

ÉLIMINATION DU CARBONE ATMOSPHERIQUE

INTRODUCTION AUX PROCÉDÉS
À ÉMISSIONS NÉGATIVES

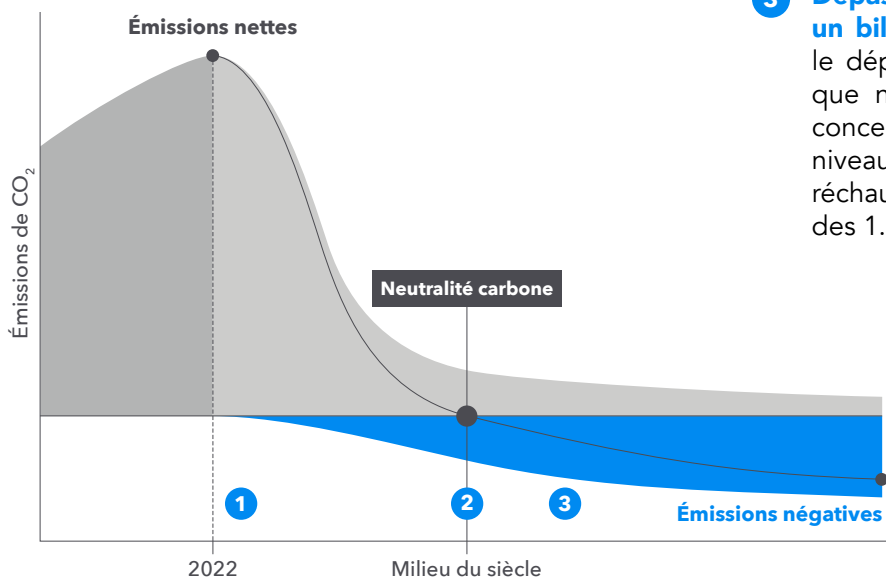
JUILLET 2022

L'accumulation du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère due aux activités humaines est la cause principale du changement climatique. Pour limiter ce réchauffement, il est nécessaire de réduire drastiquement les émissions, en déployant un large éventail de solutions, pour la plupart connues et opérationnelles. En complément, différentes méthodes permettant de retirer du CO₂ de l'atmosphère à grande échelle, plus récentes, ont un rôle à jouer dans les années à venir. En quoi consistent ces procédés ? Comment les émissions négatives qui en résultent contribuent-elles aux objectifs climatiques ? Quels sont les enjeux et perspectives du développement de l'élimination du carbone ? Petit tour d'horizon.

Qu'est-ce que l'élimination du carbone atmosphérique ?

L'élimination du carbone (en anglais Carbon Dioxide Removal, CDR) désigne un ensemble « d'activités humaines visant à retirer du CO₂ de l'atmosphère et à le stocker durablement dans des réservoirs géologiques, terrestres ou océaniques, ou dans des produits ». ¹ Ces pratiques permettent de générer des « émissions négatives ».

Une trajectoire d'émissions avec déploiement de l'élimination du carbone



Ce graphique présente, de manière qualitative, un scénario possible d'évolution des émissions en fonction du développement des capacités d'élimination du carbone atmosphérique à grande échelle. Les émissions nettes, aujourd'hui positives, s'annulent vers le milieu du siècle avec l'atteinte de la neutralité carbone, et deviennent négatives si les efforts de déploiement de procédés d'élimination se poursuivent.

Pourquoi retirer le carbone de l'atmosphère ?

L'Accord de Paris nous engage à limiter le réchauffement climatique bien en-dessous des 2 degrés, et idéalement 1,5 degrés pour éviter les impacts les plus graves. Ceci implique d'atteindre la **neutralité carbone** d'ici la moitié du siècle, avec une réduction rapide et drastique des émissions. Cependant, comme l'a rappelé le GIEC dans le 3ème volet de son dernier rapport¹, ces réductions d'émissions doivent être complétées par des émissions négatives, c'est-à-dire l'élimination d'un très grand volume de CO₂ accumulé dans l'atmosphère. Tous les scénarios permettant de tenir l'objectif de 1,5 degrés ont en effet recours au déploiement massif de ces pratiques dès 2030, pour atteindre l'élimination de 5 à 16 milliards de tonnes par an vers 2050.

