'océan pour aider à lutter contre l'acidification locale des océans et convertir le CO ₂ dissous en ions bicarbonate.	Classification : Non biologique (abiotique) Type : inorganique (ions bicarbonate et carbonate) Durée de vie estimée : Millénaire	1 – 2 ^a	1 – 100 ^a	40 – 260 ^a
	Remontée/plongée d'eau	Mouvement artificiel des eaux océaniques par de grands tuyaux verticaux ou d'autres moyens entre la couche superficielle et l'océan profond. La remontée d'eau transporte les eaux froides et riches en nutriments des profondeurs vers la surface afin de stimuler l'activité du phytoplancton qui consomme du CO ₂ . La descente d'eau transporterait les eaux saturées en CO ₂ de la surface vers les profondeurs de l'océan afin de favoriser le stockage à long terme du carbone. Le pompage de l'acidité des eaux de surface vers les grands fonds à différentes profondeurs pour favoriser le stockage du carbone est également à l'étude.	Classification : Hybride Type : organique ou inorganique (enfouissement dans les sédiments marins ou reminéralisés ou biomasse marine) Durée de vie estimée : Décennies à siècles	Inconnu ^f	0,1 – 1 ^f	>100 ^f

Catégorie	Méthode	Description	Caractéristiques du stockage	Niveau de maturité technologique (TRL) (1–9)	Est. Potentiel d'élimination (GtCO ₂ /an)	Est. Coût à l'échelle (\$US/tCO ₂)
Other	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)	L'utilisation du CO ₂ capturé comme matière première pour les produits à base de carbone tels que les produits chimiques, les carburants et les matériaux de construction afin de promouvoir la circularité du CO ₂ et de le stocker à des échelles de temps variables en fonction du produit.	Dépend du mécanisme de captage et de l'utilisation du CO ₂ capté	Varie	Varie	Varie
	Capture directe de CO ₂ dans l'air (DAC)	Utilisation de produits chimiques et de matériaux spéciaux qui fixent sélectivement le CO ₂ de l'air ambiant en vue d'un stockage ou d'une utilisation ultérieurs.	Classification : Non biologique (abiotique) Type : Dépend de l'utilisation du CO ₂ capturé Durée de vie estimée : Millénaire (stockage géologique)	6 ^a	5 – 40 ^a	100 – 300 ^a

^a Smith, S. M., Geden, O., Nemet, G., Gidden, M., Lamb, W. F., Powis, C., Bellamy, R., Callaghan, M., Cowie, A., Cox, E., Fuss, S., Gasser, T., Grassi, G., Greene, J., Lück, S., Mohan, A., Müller-Hansen, F., Peters, G., Pratama, Y., Repke, T., Riahi, K., Schenuit, F., Steinhäuser, J., Streifer, J., Valenzuela, J. M., and Minx, J. C. (2023). L'état de l'élimination du dioxyde de carbone [The State of Carbon Dioxide Removal]. 1ère édition. doi:10.17605/OSF.IO/W3B4Z

^b Élimination du dioxyde de carbone [Carbon Dioxide Removal]. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, IPCC AR6 WG3, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGIII_Factsheet_CDR.pdf. Consulté le 22 août 2023.

^c M. Pathak, R. Slade, P.R. Shukla, J. Skea, R. Pichs-Madruga, D. Ürgé-Vorsatz, 2022 : Résumé technique. Dans : Changement climatique [Climate change], 2022 : Atténuation du changement climatique. Contribution du groupe de travail III au sixième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK et New York, NY, USA. doi : 10,101 7/9 781 009 157 926 002.

^d David Sandalow, Roger Aines, Julio Friedmann, Peter Kelemen, Colin McCormick, Ian Power, Briana Schmidt, Siobhan (Sasha) Wilson, Feuille de route pour la minéralisation du carbone [Carbon Mineralization Roadmap] (Projet ICEF Innovation Roadmap, novembre 2021).

^e L'élimination du dioxyde de carbone par l'océan : feuilles de route [Ocean-Based Carbon Dioxide Removal: Road Maps], Ocean Visions, <https://www2.oceanvisions.org/roadmaps/>. Consulté le 22 août 2023.

^f Académies nationales des sciences, de l'ingénierie et de la médecine. 2022. Une stratégie de recherche pour l'élimination et la séquestration du dioxyde de carbone dans les océans [A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration]. Washington, DC : The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26278>.

^g REDD+, <https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/reddplus#:~:text=The%20IPCC%20identifies%20REDD%2B%20as,goals%20in%20countries%20and%20globally>. Consulté le 23 août 2023.

Source : Carbon Removal Canada, 2023

Tableau A-2 : Sélection d'estimations bibliographiques concernant les besoins en CDR au Canada d'ici à 2050

Entité	2030	2040	2050
Buck, 2023			
S.O.	S.O.	S.O.	Total : 149
Canadian Climate Institute, 2021^{120,121}			
<i>Disponible</i>	Inconnu (BECCS) 0 (DAC) 80 (LULUCF) Total : ≥80	Inconnu (BECCS) 0 – 221 (DAC) (médiane = 111) Inconnu (LULUCF) Total : 0 – 221 (médiane = 111)	Inconnu (BECCS) 0 – 426 (DAC) (médiane = 213) 105 (LULUCF) Total : 105 – 531 (médiane = 318)
Clean Energy Canada, 2023¹²²			
<i>Net zéro</i>	Inconnu (DAC) 30 (LULUCF) Total : ≥30	Inconnu (DAC) Inconnu (LULUCF) Total : Inconnu	0 – 250 (DAC) 105 (LULUCF) Total : 105 – 355 (médiane = 230)
Canada Energy Regulator, 2023¹²³			
<i>Canada Net zéro</i>	Inconnu (BECCS ^a) 0 (DAC) 30 (LULUCF) Total : 30+	25 (BECCS) 2 (DAC) 40 (LULUCF) Total : 67	60 (BECCS) 55 (DAC) 50 (LULUCF) Total : 165
Clean Prosperity, 2023¹²⁴			
Voies d'accès nettes-zéro d'ici à 2050 (sélectionner)	0 (DAC)	0 (DAC) 30 (LULUCF) Total : 30	13 – 70 (DAC) 50 (LULUCF) Total : 63 – 120 (médiane = 91,5)
Environment and Climate Change Canada, 2022¹²⁵			
<i>Hypothèses actuelles</i>	Inconnu (BECCS) Inconnu (DAC) Inconnu (LULUCF) Total : Inconnu	Inconnu (BECCS) Inconnu (DAC) Inconnu (LULUCF) Total : Inconnu	16 – 73 (BECCS) (médiane = 45) 20 – 133 (DAC) (médiane = 77) 100 (LULUCF) Total : 136 – 306 (médiane = 221)
Electric Power Research Institute, 2021¹²⁶			
<i>Net-Zero</i>	Inconnu (DAC) Total : Inconnu	Inconnu (DAC) Total : Inconnu	114 (DAC) Total : 114

*Les valeurs sont présentées en mégatonnes de CO₂ par an.

^aSomme de l'« électricité » et de la « production d'hydrogène à faibles émissions ou sans émissions »¹²⁷

Remarque : D'autres études ont été publiées dans la littérature ; elles n'entraient pas dans le cadre d'un scénario d'émissions nettes nulles pour le Canada ou ne disposaient pas des données connues. Ces études sont indiquées dans les notes de bas de page ci-dessous à titre de référence^{128,129,130,131,132}.

