

Manuel des émissions négatives

Novembre 2024



Table des matières

1 Résumé analytique 1

2 Introduction 6

3 Les concepts clés de l'élimination du carbone 10

- 3.1** Comptabilité 10
- 3.2** Captage et stockage du carbone(CSC) et utilisation (CCU) 16
- 3.3** Le cycle du carbone 19
- 3.4** Les mécanismes des marchés du carbone 23
- 3.5** Efficience de l'élimination du carbone 27
- 3.6** Modélisation 29
- 3.7** Suivi, déclaration, vérification, responsabilité (MRVL) 32
- 3.8** Permanence 35
- 3.9** Frontières planétaires 37
- 3.10** Séparation des activités et nécessité d'objectifs distincts 41
- 3.11** Situation de la législation et du cadre politique de l'UE 45

4 Méthodes d'élimination du carbone 51

- 4.1** Le biochar 54
- 4.2** La biomasse avec captage et stockage du carbone (Bio-CSC) 56
- 4.3** Le captage direct dans l'air avec séquestration du carbone (DACCS) 58
- 4.4** L'altération forcée 60
- 4.5** La reforestation et l'afforestation 62
- 4.6** La séquestration du carbone dans le sol 64

5 Glossaire 66



ABBREVIATIONS

BECCS	Bioénergie avec captage et stockage du carbone
Bio-CSC	Biomasse avec captage et stockage du carbone
C	Carbone
PAC	Politique agricole commune
CSC	Captage et stockage du carbone
CCU	Captage et utilisation du carbone
CDR	Élimination du carbone
CO₂	Dioxyde de carbone
CO₂e	Équivalent carbone
CRCF	Cadre européen de certification d'élimination du carbone
DACCS	Captage direct dans l'air avec stockage du carbone FEADER Fonds européen agricole pour le développement rural LEC Loi européenne sur le climat
UE	Union européenne
SEQE	Système d'échange de quotas d'émissions
EW	Altération forcée (AF)
BCAE	Bonnes conditions agricoles et environnementales
GES	Gaz à effet de serre
Gt	Gigatonne (10 ⁹ tonnes)
Gt C	Gigatonnes (10 ⁹ tonnes) de carbone
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ACV	Analyse du cycle de vie
UTCATF	Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie
MRVL	Suivi, déclaration, vérification, responsabilité
MWh	Mégawattheure
Mt	Mégatonne (10 ⁶ tonnes)
CDN	Contributions déterminées au niveau national
NEGEM	Projet de recherche NEGEM H2020
NETP	Technologies ou pratiques d'émissions négatives
ONG	Organisation non-gouvernementale
LRN	Loi sur la restauration de la nature
NZIA	Règlement pour une industrie « zéro net »
LM	Frontières planétaires
REDD+	Réduction des émissions provenant de la déforestation et de la dégradation des forêts dans les pays en développement et activités forestières supplémentaires visant à protéger le climat
SLO	Permis d'exploitation social
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques



Résumé analytique

L'Accord de Paris de 2015 établit au niveau mondial l'ambition de « parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle ». C'est ce que l'on appelle plus communément le « zéro émission nette de GES ». Pour atteindre les objectifs de neutralité carbone, une réduction substantielle des émissions brutes, de plus de 90 % à travers l'ensemble des secteurs (transport, énergie, déchets, industrie, AFOLU), sera nécessaire.

D'un point de vue réaliste, seule une petite quantité limitée d'élimination du carbone (CDR), définie comme l'élimination et le stockage permanent du dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique dans des réservoirs stables, peut être atteinte. Néanmoins, la CDR aura un rôle clé à jouer afin de contrebalancer les émissions résiduelles. Certaines solutions intègrent des technologies ou pratiques d'émissions négatives (NETP) qui renforcent des processus naturels ou emploient de nouvelles approches. Chaque méthode se distingue par son degré de maturité technologique, ses éventuelles limites physiques, sa dépendance aux ressources, ses effets indésirables et ses cobénéfices. Au vu de ces compromis et des défis liés à la permanence du stockage, à la responsabilité d'éventuelles inversions et aux limites de déploiement des systèmes d'élimination, un portefeuille diversifié s'avère indispensable. Aucune technologie ou pratique ne peut à elle seule permettre d'éliminer la quantité requise de CO₂ d'ici à 2050. En outre, se concentrer sur une méthode unique ou un éventail réduit de méthodes comporte des risques qu'il convient d'atténuer.

Ce manuel aborde une liste de concepts associés à la CDR et explore six NETP différentes : le biochar, la biomasse avec captage et stockage du carbone (Bio-CSC), le captage direct dans l'air avec stockage du carbone (DACCS), l'altération terrestre forcée, l'afforestation et la reforestation et la séquestration du carbone dans les sols. Il est destiné aux décideurs politiques, ONG, journalistes et membres de la population s'intéressant à l'encadrement politique de la CDR. Ainsi, il vise à fournir une synthèse solide des principes clés, concepts, technologies et pratiques qui sous-tendent la CDR.

Recommandations politiques clés

1

Adopter une définition solide de l'élimination du carbone, présentée comme l'extraction directe du CO₂ de l'atmosphère avec stockage permanent, étant entendu que la permanence correspond à plusieurs siècles au minimum. La quantité de CO₂ prélevée de l'air doit être supérieure à la quantité d'émissions de gaz à effet de serre (GES) libérées dans l'atmosphère dans le cadre de l'activité d'élimination, assurant ainsi une véritable élimination physique supplémentaire de l'atmosphère.

2

Respecter la hiérarchie : utiliser l'élimination permanente et la séquestration dans les sols comme des compléments aux réductions d'émissions, et non comme des substituts à la décarbonation. Les approches contributives doivent être privilégiées dans la mesure où placer élimination et réduction des émissions sur un pied d'égalité conduit à des allégations erronées, irréalistes et infondées.

3

Établir des objectifs et politiques réalistes, distincts et juridiquement contraignants pour la réduction des émissions, l'élimination permanente et la séquestration dans les sols. Les différences entre ces diverses activités doivent être reconnues et abordées afin d'éviter tout amalgame et de maximiser leur contribution à la résolution de la crise climatique.

4

Ventiler les objectifs de neutralité carbone par type d'émission de GES (en raison de leurs différences en termes d'impact climatique et de durée de séjour dans l'atmosphère), permanence de l'élimination/de la séquestration et risque de déstockage. Associer le type et la durée de séjour des émissions à des caractéristiques d'élimination correspondantes afin de contrebalancer efficacement ces dernières et de concevoir des feuilles de route efficaces pour atteindre la neutralité carbone.

Recommandations politiques clés

5



Mettre en œuvre des règles de comptabilité, méthodes de certification, mécanismes de responsabilité et exigences de durabilité solides pour la CDR à partir d'une étude minutieuse des implications et impacts afin d'assurer une élimination réelle et durable.

- Le système de suivi, déclaration et vérification (MRV) doit reposer sur une formule de quantification complète, en utilisant toujours les estimations les plus conservatrices et en tenant compte de toutes les émissions de GES (directes et indirectes) sur l'ensemble de la chaîne de valeur, à la fois au niveau national et à l'étranger, le cas échéant.
- Prévenir toute double comptabilisation et double revendication en attribuant des identifiants systématiques et uniques aux crédits vendus sur le marché privé ou à des pays tiers. Assurer le suivi des certificats d'élimination : veiller à ce que la certification soit accordée au moment de l'élimination et non avant.
- Établir des règles de responsabilité pour veiller à ce que les acteurs concernés soient tenus responsables des éventuelles inversions, ainsi que pour clarifier les transferts de responsabilité afin d'éviter la transmission d'une charge injuste aux générations futures.

6



Investir dans la recherche et le développement des méthodes de CDR et concevoir des mécanismes politiques permettant de mettre en œuvre et de promouvoir des obligations de transparence des données pour renforcer le transfert de connaissances international. Considérer les échecs comme des opportunités d'apprentissage et les points de départ de débats constructifs sur le déploiement optimal de portefeuilles de CDR. Pour éliminer les obstacles à un déploiement durable, concevoir des feuilles de route alternatives centrées sur la réduction des émissions, avec un recours limité voire minime à la CDR.

Recommandations politiques clés

7



Adopter une approche globale de la stabilité du système Terre, en développant des politiques alliant stabilisation du climat et préservation de la biosphère, en tenant compte de leur rôle fondamental dans la résilience du système Terre. Intégrer les transformations du système alimentaire en promouvant une évolution sociétale vers une alimentation plus végétale, qui libérerait des terres pour la restauration de la nature et la production durable de biomasse.

8



Déployer une combinaison de plusieurs méthodes de CDR :

- Adopter un portefeuille diversifié de NETP afin d'en assurer un déploiement réaliste et utile. Prioriser le déploiement des méthodes de CDR en fonction de leurs cobénéfices, plutôt qu'en se concentrant sur l'élimination du carbone.
- Adopter des portefeuilles propres à chaque pays, s'inscrivant dans des trajectoires d'émissions négatives réalistes et responsables pour l'UE. Dans ce cadre, prendre en compte les spécificités nationales et privilégier une approche fondée sur une offre durable plutôt qu'une vision axée sur la demande. Alléger la pression sur les ressources limitées en assurant une affectation efficace entre les activités d'atténuation.

9



Promouvoir la coopération internationale en matière de politique d'atténuation du changement climatique afin d'encourager le recours à des ressources bio-géophysiques régionales et la prise en compte des facteurs socio-économiques, tout en contrebalançant les inégalités de répartition du potentiel de CDR à travers le monde, et en intégrant la responsabilité historique.

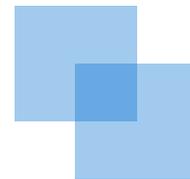
Recommandations politiques clés

10



Considérer la CDR comme un bien public et intégrer les questions environnementales et sociales à l'ensemble du processus de décision politique, en accordant une attention particulière à la consultation de la population, à la transparence, à la solidité de la gouvernance, aux droits de l'homme et à la transition juste. Impliquer les communautés dans les projets de CDR dès leur conception, définir clairement les acteurs concernés et processus de prise de décision, et établir des mécanismes de réclamation. Respecter les principes fondamentaux du droit de l'environnement international et européen, comme les principes de précaution, de DNSH (do no significant harm, ou « absence de préjudice important ») et du pollueur-payeur. Suivre la limite de 1,5 °C établie par l'Accord de Paris.

Introduction



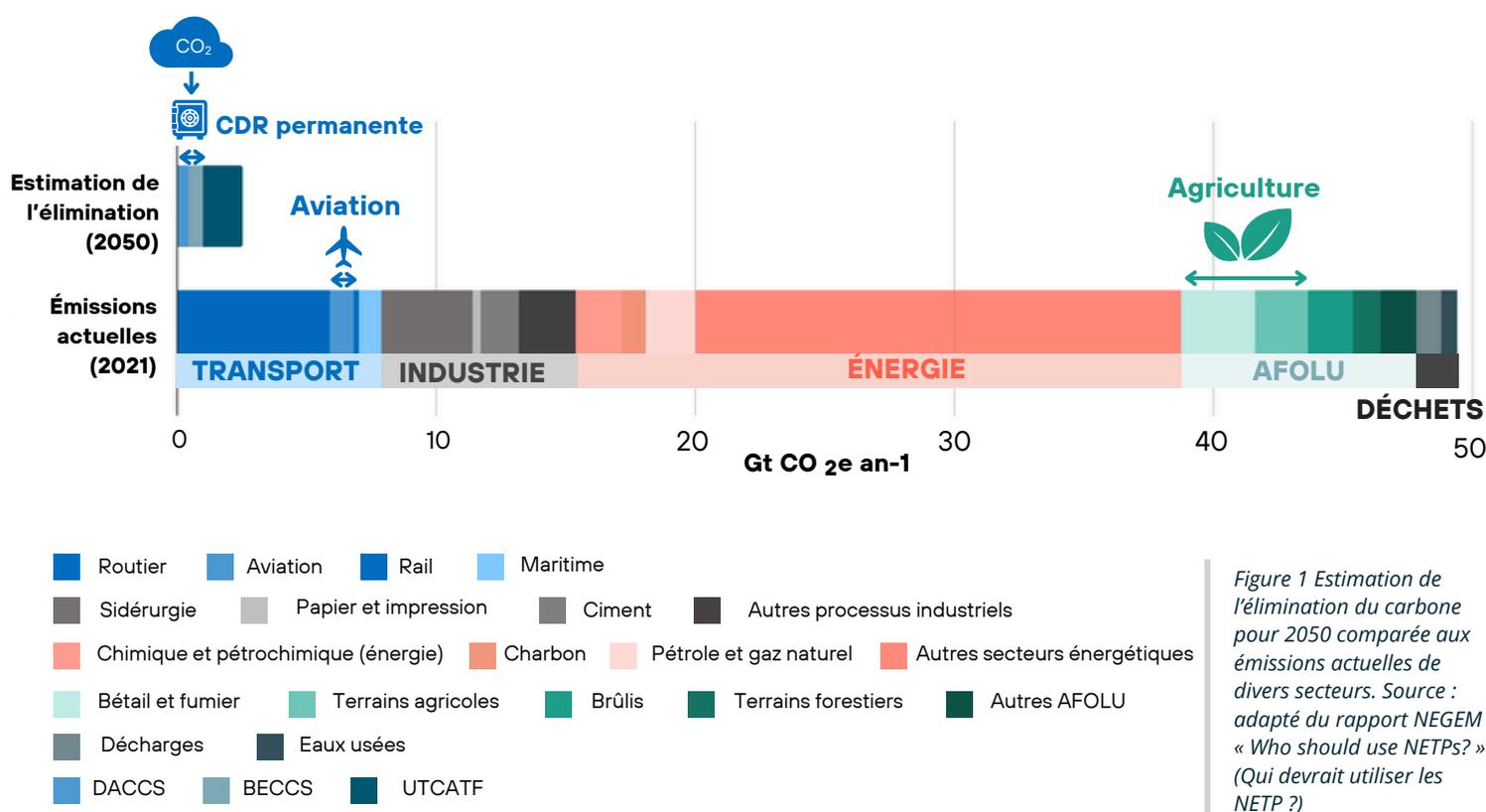
La CDR en bref

L'élimination du carbone (CDR) consiste à extraire physiquement du dioxyde de carbone (CO₂) déjà présent dans l'atmosphère et à le stocker de manière permanente, par exemple dans des formations géologiques. Il existe une multitude de méthodes de CDR, parmi lesquelles celles offrant un stockage à long terme et une faible vulnérabilité sont généralement désignées sous le nom d'élimination par géo-ingénierie ou d'élimination technologique. Le dioxyde de carbone peut également être stocké via des processus naturels, dans des écosystèmes tels que les forêts, les zones humides et les prairies, qui agissent comme des puits naturels de carbone. Néanmoins, ces processus sont fortement exposés au risque de perturbation humaine et naturelle, exigeant une gestion constante, et restent vulnérables à la perte du carbone stocké, ce qui en fait davantage des formes de stockage temporaires. Cependant, la séparation traditionnelle entre méthodes d'élimination biogéniques et technologiques est illusoire, car certaines solutions technologiques comme l'utilisation de biomasse avec captage et stockage du carbone (Bio-CSC) et l'altération terrestre forcée (TEW) comportent des aspects naturels. Il convient de noter que la génération d'émissions négatives au travers du cycle biologique du carbone peut donner lieu à des bénéfices supplémentaires tels que la préservation de la biodiversité et la santé des sols.

Malgré toutes les incertitudes qui planent autour des différents concepts d'élimination, le GIEC a déterminé que la CDR s'avérait inévitable pour atteindre l'objectif de température de 1,5 °C, avec un dépassement faible voire nul, et celui de zéro émission nette de gaz à effet de serre (GES). Le GIEC attribue à la CDR les rôles suivants :

- 1** Avant la neutralité carbone, compléter les efforts de réduction des émissions et accélérer l'atténuation du changement climatique.
- 2** Atteindre le zéro émission nette en compensant les émissions résiduelles de CO₂ et de GES hors CO₂.
- 3** Dépasser les émissions annuelles de GES et parvenir à des émissions « nettes négatives » à l'échelle mondiale afin de faire baisser la température globale.

Conformément à la hiérarchie de l'atténuation, la réduction des émissions doit rester la priorité, et il est essentiel d'éviter tout recours excessif à la CDR qui risquerait de saper les efforts de décarbonation. En outre, les émissions doivent être réduites d'au moins 90 % pour parvenir à un équilibre avec la quantité probablement limitée de CO₂ extraite de l'atmosphère, une situation appelée « neutralité carbone » (voir Figure 1 concernant les estimations d'offre et de demande de CDR). Dans l'Union européenne, la loi sur le climat stipule que l'Union doit atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050 au plus tard, tout en reconnaissant qu'il s'agit d'un objectif temporaire et intermédiaire. L'objectif ultime est d'atteindre une situation « d'émissions négatives », où les volumes de CO₂ extraits de l'atmosphère seraient supérieurs aux volumes de GES émis.



Il est également essentiel de définir comment seront gérées les émissions résiduelles, celles dont l'élimination complète est la plus difficile. Au vu de la capacité limitée de la CDR, son rôle doit être limité à la compensation de ces dernières émissions. Toute la problématique réside dans la définition de ce qui peut être qualifié d'émissions résiduelles. Quelles activités considérons-nous, en tant que société, trop précieuses pour être supprimées, malgré leurs impacts climatiques ? Si aucun secteur n'est impossible à décarboner, la vision de ce qui peut être considéré comme une émission résiduelle peut varier en fonction de la disponibilité technologique, des besoins sociétaux ou des conditions économiques à tout moment. Pour éviter toute dissuasion de l'atténuation, une définition stricte des émissions résiduelles est donc nécessaire.

De nombreuses incertitudes entourent la CDR, principalement en raison des limites physiques de l'environnement naturel, de la nécessité de recourir à des ressources durables, ainsi que des contraintes technologiques, économiques et sociales. Ainsi, il existe un déséquilibre entre la « demande » et « l'offre » potentielles de CDR, ce qui réduit significativement la probabilité d'un déploiement à grande échelle. Si un portefeuille diversifié de méthodes de CDR doit être mis en place, il est également probable que les capacités et ressources des pays varient, entraînant une répartition inégale de la capacité à éliminer le carbone de l'atmosphère de manière rentable. Cela doit être associé à l'idée selon laquelle, en raison de leurs capacités financières plus élevées et de leurs émissions historiques de gaz à effet de serre, certains pays doivent assumer une responsabilité plus importante si l'on souhaite une action climatique équitable. Toutefois, pour atteindre la neutralité carbone à l'échelle globale, la CDR doit être considérée comme un bien public : la réduction de la concentration de GES dans l'atmosphère bénéficie à tous, tandis que son augmentation nuit à l'ensemble de la planète.

Principes clés de la CDR

Une définition solide de ce qui constitue la CDR est essentielle pour parvenir à une réduction nette des concentrations de CO₂ de l'atmosphère et à l'extraction d'une quantité de carbone plus importante que le volume de GES émis par l'activité d'élimination elle-même. Voici quatre principes établis par [Tanzer and Ramirez](#), pour expliquer ce qui devrait être considéré comme de la CDR :

- 1** Le CO₂ est extrait physiquement de l'atmosphère.
- 2** Le CO₂ extrait de l'atmosphère est stocké de manière permanente, sans retourner dans l'atmosphère.
- 3** Toutes les émissions de gaz à effet de serre associées aux processus d'élimination et de stockage sont estimées et incluses dans leur intégralité.
- 4** La quantité de CO₂ issu de l'atmosphère stocké de manière permanente est supérieure au volume de GES émis durant les processus d'élimination et de stockage et tout au long de leurs chaînes de valeur.

Le carbone extrait peut être stocké dans divers types de réservoirs, qui peuvent généralement être classés en catégories : « biologiques » (végétation, sols, sédiments), « géochimiques », « géologiques » et « océaniques ». Des différences fondamentales séparent ces moyens de stockage, en termes de stabilité des réservoirs, de facilité à quantifier et surveiller le CO₂ stocké, de niveau de gestion et de maintenance requis, et d'attribution de responsabilités en cas de déstockage du carbone.

Objectifs du manuel de CDR

L'objectif de ce manuel est de rendre la CDR accessible aux décideurs politiques, ONGs, journalistes et autres acteurs intéressés. Il vise à renforcer les connaissances en matière de CDR, à aider les personnes situées au cœur de l'élaboration des politiques à distinguer ce qui constitue ou non une véritable élimination du carbone, à comprendre les limites de sa faisabilité et de son déploiement à grande échelle, et à formuler des recommandations politiques clés pour assurer un déploiement durable de la CDR sur la voie de la neutralité carbone et au-delà.

Ce manuel est divisé en deux parties : la première traite de divers concepts liés à la CDR, tandis que la seconde passe en revue les différentes NETP de manière attrayante, en abordant les points clés, les avantages et inconvénients, les contraintes, les projets de recherche à venir et les recommandations propres à chaque NETP.

Les concepts clés de l'élimination du carbone

Comptabilité et additionnalité

Une comptabilité précise et solide du carbone s'avère essentielle afin de pouvoir déterminer l'élimination nette et évaluer les impacts environnementaux. Si la comptabilité peut sembler simple en principe, la complexité des systèmes de CDR, le spectre des émissions associées et les nombreux cobénéfices ou impacts possibles soulèvent de nombreux défis.