Le rôle de l'élimination du CO₂ atmosphérique dans l'atteinte de la neutralité carbone fait l'objet d'un consensus scientifique. Dans son dernier rapport, le GIEC rappelle que « le déploiement des pratiques d'élimination pour compenser les émissions résiduelles difficiles à éliminer est inévitable pour atteindre la neutralité carbone »¹. Le GIEC y explicite également les trois rôles complémentaires que les émissions négatives peuvent jouer pour atteindre les objectifs climatiques :

- 1 Réduire les émissions nettes avant d'atteindre la neutralité carbone (court terme) :** Agir en complément d'une décarbonation profonde et rapide, en contribuant à réduire les émissions nettes de CO₂.
- 2 Compenser les émissions résiduelles (moyen terme) :** Contrebalancer les émissions des secteurs difficiles à décarboner d'ici 2050 (acier, ciment, industrie chimique, transports lourds, agriculture).
- 3 Dépasser la neutralité carbone pour atteindre un bilan net négatif (long terme) :** Continuer le déploiement pour retirer davantage de CO₂ que nous n'en émettons, et ainsi ramener la concentration de CO₂ dans l'atmosphère à des niveaux plus bas - en particulier dans le cas où le réchauffement excède temporairement la barre des 1.5°C.

En quoi consiste l'élimination du carbone ?

Il existe de nombreuses façons de retirer du CO₂ de l'atmosphère (voir quelques exemples page 3). Toutes comportent au moins deux étapes :

- **Extraire le CO₂ de l'atmosphère (ou de l'océan**)**, en tirant parti des **réactions chimiques naturelles** qui gouvernent le cycle du carbone (photosynthèse, altération des silicates), ou par le biais de **processus technologiques** qui séparent le CO₂ des autres constituants de l'air.
- **Séquestrer durablement le CO₂ ainsi capturé.** Celui-ci peut être stocké dans des réservoirs de la **lithosphère** (au sein de formations rocheuses particulières), de la **biosphère** (sols, végétation), de l'**hydrosphère** (océan, sédiments) ou encore de « l'**anthroposphère** » (produits à longue durée de vie, comme certains matériaux de construction).

Dans certains cas, ces deux étapes se confondent. Par exemple, les arbres captent le CO₂ par photosynthèse et le stockent au sein de leurs racines, leurs feuilles, leur tronc. Pour d'autres méthodes, comme la capture directe du CO₂, les deux étapes sont séparées : le CO₂ doit alors être transporté du site de captage vers le site de stockage géologique.

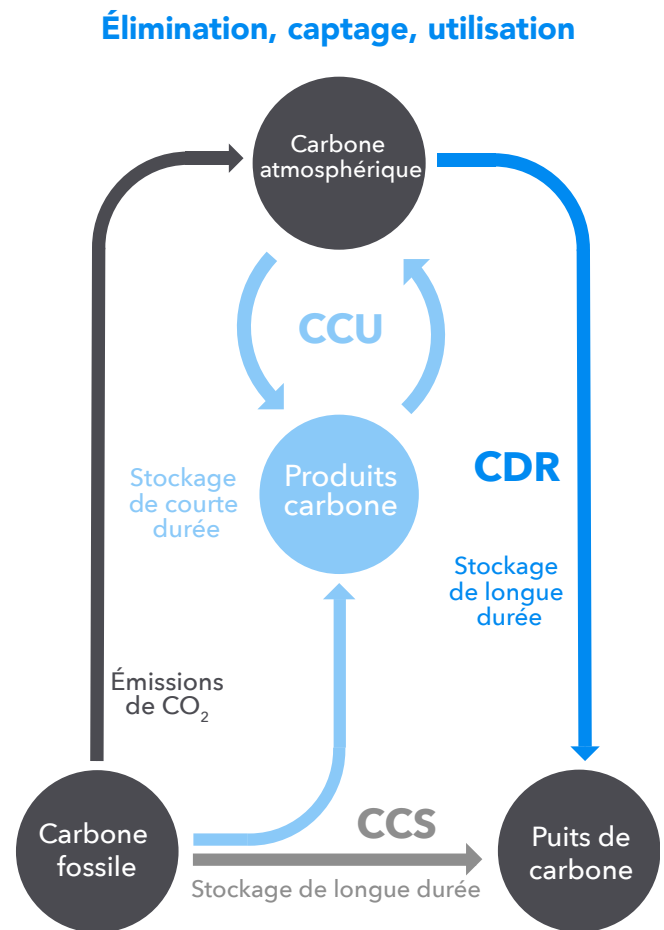
Capture, élimination, utilisation, ou séquestration ?