Source : Carbon Removal Canada, 2023

Tableau A-3 : Sociétés de CDR au Canada (liste non exhaustive)

N°	Nom	Emplacement	Année de création	Méthode de CDR
1	ADC Technologies	Montréal, Québec	2013	Captage direct de l'air (DAC)
2	Airex Energy	Laval, Québec	2014	Biomasse avec captage et stockage du carbone (BiCRS) : biocharbon
3	Arca	Vancouver, Colombie-Britannique	2023	Minéralisation du carbone
4	BC Biocarbon	McBride, Colombie-Britannique	2011	Biomasse avec captage et stockage du carbone (BiCRS) : biocharbon
5	Bella Biochar	Hamilton, Ontario	2019	Biomasse avec captage et stockage du carbone (BiCRS) : biocharbon
6	Blue Sky Minerals	Vancouver, Colombie-Britannique	2023	Minéralisation du carbone
7	Canada Nickel	Toronto, Ontario	2019	Minéralisation du carbone
8	Canada's Forest Trust	Toronto, Ontario	2019	Boisement/Reboisement
9	Canadian Wollastonite	Kingston, Ontario	2001	Amélioration de l'altération des roches
10	CarbiCrete	Lachine, Québec	2016	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
11	Carbon Alpha	Calgary, Alberta	2021	Stockage géologique
12	Carbon Cantonne	Calgary, Alberta	2021	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
13	Carbon Corps (C2CNT)	Calgary, Alberta	2022	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
14	Carbon Engineering	Squamish, Colombie-Britannique	2009	Captage direct de l'air (DAC)
15	Carbon Lock Technologies	Winnipeg, Manitoba	2020	Biomasse avec captage et stockage du carbone (BiCRS) : biocharbon
16	Carbon Streaming	Toronto, Ontario	2022	Divers
17	Carbon Upcycling	Calgary, Alberta	2014	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
18	Carboclave	Kitchener, Ontario	2016	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
19	CarbonCure Technologies	Halifax, Nouvelle-Écosse	2012	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
20	CarbonRun	Halifax, Nouvelle-Écosse	2022	Alcalinisation artificielle des océans
21	Cascadia Seaweed	Sidney, Colombie-Britannique	2019	Culture de macroalgues
22	Cbiochar	Sutton, Québec	2020	Biomasse avec captage et stockage du carbone (BiCRS) : biocharbon
23	CERT Systems	Toronto, Ontario	2019	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
24	CHAR Technologies	Toronto, Ontario	2011	Biomasse avec captage et stockage du carbone (BiCRS) : biocharbon
25	Clean Carbon Energy	Calgary, Alberta	Unknown	Biomasse avec captage et stockage du carbone (BiCRS) : biocharbon
26	CleanO2	Calgary, Alberta	2013	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)

N°	Nom	Emplacement	Année de création	Méthode de CDR
27	CO2 Lock	Vancouver, Colombie-Britannique	2021	Minéralisation du carbone
28	CO2L Technologies	Kingston, Ontario	2022	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
29	CO280	Vancouver, Colombie-Britannique	2022	Développeur de projet
30	Cvictus	Calgary, Alberta	2018	Production d'hydrogène
31	Deep Sky	Montréal, Québec	2022	Développeur de projet
32	Drax Canada	Richmond, Colombie-Britannique	1989	Biomasse avec captage et stockage du carbone (BiCRS) : biocharbon
33	Emergent Waste Solutions	Richmond, Colombie-Britannique	2009	Biomasse avec captage et stockage du carbone (BiCRS) : biocharbon
34	Ensyn	Renfrew, Ontario	1984	Biomasse avec captage et stockage du carbone (BiCRS) : biocharbon
35	E-quester	Toronto, Ontario	2021	Captage direct de l'air (DAC)
36	Exhale Aerosystems	Toronto, Ontario	2021	Captage direct de l'air (DAC)
37	Exterra Climate Solutions	Montréal, Québec	2021	Minéralisation du carbone
38	First Gigaton	Nanaimo, Colombie-Britannique	Unknown	Culture de macroalgues
39	Flash Forest	Toronto, Ontario	2019	Boisement/Reboisement
40	Gaia Refinery	Saint-Jean, Nouveau-Brunswick	2020	Captage direct de l'air (DAC)
41	Huron Clean Energy	Vancouver, Colombie-Britannique	2009	Captage direct de l'air (DAC)
42	Hydragas Energy	Vancouver, Colombie-Britannique	Unknown	Inconnue
43	Hydrogen Naturally	Calgary, Alberta	Unknown	Biomasse avec captage et stockage du carbone (BiCRS) : biocharbon
44	Hyperion Global Energy	Ottawa, Ontario	2021	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
45	Invert	Ottawa, Ontario	2022	Inconnue
46	Ionomr Innovations	Vancouver, Colombie-Britannique	2017	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
47	Kanata Clean Power	Vancouver, Colombie-Britannique	2020	Captage direct de l'air (DAC), hydrogène, infrastructure de la CDR
48	Minera Systems	Squamish, Colombie-Britannique	2021	Inconnue
49	New Acre Project	Toronto, Ontario	Unknown	Restauration d'écosystème
50	Ocean Wise	Vancouver, Colombie-Britannique	1956	Culture de macroalgues
51	ONT Holdings Inc.	Richmond, Colombie-Britannique	Unknown	Culture de microalgues
52	Phycus Biotechnologies	Markham, Ontario	Unknown	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
53	Planetary Technologies	Dartmouth, Nouvelle-Écosse	2019	Captage direct de l'océan (DOC)
54	Pond Technologies	Markham, Ontario	2008	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
55	Project Forest	Edmonton, Alberta	2020	Boisement/Reboisement
56	Sargent Group	Toronto, Ontario	Unknown	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
57	Scotia BioChar	Bedford, Nouvelle-Écosse	2022	Biomasse avec captage et stockage du carbone (BiCRS) : biocharbon

N°	Nom	Emplacement	Année de création	Méthode de CDR
58	SeeO2 Energy	Calgary, Alberta	2018	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
59	Skyrenu Technologies	Sherbrooke, Québec	2021	Captage direct de l'air (DAC)
60	Solid Carbon	Victoria, Colombie-Britannique	2020	Minéralisation du carbone
61	Solistra	Toronto, Ontario	2018	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
62	Svante Inc.	Burnaby, Colombie-Britannique	2007	Captage direct de l'air (DAC)
63	Takachar	Vancouver, Colombie-Britannique	2012	Biomasse avec captage et stockage du carbone (BiCRS) : biocharbon
64	Taking Root	Vancouver, Colombie-Britannique	2007	Boisement/Reboisement
65	Tandem Technical	Ottawa, Ontario	Unknown	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
66	TerraFixing	Ottawa, Ontario	2020	Captage direct de l'air (DAC)
67	Vortis	Calgary, Alberta	Unknown	Utilisation du CO ₂ (CO ₂ U)
68	Vytterra Renewables	Ottawa, Ontario	2021	Biomasse avec captage et stockage du carbone (BiCRS) : biocharbon
69	ZS2 Technologies	Calgary, Alberta	2020	Captage direct de l'air (DAC)

Source : Carbon Removal Canada, 2023

Méthodologie

Émissions résiduelles : une analyse documentaire a été réalisée afin de recenser les études antérieures qui ont modélisé des trajectoires de zéro net pour le Canada d'ici 2050. Pour les études pertinentes qui présentaient une représentation du Cdr dans des scénarios de zéro net, le CDR total nécessaire en 2050 a été utilisé comme estimation des émissions résiduelles. Dans le cas où seules des fourchettes de données étaient fournies pour diverses technologies CDR, des valeurs médianes ont été utilisées pour ces cas particuliers.