Ces problèmes peuvent être résolus par l'élaboration de cadres basés sur la science établissant une comptabilité claire pour les différents types de capture et de stockage et améliorant la qualité des données.

La séparation des cadres de comptabilité réduit le risque de dissuasion de l'atténuation (lorsque l'élimination est exploitée pour ralentir les efforts de décarbonation) et de fausse équivalence entre réduction des émissions et élimination.

Il est important de définir des limites adéquates et exhaustives, dans la mesure où elles détermineront quelles émissions sont prises en compte (comme les émissions se produisant en aval) ou non, et qui en est responsable.

La comptabilité et la certification doivent se produire au même moment que le stockage du carbone, afin de veiller à ce que toute dette de carbone soit également prise en charge au moment du stockage. Cela s'avère particulièrement important pour les solutions fondées sur la biomasse (p. ex. la Bio-CSC) ou pour les puits non-permanents nécessitant une gestion continue des stocks de carbone (p. ex. gestion forestière).

Qu'est-ce que la comptabilité carbone ?

La comptabilité carbone vise à quantifier et à suivre les flux de carbone d'un système donné. Elle associe science physique et responsabilité climatique en clarifiant les indicateurs, méthodes, juridictions et responsabilités, afin d'assurer le suivi des progrès effectués sur les objectifs climatiques et ambitions de neutralité carbone.

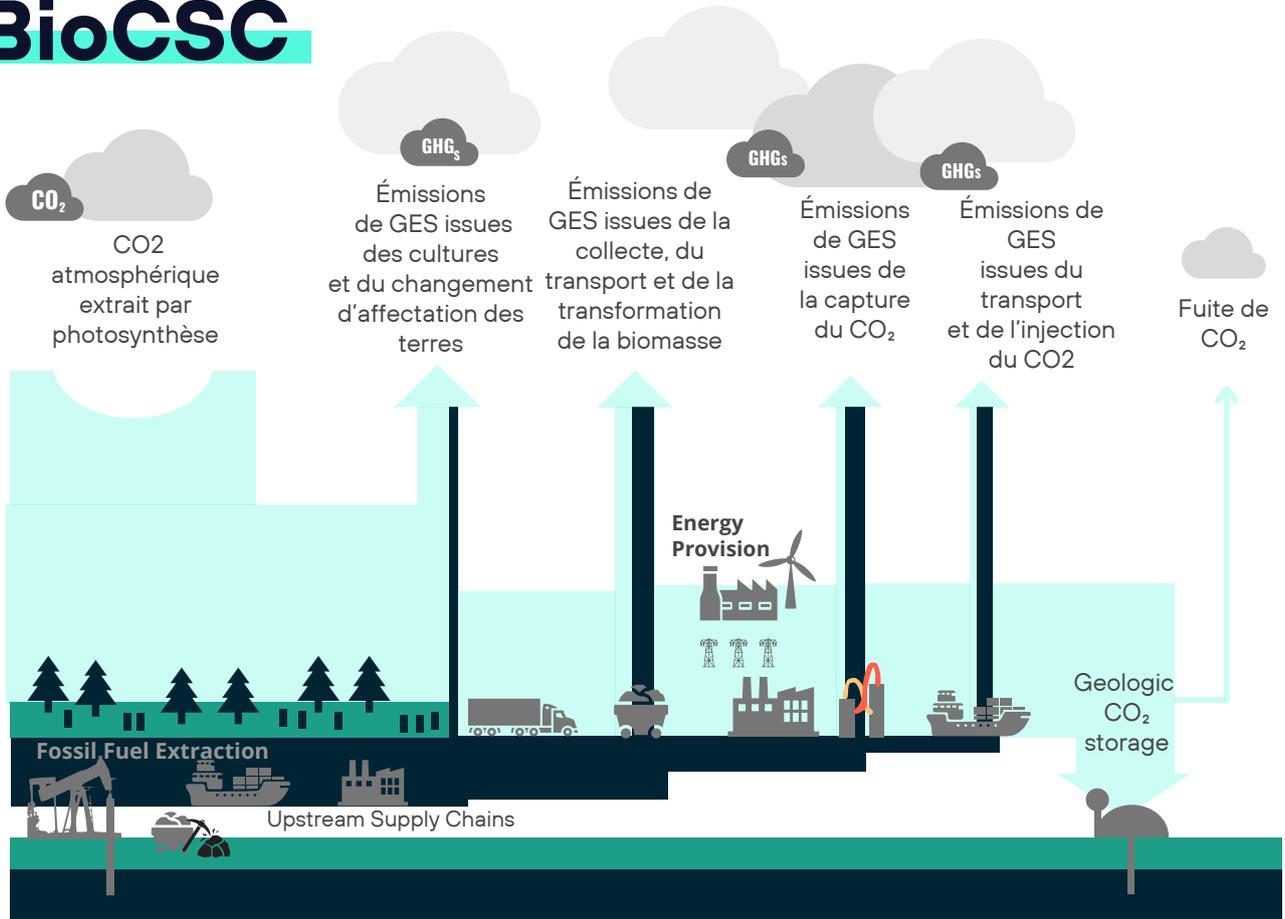
La comptabilité des émissions de GES est une pratique courante pour les pays signataires de la CCNUCC, mais également pour un nombre croissant d'entreprises et autres entités, afin de répondre à leurs obligations déclaratives au titre de la Directive CSRD ([Directive européenne 2022/2464](#)). Les émissions de GES sont comptabilisées selon une approche territoriale ou « par produit ». La comptabilité territoriale donne lieu à un inventaire des émissions de GES (voir [« Source »](#) et [« Puits »](#)) d'un pays ou d'une juridiction nationale. Les émissions peuvent être calculées directement sur leur lieu de production, par exemple sur la cheminée ou le conduit d'un point source, à partir des bilans massiques (p. ex. évolution des stocks de carbone à la suite d'un changement d'affectation de terres) selon des modèles empiriques ou en appliquant les facteurs d'émissions correspondants.

Pourquoi la comptabilité carbone est-elle pertinente pour la CDR ?

L'intérêt climatique de l'élimination du carbone réside dans l'extraction de CO₂ de l'atmosphère et son stockage permanent, réduisant la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Cela signifie que toute méthode de CDR doit extraire physiquement et stocker davantage de CO₂ que le processus d'élimination et de stockage n'émet de GES ([voir également l'introduction pour les quatre principes clés qui définissent la CDR](#)).

La certification de CDR doit donc uniquement comptabiliser les méthodes d'élimination réelles, qui conduisent à des émissions négatives. La certification de toute méthode de CDR doit reposer sur une comptabilité carbone exhaustive et solide afin de garantir que la quantité nette de CO₂ extrait de l'atmosphère soit correctement quantifiée, « du berceau au tombeau ». Ainsi, le budget carbone du système sera complet, de la source au puits. Cela implique que les flux de carbone soient suivis et enregistrés depuis toute émission en amont avant l'extraction atmosphérique et la capture (berceau), jusqu'au stockage (tombeau), en passant par les émissions directes et indirectes pouvant être occasionnées par l'utilisation de combustibles fossiles ou un changement d'affectation de terres. Toute fuite de carbone le long de la chaîne de valeur et à la suite d'un déstockage doit également être prise en compte (Figure 2). Ce type de comptabilité carbone au niveau du projet est appelé « analyse de cycle de vie ».

BioCSC



Biochar

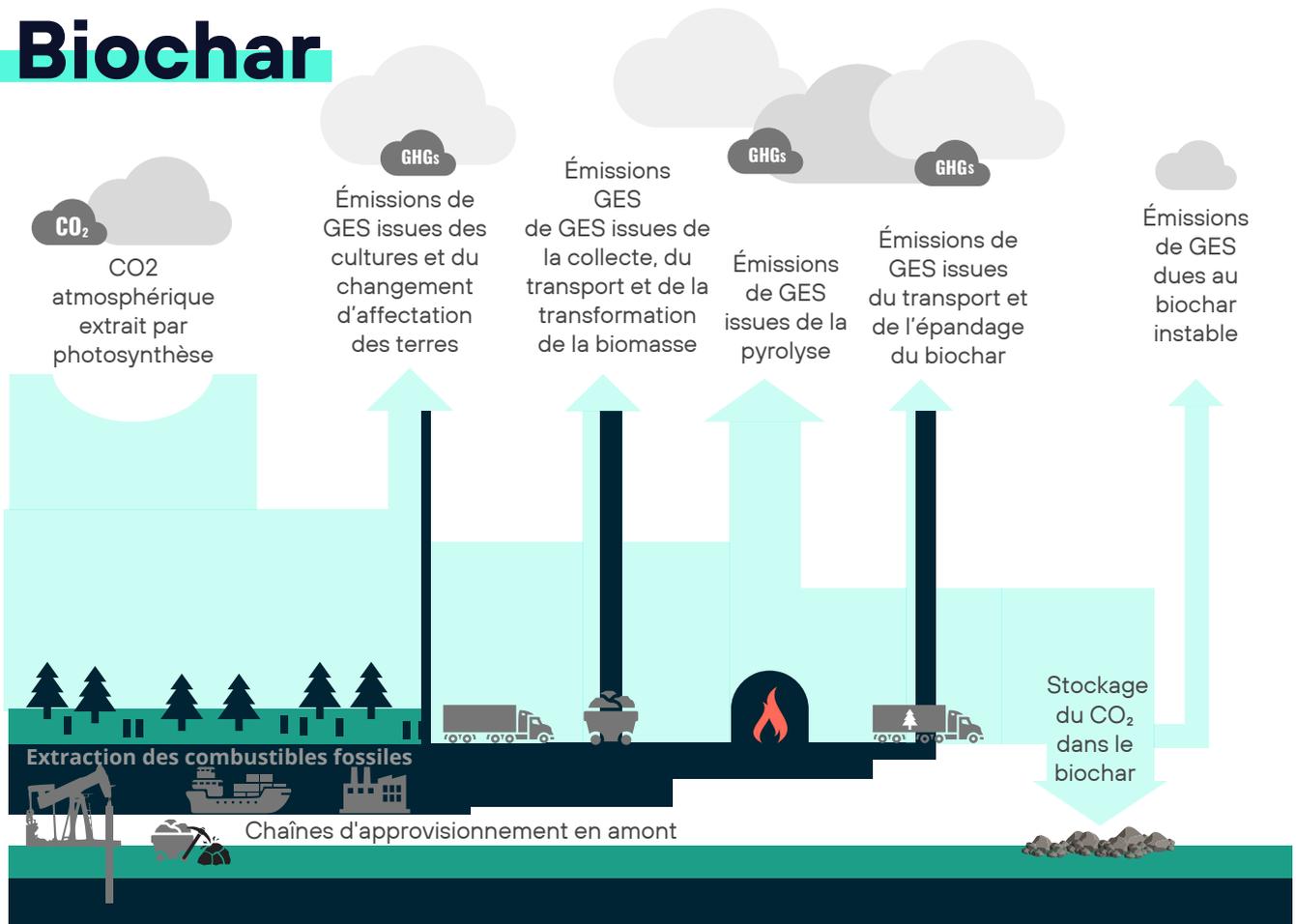


Figure 2 Deux exemples de systèmes de CDR pour la Bio-CSC (en haut) et le biochar (en bas), définissant la source, le puits et le système. Les sources d'émissions de combustibles fossiles et fuites de CO₂ capturé tout au long de la chaîne de valeur sont également identifiées. Figure adaptée de Tanzer et al. 2022.

En voici les principaux risques :

- **Surestimation du carbone extrait et stocké.** Ce risque peut être atténué en standardisant les protocoles de comptabilité pour différentes méthodes. Cela implique que des données empiriques de bonne qualité, idéalement issues de mesures directes quantifiant les taux de captage et de stockage, soient collectées pour chaque projet et chaque site. En outre, les éliminations doivent uniquement être comptabilisées après leur exécution physique.
- **Sous-estimation des émissions associées.** Ce risque peut être atténué en définissant de manière exhaustive les éléments du système de CDR pris en compte tout au long de la chaîne de valeur. Pour l'extraction biogénique du CO₂, bien que la portée de chaque système ne puisse pas être généralisée, au vu de la nécessité d'une approche « du berceau au tombeau », les méthodes de comptabilité carbone devraient viser une vision large et systémique des émissions associées au système de captage et de stockage lui-même.
- **Négligence du risque de déstockage.** Ce risque peut être atténué en distinguant les puits en fonction du risque de déstockage qu'ils présentent. Cela signifie que les puits biogéniques, dont le risque de déstockage est élevé, seront comptabilisés séparément des puits géologiques, qui sont plus sûrs et offrent une durée de stockage supérieure à 100 000 ans. Il sera aussi probablement nécessaire d'élaborer des instruments politiques distincts pour chaque type d'élimination (voir également « Séparation des activités et nécessité d'objectifs distincts »).

Une fois la quantité nette de carbone éliminé établie, il sera possible de lui attribuer une valeur ou un crédit pouvant être utilisé dans un système de certification, et, par exemple, pour contrebalancer les émissions résiduelles. Une comptabilité systémique du carbone est également requise pour déterminer qui a le droit de revendiquer une élimination. En fonction de l'approche de comptabilité adoptée, il peut s'agir d'un pays (approche territoriale) ou d'une entité commerciale ou publique.

Dans la comptabilité du cycle de vie, les émissions et éliminations sont attribuées au système lui-même, permettant d'estimer précisément l'élimination nette totale du projet. Cependant, un système technologique ne constitue pas un acteur fiable. Dans la comptabilité territoriale, les émissions et extractions sont attribuées à des acteurs fiables (les États). En revanche, il n'est pas possible de déterminer à partir de la comptabilité sectorielle annuelle si un système de CDR en particulier a conduit à une élimination nette, et toutes les émissions de ce système de CDR ne peuvent pas être affectées à un acteur responsable.

La comptabilité du cycle de vie comme la comptabilité territoriale prennent en compte le facteur temps d'une manière pouvant fausser la perception du moment où les émissions et les éliminations se produisent. Dans la comptabilité territoriale, les émissions et extractions sont comptabilisées durant l'année où elles se sont produites ; le CO₂ intégré à de la biomasse étant comptabilisé comme une élimination durant sa croissance, comme une émission lors de sa récolte, et une nouvelle fois comme une élimination lors de sa capture à des fins de stockage géologique. En outre, les émissions liées à l'utilisation des terres étant comptabilisées dans l'évolution totale des stocks de carbone durant une année donnée, il n'est pas possible de mesurer précisément le temps de croissance spécifique et la vitesse d'absorption du carbone de la biomasse utilisée dans un système de Bio-CSC.

Le cadre de la CCNUCC est centré sur les bilans annuels d'émissions. Par conséquent, si les extractions/émissions de biomasse à rotation longue ou si de la biomasse est récoltée, utilisée et/ou stockée ou si les chaînes d'approvisionnement associées se produisent d'autres années, il ne sera pas possible d'établir un inventaire unique rendant compte des émissions nettes totales associées au système de Bio-CSC. L'analyse du cycle de vie, quant à elle, se concentre sur le seul indicateur de « l'équivalent CO₂ », occultant également tout décalage temporel. Des facteurs d'émissions intégrant le potentiel de réchauffement planétaire du séjour temporaire du CO₂ biogénique dans l'atmosphère (jusqu'à la repousse de nouvelle biomasse) ont été proposés pour la biomasse mais restent peu utilisés et n'établissent pas non plus une transparence totale en termes de temporalité.

Défis à relever pour une comptabilité carbone précise et cohérente

- Les pays ou secteurs ne sont pas tous soumis aux mêmes règles de comptabilité (signataires/non signataires de l'annexe 1), ce qui peut générer des failles. Dans la comptabilité du CO₂ biogénique, par exemple, la biomasse utilisée dans les applications de bioénergie « compte pour 0 ». En effet, le CO₂ est comptabilisé comme émis lors de la récolte dans le secteur UTCATF. Ainsi, sur le papier, tout CO₂ biogénique capté génère des émissions négatives.
- Une comptabilité transfrontalière entre les pays sera nécessaire, les différentes étapes d'un système de CDR étant souvent réparties sur plusieurs territoires. Le CO₂ capté (sous forme liquéfiée, issu de biomasse ou d'autres matériaux) peut nécessiter un transport par bateau ou pipeline jusqu'aux sites de stockage finaux ou pour une autre étape de traitement.
- Dans certaines méthodes de CDR, le stockage du CO₂ est extrêmement dispersé, ou les processus de capture sont lents et fastidieux à suivre. L'incertitude quant à la quantité de carbone capturée et stockée est donc plus élevée.

- Si des matériaux partiellement recyclés et des déchets mixtes contenant du carbone d'origine biogénique et fossile sont utilisés, il devient plus difficile d'établir avec précision la source des émissions de carbone et si une élimination nette de CO₂ a réellement eu lieu.

Les systèmes d'élimination du carbone doivent prouver que l'élimination n'aurait pas eu lieu sans le projet concerné. Ce principe d'additionnalité signifie que les activités s'ajoutent à ce qui est requis conformément aux pratiques habituelles, aux exigences réglementaires, aux activités de marché, ou à des processus naturels qui se serait produit de toute façon. Cela correspond aux différentes catégories d'additionnalité, définies ci-dessous :

Additionnalité physique : L'activité entraîne une élimination physique de carbone en supplément de la situation de base. Le carbone stocké dans un puits naturel sans intervention humaine ne peut être revendiqué pour obtenir des crédits carbone. En outre, dans une élimination du carbone, l'additionnalité du projet doit également être démontrée au-delà de son territoire afin de garantir que les émissions ne soient pas simplement transférées d'une région à une autre. Ce type d'additionnalité est essentiel et peut être utilisé pour améliorer les inventaires de GES.

Additionnalité financière : L'activité entraîne des dépenses supplémentaires pour parvenir au stockage du carbone, plutôt que de simplement reposer sur des activités financières passives ou en cours. Des flux financiers liés au carbone ont été nécessaires pour rendre cette activité économiquement viable. Ce type d'additionnalité est secondaire et utilisé pour associer des flux financiers donnés à un résultat climatique spécifique.

Additionnalité réglementaire : L'activité entraîne un stockage de carbone supérieur à ce qu'exigent les pratiques habituelles et les normes réglementaires en vigueur. Ce type d'additionnalité est secondaire et utilisé pour garantir que les financements carbone accordés à l'activité lui permettent d'avoir lieu.

L'additionnalité doit être prouvée à tous ces égards afin d'éviter toute attribution excessive de crédits à des activités d'élimination ou de réduction des émissions, et doit être établie à partir d'un niveau de référence. L'additionnalité est la mesure de l'avantage climatique supplémentaire apporté par une activité certifiée, par rapport aux impacts qui auraient de toute façon eu lieu, p. ex. une forêt ou des sols qui ont dû être restaurés dans le cadre de la législation sur la protection de la nature et les systèmes de subventions existants. Pour calculer l'additionnalité physique, il est essentiel de disposer de situations de base précises. Dans l'idéal, celles-ci devraient tenir compte de la situation environnementale locale et de la variabilité au niveau du projet avec exigences standardisées en termes de mesure, de déclaration et de vérification.

Captage et stockage du carbone (CSC) et utilisation (CCU)

Le captage et utilisation du carbone (CCU) et le captage et stockage du carbone (CSC) sont souvent confondus et présentés à tort comme des formes de CDR. Le CSC et le CCU sont des systèmes technologiques visant à réduire ou retarder l'émission de CO₂ dans l'atmosphère. Leur rôle en matière d'atténuation du climat est différent de celui de la CDR, qui élimine le CO₂ de l'atmosphère et le stocke de manière permanente. Ces différentes activités doivent donc être clairement distinguées les unes des autres.

En stockant du CO₂ de manière permanente, le CSC (et certains systèmes de CCU) peuvent permettre d'éviter que le CO₂ émis par une installation industrielle n'atteigne l'atmosphère et d'atténuer les émissions de secteurs où les alternatives de décarbonation sont rares voire inexistantes. Pour le CCU, l'avantage climatique provient de la réduction des émissions si les produits du CCU remplacent d'autres produits équivalents générant davantage d'émissions durant leur cycle de vie.

Le CSC et le CCU sont des processus gourmands en énergie qui risquent d'accroître le coût tout en réduisant l'efficacité globale du système concerné. Par rapport à un système sans captage du carbone, un système impliquant un captage du carbone requiert de l'énergie et des matériaux supplémentaires pour parvenir au même produit fini.

Le CO₂ capté est soit utilisé in situ (dans la même zone industrielle), soit transporté pour être stocké ou réutilisé dans un processus industriel, ce qui exige une infrastructure de transport de CO₂ fiable et coûteuse. Cela peut également conduire à une augmentation des émissions associées et des coûts d'infrastructure.

Comme avec la CDR, toutes les émissions de la chaîne de valeur de CSC et CCU doivent être calculées et prises en compte, en incluant la source et la destination finale du CO₂.

Qu'est-ce que le CSC et le CCU ?

Le captage et stockage du carbone (CSC) consiste à capturer le CO₂ puis à le compresser et à le stocker dans des formations géologiques ou par minéralisation, entraînant un stockage permanent hors de l'atmosphère pouvant potentiellement perdurer plusieurs milliers d'années. Dans le captage du carbone avec utilisation (CCU), le CO₂ est capté et utilisé directement ou indirectement dans des produits ou processus industriels. Depuis 2009, le stockage de CO₂ est réglementé en UE par la directive relative au stockage géologique du dioxyde de carbone (appelée directive CCS) et peut être utilisé pour éviter l'achat de quotas d'émissions dans le cadre du SEQUE (Système d'échange de quotas d'émissions, ou ETS selon son acronyme anglais), s'il est mis en place dans le cadre d'une installation conforme au SEQUE-UE. Les installations industrielles intégrant le CCU doivent toujours obtenir des allocations pour le CO₂ généré, sauf si le CO₂ est utilisé de telle manière qu'il soit chimiquement lié à un produit de manière permanente, à la fois pendant son utilisation et à la fin de sa vie utile.