La « capture du carbone » désigne un ensemble d'actions de **gestion du carbone** qui, suivant la source et la destination du CO₂, ont des effets différents sur le climat⁴.

La **capture et séquestration du carbone (CCS*)** désigne les procédés où le CO₂ est capté au point d'émission (par exemple en sortie de cheminée d'usine) avant qu'il n'atteigne l'atmosphère, pour ensuite le stocker durablement dans des réservoirs géologiques. Cette technique est un levier de décarbonation pour certaines industries très émettrices de CO₂, mais ne produit pas d'émissions négatives. La CCS et l'élimination de carbone sont donc distinctes et complémentaires dans leur finalité, bien qu'elles puissent faire appel à des infrastructures similaires pour la capture, le transport ou le stockage géologique.

L'**utilisation du carbone** (souvent regroupée sous l'acronyme CCU* avec l'étape de capture) permet de valoriser le CO₂ collecté plutôt que de l'enfouir. Le CO₂ peut être utilisé directement, par exemple dans des boissons gazeuses ou pour fertiliser des serres. A plus grande échelle, il peut servir de matière première pour fabriquer du béton, synthétiser des carburants et produits chimiques, etc. L'utilisation de carbone capturé au lieu du carbone fossile permet de contribuer à réduire l'intensité carbone des produits en question. Dans certains cas, le CO₂ employé peut provenir de l'atmosphère. Cependant, les produits obtenus ayant pour la plupart une durée de vie courte, ce CO₂ sera rapidement réémis. Ces procédés ne permettent donc qu'un retrait temporaire du carbone atmosphérique.

Les procédés d'élimination, CCS et CCU ont tous un rôle à jouer pour atteindre la neutralité carbone, mais ils produisent des effets différents et ne doivent par conséquent pas être confondus.



L'élimination du carbone fait partie d'un ensemble d'actions de « gestion du carbone » aux côtés de la CCS et de la CCU.

* CCS: carbon capture and storage / CCU: carbon capture and utilisation.

** La surface des océans est en équilibre constant avec le CO₂ de l'atmosphère. Ainsi, retirer du CO₂ de la partie supérieure des océans peut contribuer à réduire les concentrations atmosphériques. L'accumulation du CO₂ est un facteur connu d'acidification des océans, et en réduire les concentrations permettrait de contrer cet effet.

Méthodes d'élimination : un panorama³



Les solutions pour éliminer du CO₂ de l'atmosphère sont nombreuses et en constante évolution. Quelques exemples de techniques majeures sont présentés ici.



Reforestation/gestion améliorée des forêts | Plantation d'arbres et restauration de forêts, en s'assurant de la bonne gestion des parcelles (les arbres stockent du carbone dans leur tronc, leurs racines et les sols environnants).

Capture directe (direct air capture) et stockage du CO₂ | Le CO₂ est « filtré » de l'air ambiant à l'aide d'un absorbant, d'un solvant ou d'une membrane, puis stocké dans des réservoirs géologiques stables.



Sols | Certaines pratiques agricoles (semis direct, engrais verts) augmentent la capacité des sols à capter et stocker le carbone.

Océans | Certaines méthodes peuvent stimuler les échanges biochimiques marins, augmentant la capacité des océans à séquestrer du carbone: fertilisation, alcalinisation ou projets de restaurations d'écosystème (« blue carbon »).



Biochar | Le biochar est une forme de charbon très riche en carbone produit par pyrolyse de biomasse (cette dernière ayant retiré du CO₂ lors de sa croissance). Le biochar peut être épandu sur les sols agricoles pour améliorer les rendements.

Minéralisation et altération des roches | Le CO₂ est capté et stabilisé sous la forme d'un carbonate solide, par exemple en épandant des minéraux concassés qui réagissent avec le CO₂ ambiant, ou en transportant un fluide riche en CO₂ dans des formations rocheuses particulières.