Objectif de 1,5 °C : en se basant sur le besoin cumulatif estimé de CDR à l'échelle mondiale entre 2020 et 2100 par Smith et coll. en 2023¹³³, une proportion du CDR nécessaire pour les deux scénarios de 1,5 °C a été calculée en divisant les émissions historiques du Canada tirées de Friedlingstein et coll. en 2022¹³⁴ par le total mondial des émissions à l'échelle de l'économie (utilisation de combustibles fossiles et changement d'affectation des terres) et de l'utilisation de combustibles fossiles seulement. Ces pourcentages (3 % pour la part des émissions de l'ensemble de l'économie et 2 % pour la part des émissions des combustibles fossiles) ont été multipliés par les besoins d'élimination totaux de Smith et coll. (2023) pour obtenir une part absolue qu'il faudrait éliminer au-delà des émissions nettes zéro (supposées) au cours de la période 2050 – 2100. La part absolue des émissions a ensuite été divisée par 50 (années) pour obtenir les taux d'élimination annuels estimés au cours de la période 2050 – 2100. Les limites inférieures des fourchettes d'élimination pour chaque scénario de 1,5 °C représentent les émissions des combustibles fossiles uniquement et les limites supérieures représentent les émissions de l'ensemble de l'économie.



Notes de fin d'ouvrage

- 1 Friedlingstein, Pierre, et coll. *Budget mondial du carbone 2022* [Global Carbon Budget 2022]. *Earth System Science Data*, vol. 14, n° 11, nov. 2022, pp. 4811-900. Copernicus Online Journals, <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
- 2 *Le dioxyde de carbone dépasse aujourd'hui de plus de 50 % les niveaux préindustriels* [Carbon Dioxide Now More than 50% Higher than Pre-Industrial Levels]. 3 juin 2022, <https://www.noaa.gov/news-release/carbondioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels>.
- 3 Hausfather, Zeke. *L'état du climat : Comment le monde s'est réchauffé en 2022* [State of the Climate: How the World Warmed in 2022]. *Carbon Brief*, 3 janvier 2023, <https://www.carbonbrief.org/state-of-the-climate-how-the-world-warmed-in-2022/>.
- 4 Rogelj, Joeri, et coll. *Le fossé de la crédibilité dans les objectifs de climat zéro net laisse le monde à un risque élevé* [Credibility Gap in Net-Zero Climate Targets Leaves World at High Risk]. *Science*, vol. 380, n° 6649, juin 2023, pp. 1014-16. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1126/science.adg6248>.
- 5 Rogelj, Joeri, *Carbon Brief*. *Publication d'invité : Ce que des engagements climatiques « crédibles » signifient pour le réchauffement climatique futur* [Guest Post: What 'Credible' Climate Pledges Mean for Future Global Warming]. *Carbon Brief*, 8 juin 2023, <https://www.carbonbrief.org/guest-post-what-credible-climate-pledges-mean-for-future-global-warming/>.
- 6 L'Accord de Paris, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>. Consulté le 1er juin 2023.
- 7 Remarque : Comprend l'utilisation des combustibles fossiles et l'activité industrielle, l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la sylviculture Source : Friedlingstein, Pierre, et coll. *Budget carbone mondial 2022* [Global Carbon Budget 2022]. *Earth System Science Data*, vol. 14, n° 11 nov. 2022, pp. 4811-900. Copernicus Online Journals, <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
- 8 Remarque : Pour référence, une mégatonne est égale à un million de tonnes métriques.
- 9 Hausfather, Zeke. *Explication : le réchauffement climatique s'arrêtera-t-il dès que l'on atteindra des émissions nettes nulles?* [Explainer: Will Global Warming 'Stop' as Soon as Net-Zero Emissions Are Reached?] *Carbon Brief*, 29 avril 2021. <https://www.carbonbrief.org/explainer-will-global-warming-stop-as-soon-as-net-zero-emissions-are-reached/>.
- 10 Réchauffement de la planète de 1,5 °C. <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Consulté le 30 juin 2023.
- 11 Remarque : la dissuasion par l'atténuation décrit le risque potentiel que la société ne donne pas la priorité à la réduction des émissions et opte plutôt pour la CDR afin de compenser les émissions qui, autrement, devraient être éliminées directement. Il est important que la CDR ne serve pas d'excuse pour continuer à émettre des GES qui pourraient être éliminés de manière rentable.
- 12 Remarque : il n'existe actuellement aucun consensus scientifique sur ce qu'il faut entendre par « émissions résiduelles » et l'attribution d'une telle définition peut impliquer des jugements de valeur.
- 13 *AR6 Rapport plus détaillé : changement climatique 2023* [AR6 Longer Report : Climate Change 2023]. https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf. Consulté le 3 juillet 2023.
- 14 Smith, S. M., Geden, O., Nemet, G., Gidden, M., Lamb, W. F., Powis, C., Bellamy, R., Callaghan, M., Cowie, A., Cox, E., Fuss, S., Gasser, T., Grassi, G., Greene, J., Lück, S., Mohan, A., Müller-Hansen, F., Peters, G., Pratama, Y., Repke, T., Riahi, K., Schenuit, F., Steinhauser, J., Strefler, J., Valenzuela, J. M., and Minx, J. C. (2023). *L'état de l'élimination du dioxyde de carbone* [The State of Carbon Dioxide Removal] — 1ère édition. doi:10.17605/OSF.IO/W3B4Z
- 15 Repmann, M., Schelske, O., Colijn, D., & Prasad, S. (2021). *La logique d'assurance pour les solutions d'élimination du carbone* [The insurance rationale for carbon removal solutions]. Swiss Re Institute, Swiss Re Management Ltd. <https://www.swissre.com/dam/jcr:31e39033-0ca6-418e-a540-d61b8e7d7b31/swiss-re-instituteexpertise-publication-insurance-%20rationale-for-carbon-removal-solutions.pdf>
- 16 Remarque : Pour situer le contexte, une gigatonne de CO₂ équivaut à environ deux fois la quantité d'émissions de CO₂ de l'ensemble de l'économie canadienne en 2021 (537 MtCO₂). Source : Environment and Climate Change Canada Data / Environnement et Changement Climatique Canada Données. <https://data-donnees.ec.gc.ca/data/substances/monitor/canada-s-official-greenhouse-gas-inventory/B-Economic-Sector/?lang=en>. Consulté le 4 juillet 2023.
- 17 Remarque : Le dépassement décrit une période au cours de laquelle la température moyenne à la surface de la planète dépasse de 1,5 °C ou 2 °C les niveaux préindustriels tels qu'établis dans l'Accord de Paris. En cas de réchauffement dépassant ces seuils de température, la CDR offre la possibilité de ramener les températures moyennes à la surface de la planète en dessous de ces seuils grâce à des émissions nettes négatives soutenues.
- 18 Remarque : Il existe encore des chevauchements et des interdépendances entre ces différents ensembles de technologies pour des applications telles que DAC et BECCS.
- 19 Smith, S. M., Geden, O., Nemet, G., Gidden, M., Lamb, W. F., Powis, C., Bellamy, R., Callaghan, M., Cowie, A., Cox, E., Fuss, S., Gasser, T., Grassi, G., Greene, J., Lück, S., Mohan, A., Müller-Hansen, F., Peters, G., Pratama, Y., Repke, T., Riahi, K., Schenuit, F., Steinhauser, J., Strefler, J., Valenzuela, J. M., and Minx, J. C. (2023). *L'état de l'élimination du dioxyde de carbone* [The State of Carbon Dioxide Removal] — 1ère édition doi:10.17605/OSF.IO/W3B4Z