Le CCU est également en partie réglementé par la directive relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, qui promeut les combustibles renouvelables d'origine non-biologique et les combustibles produits à partir de CO₂ capté. Néanmoins, il n'existe pour l'heure aucun cadre réglementaire portant sur l'ensemble de la chaîne de valeur. La Commission européenne prévoit de lancer certaines initiatives législatives pour y remédier. Il est important de noter que le règlement pour une industrie « zéro net » (NZIA) établit un objectif de capacité d'injection de stockage de CO₂ de 50 Mt par an d'ici à 2030, obligeant les producteurs de gaz et de pétrole européens à développer ce type de sites de stockage. En outre, le NZIA cite le CSC, le CCU et le transport de CO₂ comme des « technologies net zéro » et appelle la Commission à élaborer un cadre législatif sur un marché potentiel du CO₂ capté. Enfin, la Communication sur la gestion industrielle du carbone souligne le rôle que la capture du carbone doit jouer pour permettre à l'UE d'atteindre ses objectifs de neutralité carbone, ainsi que la nécessité d'une infrastructure de transport et de stockage du CO₂ qui soit non-discriminatoire, en accès libre, transparente, multimodale et internationale.

Pourquoi le CCU et le CSC sont-ils pertinents pour la CDR ?

Le CCU et le CSC sont souvent confondus et considérés à tort comme des formes de CDR. Il est essentiel de les distinguer clairement afin de refléter l'impact climatique et de clarifier au maximum les bénéfices climatiques de ces différentes mesures.

Le CSC et le CCU sont des processus ou des méthodes, tandis que la CDR est le résultat de méthodes spécifiques allant de la source au puits. Le CSC et le CCU ne peuvent faire partie d'un système de CDR qu'à la condition que la source du CO₂ soit atmosphérique (DACCS et DACCU) ou biogénique (Bio-CSC ou Bio-CCU). Il n'y a élimination qu'à condition que le carbone capté soit stocké de manière permanente.

Avec la CDR basée sur le CSC, le carbone est stocké dans des réservoirs géologiques pendant plusieurs siècles au minimum, tandis que la CDR basée sur le CCU peut conduire au stockage dans des produits avec une permanence allant de quelques jours à quelques décennies, en fonction de l'utilisation spécifique et des possibilités de recyclage du produit en question. Ainsi, la durée de stockage du carbone offerte par le CCU est généralement plus courte que la durée de vie atmosphérique du carbone, et n'est donc pas permanente.

Le CSC et le CCU issus de sources industrielles ou fossiles n'extraient pas les émissions passées de l'air mais préviennent les nouvelles. Certaines technologies actuelles permettent techniquement de [capturer plus de 90 à 95 % du CO₂ émis par l'échappement de l'émetteur](#). Le premier obstacle à une exploitation commerciale est économique : tout pourcentage supplémentaire capturé conduit à une augmentation non-linéaire des coûts. En effet, ces méthodes sont très gourmandes en énergie, le CSC consommant généralement de 1 à 3 MWh/tonne de CO₂, augmentant les coûts du système et réduisant l'efficacité globale, dans la mesure où davantage d'énergie est requise pour obtenir le même résultat. L'essentiel de la pénalité énergétique provient du captage du carbone, ou plus précisément des processus de séparation du carbone de la composition de gaz. Capturer le carbone de l'atmosphère requiert donc davantage d'énergie que depuis les gaz d'échappement industriels, où les concentrations sont plus élevées.

Le carbone capté peut être transporté pour stockage (CSC) ou une utilisation industrielle ultérieure, ou utilisé in situ dans la zone industrielle (CCU). Cela exige une infrastructure de transport de CO₂ robuste et coûteuse, avec des pipelines, des cargos, du transport routier et/ou ferroviaire, qui peuvent impliquer des émissions et pertes d'efficacité significatives au vu des distances potentiellement importantes entre les émetteurs et les sites de stockage.

En ce sens, toutes les émissions de la chaîne de valeur de CSC et CCU doivent être calculées et prises en compte, ce qui n'est pas une tâche aisée. En outre, les sites de stockage doivent être étroitement surveillés et des mécanismes de responsabilité mis en place en cas de fuite. L'UE a prévu un tel mécanisme de responsabilité dans la directive CSC.

Le CSC et certaines activités de CCU de sources fossiles ou industrielles comme les produits carbonés qui lient le carbone chimiquement de manière permanente dans des conditions normales d'utilisation et de fin de vie peuvent conduire à une réduction des émissions. De fait, le principal avantage climatique du CSC réside dans la gestion des émissions de processus des applications industrielles. Si les incitations sont mal conçues, le CO₂ capté pourrait à la place être utilisé pour extraire davantage de combustibles fossiles, une pratique appelée récupération assistée du pétrole ou du gaz et courante aux États-Unis.

La clarté quant à la terminologie et une comptabilité solide peuvent contribuer à dissiper toute ambiguïté quant à l'impact climatique du CSC et du CCU en fonction de la source du carbone et de sa destination finale. Si le CSC n'est pas une solution miracle, il peut être envisagé dans les cas où les autres possibilités de réduction des émissions s'avèreraient technologiquement difficiles ou impossibles. Utilisé de manière ciblée, le CSC a un rôle clé à jouer dans la transition verte et juste de l'Europe, en permettant à ces secteurs importants pour l'économie et le système social de s'inscrire dans un monde neutre en carbone. À long terme, des réseaux d'infrastructures de transport et de stockage du CO₂ seront également nécessaires pour certaines méthodes de CDR, indispensables pour atteindre nos objectifs climatiques.



Le cycle du carbone

Les flux de carbone étant fortement interconnectés dans la nature, tout changement tel que l'ajout ou le retrait de carbone dans l'atmosphère entraînera des répercussions sur d'autres maillons du cycle du carbone. De la même manière que les océans et les puits terrestres absorbent actuellement le CO₂ atmosphérique excédentaire, l'inverse pourrait également se produire si les concentrations de CO₂ diminuent.

Qu'est-ce que le cycle global du carbone ?

Le cycle global du carbone désigne le réseau complexe de réservoirs de carbone, souterrains, sur terre, dans les océans et dans l'atmosphère, et les flux de carbone qui les relient. Plus de 37 000 Gt de carbone (GtC) sont stockées dans les océans, 1 700 GtC dans les sols et 400 GtC dans la végétation. 900 GtC supplémentaires sont abritées dans les réserves de carbone fossiles (gaz naturel, pétrole et charbon) de la croûte terrestre, et environ 885 GtC dans l'atmosphère (voir Figure 3).

Les réservoirs de carbone géochimiques tels que les roches minérales et les processus associés tels que l'altération naturelle des roches sont souvent appelés « cycle lent du carbone », l'échange de carbone s'étendant sur des périodes pouvant aller de plusieurs milliers à quelques millions d'années. À l'inverse, avec les réservoirs biogéniques ou les processus biologiques tels que la photosynthèse, la durée de l'échange de carbone s'exprime en jours ou semaines, c'est pourquoi on parle souvent de cycle « rapide » du carbone.

Le carbone est contenu dans diverses formes chimiques :

- Le carbone organique présent dans la biomasse vivante et morte, dans les océans, sur terre et dans les sols
- Les gaz comme le méthane et le dioxyde de carbone, dans l'atmosphère
- Les minéraux tels que les roches contenant du carbonate, y compris en sous-sol

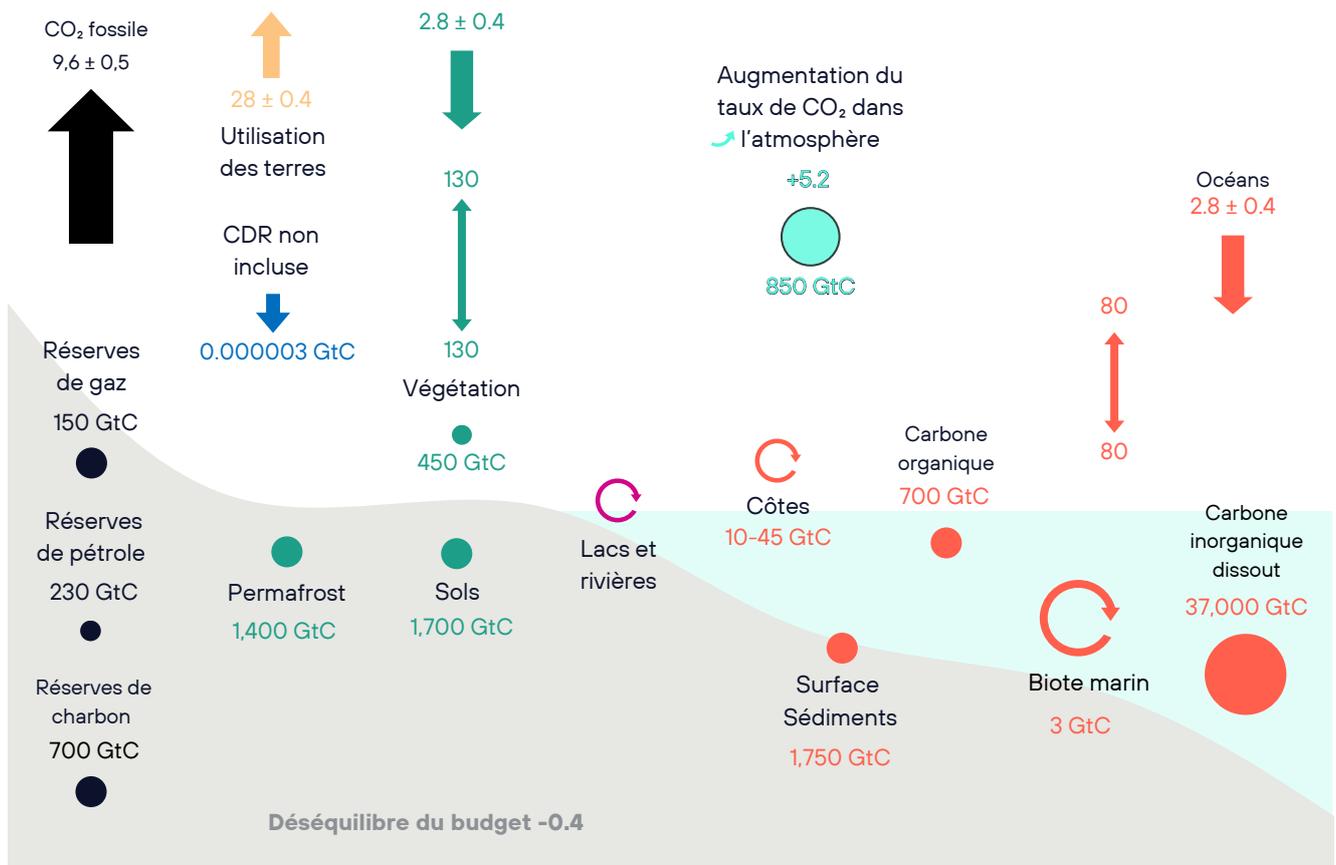
Des processus géochimiques, biologiques et chimiques transfèrent le carbone entre les différents réservoirs comme sources et puits de carbone vers l'atmosphère (Figure 3). Parmi ces processus figurent la lente absorption du CO₂ atmosphérique via l'altération naturelle des roches et le transport du carbone dissout par les rivières et lacs jusqu'à l'océan (géochimique), la rapide absorption biologique par photosynthèse dans la végétation et les producteurs primaires marins, le transfert de carbone organique vers les sols et les sédiments des fonds océaniques ainsi que l'échange chimique de carbone entre les océans et l'atmosphère (« échange de gaz entre l'air et la mer »).

Les réservoirs de carbone géochimiques tels que les roches minérales et les processus associés tels que l'altération naturelle des roches sont souvent appelés « cycle lent du carbone », l'échange de carbone s'étendant sur des périodes pouvant aller de plusieurs milliers à quelques millions d'années. À l'inverse, avec les réservoirs biogéniques ou les processus biologiques tels que la photosynthèse, la durée de l'échange de carbone s'exprime en jours ou semaines, c'est pourquoi on parle souvent de cycle « rapide » du carbone.

Le cycle global du carbone

Flux anthropiques 2013 -2023

Figure 3 Aperçu du cycle du carbone. Les cercles indiquent la taille moyenne mondiale des réservoirs de carbone en GtC (cercles), tandis que les flèches représentent les flux de carbone en GtC yr⁻¹, avec une incertitude de 1 déviation standard. E = émissions, S = puits/absorption. Source initiale: [Global Carbon Budget 2023](#).



Le carbone est contenu dans diverses formes chimiques :

- Le carbone organique présent dans la biomasse vivante et morte dans les océans, sur terre et dans les sols
- dans les gaz comme le méthane et le dioxyde de carbone, dans l'atmosphère
- Les minéraux tels que les roches contenant du carbonate, y compris en sous-sol
- les ions dissouts en sous-sol comme le bicarbonate, dans les nappes et dans les océans

Bien que ces processus s'étendent sur des durées très diverses, de quelques jours à plusieurs millénaires, les sources et puits de carbone sont étroitement liés et la quantité de carbone contenue dans chaque réservoir est relativement stable. Or, l'extraction de carbone fossile au plus profond de la croûte terrestre et les émissions rejetées dans l'atmosphère perturbent cet équilibre. Seulement ~40 % du CO₂ émis par les activités humaines reste dans l'atmosphère, car les océans et les puits terrestres absorbent des volumes substantiels de cet excédent de carbone (respectivement 25 % et 35 % en 2022).

Pourquoi le cycle du carbone est-il pertinent pour la CDR ?

Éviter une émission et éliminer la même quantité de carbone après l'émission n'ont pas le même impact climatique. En effet, le cycle du carbone comporte de nombreuses rétroactions complexes entre le carbone et le climat, qui s'exercent à différentes échelles de temps. Ainsi, l'effet de refroidissement lié à l'élimination du carbone ne sera pas immédiat et pourrait ne pas être pleinement efficace. Les études révèlent que l'effet de réchauffement lié aux émissions de CO₂ est supérieur à l'effet de refroidissement lié à l'élimination du CO₂. De ce fait, un scénario de dépassement (c'est-à-dire où les concentrations de CO₂ seraient temporairement supérieures à une limite convenue et où le CO₂ atmosphérique excédentaire serait éliminé afin de respecter le budget carbone) n'a pas la même influence sur le réchauffement climatique qu'un scénario de non-dépassement, en raison de cette différence dans la réaction climatique transitoire aux émissions de carbone cumulées et du risque de déclenchement de points de bascule dans le système climatique mondial, sur lesquels la CDR ne pourrait revenir.

L'impact climatique peut également varier en fonction de la méthode de CDR employée et au fil du temps, en raison du cycle du carbone et de la rétroaction du climat : par exemple, pour atteindre la même réduction du réchauffement, il faudra éliminer davantage de carbone via la reforestation qu'avec l'alcalinisation des océans. Cela s'explique par les rétroactions biophysiques (effet albédo) causées par l'augmentation de la végétation entraînée par la reforestation, qui sont inexistantes avec l'alcalinisation des océans. La quantification et la certification du carbone éliminé peuvent avoir lieu après son élimination effective (ex-post), ou par estimation de la quantité de carbone qui sera éliminée à l'avenir (ex-ante). Pour les méthodes de CDR où l'élimination ne se produit pas immédiatement (p. ex. l'altération forcée), la certification ex-post permet d'éviter que de futures éliminations potentielles ne soient utilisées pour compenser des émissions contemporaines.

Les mécanismes des marchés du carbone

Les marchés du carbone appliquent un prix et/ou une limite aux émissions. Il existe deux types de mécanismes de marchés du carbone prédominants : les systèmes d'échange de quotas d'émissions et les mécanismes d'octroi de crédits carbone, comme les marchés volontaires du carbone. À l'heure actuelle, il n'existe aucun mécanisme de marché comparable pour les éliminations, car il est impossible de prouver qu'un crédit carbone neutralise ou contrebalance efficacement l'impact climatique de l'émission d'une tonne de CO₂.

La responsabilité du financement de l'élimination du carbone ne doit pas être laissée aux marchés volontaires, qui ont tendance à ne pas reconnaître les différences de fiabilité du stockage entre les puits naturels et géologiques, et à favoriser les solutions d'élimination les moins chères plutôt qu'une diversification du portefeuille.

Il convient de trouver d'autres solutions. Il pourrait par exemple s'agir d'un système d'échange de quotas d'élimination dédié pour des méthodes d'élimination permanente de qualité ; de l'utilisation des recettes du marché du carbone ; ou d'un modèle contributif, où les entreprises utiliseraient les marchés du carbone existants pour déboursier des fonds climatiques en achetant et annulant des crédits carbone sans revendiquer la propriété de la réduction des émissions ni formuler d'allégations de compensation.

Quels sont les mécanismes des marchés du carbone ?

Les marchés du carbone sont des instruments de marché utilisés pour limiter la pollution au carbone. Leur objectif est de réduire les émissions en attribuant un prix et/ou une limite aux émissions (principalement de dioxyde de carbone) ou en créant d'autres formes d'incitation financière à la réduction des émissions. À l'heure actuelle, il n'existe aucun mécanisme de marché robuste permettant de gérer l'élimination du carbone au niveau mondial, bien que des discussions politiques soient en cours, à l'image des négociations de la CCNUCC sur l'article 6 de l'Accord de Paris.

Les deux principaux systèmes de marché du carbone sont le système d'échange de quotas d'émissions (SEQE) et les mécanismes d'octroi de crédits carbone. Le premier est un régime réglementaire dont il existe de nombreux exemples à travers le monde, et particulièrement en UE, visant à réduire les émissions de secteurs spécifiques. Le second est souvent établi sous la forme d'un régime volontaire promouvant la mise en œuvre de projets d'atténuation via un système permettant aux porteurs de projets de tirer des recettes de la vente de crédits carbone. Si ces marchés sont dominés par des projets de réduction des émissions, ils visent également à accroître la séquestration de carbone dans les puits terrestres. Au niveau européen, le nouveau cadre de certification d'élimination du carbone devrait notamment certifier des activités d'élimination du carbone prévues sur les marchés volontaires du carbone.

Un SEQE, forme de système de plafonnement et d'échange, fixe une limite globale (« plafonnement » ou « cap » en anglais) au volume total d'émissions de GES que les entreprises des secteurs concernés peuvent émettre ensemble. Un abaissement graduel de ce plafond permet d'atteindre les objectifs de réduction. Au sein du SEQE-UE, ce plafond prend la forme d'allocations d'émissions ou de permis de polluer que les entreprises achètent (ou reçoivent gratuitement) et vendent sur le marché ouvert, et s'échangent ensuite entre elles. Une allocation représente une tonne de CO₂. Aucune limite n'est fixée à la quantité d'allocations pouvant être achetées ou à la période durant laquelle elles peuvent être échangées. L'obtention d'une allocation donne le droit d'émettre une tonne de CO₂.

Ce système étant fondé sur le principe du « pollueur-payeur », le coût de la pollution doit être supporté par ceux qui en sont à l'origine. De ce fait, les entreprises achètent la plupart de ces allocations pour pouvoir polluer. Malheureusement, le SEQE-UE s'est toujours caractérisé par une offre excessive et l'attribution gratuite de droits à polluer, conduisant à des prix faibles sur la pollution et nuisant à l'objectif initial de réduire les émissions.

À l'inverse, dans les marchés de crédits carbone, les porteurs de projets reçoivent des crédits certifiés délivrés par des programmes ou normes d'octroi de crédits carbone. Un crédit représente une tonne d'équivalent CO₂ réduit (ou éliminé de l'atmosphère). Ces crédits sont ensuite vendus à des acteurs publics et privés, qui peuvent ensuite se les échanger. Aucune limite n'est fixée au nombre de fois qu'un crédit peut être échangé, et dans la plupart des cas, le crédit n'a pas de date d'expiration. Lorsqu'un acheteur final décide d'utiliser un crédit pour compenser une partie de ses émissions ou revendiquer la neutralité carbone, le crédit carbone est « épuisé ». Il ne peut donc plus être échangé, et aucune autre revendication sur ce crédit ou ses attributs environnementaux ou sociaux sous-jacents ne peut être formulée.

Pourquoi les mécanismes des marchés du carbone sont-ils pertinents pour la CDR ?

Bien que ce mécanisme soit exclusivement conçu pour les réductions d'émissions, des discussions quant à l'intégration de la CDR (ou de crédits CDR) au SEQE-UE font leur chemin. Cependant, une telle fusion pourrait conduire à un scénario hautement problématique, où le prix prévaudrait sur la qualité au profit des méthodes d'élimination dont le coût est moins élevé que le prix de la pollution. En effet, un SEQE ne saurait promouvoir le déploiement de méthodes d'élimination permanente de qualité, car celles-ci seraient plus onéreuses que le reste des solutions d'atténuation disponibles sur le marché. Les mécanismes de marché destinés à l'élimination du carbone devraient également respecter les [principes de crédibilité physique et sociale](#).