Valorisation de biomasse | Durant leur croissance, les plantes et algues captent du CO₂ de l'air ambiant ; cette biomasse peut être récoltée puis brûlée, par exemple pour générer de l'énergie. Les émissions résultant de cette combustion peuvent être captées en sortie d'usine puis stockées dans des réservoirs géologiques - par exemple dans le cas d'infrastructures de bioénergie avec capture et stockage du carbone (BECCS).

Produits à longue durée de vie | Certains matériaux peuvent stocker du CO₂ sur de longues périodes, notamment le bois de construction (les arbres séquestrent du carbone dans leur phase de croissance) et certains bétons enrichis en carbone. Ces méthodes doivent clairement prendre en compte le devenir du carbone en fin de vie - le stockage à court terme étant limité, et considéré comme "du recyclage de carbone".



Illustration by Walker Cahall - www.waltronic.net

Toutes les méthodes d'élimination du carbone se valent-elles ?

Les différentes méthodes d'élimination ont des caractéristiques distinctes : performances physiques (durabilité du stockage, potentiel à grande échelle, vitesse de séquestration), coûts, co-bénéfices, risques, ou acceptabilité sociale⁵. Chaque méthode présente ses propres atouts et faiblesses : ainsi, aucune ne pourra atteindre seule les objectifs fixés, et les scénarios réalistes de déploiement ont tous recours à une diversité de solutions⁶.

Performances physiques

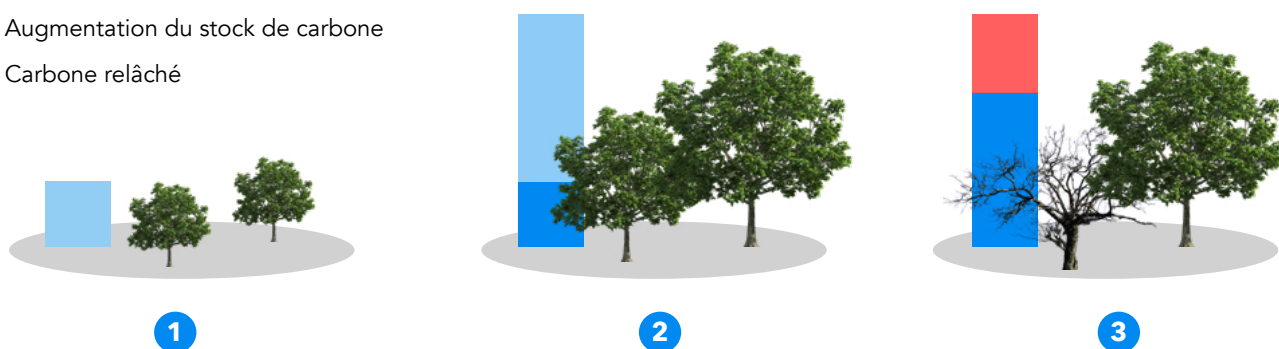
Combien de CO₂ peut être stocké ? Chaque type de réservoir (une forêt, une formation géologique...) est caractérisé par une capacité de stockage maximale avant d'arriver à saturation.

À quelle vitesse le CO₂ peut-il être retiré de l'atmosphère ? Chaque méthode est caractérisée par une vitesse maximale de séquestration : les forêts, par exemple, mettent plusieurs décennies à atteindre leur potentiel de stockage maximal.

Pour combien de temps le CO₂ sera-t-il stocké ? Le carbone capturé est stocké, idéalement, de manière permanente. Cependant, il existe toujours un risque de réversibilité du stockage, lors duquel tout ou une partie du carbone est réémis dans l'atmosphère. Ce risque varie selon les méthodes considérées.

Reforestation : bénéfiques et risques⁷

- Carbone stocké
- Augmentation du stock de carbone
- Carbone relâché



Lors de leur croissance, les arbres accumulent un certain volume de carbone, jusqu'à ce que les forêts atteignent leur potentiel maximal de séquestration (1 à 2). Les forêts matures peuvent continuer à séquestrer du carbone, mais à des rythmes beaucoup plus faibles. Cette forme de stockage dans la végétation est sujette à un risque constant de réversibilité qui doit être encadré, géré et couvert contractuellement. Des facteurs naturels (feux de forêts, sécheresse, maladies...) ou humains (exploitation, utilisation du bois) peuvent contribuer à ce qu'une partie du carbone retourne dans l'atmosphère (2 à 3) - devant alors être compensée, par exemple, par des plantations additionnelles. La restauration de forêts endommagées (reforestation) à l'aide d'essences variées et adaptées, et sans enfreindre de droits de propriété, est globalement moins controversée que certaines pratiques telles que l'afforestation ou la plantation en monocultures.