- 20 Powis, Carter M., et coll. Quantifier le déploiement de l'élimination du dioxyde de carbone au niveau mondial [Quantifying Global Carbon Dioxide Removal Deployment] Environmental Research Letters, vol. 380, n° 2, janvier 2023, p. 024022. Institute of Physics, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acb450>.
- 21 Remarque : le présent rapport définit la CDR durable comme fonctionnant sur des échelles de temps allant de plusieurs siècles à plusieurs millénaires, grâce à des supports de stockage moins vulnérables aux phénomènes d'inversion physique.
- 22 Smith, S. M., Geden, O., Nemet, G., Gidden, M., Lamb, W. F., Powis, C., Bellamy, R., Callaghan, M., Cowie, A., Fuss, S., Gasser, T., Grassi, G., Greene, J., Lück, S., Mohan, A., Müller-Hansen, F., Peters, G., Pratama, Y., Repke, T., Riahi, K., Schenuit, F., Steinhauser, J., Strefler, J., Valenzuela, J. M., and Minx, J. C. (2023). L'état de l'élimination du dioxyde de carbone [The State of Carbon Dioxide Removal] — 1ère édition. doi:10.176 05/OSF.IO/W3B4Z
- 23 Les investissements dans les énergies propres augmentent leur avance sur les combustibles fossiles, stimulés par les atouts de la sécurité énergétique — Actualités [Clean Energy Investment Is Extending Its Lead over Fossil Fuels, Boosted by Energy Security Strengths - News]. IEA, <https://www.iea.org/news/clean-energy-investment-is-extending-its-lead-over-fossil-fuels-boosted-by-energy-security-strengths>. Accessed 13 Aug. 2023.
- 24 Smith, S. M., Geden, O., Nemet, G., Gidden, M., Lamb, W. F., Powis, C., Bellamy, R., Callaghan, M., Cowie, A., Cox, E., Fuss, S., Gasser, T., Grassi, G., Greene, J., Lück, S., Mohan, A., Müller-Hansen, F., Peters, G., Pratama, Y., Repke, T., Riahi, K., Schenuit, F., Steinhauser, J., Strefler, J., Valenzuela, J. M., and Minx, J. C. (2023). L'état de l'élimination du dioxyde de carbone [The State of Carbon Dioxide Removal] — 1ère édition. doi:10.176 05/OSF.IO/W3B4Z
- 25 Remarque : D'autres possibilités de CDR (qui ne sont pas abordées dans le présent rapport) pourraient inclure l'élimination totale des émissions historiques nationales et/ou la poursuite d'un modèle de CDR en tant que service, dans lequel la CDR est entrepris dans un pays pour le compte d'un autre pays qui n'a pas accès à des ressources adéquates et qui agit donc en tant que « pays hôte » pour de tels projets.
- 26 Nations Unies, Changement climatique, portail des stratégies à long terme, <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/long-term-strategies>. Consulté le 25 juillet 2023.
- 27 Remarque : Ce chiffre exclut les émissions du secteur de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie (UTCATF).
- 28 Remarque : L'équivalent CO₂ (CO₂-eq) consiste à regrouper le potentiel de réchauffement planétaire de différents types et quantités de gaz à effet de serre en une seule mesure commune qui équivaut à la quantité de molécules de CO₂ qui aurait un effet de réchauffement similaire.
- 29 Buck, H.J., Carton, W., Lund, J.F. et coll. Pourquoi les émissions résiduelles sont-elles importantes aujourd'hui? [Why residual emissions matter right now]. Nat. Clim. Chang. 13, 351–358 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01592-2>
- 30 Remarque : Du point de vue des émissions, cela équivaudrait à retirer de la circulation entre 28 et 109 millions de véhicules de tourisme par an. Source : Gouvernement du Canada, Ressources naturelles Canada : Gouvernement du Canada, Ressources naturelles Canada. Calculateur d'équivalences de gaz à effet de serre. 13 juin 2017, https://oee.nrcan.gc.ca/corporate/statistics/neud/dpa/calculator/ghg-calculator.cfm?_gl=1*ig0dur*_ga*MTUyMjE4OTM5NS4xNjk2MjUzNDc4*_ga_C2N5Y7DX5*MTY5NjM1OTg5My4xLjAuMTY5NjM1OTg5NS4wLjAuMA#results.
- 31 Remarque : Cela est d'autant plus vrai que certains modèles peuvent n'optimiser que le coût plutôt qu'une série de variables qui affecteraient les perspectives de déploiement de la CDR, telles que les exigences en matière d'utilisation des sols et la disponibilité d'énergie propre.
- 32 Gouvernement du Canada, Ressources naturelles Canada, Le gouvernement du Canada fait le point sur les prévisions de la saison des feux de forêt pour 2023, <https://www.canada.ca/en/natural-resources-canada/news/2023/07/government-of-canada-provides-update-on-2023-wildlandfire-season-forecast.html>
- 33 Les incendies de forêt au Canada éclipsent les émissions de toutes les autres industries [Canada's Wildfires Dwarf Emissions from All Other Industries]. The Globe and Mail, 7 septembre 2023. www.theglobeandmail.com, <https://www.theglobeandmail.com/podcasts/the-decibel/article-canadas-wildfires-dwarf-emissions-from-all-other-industries/>.
- 34 Remarque : Ceci est particulièrement important étant donné l'incertitude inhérente associée à la performance du secteur UTCATF fonctionnant comme un puits ou une source nette de CO₂ au cours d'une année donnée (en particulier avec l'aggravation des impacts climatiques sur les systèmes naturels à l'avenir).
- 35 GIEC, 2023 : Sections. Dans : Changement climatique 2023 : Rapport de synthèse. Contribution des groupes de travail I, II et III au sixième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, H. Lee et J. Romero (éds.)]. GIEC, Genève, Suisse, pp. 35-115, doi : 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- 36 Remarque : L'absence nette d'émissions est une condition préalable à l'absence nette d'émissions. Tout déploiement de CDR à partir du présent par l'obtention d'émissions nettes zéro ne contribuerait donc pas à l'élimination des émissions historiques puisqu'il s'agirait simplement de compenser les émissions en cours dans l'atmosphère.