Quant au régime d'octroi de crédits, le premier point de litige réside dans la fausse équivalence « tonne pour tonne » : il ne peut être scientifiquement prouvé qu'un crédit carbone permet de neutraliser ou de contrebalancer efficacement une tonne de CO₂ émise. De fait, l'impact de l'élimination d'une tonne de CO₂ sur le climat peut être jusqu'à 10 % inférieur à celui de l'émission d'une tonne en raison des interactions avec les stocks de carbone dans les sols et les océans. Cette fausse équivalence dissuade les pollueurs de remédier à leurs émissions puisqu'elle leur permet d'acheter des crédits et d'éviter de réduire leur empreinte carbone.

En outre, chaque tonne éliminée doit être surveillée et maintenue hors de l'atmosphère de manière permanente, ce qui est difficile à garantir étant donné que la durée de vie naturelle d'un projet dont les crédits ont été émis est généralement plus courte que la durée de vie du carbone dans l'atmosphère. Il se peut que le projet ne soit plus géré, ait relâché tout le carbone qui avait été stocké dans la végétation ou les sols, ou ait arrêté de réduire les émissions. En effet, pour être de bonne qualité, les crédits carbone échangés doivent être soumis à un système de MRV (voir « [Suivi, déclaration, vérification, responsabilité \(MRVL\)](#) ») et des procédures solides de comptabilité doivent être appliquées afin d'éviter toute double comptabilisation. Les investissements générant des crédits doivent donc : démontrer qu'ils apportent des résultats supplémentaires par rapport à ce qui se serait produit naturellement, présenter un faible risque de déstockage et éviter tout impact négatif sur les populations et l'environnement.

Or, les systèmes d'octroi de crédits proviennent généralement de projets basés sur la nature, qui nuisent souvent au respect des critères précédemment cités. Par exemple, les projets de foresterie REDD+ (centrés sur des crédits de réduction) ont fait l'objet d'intenses critiques car ils généraient des quantités exagérées de crédits, avaient un impact climatique contestable et manquaient de garanties adéquates pour prévenir tout effet indésirable sur l'environnement et les populations locales. Dans l'ensemble, ces projets n'offraient pas de bénéfices climatiques équivalents au dommage climatique qu'ils étaient censés compenser, sapant toute intégrité environnementale.

Ce qui précède illustre parfaitement les raisons pour lesquelles les marchés ne constituent pas l'outil adéquat pour financer les activités d'élimination et de séquestration terrestre, en particulier lorsque aucune séparation n'est établie entre les systèmes d'élimination permanente, la séquestration terrestre et la réduction des émissions dans le cadre politique concerné. Comme évoqué précédemment, la logique de marché se concentre principalement sur le prix plutôt que sur la qualité, ce qui signifie qu'un marché mal régulé, sans séparation, encouragerait inévitablement la solution la moins coûteuse : les méthodes de séquestration dans les sols, qui sont par nature vulnérables aux perturbations humaines et naturelles, avec un risque important de réémission dans l'atmosphère du carbone stocké.

Dans le même esprit, la logique de marché limite également la possibilité qu'un portefeuille diversifié de méthodes de CDR soit adopté, puisque les méthodes onéreuses, durables et innovantes n'obtiendront jamais le soutien financier dont elles auraient besoin. Or, une telle diversification est nécessaire, à la fois pour réduire les risques impliqués par le recours à une méthode unique et pour renforcer l'efficacité globale de l'élimination du carbone et des efforts de séquestration.

De toute évidence, il convient de trouver d'autres solutions. Une possibilité pourrait être de créer un système d'échange de quotas d'élimination dédié exclusivement aux méthodes d'élimination permanentes et de bonne qualité. Une autre option pourrait consister à utiliser les recettes des marchés du carbone pour financer les méthodes d'élimination. Un modèle contributif pourrait également être adopté, où les entreprises utiliseraient les marchés du carbone existants pour déboursier des fonds climatiques en achetant et épuisant des crédits carbone, sans revendiquer la propriété de la réduction des émissions ni formuler d'allégations de compensation. Cette approche requiert également que les entreprises utilisant les crédits carbone mettent en œuvre les mesures de diligence raisonnable requises afin de s'assurer que seuls des projets transparents et de qualité, accompagnés de solides garanties sociale, soient sélectionnés. Enfin, toute solution doit respecter les trois principes clés sous-tendant la politique climatique : les principes de précaution, de DNSH (do no significant harm, ou « absence de préjudice important ») et de primauté de la réduction des émissions.

Efficiency of Carbon Elimination

L'efficacité de la CDR désigne le rapport entre la quantité de CO₂ émise par l'activité (c'est-à-dire les fuites) et la quantité de CO₂ stockée de manière permanente tout au long du cycle de vie d'un projet de CDR. C'est un indicateur qui intègre le risque de déstockage, les émissions de GES sur toute la chaîne de valeur, la permanence du stockage et les limites de capacité de stockage.

L'efficacité de la CDR, telle que définie par [Chiquier et al.](#) est représentée par l'équation ci-dessous. Ici, les fuites désignent les émissions de gaz à effet de serre tout au long de la chaîne d'approvisionnement et pas seulement les fuites physiques de CO₂ provenant du stockage.

$$\text{Efficiency of the CDR} = \frac{\text{Quantity of CO}_2 \text{ stored - CO}_2 \text{ emitted throughout the supply chain}}{\text{Quantity of CO}_2 \text{ emissions stored permanently}}$$

L'efficacité de la CDR tout au long de la durée de vie du projet, y compris du stockage du carbone à long terme, dépend de la technologie employée et de la manière dont elle est déployée dans chaque projet. L'efficacité de la CDR est étroitement liée à la « durée d'amortissement du carbone », c'est-à-dire la durée requise pour qu'un système de CDR ait stocké suffisamment de CO₂ atmosphérique de manière permanente pour compenser les émissions émises tout au long de la chaîne d'approvisionnement, en particulier celles liées à l'utilisation des terres et au changement d'affectation des terres. Cette durée d'amortissement est plus courte si l'élimination physique du CO₂ se produit de manière immédiate et rapide, et si les émissions de GES associées sont faibles (p. ex. DACCS alimenté par de l'électricité verte).

La Figure 4 propose une illustration de l'efficacité de la CDR au cours du temps avec les trajectoires indicatives de différentes technologies et pratiques.

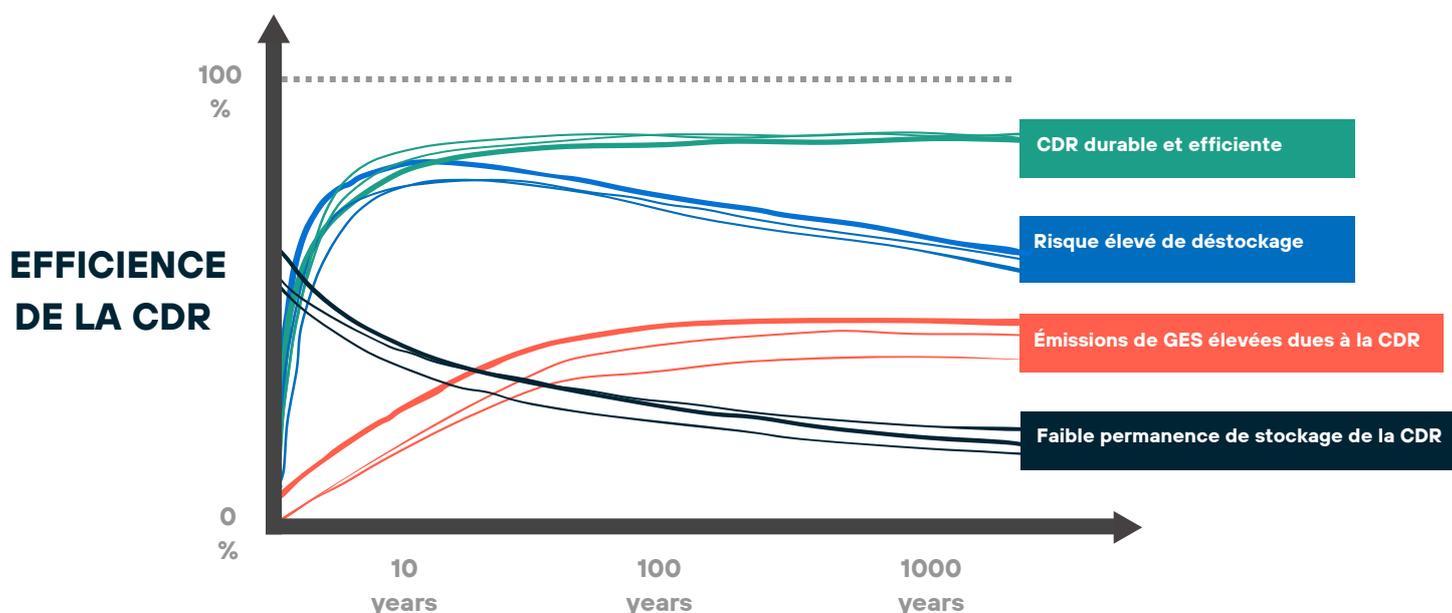


Figure 4 Efficacité de la CDR au cours du temps pour différents types de CDR, adapté de Chiquier et al. 2022.

Modélisation

Différentes méthodes de modélisation peuvent être employées pour évaluer le potentiel et la durabilité des méthodes de CDR. Chaque modèle fournit des informations précieuses sur des possibilités réalistes, sous un point de vue spécifique. Pour interpréter les résultats, il est important de comprendre les objectifs spécifiques des modèles et les informations qu'ils peuvent fournir.

Ci-dessous, trois types d'analyses de modèles appliqués dans le consortium de recherche H2020 NEGEM sont employés pour illustrer les informations spécifiques fournies par chaque type de modèle, ainsi que leurs éventuelles limites.

Analyse des performances environnementales tout au long du cycle de vie : L'analyse du cycle de vie (ACV) sert à étudier un projet de CDR du point de vue d'un produit ou d'un système. Elle fournit des informations sur les performances environnementales de la méthode de CDR étudiée tout au long de son cycle de vie, le système le plus complet étant appelé « du berceau au tombeau ». L'ACV comprend différentes catégories d'impact, étudiant par exemple les répercussions sur le climat, l'écosystème, les bassins hydrologiques, l'air, les ressources et la santé humaine. L'ACV doit être menée de manière cohérente afin de permettre des comparaisons pertinentes entre les différentes méthodes de CDR.

Lors de l'interprétation des résultats de toute ACV, il est important de bien comprendre les hypothèses quant au processus de CDR et les méthodes d'ACV appliquées. Bien que subjectifs, ces éléments peuvent altérer le résultat de l'ACV. Les résultats d'une ACV portant sur une méthode de Bio-CSC peuvent notamment être très variables en fonction de la biomasse utilisée, de la situation géographique, de l'efficacité du processus, des sources d'énergie externes éventuellement utilisées et des limites du système, en plus des impacts liés au changement d'affectation des terres et à la substitution des matières premières.

Modèles d'évaluation intégrés pour l'analyse de portefeuilles à coût optimisé: Les modèles d'évaluation intégrés (MEI) servent à identifier le portefeuille de technologies de CDR le moins coûteux requis pour atteindre un objectif d'atténuation du changement climatique à l'échelle nationale, régionale ou mondiale (p. ex. limiter le réchauffement à 1,5 °C) dans différents scénarios. Ces modèles sont employés dans la création des scénarios du GIEC sur l'atténuation du changement climatique, mais peinent souvent à intégrer les contraintes sociales et environnementales. Ils peuvent donc être qualifiés de « modèles fondés sur la demande ». La plupart des projections de ces modèles partent d'une demande élevée de Bio-CSC pour atteindre les objectifs d'atténuation. Cela s'explique par le fait que ces modèles considèrent la Bio-CSC comme une solution à coût modéré puisque, en plus de la CDR obtenue, de l'énergie peut être générée durant le processus (p. ex. BECCS). Cette méthode bénéficie en outre d'un niveau de maturité technologique élevé par rapport à d'autres méthodes de CDR, comme l'altération forcée des roches. Néanmoins, les contraintes sur l'approvisionnement en biomasse incluses dans le modèle dépendent de l'utilisateur et ne peuvent ni représenter des niveaux réalistes ou durables d'approvisionnement, ni tenir compte d'autres impacts environnementaux comme la pression exercée sur les frontières planétaires.

Modèle de biosphère basé sur les processus pour évaluer les contraintes environnementales : Les modèles de biosphère basés sur les processus constituent une troisième catégorie de modèles, utilisée pour évaluer les contraintes environnementales du point de vue de « l'offre », à l'image du modèle employé pour étudier le potentiel de biomasse mondiale pour la Bio-CSC dans l'étude NEGEM (LPJmL5-NEGEM). Ces modèles permettent d'analyser le déploiement de la CDR du point de vue de l'offre et fournissent des informations détaillées sur la disponibilité des ressources en biomasse en tenant compte de diverses restrictions, par exemple les frontières planétaires. Les méthodes fondées sur l'offre peuvent être appliquées à l'aide de modèles de biosphère basés sur les processus, qui reproduisent les dynamiques des écosystèmes naturels et agricoles. L'objectif est de reproduire et de détecter tout changement critique dans la composition et la distribution de la végétation, ainsi que dans les stocks et flux de carbone, d'eau et d'azote, selon un couplage dynamique et à l'échelle mondiale.

Analyse du cycle de vie

Objectif

Comparer les performances des différentes méthodes de CDR en matière de durabilité par tonne de CO₂ éliminée.

Hypothèses

Paramètres moyens de la méthode de CDR employée (données non spécifiques au projet).

Limites principales

La sélection de parcours d'application spécifiques de la CDR peut faire fortement varier les impacts présentés par le modèle.
Sélection subjective des limites du système pour répondre aux besoins de l'utilisateur en l'absence de standardisation.

Avantages

Les émissions et l'impact en termes d'utilisation des ressources peuvent être étudiés pour de nombreuses méthodes de CDR différentes, tout au long de leur cycle de vie.

Basée sur la demande

(p. ex. MEI)

Objectif

Optimisation du portefeuille de technologies de CDR le moins coûteux requis pour atteindre un objectif d'atténuation du changement climatique national, régional ou mondial (p. ex. réchauffement de 1,5 °C) dans différents scénarios. Par exemple, évaluer les futurs besoins en certains minéraux et métaux pour différentes trajectoires de transition énergétique, la demande en ressources, et les ralentissements dans le déploiement des technologies dus au manque de ressources.

Hypothèses

Hypothèses sur le système énergétique, les technologies de CDR, les populations, la croissance du PIB mondial, etc.

Limites principales

Présume une prévoyance et des réactions de marché parfaites, nombre limité de scénarios possibles (p. ex. 1.5°C, 2°C). Risque que les contraintes ne représentent pas un approvisionnement réaliste et durable, et ne tiennent pas compte d'autres impacts environnementaux (p. ex. frontières planétaires). Dans les scénarios NEGEM, les contraintes de la modélisation de biosphère basée sur les processus (LPJmL) ont été appliquées pour la Bio-CSC, le biochar et la reforestation.

Avantages

L'identification de trajectoires à coût optimisé avec différentes méthodes de CDR, tant au niveau européen que mondial, permet de comprendre l'échelle requise en matière de solutions d'atténuation, la transition énergétique et l'impact de la CDR sur la demande en énergie.

Modèle de biosphère basé sur les processus

Objectif

Quantifier le potentiel biophysique durable de CDR basée sur la biomasse avec production de matières premières sur des terres non cultivées et évaluer la pression environnementale qu'entraînerait la réaffectation de pâturages vers les NETP.

Hypothèses

La surface de plantation de biomasse s'étend au-delà des terres agricoles, sans transgression des frontières planétaires terrestres ni réaffectation de pâturages vers les NETP.

Limites principales

Évaluation biogéochimique uniquement, sans considérations socio-économiques, ni sur l'efficacité technique globale (non spécifique au projet).

Avantages

Reproduit la croissance de la biomasse et les impacts sur l'écosystème, tant à l'échelle mondiale que locale.

Suivi, déclaration, vérification, responsabilité (MRVL)

Le suivi, la déclaration et la vérification, suivies par une attribution des responsabilités (MRVL) constituent des éléments essentiels à tout projet d'élimination du carbone produisant des unités d'élimination du carbone certifiées. Le système de MRVL permet de garantir que le projet offre effectivement l'élimination de carbone promise. Des cadres de MRV existent déjà pour les inventaires d'émissions nationales, à l'image des Lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Des recherches sont actuellement menées afin de définir des bonnes pratiques en matière de procédures et normes de MRVL pour les différentes méthodes d'élimination du carbone.



Figure 5 « Comment créer un cadre solide pour la certification de méthodes d'élimination du carbone de qualité », reproduite avec l'autorisation de Carbon Gap/Clean Air Task Force/Bellona.

Suivi

Également appelé « mesure », le suivi implique une quantification fiable des flux initiaux de carbone, du carbone supplémentaire éliminé grâce à l'activité, du suivi des réservoirs de stockage, et de toute autre émission de GES associée au cours de la chaîne de valeur (voir étape 4 de la Figure 5 ci-dessus, ainsi que la section "[Comptabilité](#)"). Les méthodologies élaborées doivent établir des lignes directrices standardisées de mesure et de suivi pour chaque type de CDR, une adaptation pouvant également être nécessaire en fonction des différents projets.

Les mesures physiques des stocks et flux de carbone doivent être privilégiées pour chaque site de déploiement afin d'assurer un suivi précis pour chaque type de projet spécifique, site et durée. Au fil du temps, le développement du modèle et la validation apportée par les mesures de terrain peuvent réduire le coût des mesures physiques de tous les stocks et flux de carbone pour chaque durée définie.

Pour les mesures physiques comme pour les estimations basées sur une modélisation, l'incertitude statistique ou empirique associée doit également être déterminée. Cela permettra d'établir dans quelle mesure la valeur réelle d'élimination de carbone pourrait différer de l'estimation. Avec le temps, grâce à l'amélioration de la compréhension des processus d'élimination du carbone et de la variabilité naturelle et à des hypothèses plus précises dans les modèles, cette incertitude devrait reculer. Il convient de toujours utiliser les estimations les plus conservatrices afin de limiter le risque de surestimation de la quantité de carbone éliminée et d'encourager les porteurs de projets à réduire les incertitudes.

Déclaration

Une communication transparente et détaillée sur la quantité de carbone éliminée et stockée fait partie intégrante du processus de MRVL. Parmi les informations devant être transmises dans le cadre du processus de déclaration figurent l'incertitude (empirique et statistique) quant à la quantification des flux et stocks de carbone, les procédures de contrôle qualité, les sources de données et hypothèses prises en compte, ainsi qu'une description détaillée de la méthodologie appliquée.

Vérification

La vérification est menée par des vérificateurs indépendants agréés appartenant à des organismes publics ou privés. Aucun conflit d'intérêt ne peut exister entre l'exploitant et le vérificateur ; l'impartialité et l'indépendance doivent être garanties afin d'assurer la crédibilité de la procédure. Après vérification, la certification est octroyée, permettant au projet d'obtenir des crédits ou unités d'élimination du carbone. Il convient de noter que, si le processus de vérification n'est pas l'apanage des mécanismes de marchés du carbone, il constitue une étape nécessaire pour que des certificats soient délivrés, et ainsi pour renforcer la confiance dans tout système. De manière générale, la vérification s'avère essentielle pour que la quantité de carbone éliminé puisse être estimée avec précision. Elle atteste de la précision et de la fiabilité des données, garantissant la qualité d'une élimination et renforçant l'intégrité du système.

Responsabilité

La responsabilité est requise pour garantir qu'un projet d'élimination ou de séquestration spécifique puisse être tenu responsable en cas de fuite de carbone ou de dommage environnemental. Généralement, la responsabilité repose sur l'exploitant, c'est-à-dire l'entité menant l'activité d'élimination ou de séquestration du carbone. En effet, après la validation de la vérification, les exploitants bénéficient d'une certification, gage de rétribution ou de soutien financier.

Or, la responsabilité est souvent difficile à établir, en particulier lorsque le processus d'élimination implique un transport international de CO₂ jusqu'au site de stockage, ou lorsqu'il s'avère, des années plus tard, qu'un système d'élimination n'apporte pas d'émissions négatives. Dans ce dernier cas, la probabilité qu'une entreprise ou un gestionnaire foncier assume sa responsabilité carbone plusieurs décennies après le lancement du projet est faible. La responsabilité incombera ainsi aux générations futures, un fardeau injuste qu'elles n'avaient pas demandé et pour lequel elles n'ont reçu aucune compensation financière. Pourtant, quelqu'un doit bien être tenu responsable de l'émission de carbone, en particulier dans un contexte où la concentration de CO₂ dans l'atmosphère ne cesse d'augmenter.

Une solution consiste à bloquer une certaine part des fonds d'un projet, réservée pour les fuites éventuelles ou réparations du site de stockage. C'est ce que l'on appelle une « réserve tampon », qui joue le rôle d'un filet de sécurité en cas de pertes inattendues. Malheureusement, ces réserves suffisent rarement à compenser toute la perte de carbone, et ne sont donc pas considérées comme un mécanisme parfaitement sécurisé. L'autre solution consiste à prévoir un transfert de responsabilité après l'arrêt des activités, rendant le nouvel acteur, privé ou public, responsable des dommages.