Autres caractéristiques

Maturité | Certaines méthodes, comme la reforestation, sont matures et maîtrisées. Elles peuvent être déployées dès maintenant et les possibilités d'optimisation des coûts sont modestes. D'autres comme la capture directe sont bien établies scientifiquement, mais ces technologies n'existent encore qu'à l'échelle d'installations pilotes. Elles présentent de grandes marges de réduction des coûts et d'améliorations techniques. Enfin, il existe des approches qui sont encore au stade expérimental, notamment les méthodes basées sur l'océan. Celles-ci doivent encore être étudiées pour mieux comprendre leur faisabilité et leurs impacts potentiels.

Coûts | Actuellement, le coût d'élimination d'une tonne de CO₂ varie d'une dizaine à plusieurs milliers d'euros. Cette large fourchette reflète les écarts de maturité et de performance entre les différentes options. Les méthodes qui présentent le moins de risques de réversibilité sont pour l'instant les plus coûteuses.

Ressources | Les méthodes diffèrent aussi par leurs besoins en termes de ressources (eau, énergie, terres, nutriments...). Le potentiel de capture doit toujours être calculé en base nette, en tenant compte des émissions sur l'ensemble du cycle de vie des procédés. Étant donné l'échelle de déploiement nécessaire, il est essentiel d'estimer ces besoins car les tensions sur les ressources sont de plus en plus contraignantes.

Développer l'élimination du carbone à grande échelle

Au niveau mondial, les niveaux de déploiement des solutions d'élimination sont à l'heure actuelle loin d'être suffisants pour avoir des effets tangibles sur le climat : des efforts considérables sont nécessaires pour atteindre l'échelle adéquate.

Le développement de ces pratiques est à l'heure actuelle limité notamment par :

- Le manque de politiques et de mécanismes de soutien pour donner de la visibilité à long terme sur le prix du carbone, nécessaire pour stimuler les investissements
- Des financements insuffisants en R&D et dans l'innovation
- Le manque de standards reconnus pour certifier la qualité des crédits carbone et assurer que ceux-ci correspondent à des tonnes réellement capturées et stockées
- Une méconnaissance du sujet par le public (peu d'intérêt et de soutien)
- La faible disponibilité des réservoirs véritablement durables (notamment géologiques)

Chaque méthode pose des questions bien spécifiques qui doivent être comprises et quantifiées, particulièrement lors d'un déploiement à plus grande échelle². Par exemple, la capture directe requiert actuellement d'importantes quantités d'énergie décarbonée, alors même que celle-ci est actuellement insuffisante dans le mix énergétique mondial. Les méthodes mobilisant de grandes surfaces arables peuvent, à grande échelle, entrer en compétition avec d'autres usages des sols, comme la production de nourriture ou la gestion de la biodiversité, et poser de réels problèmes de gouvernance et de droits de propriété.

Certaines approches s'accompagnent en revanche potentiellement de divers **co-bénéfices** hors-carbone⁹ : les pratiques d'agriculture régénérative, l'épandage de biochar ou certains types de minéralisation peuvent augmenter les rendements

45 GtCO₂ par an

Niveaux actuels d'émissions (2019)¹. Ce volume doit être ramené aussi proche que possible de zéro - les émissions résiduelles devant être compensées par des émissions négatives.