- 37 Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., Arneeth, A., Arora, V. K., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Bittig, H. C., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Cronin, M., Evans, W., Falk, S., Feely, R. A., Gasser, T., Gehlen, M., Gkritzalis, T., Gloege, L., Grassi, G., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Hefner, M., Houghton, R. A., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Jain, A. K., Jersild, A., Kadono, K., Kato, E., Kennedy, D., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lindsay, K., Liu, J., Liu, Z., Marland, G., Mayot, N., McGrath, M. J., Metzl, N., Monacci, N. M., Munro, D. R., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., O'Brien, K., Ono, T., Palmer, P. I., Pan, N., Pierrrot, D., Pockock, K., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Rodriguez, C., Rosan, T. M., Schwinger, J., Séférian, R., Shutler, J. D., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sun, Q., Sutton, A. J., Sweeney, C., Takao, S., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, X., Tian, H., Tilbrook, B., Tsujino, H., Tubiello, F., van der Werf, G. R., Walker, A. P., Wanninkhof, R., Whitehead, C., Willstrand Wranne, A., Wright, R., Yuan, W., Yue, C., Yue, X., Zaehle, S., Zeng, J., and Zheng, B.: Budget carbone mondial 2022 [Global Carbon Budget 2022], *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 4811–4900, <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>, 2022
- 38 Friedlingstein et coll., 2022b
- 39 Hansis, E., Davis, S. J., and Pongratz, J.: *Pertinence des choix méthodologiques pour la comptabilisation des flux de carbone liés aux changements d'affectation des sols* [Relevance of methodological choices for accounting of land use change carbon fluxes], *Global Biogeochemical Cycles*, 29, 1230-1246, 2015.
- 40 Remarque : Plus précisément, la ventilation des émissions comprend 34 GtCO₂ provenant de l'utilisation de combustibles fossiles et 39 GtCO₂ provenant du changement d'affectation des terres.
- 41 Remarque : Ces chiffres excluent les gaz à effet de serre autres que le CO₂.
- 42 Remarque : Des niveaux de certitude plus élevés, supérieurs à 50 %, seraient souhaitables pour les deux scénarios de 1,5 °C, mais ces données n'étaient pas disponibles pour cette analyse.
- 43 Smith, S. M., Geden, O., Nemet, G., Gidden, M., Lamb, W. F., Powis, C., Bellamy, R., Callaghan, M., Cowie, A., Cox, E., Fuss, S., Gasser, T., Grassi, G., Greene, J., Lück, S., Mohan, A., Müller-Hansen, F., Peters, G., Pratama, Y., Repke, T., Riahi, K., Schenuit, F., Steinhauser, J., Strefler, J., Valenzuela, J. M., and Minx, J. C. (2023). *L'état de l'élimination du dioxyde de carbone* [The State of Carbon Dioxide Removal] — 1ère édition. doi:10.17605/OSF.IO/W3B4Z
- 44 GIEC, 2022 : Annexe III : Scénarios et méthodes de modélisation [Guivarch, C., E. Kriegler, J. Portugal-Pereira, V. Bosetti, J. Edmonds, M. Fischedick, P. Havlík, P. Jaramillo, V. Krey, F. Lecocq, A. Lucena, M. Meinshausen, S. Mirasgedis, B. O'Neill, G.P. Peters, J. Rogelj, S. Rose, Y. Saheb, G. Strbac, A. Hammer Strømman, D.P. van Vuuren, N. Zhou (eds)]. Dans IPCC, 2022 : Changement climatique 2022 : atténuation du changement climatique. Contribution du groupe de travail III au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (éds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi : 10.1017/9 781 009 157 926 022
- 45 Statistiques sur les capacités renouvelables 2023, Agence internationale pour les énergies renouvelables. 21 mars 2023, <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>.
- 46 L'administration Biden-Harris annonce jusqu'à 1,2 milliard de dollars pour les premières démonstrations nationales de captage direct de l'air au Texas et en Louisiane [Biden-Harris Administration Announces Up To \$1.2 Billion For Nation's First Direct Air Capture Demonstrations in Texas and Louisiana]. Energy.Gov, <https://www.energy.gov/articles/biden-harris-administration-announces-12-billion-nations-first-direct-air-capture>. Consulté le 20 août 2023.
- 47 Une garantie de marché pour accélérer l'élimination du carbone [An Advance Market Commitment to Accelerate Carbon Removal]. <https://frontierclimate.com/>. Consulté le 20 août 2023.
- 48 L'analyse a été réalisée par Navius Research à l'aide de son modèle gTech afin d'étudier les emplois et les opportunités économiques qui pourraient résulter de l'extension des technologies CDR au Canada.
- 49 Une raison de plus pour agir rapidement en faveur du climat : l'économie [One More Reason for Rapid Climate Action: Economics]. World Economic Forum, 24 mai 2022, <https://www.weforum.org/agenda/2022/05/one-more-reason-for-rapid-climate-action-economics/>
- 50 Remarque : Définies comme des « solutions capables de supprimer et de séquestrer les émissions de manière vérifiable pendant 100 à 1 000 ans ou plus ».
- 51 Karan, M., Carroll, B., Baker, T., Ponce de Leon Barido, P., Dewar, A., & Sims, A. (2023). Les besoins climatiques et la demande du marché déterminent l'avenir des CDR durables [Climate Needs and Market Demand Drive Future for Durable CDR]. BCG Global, 11 septembre 2023, <https://www.bcg.com/publications/2023/the-need-and-market-demand-for-carbon-dioxide-removal>.
- 52 Le modèle a supposé que les coûts des DAC étaient relativement élevés en 2050 (un minimum de 217 dollars par tonne) et que l'adoption globale était faible (disponibilité élevée de nouvelles centrales nucléaires, faibles coûts futurs des biocarburants, faibles prix mondiaux du pétrole et faible croissance de la population au Canada). La DAC a été utilisé dans le modèle comme un substitut pour tout type de CDR. Les résultats ne doivent pas être interprétés comme si Carbon Removal Canada supposait que tous les CDR s'appuieraient sur la DAC.
- 53 Charm Industrial. A Story of American Ingenuity and Progress, <https://charmindustrial.com/newjobs>. Consulté le 14 septembre 2023.
- 54 Zone [Area]. <https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/area/country-comparison/>. Consulté le 16 août 2023.
- 55 Les pays ayant la plus longue côte [Countries With The Longest Coastline]. WorldAtlas, 1er octobre 2020, <https://www.worldatlas.com/articles/countries-with-the-mostcoastline.html>.