En tout état de cause, il est essentiel d'établir un cadre d'attribution des responsabilités à long terme afin d'aborder et de gérer les risques, mais aussi de renforcer la confiance dans les projets d'élimination et de séquestration du carbone. En fonction de la nature du risque de déstockage, la responsabilité devra être adaptée, afin de correspondre parfaitement à la gestion des inversions requise pour la méthode de CDR concernée. Par exemple, une méthode de CDR nécessitant une maintenance à long terme pour prévenir tout déstockage du carbone, comme les pratiques de gestion foncière, exigera un cadre de responsabilité mettant l'accent sur la gestion à long terme de ce puits.

Permanence

Pour que le stockage de carbone soit considéré comme permanent, le carbone séquestré ne doit pas être relâché tant que cela contribuerait au dérèglement climatique. Vulnérables par nature aux perturbations naturelles et humaines, y compris à l'aggravation du changement climatique lui-même, il est probable que les systèmes de stockage biogéniques ne remplissent pas ce critère de permanence. Leur fiabilité et leur pertinence dans la lutte contre le réchauffement climatique peuvent donc s'avérer limitées. Toutefois, ils s'avèrent essentiels pour atteindre d'autres objectifs environnementaux clés, notamment en ce qui concerne la dégradation des écosystèmes et la perte de biodiversité.

La permanence est définie de différentes manières dans les politiques, marchés volontaires du carbone et études scientifiques. Il est important de noter que la permanence « réelle », c'est-à-dire un stockage à durée indéterminée s'étendant sur des millénaires, ne peut être garantie scientifiquement, et que l'utilisation de délais extrêmement longs pour définir la permanence rendrait impossible toute création d'activité d'élimination du carbone. Une vision plus nuancée de la permanence est donc nécessaire et devrait se limiter à la durée

durant laquelle le carbone devrait être maintenu hors de l'atmosphère pour permettre à l'humanité de stopper le dérèglement climatique et de gérer les impacts qui y sont liés. Ainsi, une élimination du carbone peut être qualifiée de permanente dès lors que le carbone stocké n'est pas relâché durant une période où il aggraverait le changement climatique.

La durée de stockage est importante pour l'atténuation du changement climatique puisque les émissions de CO₂ sont de fait permanentes et ont un effet clés sur l'évolution des températures, sur la base des émissions cumulées. Quand le CO₂ entre dans l'atmosphère, environ 15 à 40 % de la masse de l'émission carbone y reste pendant plus de 1000 ans, et environ 20 % pendant plus de 10 000 ans. Le reste du carbone est absorbé par les océans et les puits terrestres (voir « [Le cycle du carbone](#) ») et ce processus d'absorption s'étend sur plusieurs centaines de milliers d'années. En comparaison, la plupart des autres GES ont une durée de vie relativement courte, et leur impact sur l'évolution des températures est directement lié aux taux d'émission. Dans une telle situation, les systèmes de stockage temporaire durant quelques années, décennies ou jusqu'à un siècle, ne contribuent pas de manière significative à l'action climatique, à moins que la même quantité de carbone soit en permanence séquestrée à nouveau et gérée. Au contraire, ils retardent les émissions et peuvent même accentuer l'évolution des températures si le carbone stocké est libéré avant que la stabilisation du climat ne soit atteinte.

Certaines des méthodes technologiques présentées dans ce manuel, comme le DACCS et la Bio-CSC, peuvent être considérées comme permanentes à condition que les réservoirs de stockage souterrains soient correctement scellés. Par ailleurs, la carbonatation minérale, réaction chimique sur laquelle repose l'altération forcée, offre une durée de stockage estimée à plus de 10 000 ans. Les morceaux stables de biochar peuvent être permanents, bien que certaines incertitudes perdurent quant à sa vitesse de décomposition dans différents milieux de stockage. Dans les applications agricoles, cela dépendra de la composition chimique du biochar et de l'état des sols sur lesquels il est épandu. Néanmoins, le carbone stocké dans le biochar et dans l'altération forcée étant dilué dans l'environnement, éventuellement dans des réservoirs terrestres et également dans les océans au fil du temps, il est difficile de suivre le carbone éliminé, et par conséquent de vérifier la permanence du stockage.

De leur côté, les méthodes foncières reposant sur des stocks biogéniques (végétation, sédiments, sols) comme la reforestation et l'enrichissement des sols en carbone ne pourront probablement séquestrer le carbone que de manière temporaire car elles sont vulnérables aux perturbations naturelles et humaines, comme les récoltes, les changements d'affectation des terres, les nuisibles, les sécheresses, les inondations et les glissements de terrains. Bon nombre de ces perturbations naturelles risquent par ailleurs de s'aggraver sous l'influence du changement climatique, l'augmentation des températures accentuant ainsi le risque de déstockage du carbone.

En outre, il est difficile de mesurer et de quantifier le carbone stocké à long terme, et le puits finira par être saturé, réduisant son efficacité. Néanmoins, ces méthodes ne doivent pas non plus être écartées car, correctement gérées et protégées, elles peuvent stocker du carbone sur de longues périodes, jouent un rôle clé dans la restauration de la biodiversité et contribuent à maintenir l'intégrité des écosystèmes ainsi que d'autres « services écosystémiques ».

Frontières planétaires

Le déploiement de la CDR devrait contribuer à la fois à la stabilisation du climat et à d'autres éléments clés de la santé de la planète, comme la disponibilité d'eau douce, les flux d'azote et l'intégrité de la biosphère. Le cadre des frontières planétaires définit un « espace de vie préservé », où la stabilité du système Terre serait préservée, et peut être utilisé pour contribuer à définir les limites de durabilité de la CDR et en identifier les inconvénients clés. Les analyses employant ce cadre signalent certains inconvénients potentiels significatifs, notamment pour les méthodes de CDR basées sur la biomasse, en raison de leur efficacité, de la surface de terre requise et de leur impact sur les frontières planétaires. Cependant, la reforestation peut offrir des synergies substantielles entre atténuation du changement climatique et objectifs internationaux de restauration de la nature ([Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal](#)).

Que sont les frontières planétaires ?

Les frontières planétaires définissent l'« espace de fonctionnement sûr » pour l'activité humaine dans le cadre des différents processus du système terrestre. Elles reflètent le fonctionnement d'un système terrestre stable depuis l'Holocène, qui a commencé il y a 11 700 ans. Le franchissement d'une limite implique un risque de changement environnemental catastrophique à grande échelle, car des transitions critiques, des effets de contagion et points de bascule peuvent être atteints.

Les chercheurs ont identifié neuf processus « essentiels pour maintenir la stabilité et la résilience du système Terre dans son ensemble ». Le [Cadre des frontières planétaires](#) étudie l'impact systémique de ces neuf processus interconnectés sur le complexe système Terre, permettant de quantifier l'influence humaine et de suivre tout changement au fil du temps. S'il est possible d'établir une quantification pour les différentes limites, des recherches sont en cours concernant l'interaction et la réaction combinée entre les limites.

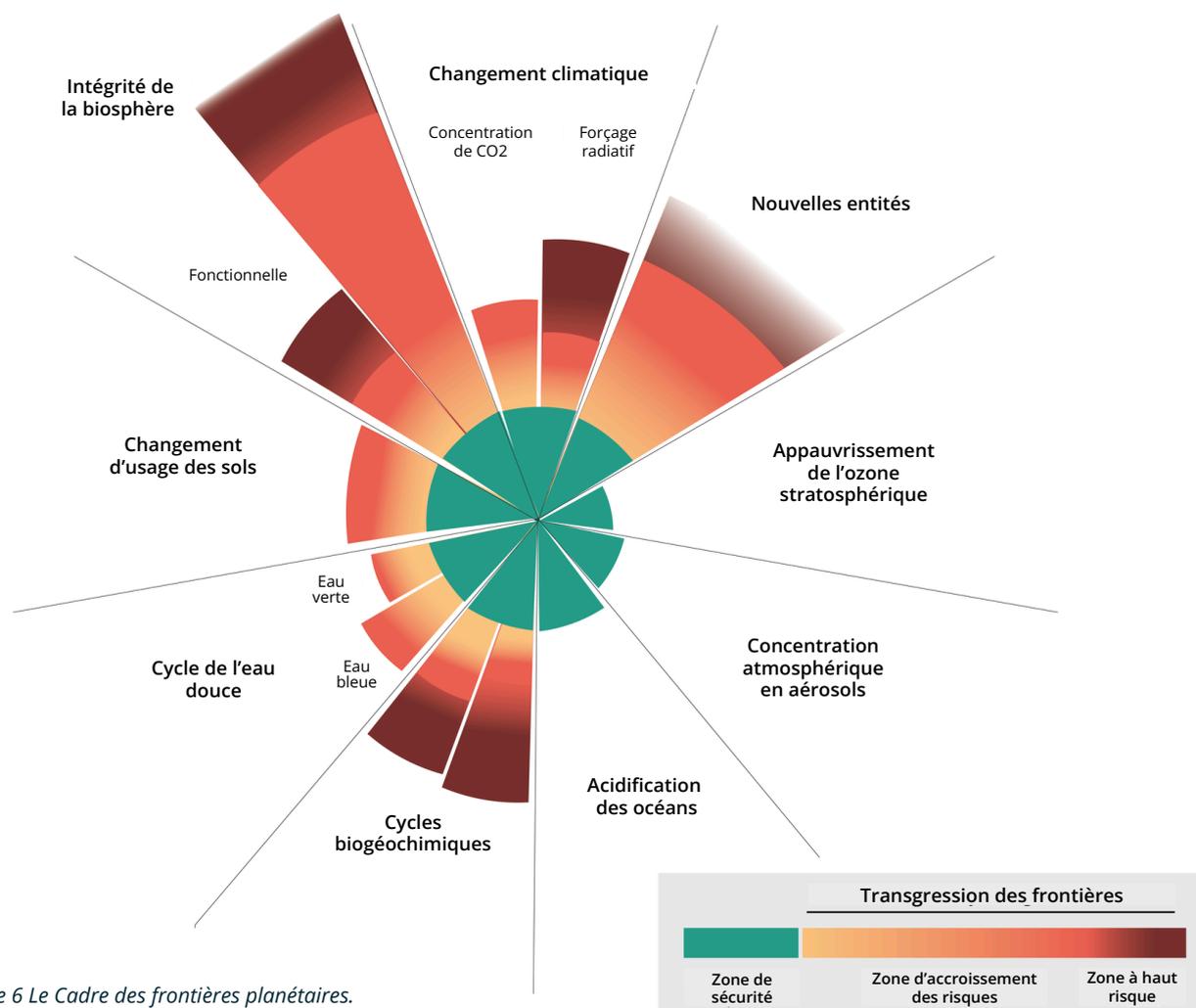


Figure 6 Le Cadre des frontières planétaires.
Licence CC BY-NC-ND 3.0 (crédit : Azote for Stockholm Resilience Centre, Université de Stockholm).

L'intégration de ce cadre aux politiques environnementales et stratégies de gouvernance a connu un véritable élan, ce concept étant aussi étroitement lié au développement durable. L'utilisation du cadre pour évaluer la contribution d'un pays à la résilience du système Terre suscite un certain intérêt. La théorie du Donut ajoute la dimension du bien-être humain à l'espace de vie préservé, les plafonds environnementaux étant associés au concept de frontières planétaires. Une économie prospère y est présentée comme une économie reposant sur douze planchers sociaux (comme l'énergie, l'eau, l'alimentation, la santé, le logement) tout en restant en dessous des plafonds environnementaux.

Pourquoi les frontières planétaires sont-elles pertinentes pour la CDR ?

La limite planétaire du changement climatique a été dépassée, nous plaçant dans une zone de risque accru. En décembre 2023, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère a atteint 421 ppm, au-delà de la limite planétaire de 350 ppm.

En captant et stockant du carbone de manière permanente, la CDR pourrait alléger une partie de la pression sur la limite planétaire du changement climatique. Néanmoins, chaque méthode de CDR comporte des effets négatifs sur les ressources naturelles nécessaires à leur déploiement (voir également Figure 6). Par exemple, l'extension des terres arables, la récolte de biomasse terrestre et l'extraction de minéraux/métaux peuvent accentuer la pression, déjà très forte, sur les frontières planétaires telles que le changement d'usage des sols, l'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère et la perturbation des cycles biogéochimiques. Si un certain niveau d'effets négatifs peut être inévitable, dans l'idéal, une analyse d'impact systémique devrait garantir pour chaque projet de CDR un bénéfice climatique global ne compromettant pas d'autres aspects de la durabilité et de la protection de l'environnement. Certains types de CDR peuvent à la fois accroître et relâcher la pression sur les frontières planétaires, en fonction de leurs différents impacts.

À titre de simplification, la Figure 6 ne détaille pas les impacts sur les frontières planétaires de manière exhaustive mais démontre que les activités de CDR auront différents impacts sur les frontières planétaires, parfois même dans des directions opposées pour un même projet. L'étude NEGEM révèle que la plupart des méthodes basées sur la biomasse entraîne une réduction nette de la pression.

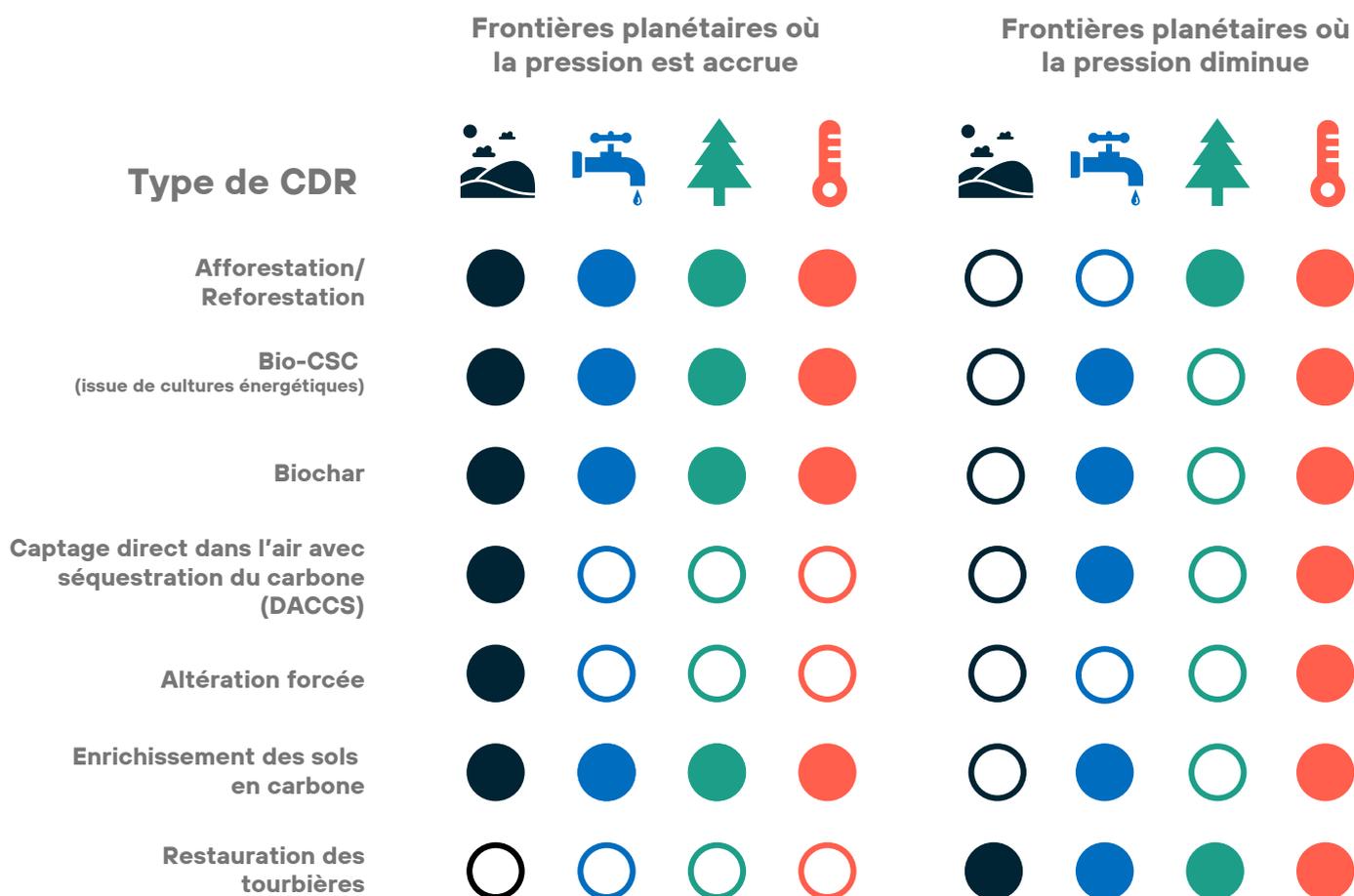


Figure 7 Interactions potentielles entre les types de projets de CDR et les frontières planétaires indiquant les effets négatifs et cobénéfiques potentiels de chaque activité. Icône brune = changement d'usage des sols, icône bleue = utilisation et cycle de l'eau douce et de l'azote, icône verte = introduction d'entités nouvelles dans la biosphère (production primaire nette + biosphère), icône rouge = changement climatique (concentration de CO₂ dans l'atmosphère + forçage radiatif).

Le projet NEGEM a utilisé le Cadre des frontières planétaires pour indiquer la capacité des NETP à éliminer du carbone tout en tenant compte de la complexité du système Terre. Cela signifie que tout dépassement supplémentaire des frontières planétaires serait évité, et que les opportunités régionales de maintien dans la zone d'espace de vie préservé sont exploitées.

Comme indiqué dans le [projet NEGEM](#) : « Cette vision globale des frontières planétaires devrait être étudiée avec attention lors de l'élaboration des stratégies de CDR en Union européenne, dans la mesure où la demande européenne de CDR ne pourra certainement reposer que partiellement sur les activités de séquestration menées sur son propre territoire. Les hypothèses quant au potentiel réaliste de CDR sur le territoire de l'UE et au-delà de ses frontières doivent ainsi être fondées sur un examen minutieux de toutes les frontières planétaires, et non uniquement sur les objectifs climatiques ».

Séparation des activités et

nécessité d'objectifs distincts

La politique d'atténuation du changement climatique regroupe une multitude d'activités, dont la réduction des émissions, l'évitement des émissions, l'élimination permanente du carbone et la séquestration dans les sols. Ces activités distinctes requièrent des objectifs distincts. Certaines NETP peuvent contribuer à plusieurs activités. Ce chapitre vise à définir chaque activité, à détailler les arguments en faveur d'une séparation et à illustrer les divers problèmes occasionnés par la confusion entre les objectifs et les activités.

Qu'entend-on par séparation des activités ?

Les activités peuvent être définies comme suit :

Réduction des émissions : diminution quantifiée des émissions de GES liées à une activité existante, ou en émanant, entre deux dates données, dans un processus contribuant à la décarbonation (Figure 8). Elle implique divers acteurs et doit être mise en œuvre à l'échelle des entreprises, sectorielle, régionale et nationale.

Évitement des émissions : déplacement ou prévention de futures émissions de GES attendues. On peut citer en exemple les projets d'énergies renouvelables ou mesures d'efficacité énergétique. Les émissions évitées sont souvent intégrées aux réductions d'émissions, conduisant à une confusion entre les deux termes. Certains projets peuvent mener à la fois à un évitement et une réduction des émissions, et la ligne de séparation entre les deux n'est pas toujours très claire pour les acteurs. Néanmoins, ces deux activités conduisent à une baisse de la quantité de CO₂ émise dans l'atmosphère (Figure 8). Dans un avenir proche, il s'agit du type d'action le plus important pour lutter contre le changement climatique. L'objectif est de ralentir voire de stopper l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère.

Élimination permanente du carbone : élimination physique du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère, qui est ensuite stocké de manière permanente, par exemple dans des réservoirs géologiques ou par minéralisation. L'étude NEGEM (voir le [chapitre « Comptabilité »](#)) et le cadre européen de certification d'élimination du carbone (voir le [chapitre « Situation de la législation et du cadre politique de l'UE »](#)) définissent la permanence comme une période durant au moins plusieurs siècles. Le DACCS, la Bio-CSC et l'altération forcée entrent dans cette catégorie. L'action climatique consiste à extraire physiquement du CO₂ de l'atmosphère et à le stocker de manière permanente (Figure 8). Le résultat est un ralentissement de l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, contrebalançant les émissions résiduelles dans une situation de « neutralité carbone » puis réduisant la concentration de CO₂.

Séquestration dans les puits naturels : absorption physique du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère, stocké dans des réservoirs biologiques naturels comme la végétation, les sédiments ou les sols. Ces réservoirs peuvent être fortement exposés à un risque de déstockage et sont souvent en contact direct avec l'atmosphère, ce qui signifie que toute réémission de carbone contribuera directement au réchauffement. Cette catégorie regroupe l'afforestation, la reforestation et l'enrichissement des sols en carbone, également appelés « puits de carbone terrestres ». La biomasse marine et le carbone bleu sont leurs équivalents dans les océans.