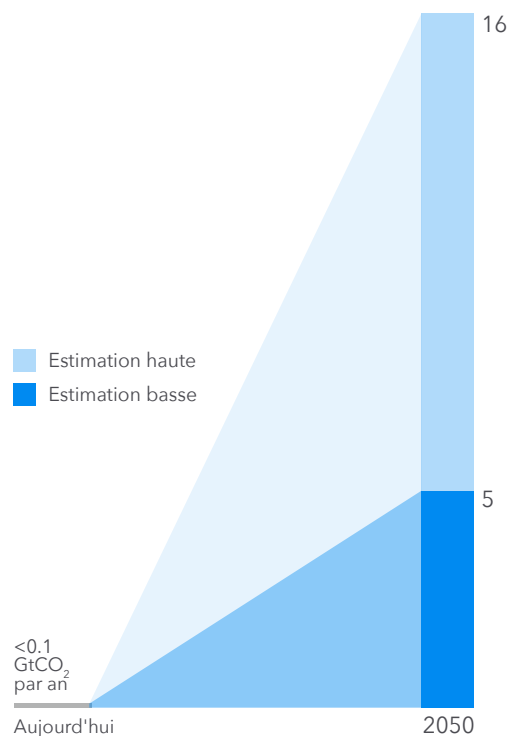
agricoles ; la reforestation peut maintenir ou restaurer la biodiversité locale et certains services écosystémiques ; le déploiement à grande échelle des techniques d'élimination du carbone peut être vecteur de croissance et de création d'emplois¹.

Certaines méthodes d'élimination ont encore besoin d'appui au niveau de la recherche et du déploiement de projets pilotes. D'autres sont prêtes pour un développement massif, qui s'étalera sur plusieurs décennies. De manière générale, les différentes pratiques suivront probablement une trajectoire similaire à celle des énergies renouvelables, pour lesquelles les politiques publiques de soutien au déploiement ont joué un rôle crucial dans la réduction des coûts¹. Développer une industrie de l'élimination du carbone atmosphérique prendra du temps, et en retarder le démarrage aujourd'hui ne fera que limiter les possibilités d'atteindre les niveaux requis à l'avenir.

Jusqu'à 5-16 GtCO₂ par an

pourraient être capturées d'ici 2050 dans les scénarios compatibles avec un réchauffement limité à 1.5°C¹.

Évolution jusqu'en 2050



Il est difficile de prédire les volumes d'émissions négatives qui devront être déployés - plus vite les réductions d'émissions vont s'opérer, moins le recours à des techniques d'élimination sera nécessaire. Sur la base des travaux analysés par le GIEC, de 5 à 16 milliards de tonnes de CO₂ pourraient être capturés annuellement d'ici 2050, représentant une augmentation de 50 à 160 fois la capacité actuelle installée¹.

Considérer l'ensemble des solutions

Aucune méthode d'élimination du carbone ne pourra à elle seule générer assez d'émissions négatives d'ici 2030 ou 2050 pour permettre d'atteindre la neutralité carbone⁶. Chacune ayant ses propres atouts et faiblesses, il est essentiel de considérer l'ensemble des solutions possibles.

La priorisation de l'une ou l'autre des méthodes doit se faire selon les contextes locaux et en suivant une logique de temporalité. Les options disponibles à l'heure actuelle, comme la restauration d'écosystèmes, sont généralement moins coûteuses et s'accompagnent de co-bénéfices significatifs. Il est crucial de les déployer dès que possible, en veillant particulièrement au caractère durable des projets, à leur additionnalité et à la mise en place d'un suivi actif et rigoureux, tout en évitant leurs effets indésirables⁹. Cependant, la vitesse et le potentiel de séquestration de ces méthodes sont limités, notamment par le changement climatique lui-même¹⁰. Elles devront donc à plus ou moins long terme être complétées par des techniques aujourd'hui moins matures, potentiellement plus coûteuses mais également plus performantes en termes de permanence du stockage¹¹. De telles méthodes ont besoin d'investissements dès aujourd'hui pour déployer pleinement leur potentiel.

Quelles perspectives pour l'élimination du carbone atmosphérique ?

L'élimination du carbone intervient en complément d'une réduction drastique des émissions, et ne pourra en aucun cas s'y substituer. Cette clarification est importante car l'humanité ne peut se permettre de retarder les efforts sans précédent que requiert la décarbonation de l'économie mondiale pour rester sous la barre des 1.5°C¹². Les scénarios permettant de respecter les objectifs climatiques impliquent de réduire les émissions de CO₂ de moitié d'ici 2030, et d'atteindre la neutralité d'ici 2050, mais nécessitent en plus de cela de retirer plusieurs milliards de tonnes de CO₂ de l'atmosphère. Le dernier rapport du GIEC met en lumière le fait que ni les réductions d'émissions, ni l'élimination du carbone atmosphérique ne pourront, seules, permettre d'éviter un réchauffement trop conséquent : les deux volets sont essentiels et jouent un rôle complémentaire.