- 56 Canada, Ressources naturelles. Combien de forêts le Canada possède-t-il? [Canada, Natural Resources. How-Much-Forest-Does-Canada-Have]. 11 juin 2015, <https://natural-resources.canada.ca/our-naturalresources/forests/state-canadas-forests-report/how-much-forest-does-canada-have/17601>.
- 57 Canada, Agriculture et Agroalimentaire. Vue d'ensemble du secteur agricole et agroalimentaire canadien. 5 novembre 2021, <https://agriculture.canada.ca/en/sector/overview>.
- 58 Canada — pays et régions [Canada - Countries & Regions]. IEA, <https://www.iea.org/countries/canada>. Consulté le 15 août 2023.
- 59 Gouvernement du Canada, Régulateur de l'énergie du Canada. CER — Profils énergétiques provinciaux et territoriaux — Canada. 3 mars 2023, <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/energy-markets/provincial-territorial-energy-profiles/provincial-territorial-energy-profilescanada.html>.
- 60 Gouvernement du Canada, Régulateur de l'énergie du Canada. CER - L'avenir énergétique du Canada 2023 : projections de l'offre et de la demande d'énergie jusqu'en 2050. 16 août 2023, <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/canada-energy-future/2023/#~:text=Canada%27s%20Energy%20Future%202023%20focuses,zero%20world%20could%20look%20like>.
- 61 Remarque : Le stockage géologique pourrait jouer un rôle de soutien pour la réduction des émissions de carbone, mais n'est pas en soi une méthode de réduction des émissions de carbone.
- 62 NATCARB/ATLAS. Netl.Doe.Gov, <https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-storage/strategic-program-support/natcarb-atlas>; <https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2018-10/ATLAS-V-2015.pdf>. Consulté le 20 août 2023.
- 63 Le contexte canadien du CO₂, une carte-guide pour les sources et les puits [Canada's CO₂ Landscape, A Guide Map for Sources and Sinks], International CCS Knowledge Centre, [https://ccsknowledge.com/pub/Publications/CO2-Sources_&_Sinks_Map_Canada%20\(2021-05-12\).pdf](https://ccsknowledge.com/pub/Publications/CO2-Sources_&_Sinks_Map_Canada%20(2021-05-12).pdf). Consulté le 20 août 2023.
- 64 Gouvernement du Canada, Services publics et approvisionnement Canada. Rapport d'inventaire national : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada : En81-4E-PDF — Publications du gouvernement du Canada — Canada.Ca. 1er juillet 2002, <https://publications.gc.ca/site/eng/9.506002/publication.html>.
- 65 Remarque : Cette estimation est basée sur un niveau d'émissions de CO₂ de 537 MtCO₂ en 2021.
- 66 Kearns, J., Teletzke, G., Palmer, J., Thomann, H., Kheshgi, H., Chen, H., Paltsev, S., & Herzog, H. (2017). Élaboration d'une base de données cohérente sur les capacités régionales de stockage géologique du CO₂ dans le monde entier [Developing a consistent database for regional geologic CO₂ storage capacity worldwide], Programme conjoint de MIT sur la science et la politique du changement planétaire, https://globalchange.mit.edu/sites/default/files/MITJPSPGC_Reprint_17-18.pdf. Consulté le 10 octobre 2023.
- 67 Canada, Affaires mondiales. « Les forces et les priorités du Canada en matière d'innovation ». GAC, 21 Nov. 2019, <https://www.tradecommissioner.gc.ca/tcs-sdc/innovators-innovateurs/strategies.aspx?lang=eng>.
- 68 Initiative CanCO₂Re - Technologies CDR Canada, <https://www.canco2re.ca>. Consulté le 31 août 2023.
- 69 Pillorge, H., Kolosz, B., Wu, G.C., & Freeman, J. (2021). Cartographie mondiale des opportunités de la CDR [Global Mapping of CDR Opportunities]. CDR Primer, édité par J Wilcox, B Kolosz, J Freeman. <https://cdrprimer.org/read/chapter-3>. Consulté le 11 août 2023.
- 70 NATCARB_AllData_v1502 — EDX. <https://edx.netl.doe.gov/dataset/natcarb-alldata-v1502>. Consulté le 29 août 2023.
- 71 Secrétariat, Treasury Board of Canada, and Treasury Board of Canada Secrétariat. Open Government Portal. <https://open.canada.ca/data/en/dataset/a883eb14-0c0e-45c4-b8c4-b54c4a819edb/resource/12c03de6-c3f7-4f5f-bb5c-d479f2332842>. Accessed 29 Aug. 2023.
- 72 Actualités, Kyle Bakx. CBC. Les entreprises, les investissements et les talents canadiens dans le domaine des technologies propres commencent à se déplacer vers les États-Unis | CBC News [Canadian Clean Tech Companies, Investment and Talent Begin Moving to the U.S. | CBC News]. CBC, 19 juillet 2023, <https://www.cbc.ca/news/canada/calgary/bakx-clean-tech-ira-ccs-1.6879129>.
- 73 News, Kyle Bakx. CBC. Ces entreprises de technologies propres ont été lancées à Calgary, mais la plupart de leurs ventes se font aux États-Unis | CBC News [These Clean Tech Startups Launched in Calgary, but Most of Their Sales Are in the U.S. | CBC News]. CBC, 4 août 2023, <https://www.cbc.ca/news/canada/calgary/methane-epa-kathairos-qube-westgen-convrq-1.6926611>.
- 74 « Le gouvernement consulte les Canadiens sur les mesures du budget 2023 visant à faire croître l'économie propre, à supprimer les échappatoires fiscales et à accorder des allègements fiscaux aux Canadiens », ministère des Finances du Canada, <https://www.canada.ca/en/department-finance/news/2023/08/government-consultscanadians-on-budget-2023-measures-to-grow-the-clean-economy-close-tax-loopholes-and-deliver-tax-relief-for-canadians.html>. Consulté le 12 août 2023.
- 75 Remarque : La réduction des émissions de carbone par l'utilisation du CO₂ n'est possible que si le CO₂ provient de l'atmosphère ou de matières premières biogènes et que l'ensemble du processus (c.-à-d. le cycle de vie complet du projet) aboutit à des émissions nettes négatives.
- 76 Domicile [Home] Planetary Technologies, <https://www.planetarytech.com/>. Consulté le 2 août 2023.
- 77 Ingénierie du carbone — Captage direct du CO₂ dans l'air - Domicile [Carbon Engineering | Direct Air Capture of CO₂ | Home]. Carbon Engineering, <https://carbonengineering.com/>. Consulté le 2 août 2023.
- 78 La solution durable de CarbonCure pour le béton [CarbonCure's Sustainable Concrete Solution]. CarbonCure Technologies Inc., <https://www.carboncure.com/>. Consulté le 10 septembre 2023.

- 79 Une entreprise canadienne de technologies propres voit un grand avenir dans le biochar, mais cela peut être très risqué [A Canadian Cleantech Startup Sees a Big Future in Biochar, but It Can Be High Risk]. Yahoo Finance, 21 juillet 2023, <https://ca.finance.yahoo.com/news/canadian-cleantech-startup-sees-big-162904577.html>.
- 80 Corporation, Captura. Captura et Deep Sky s'associent pour lutter contre le changement climatique en déployant un système d'élimination du carbone océanique au Canada [Captura and Deep Sky Partner to Fight Climate Change by Deploying Ocean Carbon Removal in Canada]. GlobeNewswire News Room, 12 juillet 2023, <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/07/12/2703501/0/en/Capturaand-Deep-Sky-partner-to-fight-climate-change-by-deploying-ocean-carbon-removal-in-Canada.html>.
- 81 Sky, Deep. Deep Sky et Mission Zero s'associent pour déployer le captage direct du carbone dans l'air au Canada. <https://www.newswire.ca/news-releases/deep-sky-and-mission-zero-partner-to-deploy-direct-air-capture-carbon-removal-in-canada-830803134.html>. Consulté le 25 septembre 2023.
- 82 CarbonCure Technologies, Central Concrete et Heirloom réalisent le premier stockage en béton du CO₂ atmosphérique capturé par captage direct de l'air [CarbonCure Technologies, Central Concrete and Heirloom Achieve First-Ever Concrete Storage of Atmospheric CO₂ Captured By Direct Air Capture]. CarbonCure Technologies Inc., <https://www.carboncure.com/news/carboncure-technologies-central-concrete-and-heirloom-achieve-first-ever-concrete-storage-of-atmospheric-co2-captured-by-direct-air-capture/>. Consulté le 11 août 2023.
- 83 Lust, Cameron. Un événement historique : découvrez l'inauguration de la plus grande installation de captage direct de l'air au monde ». Carbon Engineering [History in the Making: Experience the Ground-Breaking Moment for World's Largest Direct Air Capture Facility]. Carbon Engineering, 15 juin 2023, <https://carbonengineering.com/news-updates/direct-air-capture-groundbreaking/>.
- 84 Élimination du carbone : Comment Shopify mène la charge en matière de responsabilité d'entreprise [Carbon Removal: How Shopify Is Leading the Charge on Corporate Responsibility]. Shopify, 17 février 2023, <https://www.shopify.com/ca/blog/carbon-removal>.
- 85 Soutenir les entrepreneurs du climat grâce au fonds de développement durable de Shopify [Supporting Climate Entrepreneurs | Shopify's Sustainability Fund]. Shopify, <https://www.shopify.com/ca/climate/sustainability-fund>. Consulté le 2 août 2023.
- 86 BMO First Bank achète à l'avance des solutions d'élimination du carbone par captage direct de l'air grâce à la technologie de l'ingénierie du carbone [BMO First Bank to Pre-Purchase Direct Air Capture Carbon Removals Using Carbon Engineering Technology]. <https://capitalmarkets.bmo.com/en/news-insights/news-releases/bmo-first-bank-pre-purchase-direct-air-capture-carbon-removals-using-carbonengineering-technology/>. Consulté le 2 août 2023.
- 87 Comment lancer le marché de l'élimination du carbone : la stratégie de Shopify [How to Kick-Start the Carbon Removal Market: Shopify's Playbook]. Shopify. https://cdn.shopify.com/static/sustainability/How-to-Kick-Start-the-Carbon-Removal-Market_Shopifys-Playbook.pdf?_gl=1*14kgme4*_ga*MTg0MDk4OTUxNC4xNjYwMzlyNDc1*_ga_B7X5MKCR35*MTY3NTk2NDYxNy4xNTYuMS4xNjc1OTY3ODMxLjQxLjAuMA..*_fplc*UnQyd2UxazJOWU50ZEZzJTJGd1FQeWtnR0pnMVhWSVNHYmNrdGNIRFISUVNLc01aRGphY0k0TmRVSGNsamxYWklzNVZkQ3hXaDYzdkp6M1ISS05HRzRRUVNUS EZ5SskJ3MXVCVHBOcUxrYzV0enVYeiUyQnVSQIM5QzM0TXpwN1Z1QSUzRCUzRA. Consulté le 11 août 2023.
- 88 Cdr.Fyi. <https://www.cdr.fyi/>. Consulté le 11 août 2023.
- 89 Tableau de bord des cibles (bêta) [Target Dashboard (Beta)]. Science Based Targets, <https://sciencebasedtargets.org/target-dashboard>. Consulté le 2 août 2023.
- 90 Gouvernement du Canada, 2022, Loi canadienne sur la responsabilité en matière d'émissions nettes zéro, <https://www.canada.ca/en/services/environment/weather/climatechange/climate-plan/net-zero-emissions-2050/canadian-net-zero-emissions-accountability-act.html>
- 91 Gouvernement du Canada, Services publics et marchés publics Canada. Information archivée dans le Web. https://publications.gc.ca/site/archivee-archived.html?url=https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/eccc/En81-4-1-2021-eng.pdf. Consulté le 19 août 2023.
- 92 Portail des stratégies à long terme [Long-term strategies portal], United Nations Climate Change, <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/long-term-strategies>. Consulté le 21 août 2023.
- 93 Canada, Ressources naturelles. Stratégie canadienne de gestion du carbone, 18 septembre 2023, <https://natural-resources.canada.ca/climatechange/canadas-green-future/capturing-the-opportunity-carbon-management-strategy-for-canada/canadas-carbon-managementstrategy/25337>.
- 94 Explorer des approches pour la transition du Canada vers la carboneutralité : Présentation de la stratégie à long terme du Canada à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, Environnement et Changement climatique Canada, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS%20Full%20Draft_Final%20version_oct31.pdf. Consulté le 21 août 2023.
- 95 L'administration Biden-Harris annonce 3,7 milliards de dollars pour relancer l'industrie américaine de l'élimination du dioxyde de carbone. [Biden-Harris Administration Announces \$3.7 Billion to Kick-Start America's Carbon Dioxide Removal Industry] Energy.Gov, <https://www.energy.gov/articles/biden-harris-administration-announces-37-billion-kick-start-americas-carbon-dioxide>. Consulté le 2 octobre 2023.
- 96 Le DOE annonce 35 millions de dollars pour accélérer l'élimination du dioxyde de carbone [DOE Announces \$35 Million to Accelerate Carbon Dioxide Removal] Energy.Gov, <https://www.energy.gov/fecm/articles/doe-announces-35-million-accelerate-carbon-dioxide-removal>. Consulté le 2 août 2023.