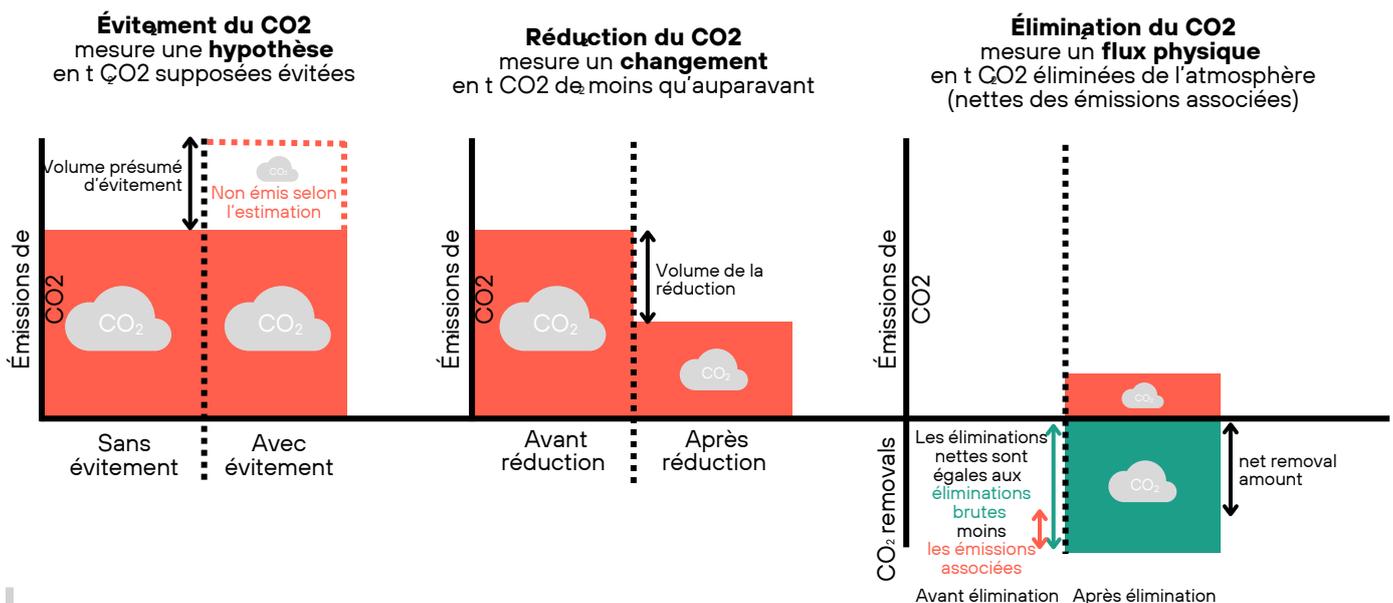


Figure 8 Différence entre évitement (à gauche), réduction (au centre) et élimination (à droite) des émissions. Source : Bellona.

Il est à noter que certaines NETP peuvent contribuer à plusieurs activités. Cependant, pour parvenir à résoudre la crise climatique, la hiérarchie de l'action climatique doit être respectée. La réduction et l'évitement des émissions doit toujours rester la priorité absolue, dans la mesure où elles offrent un impact certain et permanent sur la limitation de la concentration de carbone dans l'atmosphère, ce qui est essentiel pour réduire la gravité et les effets de la crise climatique.

De leur côté, les méthodes d'élimination permanente peuvent compléter la réduction des émissions et contribuer à atténuer le changement climatique en maintenant le carbone hors de l'atmosphère pendant des siècles voire des millénaires, compensant les émissions résiduelles, voire conduisant à une situation d'émissions négatives. Des investissements et politiques en faveur d'un déploiement sécurisé et durable de ces méthodes sont nécessaires. Néanmoins, l'attention portée au potentiel offert par l'élimination permanente ne doit pas nuire aux efforts de réduction des émissions, en particulier au vu des contraintes technologiques, des importants besoins en ressources, du risque d'impacts négatifs sur l'environnement et les populations, ainsi que de l'effet climatique moindre par rapport à la réduction ou l'évitement des émissions. Par ailleurs, ces méthodes restent incertaines, coûteuses, et leur déploiement à grande échelle dans un avenir proche reste peu probable.

Quant à la séquestration du carbone dans les sols, elle peut jouer un rôle clé dans la protection de la biodiversité et la restauration des écosystèmes si elle est stimulée par des activités de restauration de la nature. En revanche, elle ne peut être considérée comme une forme permanente de stockage du carbone en raison de son exposition aux perturbations naturelles et humaines, impliquant un risque élevé de fuite. De plus, ces vulnérabilités risquent très probablement d'être accentuées par les effets de la crise climatique elle-même, en plus de l'augmentation du risque de perte des stocks terrestres existants. En termes d'impact sur la concentration de GES dans l'atmosphère, la séquestration terrestre peinerait à contrebalancer les émissions historiques liées à l'utilisation des terres, car une reforestation de toutes les terres précédemment déforestées serait requise. Par conséquent, l'élimination et le stockage de carbone fossile issu du cycle « lent » du carbone dans des puits terrestres retiendrait davantage de carbone dans une partie vulnérable et active du cycle du carbone (« cycle rapide »). Renvoyer le carbone fossile émis dans des puits permanents atténuerait ce risque accru de déstockage, dont les conséquences seraient catastrophiques.

Pourquoi des objectifs distincts seraient-ils pertinents pour la CDR ?

Au vu de la variété d'activités et de leurs divers niveaux de contribution à la protection de l'environnement, il est important d'établir des objectifs distincts pour la réduction des émissions, l'élimination permanente et la séquestration dans le secteur foncier. Cette séparation comporte de nombreux avantages :

Éviter que les efforts de réduction des émissions ne soient ralentis ou retardés, ce que l'on appelle également « dissuasion de l'atténuation ». Les différentes activités ne sont pas interchangeables : une élimination ne pourra jamais répondre aux obligations de réduction, et un recours excessif à ces méthodes s'avère risqué. Ainsi, il est préférable de considérer les méthodes d'élimination comme un complément à la réduction des émissions, urgemment nécessaire. Dans ce sens, établir une séparation claire permet de maximiser la contribution de chacune des activités en encourageant la prise de mesures sur tous les fronts.

Permettre d'élaborer des politiques concentrées sur une activité en particulier. Chaque activité a un rôle propre à jouer dans l'action climatique, la réduction des émissions constituant la mesure prioritaire pour limiter le réchauffement climatique, la séquestration terrestre apportant d'excellents cobénéfices et l'élimination permanente extrayant les émissions résiduelles difficiles à atténuer.

Éviter d'établir une équivalence entre stockage géologique et puits biologique, afin de prévenir tout abus ou classification erronée de conduisant à considérer des systèmes de stockage vulnérables ou temporaires comme des « éliminations permanentes ». Cela s'avère particulièrement important dans la lutte contre les fausses allégations de neutralité carbone et dans la garantie de l'intégrité environnementale.

Offrir une comptabilité transparente, des indicateurs mesurables et des cadres de gouvernance plus robustes, afin de renforcer la sécurité, la confiance et la transparence. Cela permettra également d'éviter toute estimation excessive de la future contribution des émissions négatives dans les modèles climatiques et favorisera une évaluation sincère du temps et des investissements requis.

L'UE a fixé des objectifs nets de réduction des émissions de GES pour 2030 (55 %) et 2050 (neutralité carbone) par rapport aux niveaux de 1990. Il est à noter que les objectifs « nets » de l'UE mêlent réduction des émissions, élimination permanente et séquestration dans un même indicateur, sans distinction entre les différentes activités.

La [Communication](#) de la Commission européenne sur l'objectif climatique 2040, proposé à 90 % net, en est le parfait exemple. Si cet objectif peut sembler ambitieux à première vue, il implique en réalité un objectif de réduction des émissions (objectif brut) de 82 % maximum. Le restant des 90 % nets correspondrait au stockage temporaire (avec des solutions parfois très vulnérables comme l'enrichissement des sols en carbone) et à l'élimination permanente. En outre, la stratégie 2040 établit un objectif annuel d'élimination ou de séquestration allant jusqu'à 400 Mt d'équivalent carbone d'ici à 2040, sans distinguer ni séparer cet objectif dans la communication elle-même. Cela renforce la confusion entre élimination permanente et stockage dans les sols et la biomasse, malgré leurs impacts très différents sur le climat.

Situation de la législation et du cadre politique de l'UE

La législation européenne relative à la CDR et à la séquestration naturelle du carbone comprend la loi européenne sur le climat, le cadre de certification d'élimination du carbone, le règlement sur l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie, la loi sur la restauration de la nature et la Politique agricole commune.

Le cadre de certification d'élimination du carbone est le premier instrument européen à aborder directement les méthodes d'élimination du carbone.

Actuellement, la législation européenne est entachée de plusieurs lacunes et d'un manque d'ambition. Elle échoue notamment à établir des objectifs distincts et n'offre pas les éléments indispensables au déploiement durable des méthodes d'élimination du carbone.

Loi européenne sur le climat (LEC)

Publiée en juillet 2021 dans le cadre du pacte vert pour l'Europe, la loi européenne sur le climat établit deux objectifs contraignants : réduire les émissions nettes de GES de 55 % par rapport aux niveaux de 1990 d'ici à 2030 et atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050, avec l'objectif d'atteindre des émissions négatives par la suite. La LEC exhorte les institutions européennes et les États membres à accorder « la priorité à des réductions d'émissions rapides et prévisibles et, dans le même temps, [à renforcer] les absorptions par les puits naturels », la contribution des éliminations nettes à l'objectif de 2030 étant limitée à 225 Mt d'équivalent CO₂.

Le texte stipule également que l'UE doit viser un volume d'élimination plus important en 2030 afin de contribuer à l'objectif de neutralité carbone d'ici à 2050. Néanmoins, la loi ne mentionne pas les technologies d'élimination permanente. Elle échoue également à aborder et à définir le rôle que l'élimination permanente et les puits naturels devraient jouer pour nous permettre d'atteindre la neutralité carbone, ne fixe aucun objectif intermédiaire (autre l'objectif de 2030 pour la réduction des émissions et les puits terrestres) et n'approfondit pas le sujet des émissions résiduelles.

Cadre de certification d'élimination

du carbone (CRCF)

Le CRCF est une politique unique au monde. Il s'agit d'un système de certification pour les projets européens portant sur un vaste éventail d'activités. Quatre groupes d'activités ont été créés, chacun disposant de sa propre unité : (1) réduction des émissions provenant des sols (dont terrains agricoles) ; (2) renforcement des puits naturels dans les sols et forêts ; (3) stockage du carbone dans des produits, pour une durée d'au moins 35 ans ; et (4) élimination permanente du carbone – pour une durée de plusieurs siècles au minimum.

Le système de certification a été validé au printemps 2024 mais n'a pas encore été officiellement adopté au moment de la rédaction de ce rapport. Il s'agit d'un système volontaire, ce qui signifie que les pays, entreprises et gestionnaires fonciers peuvent choisir d'y avoir recours ou non. Le CRCF en lui-même ne fait qu'établir les règles de bases concernant la manière dont le système devrait fonctionner une fois pleinement opérationnel. Ces règles incluent la définition de concepts clés, une formule de base pour la quantification des bénéfices nets des différents types d'activités, les éléments fondamentaux du mode de fonctionnement du système et quelques lignes directrices sur la responsabilité et les critères de durabilité environnementale.

L'objectif affiché du CRCF est de renforcer les activités d'élimination du carbone en Union européenne. Bien que cela s'avère nécessaire, le CRCF n'a pas été doté des éléments requis pour garantir un déploiement durable. Par exemple, toutes les émissions ne sont pas prises en compte dans la quantification du « bénéfice net » d'un projet, les bases de référence standardisées potentiellement employées manquent d'ambition et les garanties de durabilité sociale ont été exclus du cadre. Plus grave, il aborde à peine la manière dont les différentes unités générées par les activités certifiées pourraient être utilisées.

La seule décision concrète ayant été prise quant à l'utilisation des unités du CRCF est qu'elles ne pourront pas être utilisées dans le cadre de systèmes de conformité internationaux (p. ex. CORSIA) ou des Contributions déterminées au niveau national de pays hors UE au titre de l'Accord de Paris (CDN).

Si les unités du CRCF ont pour vocation d'être comptabilisées dans les CDN des États membres, elles peuvent également être utilisées à l'échelle mondiale afin de compenser des émissions sur les marchés volontaires du carbone. Or, rien n'a été mis en place pour éviter une double comptabilisation entre les objectifs climatiques européens et les marchés volontaires du carbone. Cette situation soulève un risque de double comptabilisation entre les politiques européennes et les inventaires de GES d'une part, et entre les entreprises utilisant les unités du CRCF dans le cadre d'allégations de compensation, tant au sein de l'UE qu'en dehors.

Le règlement lui-même est relativement court, la plupart des décisions opérationnelles étant reportées aux actes délégués (AD) que la Commission européenne préparera au cours des prochaines années. Ces AD aborderont une multitude de questions, dont l'établissement d'un registre CRCF, mais surtout les méthodes spécifiques que les porteurs de projets devront respecter concernant la quantification des bénéfices nets de leurs projets, la gestion de la responsabilité en cas de déstockage et la mesure et la gestion des impacts sur la durabilité.

Règlement sur l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie (UTCATF)

Le règlement UTCATF établit pour l'UE des objectifs de réduction des émissions et d'augmentation de la séquestration du carbone dans les secteurs de l'utilisation des terres et de la foresterie, par exemple dans les forêts, la gestion des terres arables, les prairies et les zones humides d'ici à 2030. Dans le cadre de la révision globale de la politique et des objectifs climatiques 2021-2030 de l'UE, le règlement a été modifié en 2023. Cette révision établit un nouvel objectif absolu à l'échelle de l'UE de 310 Mt d'équivalent CO₂ d'éliminations nettes entre 2026 et 2030. Pour atteindre cet objectif, des objectifs nationaux relatifs seront définis pour chaque État membre en fonction des chiffres d'élimination nette précédemment déclarés. Cependant, ces objectifs peuvent toujours être adaptés par les États membres (par exemple en modifiant la méthode de calcul, transformant l'objectif national relatif) et peuvent fortement varier d'un pays à l'autre. Si le règlement UTCATF ne fait pas directement référence à la CDR, il définit cependant un puit comme « tout processus, toute activité ou tout mécanisme, naturel ou artificiel, qui élimine de l'atmosphère un gaz à effet de serre,

un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre ».

La révision vise également à améliorer le système de MRV de la réduction des émissions et de l'élimination via le recours à la télédétection. En outre, elle établit des règles de comptabilité complètes avec différents éléments de comparaison et années de référence associés à chaque type de terre. Le CO₂ séquestré est enregistré comme une élimination, tandis que la suppression de biomasse, de matière organique, et les interférences dans les écosystèmes entraînant un déstockage des émissions préalablement absorbées sont classées comme des émissions.

Quant aux produits ligneux récoltés, ceux-ci sont comptabilisés dans le stock de carbone du secteur UTCATF. Malgré le manque de contrôle sur le cycle de vie réel des produits ligneux, un facteur de décomposition est attribué à chaque produit afin de déterminer la durée pendant laquelle les produits peuvent demeurer dans le stock de carbone du secteur UTCATF. Une fois cette durée écoulée, ils seront automatiquement comptabilisés comme des émissions.

Enfin, certains mécanismes de flexibilité ont été intégrés, avec la possibilité d'abaisser l'objectif européen en 2030. Ces mécanismes permettent également aux États membres d'accumuler un surplus d'émissions nettes afin de recevoir des crédits UTCATF qui pourront notamment être échangés avec des pays n'étant pas parvenus à atteindre leurs objectifs. Jusqu'à 262 million de tonnes d'équivalent CO₂ (CO₂e) séquestré dans le secteur UTCATF peuvent être utilisés de 2021 à 2030 pour compenser les émissions dans le cadre du règlement sur la répartition de l'effort (RRE). Cela inclut les émissions d'un vaste éventail de secteurs, dont le transport routier, la construction et l'agriculture. Le mécanisme de flexibilité nuit à l'intégrité environnementale dans la mesure où il permet d'utiliser la séquestration biogénique du CO₂ pour compenser des émissions fossiles dans le cadre des objectifs du RRE, retardant une action climatique pourtant extrêmement nécessaire dans ces secteurs clés. Il ignore également le degré élevé d'incertitude qui entoure les mesures prélevées dans le cadre du règlement UTCATF et établit une fausse équivalence entre réduction des émissions et séquestration du carbone dans les puits terrestres.

Loi sur la restauration de la nature

Proposée en juin 2022 et finalisée en février 2024, la NRL constitue un pilier de la [Stratégie de l'UE en faveur de la biodiversité](#). Elle appelle à l'établissement d'objectifs contraignants afin de restaurer les écosystèmes dégradés, en particulier ceux offrant la plus forte capacité de séquestration du carbone. Bien que seuls 15 % des écosystèmes européens soient « en bon état », la NRL vise uniquement à restaurer au moins 20 % des écosystèmes marins et terrestres d'ici à 2030, la priorité étant accordée aux habitats dégradés situés dans des zones Natura 2000. Les États membres doivent également restaurer au moins 30 % des habitats spécialement visés par la nouvelle loi, les faisant passer de « mauvais état » à « bon état » d'ici à 2030. Cet objectif passerait à 60 % d'ici à 2040 et 90 % d'ici à 2050.

La NRL a fait l'objet de sévères critiques et d'une intense campagne de désinformation qui a presque conduit à sa disparition. Elle a notamment été accusée de mettre en péril le secteur agricole et la sécurité alimentaire. Par conséquent, ses ambitions et son contenu ont été significativement allégés par rapport à la proposition initiale de la Commission et à la position du Conseil. Par exemple, le texte de la Commission proposait un objectif ambitieux pour la restauration des tourbières drainées soumises à une exploitation agricole, fixant un taux minimal de réhumidification. Cet objectif a par la suite été revu à la baisse, tant pour la restauration des tourbières drainées utilisées à des fins agricoles que pour la part obligatoire de réhumidification. En outre, les dispositions relatives à la restauration des agroécosystèmes peuvent désormais être suspendues temporairement dès lors qu'il est considéré que les objectifs nuisent gravement à la disponibilité des terres requises pour assurer une production alimentaire suffisante pour la consommation européenne. Ainsi, ce texte manque d'ambition en termes de résolution de la crise de la biodiversité actuelle et de restauration des écosystèmes dégradés.

En février 2024, la NRL a été adoptée par le Parlement européen avec 329 voix pour, 275 contre et 24 abstentions. Après plusieurs ajournements, elle a finalement été approuvée par le Conseil européen des ministres de l'environnement en juin 2024.

Politique agricole commune (PAC) 2023-2027

Lancée en 1962, la PAC est l'un des plus anciens instruments politiques de l'UE. Elle a depuis lors été réformée à plusieurs reprises, en dernier lieu en décembre 2021 à la suite de l'adoption du pacte vert pour l'Europe. La PAC est divisée en deux piliers. Le premier rassemble les aides directes aux agriculteurs associées à des règles de conditionnalité, qui concernent le respect des exigences réglementaires en matière de gestion selon le droit européen d'une part, et celui de neuf « bonnes conditions agricoles et environnementales » (BCAE) d'autre part. Ces BCAE comprennent notamment le maintien de prairies permanentes, la protection des zones humides, la gestion de l'eau et la prévention de la dégradation des sols. Les États membres sont tenus de transposer ces critères stricts dans les normes nationales et régionales.

En plus d'améliorer le principe de conditionnalité, la réforme 2023-2027 a introduit les « éco-régimes », conçus pour promouvoir des pratiques agricoles durables telles que celles désignées par le terme « carbon farming ». Le carbon farming décrit dans les grandes lignes des pratiques agricoles entraînant une réduction des émissions ou une séquestration du carbone. Cela regroupe l'agroforesterie, l'utilisation de cultures dérobées, cultures de couverture et du labour de conservation pour renforcer l'enrichissement des sols en carbone, et la restauration des tourbières et zones humides. Les éco-régimes sont volontaires : les agriculteurs sont libres de choisir d'y participer ou non et de changer de pratique chaque année, 25 % du total des aides directes leur étant affectés pour la période 2023-2027.

Le deuxième pilier se concentre sur la politique de développement rural de l'UE et les Mesures Agro-Environnementales et Climatiques (celles-ci sont similaires aux éco-régimes et peuvent s'étendre sur plusieurs années). Par rapport au premier pilier, le second offre une plus grande flexibilité, permettant aux autorités régionales, nationales et locales d'établir leurs propres programmes pluriannuels de développement rural. Ces programmes sont cofinancés par le Fonds européen agricole pour le développement rural (FEADER) et des fonds régionaux ou nationaux.

Enfin, la réforme de 2021 a introduit la nouvelle obligation pour les États membres de détailler leurs ambitions climatiques et la manière dont ils prévoient d'atteindre les objectifs de la PAC dans ce que l'on appelle les « plans stratégiques nationaux (PSN) pour la Politique Agricole Commune ». Dans ce cadre, les États membres disposent d'une grande autonomie dans la mise en œuvre des objectifs, conformément à la situation et aux besoins des pays.

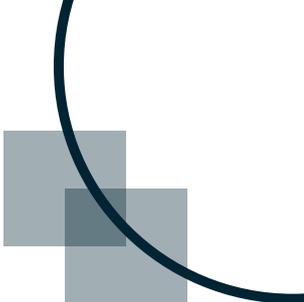
Depuis sa création, la PAC finance des pratiques néfastes pour le climat comme l'élevage intensif ou l'exploitation de tourbières drainées. Elle privilégie l'augmentation de la productivité aux dépens de l'environnement, produisant des cultures de base et produits d'origine animale bon marché pour l'industrie agroalimentaire et les marchés d'exportation. En effet, si sur la période 2014-2020, un quart du budget de la PAC (100 milliards d'euros) était consacré à l'action climatique, l'impact de ces mesures sur les émissions de l'agriculture a été mineur, car les gains potentiels apportés par les critères de conditionnalité ont été fortement surestimés. Le système des écorégimes n'a pas non plus répondu aux attentes, et la Cour des comptes européenne a récemment conclu que les [plans stratégiques nationaux pour la PAC n'étaient pas suffisamment alignés sur](#) les buts et objectifs du pacte vert, certains éléments clés permettant d'évaluer les performances écologiques de la PAC étant même absents.