L'élimination du carbone atmosphérique ouvre aussi des possibilités en matière de justice climatique, qui est fondamentale si elle s'exerce dans un cadre de gouvernance cohérent et rigoureux¹³. Les pays développés, de par leurs émissions par habitant plus élevées, leur richesse et leur

large contribution historique au réchauffement climatique, devront atteindre la neutralité carbone avant les autres pays, chez qui la décarbonation sera plus lente. Une phase d'émissions négatives nettes permettrait de compenser une partie des émissions historiques cumulées¹⁴ pour aller plus loin dans la limitation du réchauffement, même si certains effets sur le système climatique sont irréversibles.

Le constat est clair : l'élimination du carbone atmosphérique a un rôle crucial à jouer pour atteindre la neutralité carbone, mais le secteur doit changer d'échelle et se développer à une vitesse beaucoup plus rapide. Le déploiement des émissions négatives doit se faire avec rigueur et ambition, en considérant l'ensemble des méthodes disponibles à plus ou moins court terme, et en étudiant leur impact climatique, leurs co-bénéfices, et les nouveaux risques qu'elles engendrent (environnementaux, sociaux). Répondre à ces défis requiert d'agir rapidement sur le plan politique pour stimuler la recherche, l'investissement, le déploiement des projets et l'implication de la société civile afin que l'élimination du carbone atmosphérique puisse pleinement jouer son rôle dans la lutte contre le changement climatique.

Sources

- 1 IPCC, "Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change", 2022.
- 2 IPCC, "Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability", 2022.
- 3 J. C. Minx et al., "Negative Emissions - Part 1: Research Landscape and Synthesis", 2018.
- 4 D. R. Morrow and M. S. Thompson, "Reduce, Remove, Recycle: Clarifying the Overlap between Carbon Removal and CCUS", 2020.
- 5 World Economic Forum, "Net-Zero to Net-Negative: A Guide for Leaders on Carbon Removal", 2021.
- 6 S. Fuss et al., "Negative Emissions - Part 2: Costs, Potentials and Side Effects", 2018.
- 7 IPCC, "Climate Change and Land", 2019.
- 8 G. F. Nemet et al., "Negative Emissions - Part 3: Innovation and Upscaling", 2019.
- 9 P. Smith et al., "Land-Management Options for Greenhouse Gas Removal and Their Impacts on Ecosystem Services and the Sustainable Development Goals", 2019.
- 10 H. D. Matthews et al., "Temporary Nature-Based Carbon Removal Can Lower Peak Warming in a Well-below 2°C Scenario", 2022.
- 11 C. A. J. Girardin et al., "Nature-Based Solutions Can Help Cool the Planet - If We Act Now", 2021.
- 12 K. Anderson and G. Peters, "The Trouble with Negative Emissions", 2016.
- 13 D. R. Morrow et al., "Principles for Thinking About Carbon Dioxide Removal in Just Climate Policy", 2020.
- 14 C. L. Fyson et al., "Fair-share Carbon Dioxide Removal Increases Major Emitter Responsibility", 2020.

Pour aller plus loin

- CDR Primer (<https://cdrprimer.org/>)
- Forum Économique Mondial, "Net-Zero to Net-Negative: A Guide for Leaders on Carbon Removal", 2021.
- Energy Transitions Commission, "Mind the Gap: How Carbon Dioxide Removals Must Complement Deep Decarbonisation to Keep 1.5°C Alive", 2022.
- Royal Society, "Greenhouse Gas Removal", 2018.
- C2G, "C2G Evidence Brief: Carbon Dioxide Removal and its Governance", 2021.

Auteurs

François de Rochette^a, Eli Mitchell-Larson^b, Sylvain Delerce^c, Benjamin Tincq^{b,d}, Liam St Louis^b, Greg De Temmerman^{a,e}.

^aZenon Research, ^bCarbon Gap, ^cGET - CNRS/Université Toulouse 3, ^dMarble, ^eMines Paris PSL



Carbon Gap

www.carbongap.org

[www.twitter.com/CarbonGap](https://twitter.com/CarbonGap)



Zenon Research

www.zenon.ngo

www.linkedin.com/company/zenon-research

Remerciements

Les auteurs remercient Valérie Masson-Delmotte (LSCE, CEA) et Sabine Fuss (MCC) pour leur relecture et leurs suggestions.