- 97 « Tonko et Schatz présentent un projet de recherche sur l'élimination du dioxyde de carbone ». Paul Tonko, membre du Congrès, 14 septembre 2023, <https://tonko.house.gov/news/documentsingle.aspx?DocumentID=3982>.
- 98 Coup de feu négatif pour le carbone [Carbon Negative Shot] Energy.Gov, <https://www.energy.gov/fecm/carbon-negative-shot>. Consulté le 2 octobre 2023.
- 99 Certification de l'élimination du carbone, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/sustainable-carbon-cycles/carbon-removal-certification_en. Consulté le 2 octobre 2023.
- 100 L'élimination du carbone dans Horizon Europe [Carbon Removal in Horizon Europe] Carbon Gap — Policy Tracker, <https://tracker.carbongap.org/policy/horizon-europe/>. Consulté le 2 octobre 2023.
- 101 L'élimination du carbone dans le Fonds d'innovation de l'UE [Carbon Removal in the EU Innovation Fund]. Carbon Gap - Policy Tracker, <https://tracker.carbongap.org/policy/innovation-fund/>. Consulté le 2 octobre 2023.
- 102 L'élimination du carbone dans l'objectif climatique de l'UE pour 2040 [Carbon Removal in the EU Climate Target for 2040]. Carbon Gap - Policy Tracker, <https://tracker.carbongap.org/policy/eu-climate-target-for-2040/>. Consulté le 2 octobre 2023.
- 103 L'élimination du carbone dans le système d'échange de quotas d'émission de l'UE [Carbon Removal in the EU Emissions Trading System] Carbon Gap — Policy Tracker, <https://tracker.carbongap.org/policy/eu-emissions-trading-system/>. Consulté le 2 octobre 2023.
- 104 Systèmes de tarification de la pollution par le carbone au Canada [Carbon pollution pricing systems across Canada], Gouvernement du Canada, <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/pricing-pollution-how-it-will-work.html>. Consulté le 3 octobre 2023.
- 105 Comment fonctionne la tarification du carbone [How carbon pricing works], Gouvernement of Canada, <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/pricing-pollution-how-it-will-work/putting-price-on-carbon-pollution.html>. Consulté le 3 octobre 2023.
- 106 Canada, Ressources naturelles. Saisir l'occasion : une stratégie de gestion du carbone pour le Canada. 11 juin 2021, <https://natural-resources.canada.ca/climate-change/canadas-green-future/capturing-the-opportunity-carbon-management-strategy-for-canada/23721>.
- 107 Propositions législatives relatives à la loi et au règlement de l'impôt sur le revenu [Legislative Proposals Related to the Income Tax Act and the Income Tax Regulations], Gouvernement du Canada, <https://fin.canada.ca/drleg-apl/2023/ita-lir-0823-l-2-eng.pdf>. Consulté le 2 octobre 2023.
- 108 Le Canada lance un système de crédits compensatoires pour les gaz à effet de serre afin de soutenir une économie propre et verte [Canada launches Greenhouse Gas Offset Credit System to support a clean, green economy], Gouvernement du Canada, <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/news/2022/06/canada-launches-greenhouse-gas-offset-credit-system-to-support-a-clean-green-economy.html>. Consulté le 13 août 2023.
- 109 Système canadien de crédits compensatoires pour les gaz à effet de serre : Protocoles [Canada's Greenhouse Gas Offset Credit System: Protocols," Gouvernement du Canada], <https://www.canada.ca/en/environmentclimate-change/services/climate-change/pricing-pollution-how-it-will-work/output-based-pricing-system/federal-greenhouse-gasoffset-system/protocols.html>. Consulté le 2 octobre 2023.
- 110 Gouvernement du Canada, ministère des Finances. Chapitre 3 : Un plan élaboré au Canada : une énergie abordable, de bons emplois et une économie propre en pleine croissance | Budget 2023. 28 mars 2023, <https://www.budget.canada.ca/2023/report-rapport/chap3-en.html>.
- 111 Stockage géologique du carbone | Ontario.Ca. <http://www.ontario.ca/page/geologic-carbon-storage>. Consulté le 20 août 2023.
- 112 Janocha, Kirstin. Élimination du dioxyde de carbone | Mission Innovation. 10 août 2022, <https://explore.mission-innovation.net/mission/carbondioxide-removal/>.
- 113 Mission d'élimination du dioxyde de carbone — Mission Innovation. <http://mission-innovation.net/missions/carbon-dioxide-removal/>. Consulté le 31 août 2023.
- 114 Gregory Nemet, Comment l'énergie solaire est devenue bon marché, <https://www.howsolargotcheap.com>. Consulté le 2 août 2023.
- 115 Libérer le potentiel du captage direct de l'air : est-il possible de passer à l'échelle supérieure grâce aux marchés du carbone? — Analyse. IEA, <https://www.iea.org/commentaries/unlocking-the-potential-of-direct-air-capture-is-scaling-up-through-carbon-markets-possible>. Consulté le 11 octobre 2023.
- 116 Les mesures incitatives canadiennes en faveur de la réduction des émissions de carbone restent bien en deçà de celles des États-Unis, malgré les mesures importantes prévues dans le budget 2023 [Canadian Low-Carbon Incentives Remain Well behind the US, despite Significant Measures in Budget 2023]. Clean Prosperity, 18 juillet 2023, <https://cleanprosperity.ca/new-data-shows-what-canada-can-do-to-compete-for-low-carbon-investment/>.
- 117 Allan, B., Bernstein, M., Frank, B., Southin, T., & Wadland, J. (2023). Créer un avantage canadien : politiques visant à aider le Canada à être compétitif en matière d'investissements à faible intensité de carbone [Creating a Canadian Advantage: Policies to help Canada compete for low-carbon investment]. Consulté le 11 octobre 2023, https://cleanprosperity.ca/wp-content/uploads/2023/02/Creating_a_Canadian_Advantage.pdf
- 118 L'Occidental espère vendre le carbone capturé par la plus grande usine du monde [Occidental Hopes to Sell the Carbon It Captures at the World's Biggest Plant]. Bloomberg.Com, 28 avril 2023. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-04-28/occidental-sees-more-uses-of-carbon-from-world-s-biggest-plant>.