En outre, les aides directes restent versées aux agriculteurs sans réel ciblage, les règles de conditionnalité étant définies de manière très vague. Jusqu'à présent, la Commission a choisi de répondre à la crise en allégeant les dispositions vertes de la PAC. Malheureusement, cela ne suffit pas à répondre aux préoccupations de bon nombre des agriculteurs, dont les principales sont le soutien des revenus agricoles et les inquiétudes quant à la compétitivité sur les marchés internationaux.

En cours

En novembre 2023, la Commission a présenté une proposition de règlement établissant un dispositif de suivi pour assurer la résilience des forêts européennes, dans le cadre de la Stratégie de l'Union européenne pour les forêts. Cette proposition vise à combler les lacunes d'informations sur les forêts européennes et à fournir des données comparables, cohérentes et détaillées sur l'état des forêts. Cela permettra aux États membres et aux propriétaires et gestionnaires forestiers de mieux répondre à la pression croissante imposée aux forêts et à accroître leur résilience. Elle a également pour but d'offrir de meilleures données et informations pour la prise de décisions politiques et leur mise en œuvre, y compris des informations à jour sur les perturbations et catastrophes naturelles.

Considérant que 60 % des sols européens sont dégradés, en juillet 2023, la Commission a soumis [une proposition de directive sur le suivi et la résilience des sols](#) (« Directive sur la surveillance des sols »), dans la lignée de la Stratégie de l'UE pour les sols, avec pour objectif ultime que tous les sols soient en bon état d'ici à 2050. La proposition fournit une définition de la santé des sols, présente un cadre de suivi, établit les règles d'une gestion durable des sols et impose aux États membres d'identifier les sites potentiellement pollués et d'y mener des études, mais aussi d'éliminer tout risque inacceptable pour la santé humaine et l'environnement.



Méthodes d'élimination du carbone

Le dioxyde de carbone peut être éliminé via différents processus de capture (biologiques, géochimiques, de synthèse) et stocké dans différents réservoirs (Figure 10). Tous les systèmes de CDR sont hétérogènes et spécifiques à chaque site d'implantation, gourmands en ressources et en énergie, et requièrent une gestion à long terme et de solides cadres de suivi et de vérification.

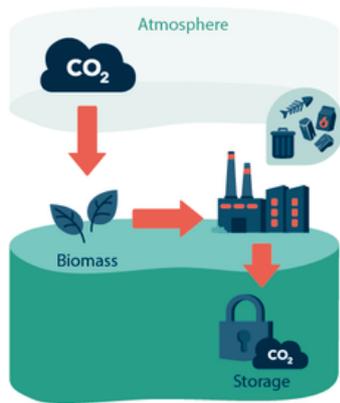
L'efficacité de tous les systèmes dépend de l'efficacité de l'utilisation des ressources de soutien (p. ex. transport, production d'énergie, culture de biomasse). Chaque système de CDR (selon le type de CDR et l'emplacement) présentera donc des avantages et des inconvénients en fonction des différentes ressources requises.

Un portefeuille équilibré de technologies et pratiques limiterait l'impact systémique de la CDR et ses effets sur les frontières planétaires, tout en maximisant l'élimination physique de carbone, en contribuant à d'autres objectifs de durabilité et en respectant les principes de crédibilité sociale et physique. Dans le cadre du projet NEGEM, les contraintes des portefeuilles potentiels de CDR en termes de durabilité, techniques et économiques ont été évaluées à l'aide de différentes méthodes de modélisation (voir également « [Modélisation](#) »), y compris au niveau des États membres de l'UE.

Les six fiches récapitulatives suivantes visent à décrire les technologies ou pratiques pouvant être utilisées pour éliminer et stocker du carbone, en précisant leur potentiel durable, leurs avantages et leurs limites. Ces fiches ne constituent pas une liste exhaustive de NETP, comme indiqué dans la Figure 10, mais se concentrent sur les plus étudiées dans le cadre du projet NEGEM. Des indicateurs de performances techniques sont fournis en haut de chaque fiche. Les autres informations, dont les contraintes correspondantes, ont été élaborées à partir de la littérature existante, comme le rapport State of CDR, et d'entretiens avec des experts du consortium NEGEM.

Voici quelques brèves explications sur les indicateurs techniques :

- **La permanence attendue** désigne la stabilité de stockage estimée du carbone dans le réservoir de stockage concerné (géologique, biologique, (géo)chimique).
- **Le risque de déstockage** désigne le risque de perte ou de fuite de carbone du support de stockage.
- **Le degré d'incertitude quant à la quantité de carbone initialement absorbé** indique la précision avec laquelle la quantité de carbone absorbé peut être mesurée. Les mesures indirectes et la complexité des chaînes d'approvisionnement accentuent cette incertitude.
- **Le degré d'incertitude quant à la quantité de carbone stocké à long terme indique dans quelle mesure le carbone peut être surveillé au fil du temps.** La dispersion du stockage du carbone, par exemple dans l'altération forcée ou le biochar, où le matériau est appliqué à un écosystème ouvert empêchent d'assurer le suivi uniquement par des mesures directes. Ces systèmes présentent également une plus grande incertitude que ceux basés sur un stockage géologique.
- **La facilité de MRV** indique le niveau de facilité avec lequel la quantité de carbone stocké à long terme pourra être mesurée, notifiée et vérifiée. Un niveau faible signifie que le système de MRV sera difficile à établir, tandis qu'un niveau élevé implique qu'il s'accompagnera de défis moindres. Des protocoles de MRV existent déjà pour bon nombre de méthodes.
- **Les bénéfices clés** cités sont limités aux cobénéfices environnementaux ou sur les écosystèmes, en plus de la coproduction d'énergie ou d'autres carburants tirée de la méthode de CDR.



Bio-CSC

Processus pouvant éliminer le carbone ou réduire les émissions de CO₂

Permanence attendue	millénaires
Risque de déstockage	faible
Incertitude quant à la quantité de carbone initialement absorbé	moyenne
Incertitude quant à la quantité de carbone stocké à long terme	faible
Facilité de MRV	élevée
Cobénéfices clés	Production d'énergie (chaleur, électricité, carburants)

Avantages

€ ADAPTATION D'ÉQUIPEMENTS PEU COÛTEUSE

La Bio-CCS peut être mise en place sur des sources de CO₂ biogénique existantes, comme des usines de papier ou d'éthanol ou des centrales électriques à biomasse/de cogénération. Elle est ainsi moins coûteuse tout en contribuant à la sécurité énergétique.

🔒 STOCKAGE PERMANENT

Le carbone séquestré est stocké de manière permanente, avec un faible risque de déstockage.

📊 MRV

Des protocoles de suivi, déclaration et vérification existent déjà.

⚡ PRODUCTION DE SOUS-PRODUITS UTILES

Pendant la conversion de la biomasse, de l'énergie est produite sous la forme de chaleur, d'électricité ou de carburants. Cela réduit l'empreinte énergétique de la Bio-CSC et peut offrir des sources de revenus supplémentaires.

Qu'est-ce que la Bio-CSC et comment stocke-t-elle le carbone ?

La biomasse avec captage et stockage du carbone (Bio-CSC) transforme le CO₂ séquestré dans la biomasse en énergie, carburants, ou autres utilisations. Le carbone libéré durant ce processus est capturé et stocké dans des stockages géologiques permanents. La source de biomasse choisie et la méthode de conversion varient en fonction du projet de Bio-CSC, ce qui a un impact sur le potentiel de CDR. La source de biomasse peut être constituée de résidus agricoles et forestiers, de déchets de l'industrie papetière, de pellets de bois, de déchets municipaux solides ou de cultures dédiées, tandis que la méthode de conversion impliquera des processus biologiques ou thermochimiques. En ce sens, chaque site de Bio-CSC est unique, avec des matières premières, une chaîne d'approvisionnement, un processus de capture de CO₂ et des processus en aval qui lui sont propres.

La biomasse utilisée dans la Bio-CSC compte souvent « pour 0 », le carbone absorbé pendant la croissance de la biomasse étant considéré comme réémis lors de la récolte (comptabilisé dans les émissions du secteur UTCATF). Tout le CO₂ biogénique capturé lors de la conversion de la biomasse dans une usine de Bio-CSC est considéré comme une émission négative. Les émissions de CO₂ biogénique existantes au point source peuvent également être capturées.

Il existe actuellement 19 usines de production de bioénergie à travers le monde, soit en fonctionnement, soit en phase pilote ou en construction. Parmi les projets phares dans ce domaine figurent les projets Drax et Stockholm Exergi, censés capturer respectivement 8 Mt CO₂/an et 0,8 Mt CO₂/an, avec stockage géologique permanent subséquent.

Cadres réglementaires pertinents : l'approvisionnement en matière première doit être conforme aux règles de la [directive européenne sur les énergies renouvelables](#) en matière de biomasse durable.

Défis

CO₂ CHAÎNE DE VALEUR À FORTES ÉMISSIONS

Les longues distances entre la source de biomasse et les sites de traitement et de stockage entraînent des émissions élevées tout au long de la chaîne de valeur.

📈 TAUX DE CAPTURE DU CARBONE IMPARFAITS

Tout le carbone issu de la conversion en bioénergie ne peut être directement capturé (taux de capture d'environ 90-99 %).

🌍 PRESSION SUR LES FRONTIÈRES PLANÉTAIRES

Un déploiement à grande échelle de cultures dédiées à la bioénergie entraînerait de graves interférences avec les frontières planétaires et les objectifs de biodiversité. Les cultures de biomasse requièrent des volumes colossaux d'eau, d'engrais et de terres, et entrent en concurrence avec la sécurité alimentaire, augmentant les prix.

🕒 LONGUE DURÉE D'AMORTISSEMENT DU CARBONE

La durée d'amortissement du carbone peut être longue en fonction de la source de biomasse.

🌲 ÉMISSIONS DE GES INDIRECTES ÉLEVÉES

Peut entraîner d'importantes émissions liées à la déforestation et au changement d'affectation des terres. La demande en cultures vivrières et fourragères restant stable, ces produits seront cultivés ailleurs, déplaçant simplement le lieu de production des émissions.

🔒 RISQUE DE FUITE

Risque de fuite pendant le transport de la biomasse, notamment si elle n'est pas utilisée dans sa région de production.

Quel est le potentiel durable de la Bio-CSC en matière de séquestration du carbone ?

Performances économiques

CapEx

Coûts réduits pour les adaptations de sites.

OpEx

Coûts élevés pour le traitement du CO₂ et son transport jusqu'au site de stockage. Coûts plus faibles pour les flux à forte concentration en CO₂ sur les sites de Bio-CCS.

Sécurité des ressources

Plus faibles contraintes énergétiques si l'énergie produite lors de la conversion de la biomasse peut être utilisée.

Les cultures énergétiques supplémentaires dédiées à la production de biomasse requièrent la conversion de nouveaux terrains et de l'eau pour l'irrigation.

Performances environnementales

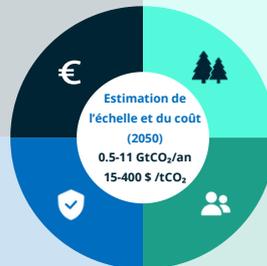
Les impacts en termes de changement d'affectation des terres, d'intégrité de la biosphère et de cycle de l'eau douce et des nutriments sont moindres avec des cultures énergétiques non dédiées ou le recours aux flux secondaires de biomasse (résidus agricoles et forestiers).

La Bio-CCS basée sur des plantations implique des besoins en eau et en terre plus élevés.

Performances sociales et gouvernance

Possibilité qu'un transport international de biomasse soit requis, et impact sur les systèmes alimentaires en raison des surfaces de culture supplémentaires requises.

Perçue de manière défavorable pas les acteurs concernés.



Inconnues actuelles et futures pistes de recherche

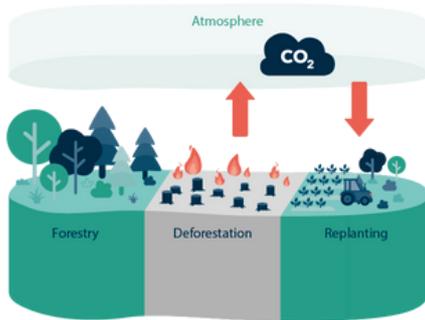
La future disponibilité des matières premières hors plantation est incertaine, et les quantités limitées devront être partagées avec d'autres utilisations potentielles (p. ex. matériaux de construction, biochar ou production de carburants alternatifs). Le changement climatique pourrait affecter les taux de croissance de la biomasse et restreindre les volumes de matières premières disponibles à l'avenir.

En l'absence de méthodologie standardisée, le potentiel de CDR et le coût de la Bio-CSC restent incertains. Une clarification est requise quant à la comptabilité carbone de la chaîne de valeur des matières premières, car la réalité des émissions négatives effectivement générées par certains projets de Bio-CSC s'avère discutable.

Il existe à l'heure actuelle peu d'emplacement de stockage disponibles et les bénéfiques/risques du stockage sur terre et en mer sont encore à l'étude.

RECOMMANDATIONS

- ★ Veiller à ce que les systèmes de certification prévoient des incitations adéquates à la capture sécurisée de tous les flux de CO₂ quel que soit le type d'émission (fossile, biogénique) ; comptabiliser le carbone sur toute la chaîne de valeur pour permettre l'établissement d'une analyse systémique de chaque projet de Bio-CSC et calculer l'élimination nette de carbone.
- ★ Mener une analyse du cycle de vie pour chaque projet de Bio-CSC afin d'en déterminer les impacts sur le changement d'affectation des terres, les ressources naturelles, la santé des écosystèmes, la biodiversité, les cycles de nutriments et les stocks de carbone dans les sols, à comparer aux inconvénients potentiels dans le cadre des frontières planétaires et de la réalisation des Objectifs de développement durable.
- ★ Élaborer des politiques incitant à une transition vers des régimes alimentaires végétariens tels que le « régime alimentaire planétaire » EAT-Lancet, qui reconvertisent les pâturages et allègent la demande en terres arables.
- ★ Privilégier les sources de matières premières durables comme les déchets municipaux, les résidus agricoles et forestiers et les déchets de l'industrie papetière afin d'éviter que de nouvelles frontières planétaires soient dépassées. Interdire l'utilisation de biomasse de haute qualité et à forte valeur ajoutée comme matière première pour la bioénergie.
- ★ Assurer un approvisionnement durable en biomasse, en conformité avec les règles européennes et internationales ; veiller à ce que des écosystèmes riches en biodiversité ne soient transformés en cultures de biomasse. Utiliser uniquement les sources de biomasse limitées dans les secteurs où la réduction des émissions serait trop difficile et où aucune autre matière première n'est disponible.
- ★ Promouvoir les échanges et la coopération à l'échelle internationale afin de remédier aux inégalités de répartition des capacités nationales, telles que les ressources en biomasse et les sites de stockage.



Afforestation et Reforestation

Pratique renforçant le stockage naturel du carbone et pouvant réduire les émissions

Permanence attendue	décennies à siècles
Risque de déstockage	élevé
Incertitude quant à la quantité de carbone initialement absorbé	moyenne
Incertitude quant à la quantité de carbone stocké à long terme	élevée
Facilité de MRV	faible
Cobénéfices clés	peut renforcer la biodiversité, la santé des écosystèmes

Avantages

DE NOMBREUX COBÉNÉFICES

La reforestation comporte de nombreux cobénéfices. Elle contribue à la restauration de la nature, à la santé des sols, à la biodiversité, à l'intégrité de la biosphère et à la stabilisation du climat.

FAIBLE COÛT

L'A/R se produit réellement et s'avère moins coûteuse à mettre en œuvre que les autres NETP. Les infrastructures supplémentaires requises sont très réduites.

IMAGE POSITIVE

L'A/R jouit généralement d'une bonne image auprès du grand public.

BÉNÉFICES ÉCONOMIQUES

Les projets peuvent dynamiser les communautés locales et leur offrir des avantages économiques.

Qu'est-ce que l'afforestation et reforestation et comment ces pratiques stockent-elles le carbone?

L'afforestation (A) consiste à planter de nouveaux arbres et à accroître le couvert forestier sur des terrains qui n'étaient pas boisés auparavant, tandis que la reforestation (R) désigne la plantation d'arbres sur des terrains récemment déforestés ou dégradés. La forêt joue un rôle de puits de carbone dans la mesure où elle absorbe le CO₂ de l'atmosphère par photosynthèse et le stocke dans la biomasse vivante, la matière organique morte et les sols forestiers. Le carbone peut s'accumuler dans le tronc et les branches (biomasse aérienne), mais également dans les racines (biomasse souterraine) et le sol. Une gestion continue de la biomasse forestière étant requise pour maintenir le carbone dans la végétation et les sols, ce type de stockage est vulnérable aux fuites, et donc susceptible de n'être que temporaire. Les pratiques d'afforestation et de reforestation qui privilégient un mélange d'essences locales plutôt que de miser sur des monocultures non locales offrent des services écosystémiques supplémentaires et stimulent la biodiversité.

D'après le rapport [State of CDR](#) de 2023, le stockage annuel de carbone issu de la séquestration terrestre (regroupant l'afforestation, la reforestation et la gestion des forêts existantes) est actuellement estimé à 2 Gt CO₂.

Cadres réglementaires pertinents : [règlement de l'UE sur l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie \(UTCATF\)](#), [loi sur la restauration de la nature](#), proposition de [cadre de suivi pour assurer la résilience des forêts européennes](#). La société a convenu de plusieurs objectifs en matière de biodiversité et de restauration des écosystèmes, comme établi dans le [Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal](#) et le [Défi de Bonn](#).

Défis

RISQUE ÉLEVÉ DE FUITE

Le carbone stocké dans les forêts est vulnérable aux perturbations telles que les feux de forêts, les parasites et les maladies, ainsi qu'aux transferts de propriété des terrains pouvant entraîner la perte des forêts.

DIFFICULTÉ À QUANTIFIER LE CARBONE STOCKÉ

Il est difficile de mesurer le carbone stocké en souterrain. La situation géographique a un impact sur la capacité de la forêt à séquestrer du carbone et implique certaines rétroactions sur le climat (p. ex. effet albédo, évapotranspiration).

CAPACITÉ DE STOCKAGE LIMITÉE

Le niveau de séquestration est faible, et la forêt pousse lentement. Après un certain temps, la forêt sature et relâche davantage de CO₂ (p. ex. lorsque les arbres meurent) qu'elle n'en absorbe.

DROITS DES POPULATIONS LOCALES

Les projets ne donnent pas toujours la priorité aux droits des populations locales marginalisées, souvent exclues des processus de prise de décisions.

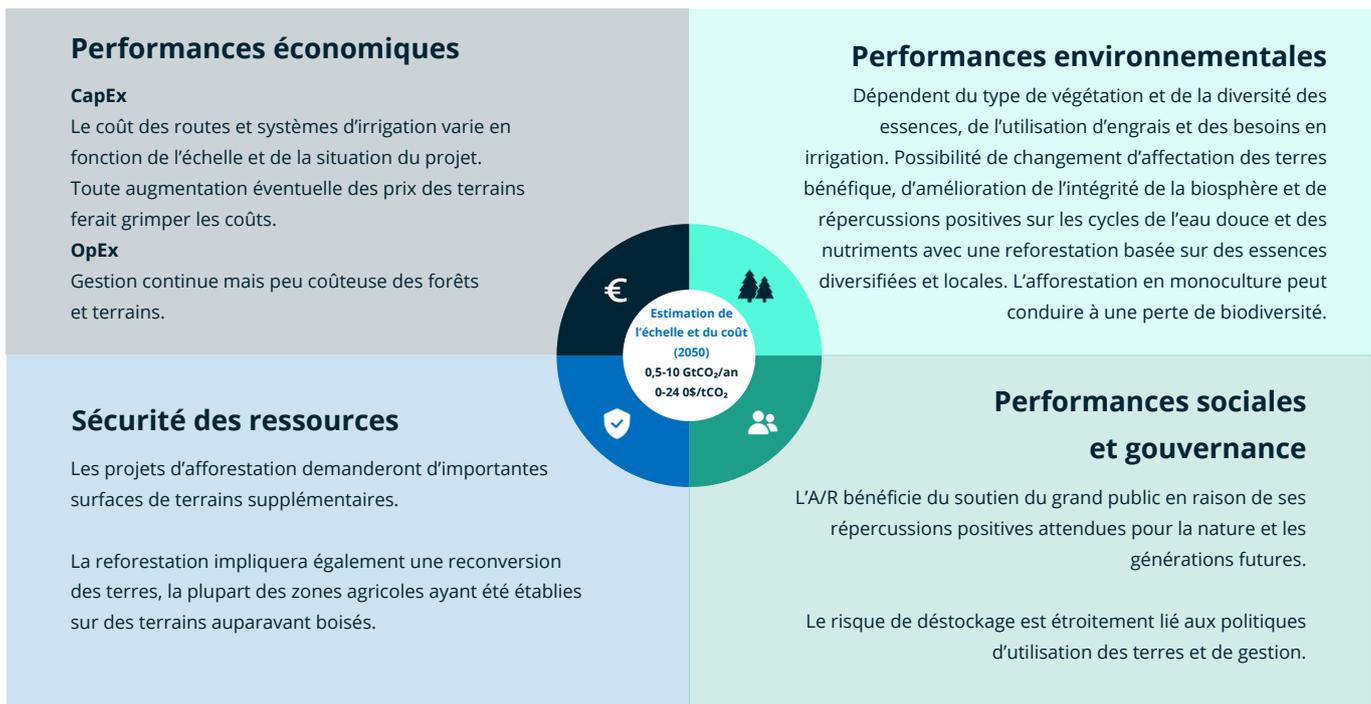
NÉCESSITÉ DE SURFACES SUPPLÉMENTAIRES

L'afforestation de terrains qui n'étaient pas boisés auparavant peut conduire à d'importants changements d'affectation des terres, accentuant l'insécurité alimentaire, les conflits autour des terres et la pression sur les frontières planétaires.