- 119 *Un avenir non construit : transformer les systèmes réglementaires du Canada pour atteindre les objectifs environnementaux, économiques et de partenariat avec les populations autochtones* [Future Unbuilt: Transforming Canada's Regulatory Systems to Achieve Environmental, Economic, and Indigenous Partnership Goals]. Business Council of Alberta. Juin 2023.
- 120 *Institut canadien pour les choix climatiques, 2021. L'avenir net zéro du Canada : trouver notre voie dans la transition mondiale.* https://climatechoices.ca/wp-content/uploads/2021/02/Canadas-Net-Zero-Future_FINAL-2.pdf. Consulté le 23 août 2023.
- 121 *Navius Research, 2021. Atteindre des émissions nettes zéro d'ici 2050 au Canada : une évaluation des voies vers le zéro net préparée pour l'Institut canadien des choix climatiques* [Achieving net zero emissions by 2050 in Canada: An evaluation of pathways to net zero prepared for the Canadian Institute for Climate Choices]. https://climatechoices.ca/wp-content/uploads/2021/02/Deep-Decarbonization-Report-2021-01-21-FINAL_EN.pdf. Consulté le 23 août 2023.
- 122 *Un moment décisif* [A Pivotal Moment]. Clean Energy Canada, <https://cleanenergycanada.org/report/a-pivotal-moment/>. Consulté le 23 août 2023.
- 123 *Gouvernement du Canada, Régulateur de l'énergie du Canada. CER - L'avenir énergétique du Canada 2023 : projections de l'offre et de la demande d'énergie jusqu'en 2050.* 16 août 2023, <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/canada-energy-future/2023/>.
- 124 *Recherche en cours : des voies d'accès à la consommation nette zéro pour le Canada : document intermédiaire 1 (2023)* Clean Prosperity Net-Zero Research Programme. Consulté le 31 août 2023, <https://cleanprosperity.ca/wp-content/uploads/2023/06/Achieving-net-zero-pathways-June-2023-Clean-Prosperity.pdf>. Les voies choisies pour 2050 comprennent la bioénergie ~ 13 Mt ; les énergies renouvelables ~19 Mt ; l'hydrogène ~ 33 Mt ; l'électrification ~70 Mt en utilisant des paramètres de référence de base (sensibilités).
- 125 *Gouvernement du Canada, Environnement et Changement climatique Canada — Exploration des approches pour la transition du Canada vers des émissions nettes nulles* Présentation de la stratégie à long terme du Canada à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS%20Full%20Draft_Final%20version_oct31.pdf. Consulté le 23 août 2023.
- 126 *Institut de recherche sur l'énergie électrique, 2021. Évaluation nationale de l'électrification au Canada : opportunités d'électrification pour l'avenir énergétique du Canada.* <https://www.epri.com/research/programs/109396/results/3002021160>. Consulté le 23 août 2023.
- 127 *CER. Données sur l'avenir énergétique du Canada Annexes.* 2016. DOI.org (Datacite), <https://doi.org/10.35002/ZJR8-8X75>.
- 128 *Banque du Canada et Bureau du surintendant des institutions financières, (2022). Utilisation de l'analyse de scénarios pour évaluer les risques liés à la transition climatique — Rapport final du projet pilote d'analyse de scénarios climatiques de la Banque du Canada et du Bureau du surintendant des institutions financières (BSIF).* <https://www.bankofcanada.ca/wp-content/uploads/2021/11/BoC-OSFI-Using-Scenario-Analysis-to-Assess-Climate-Transition-Risk.pdf>. Consulté le 23 août 2023.
- 129 *Thomas, S. & Green, T. (2022). Changer d'énergie : l'électricité sans émissions au Canada d'ici 2035* [Shifting Power: Zero-Emissions Electricity Across Canada by 2035. Clean Power Pathways et la David Suzuki Foundation]. <https://davidsuzuki.org/science-learning-centre-article/shifting-power-zero-emissions-electricity-across-canada-by-2035/>. Consulté le 23 août 2023.
- 130 *Langlois-Bertrand, S., Mousseau, N. 2022. Plan de réduction des émissions du Canada à l'horizon 2030 : la proposition de l'IET, Institut de l'énergie Trottier.* <https://iet.polymtl.ca/en/publication-en/canada-2030-emissions-reduction-plan-iet-proposal/>. Consulté le 23 août 2023.
- 131 *Gouvernement du Canada, Organisme canadien de réglementation de l'énergie. CER - Bienvenue dans l'avenir énergétique du Canada 2021.* 24 mai 2022, <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/canada-energy-future/2021/>. Consulté le 23 août 2023.
- 132 *Jaccard, M. & Griffin, B. (2021). Un système électrique canadien à zéro émission d'ici 2035* [A Zero-Emissions Canadian Electricity System by 2035. Clean Power Pathways et la David Suzuki Foundation]. <https://davidsuzuki.org/wp-content/uploads/2021/08/Jaccard-Griffin-Zero-emission-electricity-DSF-2021.pdf>. Consulté le 23 août 2023.
- 133 *Smith, S. M., Geden, O., Nemet, G., Gidden, M., Lamb, W. F., Powis, C., Bellamy, R., Callaghan, M., Cowie, A., Cox, E., Fuss, S., Gasser, T., Grassi, G., Greene, J., Lück, S., Mohan, A., Müller-Hansen, F., Peters, G., Pratama, Y., Repke, T., Riahi, K., Schenuit, F., Steinhäuser, J., Strefler, J., Valenzuela, J. M., and Minx, J. C. (2023). The State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition. The State of Carbon Dioxide Removal. doi:10.17605/OSF.IO/W3B4Z*
- 134 *Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Luijckx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., Arneeth, A., Arora, V. K., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Bittig, H. C., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Cronin, M., Evans, W., Falk, S., Feely, R. A., Gasser, T., Gehlen, M., Gkritzalis, T., Gloege, L., Grassi, G., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Hefner, M., Houghton, R. A., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Jain, A. K., Jersild, A., Kadono, K., Kato, E., Kennedy, D., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lindsay, K., Liu, J., Liu, Z., Marland, G., Mayot, N., McGrath, M. J., Metz, N., Monacchi, N. M., Munro, D. R., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., O'Brien, K., Ono, T., Palmer, P. I., Pan, N., Pierrot, D., Pocock, K., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Rodriguez, C., Rosan, T. M., Schwinger, J., Séférian, R., Shutler, J. D., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sun, Q., Sutton, A. J., Sweeney, C., Takao, S., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, X., Tian, H., Tilbrook, B., Tsujino, H., Tubiello, F., van der Werf, G. R., Walker, A. P., Wanninkhof, R., Whitehead, C., Willstrand Wranne, A., Wright, R., Yuan, W., Yue, C., Yue, X., Zaehle, S., Zeng, J., and Zheng, B.: Budget mondial du carbone 2022 [Global Carbon Budget 2022]. *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 4811–4900, <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>, 2022.*