EFFETS INDÉSIRABLES SUR L'ENVIRONNEMENT

Les projets d'afforestation sur des terrains non boisés peuvent nécessiter un recours important aux engrais et à l'irrigation. Les projets peuvent également impliquer l'introduction d'essences non locales.

Quel est le potentiel durable de l'afforestation et reforestation en matière de séquestration du carbone ?



Inconnues actuelles et pistes de recherche futures

La compatibilité entre l'A/R et d'autres NETP basées sur le foncier n'est pas garantie au vu des pressions économiques, politiques et sociales sur l'utilisation des terres pour la production alimentaire et le développement urbain.

Les rétroactions climatiques dues aux émissions de gaz à effet de serre hors CO₂, aux composés organiques volatiles, à l'évapotranspiration et à l'effet albédo pourraient contrebalancer l'atténuation climatique résultant de la réduction de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Ces impacts doivent être quantifiés plus précisément afin de pouvoir déterminer le bénéfice climatique net.

Nous ne savons pas encore quel sera l'impact du changement climatique sur la capacité des forêts à croître, survivre et stocker du carbone, ce qui complique encore la comptabilité, le système de MRV et le calcul de l'efficacité globale de la CDR.

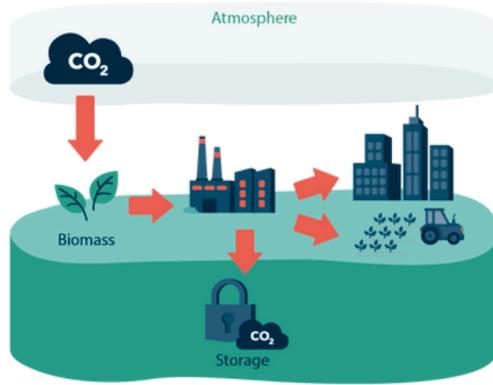
RECOMMANDATIONS

- ★ Aligner les réglementations relatives au climat et à la restauration de la nature pour parvenir à une politique environnementale plus cohérente et plus efficace.
- ★ Mettre fin à la déforestation, protéger les forêts anciennes, interdire l'abattage illégal et intensif, réduire les plantations commerciales et éviter les récoltes destinées à des utilisations à court terme (par exemple pour la bioénergie et l'industrie papetière) ; veiller à ce que le volume des récoltes de biomasse ne soit pas supérieur à la capacité de croissance de la biomasse pour remplacer les pertes.
- ★ Adopter une foresterie proche de la nature et d'autres pratiques durables telles que la plantation de mélanges d'espèces locales et la stimulation de la croissance des forêts anciennes ; poursuivre la gestion forestière après la saturation afin d'éviter que des perturbations ne conduisent à une réémission du carbone séquestré.
- ★ Mettre en œuvre une transformation du système alimentaire à grande échelle sur la base du « régime alimentaire planétaire » EAT-Lancet afin de libérer des terres, de contribuer à la restauration des forêts et d'éviter tout conflit avec la production et la sécurité alimentaires ; privilégier la reforestation et la restauration des terrains dégradés et désertifiés dans les forêts primaires et secondaires.
- ★ Tenir compte des effets négatifs (intégrité de la biosphère, changement d'affectation des terres, écosystèmes, cycle de l'eau), des particularités locales, des conditions climatiques et des interactions avec le climat (effet albédo ou processus d'évapotranspiration) dans les projets d'A/R.
- ★ Adopter une approche basée sur les droits afin de respecter les droits fonciers des communautés locales et indigènes.

Biochar

Matériau qui stocke le carbone et peut réduire les émissions de CO₂

Permanence attendue	décennies à millénaires moyen
Risque de déstockage	moyen
Incertitude quant à la quantité de carbone initialement absorbé	faible
Incertitude quant à la quantité de carbone stocké à long terme	élevée
Facilité de MRV	moyen
Cobénéfices clés	augmentation des rendements des cultures, réduction des émissions de N ₂ O des sols, pH du sol, réduction de l'utilisation d'engrais de synthèse



Avantages

DE NOMBREUX COBÉNÉFICES

Les propriétés physiques du biochar (p. ex. sa grande porosité) offrent de nombreux cobénéfices pour l'agriculture, comme une rétention accrue des nutriments et de l'humidité dans les sols.

MÉLANGE DE MATIÈRES PREMIÈRES

Aucune séparation par type de matière première n'est requise lors du processus de pyrolyse.

DÉPLOIEMENT À PETITE ÉCHELLE

Peut être rapidement déployé via une multitude de petites usines, en utilisant des flux secondaires de biomasse locale et durable.

RENTABLE

La viabilité économique est élevée : le gaz de synthèse et la bio-huile coproduits peuvent être vendus à titre commercial, générant des revenus pour les exploitants des sites.

Qu'est-ce que la Bio-CSC et comment stocke-t-elle le carbone ?

Le biochar est produit par décomposition thermique de la biomasse en l'absence d'oxygène, dans un processus appelé pyrolyse, à une température comprise entre 450°et 600°C. Les températures supérieures à cette plage peuvent créer une forme liquide, de la « bio-huile », et du « pirogaz ».

Le biochar peut être obtenu à partir de différentes sources telles que les déchets urbains et municipaux, les résidus agricoles et forestiers ainsi que les cultures de biomasse dédiées, et sa qualité dépendra de la source des matières premières et de la température à laquelle il est produit. Par exemple, une biomasse ligneuse chauffée au-delà de 450 °C présentera une meilleure stabilité et un taux de décomposition plus faible qu'une biomasse dérivée du fumier chauffée à plus faible température.

La permanence et le risque de déstockage dépendent des fractions labiles et récalcitrantes de carbone et du type et milieu de stockage. Le biochar peut être ajouté à des matériaux de construction tels que le ciment et le goudron, ou peut être épandu sur les sols, enrichissant le puits naturel du sol. D'après la recherche, bien que la part récalcitrante de biochar soit très stable, en l'absence d'études de terrain à long terme, il reste difficile de déterminer le risque potentiel de réémission du carbone stocké dans le biochar sur des périodes pertinentes pour la CDR.

Selon le dernier [European Biochar Industry report](#), fin 2023, la production de biochar atteignait environ 49 000 t (soit plus de 130 000 t CO₂e).

Cadres réglementaires pertinents : [directive sur les énergies renouvelables](#) ; [règlement sur l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie \(UTCATF\)](#) ; [règlement en vue d'ajouter les matières issues de la pyrolyse et de la gazéification en tant que catégorie de matières constitutives des fertilisants UE](#).

Défis

DÉFIS LIÉS À LA STANDARDISATION DE LA CERTIFICATION

En raison des nombreuses possibilités de stockage du biochar, il est difficile d'établir une approche standardisée de certification du carbone stocké.

EFFICIENCE DE CDR MOINDRE

Efficience de CDR inférieure à celle d'autres technologies et pratiques à émissions négatives en raison de la perte de carbone lors du processus de pyrolyse et de la décomposition.

CAPACITÉ DE STOCKAGE LIMITÉE

La demande globale en biomasse va augmenter, entraînant une concurrence avec d'autres NETP basées sur la biomasse, comme la Bio-CSC.

DIFFICULTÉ DU SUIVI

La permanence du stockage du carbone dans le biochar et sa réactivité dans les applications en plein air n'ont pas encore été prouvées. Lors d'un épandage sur de grandes surfaces, surveiller le stockage dispersé de CO₂ extrait et respecter les exigences de MRV avec précision peut relever de la gageure.

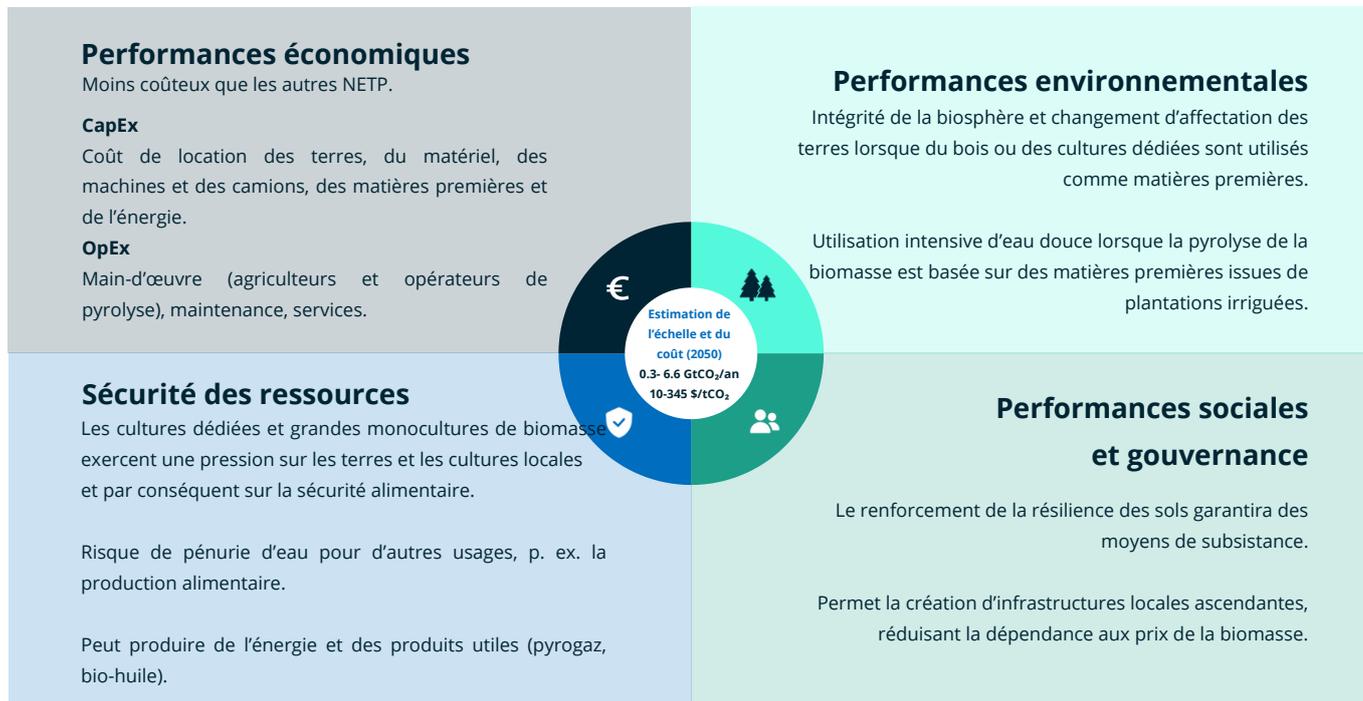
COBÉNÉFICES DÉPENDANTS DES ÉCOSYSTÈMES

Les bénéfices agricoles dépendent du sol, des propriétés du biochar, des conditions climatiques et des interactions entre tous ces éléments.

INTERACTIONS CLIMATIQUES POTENTIELLES

Des effets albédo sont possibles en fonction de la méthode d'épandage et du terrain sur lequel le biochar est déposé.

Quel est le potentiel durable du biochar en matière de séquestration du carbone ?



Inconnues actuelles et pistes de recherche futures

La réactivité du biochar dans différents milieux de stockage (p. ex. sols, matériaux de construction, béton, asphalte, goudron) et la part de carbone de biochar labile (chimiquement instable) et récalcitrant (stable) retenue dans le milieu de stockage, p. ex. les sols, sur une longue durée.

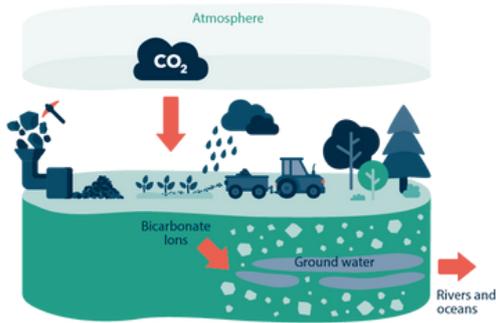
L'interaction entre le biochar et les propriétés du sol sur le site d'épandage et son influence sur la perte totale de carbone (p. ex. issue des stocks de carbone organique dans les sols et de la dégradation du biochar) et sur les cobénéfices écosystémiques de l'épandage de biochar dans différents types de sol, p. ex. capacité de rétention d'eau, cultures, rendements, conditions climatiques, émissions de GES hors CO₂ et fixation des métaux lourds.

RECOMMANDATIONS

- ★ Élaborer des expérimentations de terrain de long terme afin de mieux comprendre les propriétés et le fonctionnement du biochar et de contribuer à la création d'une politique complète en matière d'utilisation du biochar.
- ★ Veiller à ce que l'enrichissement des sols en biochar soit adapté au contexte, notamment en tenant compte des conditions climatiques et de l'état du sol. Créer une réglementation prévoyant une méthodologie solide afin de surveiller le stockage dispersé, les effets albédo potentiels, de calculer les taux de décomposition et les émissions et d'assurer l'attribution des responsabilités en cas de déstockage.
- ★ Veiller à ce que la biomasse provienne de flux secondaires tels que les résidus agricoles et forestiers ou les déchets alimentaires afin d'éviter une accumulation de la dette carbone due à l'accaparement de terres, à la concurrence avec d'autres NETP ou à l'insécurité alimentaire.
- ★ Éviter de faire appel à des cultures dédiées. Privilégier l'exploitation de terres arables abandonnées ou mettre en œuvre un système de pyrolyse neutre en terres et en calories qui demande moins d'engrais, de pesticides et d'irrigation tout en offrant des cobénéfices.

Geochemical capture

Geological storage



Altération terrestre forcée

Pratique qui accélère un processus naturel pour absorber du CO₂

Permanence attendue	millénaires
Risque de déstockage	faible
Incertitude quant à la quantité de carbone initialement absorbé	élevée
Incertitude quant à la quantité de carbone stocké à long terme	élevée
Facilité de MRV	faible
Cobénéfices clés	possibilité d'augmentation des rendements agricoles et de réduction de la consommation d'engrais

Avantages

STOCKAGE PERMANENT

Le carbone séquestré est stocké de manière permanente, avec un faible risque de réémission.

PAS DE SURFACES SUPPLÉMENTAIRES REQUISES

Les terres agricoles existantes peuvent être utilisées pour la TEW et sa mise en œuvre peut accroître les rendements agricoles et réduire l'utilisation d'engrais.

SIMILAIRE À LA GESTION DU PH DES SOLS

L'altération terrestre forcée est un processus similaire à l'épandage de chaux sur les sols et des tests standardisés existent et peuvent être utilisés pour mesurer les taux de réaction dans les sols pour les projets concernés.

RENTABLE

Système relativement rentable, avec une capacité théoriquement importante et potentiellement durable indéfiniment.

Qu'est-ce que l'altération terrestre forcée et comment stocke-t-elle du carbone ?

L'altération terrestre forcée (TEW) désigne l'épandage de particules de silicate ou de carbonate à haute réactivité sur les sols. Ces minéraux se dissolvent dans l'eau et réagissent avec le CO₂ pour produire des ions de bicarbonate qui ruissellent jusqu'aux rivières et aux océans via les nappes souterraines ou se minéralisent dans la terre, devenant des carbonates stables. Cela signifie que la durée d'élimination du carbone ne correspond pas à la durée d'épandage. Les ions dissouts et les minéraux créés constituent des milieux de stockage extrêmement stables qui enferment le carbone en sécurité pendant une longue durée (> 10 000 ans) avec un risque de fuite très faible.

Différents minéraux peuvent être utilisés dans l'altération forcée, avec différentes compositions chimiques, réactions à la dissolution, capacités de stockage du CO₂, et qui contiennent différents métaux lourds ou composés toxiques pouvant représenter un risque pour la santé ou l'environnement. Parmi les minéraux fréquemment employés figurent le basalte et la dunite. Le basalte requiert d'importantes activités d'extraction et un transport substantiel, ce qui contrebalancerait les bénéfices de l'élimination du carbone si des ressources fossiles sont employées. La TEW basée sur la dunite demande moins de matière que le basalte mais présente une toxicité plus élevée en raison de la teneur importante en nickel de ce minéral. Chaque projet requiert donc une analyse d'impact propre, en fonction par exemple de la situation géographique et du minéral utilisé.

Si la chaux est communément utilisée dans les pratiques agricoles afin de maîtriser le pH des sols, son exploitation dans l'absorption et le stockage du carbone reste nouvelle et fait encore l'objet de recherches. Son utilisation comme NETP n'est généralement pas envisagée dans les portefeuilles nationaux de l'UE. D'après le GIEC, cette solution ne serait pas faisable du point de vue économique, environnemental et technologique avant 2030, voire 2050.

Cadres réglementaires pertinents : il n'existe pour l'heure aucun texte européen encadrant l'altération forcée.

Défis

CHAÎNE DE VALEUR À FORTES ÉMISSIONS DE GES

Le processus de concassage de roches et l'exploitation minière liée à l'extraction des minéraux impliquent tous deux des émissions importantes de GES.

QUANTIFICATION DIFFICILE SUR LE TERRAIN

La séquestration de CO₂ n'est pas immédiate après épandage. Les taux de réaction lente sont difficiles à quantifier avec précision sur le terrain.

DIFFICULTÉ DU SUIVI

Lors d'un épandage sur de grandes surfaces, surveiller le stockage dispersé de CO₂ extrait et respecter les exigences de MRV avec précision peut relever de la gageure.

VARIATION DE LA SÉQUESTRATION SELON LA LOCALISATION

Le taux de CO₂ séquestré varie en fonction de la composition chimique des sols. À certains endroits, il est possible que du CO₂ s'échappe, réduisant l'efficacité de la CDR.

Quel est le potentiel durable de l'altération terrestre forcée climatique en matière de séquestration du carbone ?

Performances économiques

CapEx

Investissement initial important dans l'infrastructure d'extraction/broyage/transport.

OpEx

Suivi constant, coûts de maintenance. Coûts élevés pour alimenter le concassage des roches, transport des minéraux jusqu'au site de déploiement. Coûts d'utilisation relative faibles.

Performances environnementales

Nécessite d'importantes quantités de minéraux et un approvisionnement durable est peu probable. L'impact environnemental de l'extraction dépend du minéral. L'extraction minière peut entraîner une pollution de l'eau douce et des émissions de GES..

L'épandage des minéraux peut entraîner une lixiviation des métaux dans les sols/eaux souterraines.

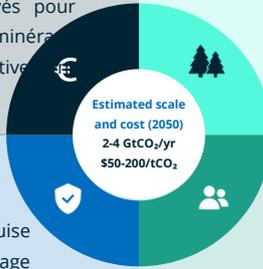
Sécurité des ressources

Aucune surface de terrain supplémentaire n'est requise pour l'épandage, mais des plafonds d'épandage existeront.

Le concassage, le broyage et le transport des roches pourraient consommer d'importantes quantités d'énergies renouvelables et exercer une pression sur les réseaux de transport.

Performances sociales et gouvernance

Impact environnemental de l'exploitation minière, risque de non-respect des droits de l'homme dans ces activités, transport international de matériaux. Impact de l'exploitation minière sur la santé humaine (p. ex. production cancérigène, pollution aux particules fines), mais qui pourrait être compensé par les bénéfices sanitaires de l'atténuation du climat.



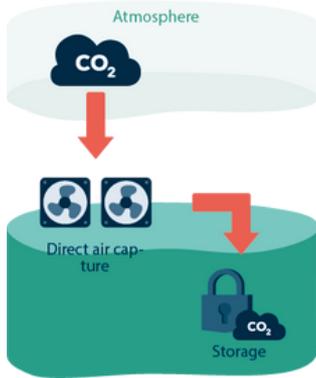
Inconnues actuelles et pistes de recherche futures

Jusqu'à présent, les études de terrain menées n'ont pas permis de reproduire les taux de dissolution possibles de manière théorique. La réactivité des minéraux dépend fortement des conditions environnementales et fonctionne mieux dans des régions chaudes et humides (p. ex. Brésil, Asie du Sud-Est, Chine, Inde). Une modélisation plus précise avec des mesures de terrain s'avère donc nécessaire pour mieux connaître les réactions chimiques, la dispersion des minéraux, les taux de réaction et le risque de perte lors de la seconde précipitation du minéral.

Le taux de dissolution des grains constitue un facteur clé du taux de séquestration du carbone dans le cadre du processus d'altération. Néanmoins, de plus amples recherches sont requises afin de mesurer la vitesse à laquelle les grains de roche se dissolvent dans différents types de sols sur le terrain et d'en optimiser l'utilisation. De nouvelles méthodes d'altération des roches sont en cours de développement, dont l'utilisation de catalyseurs ou d'organismes tels que le lichen ou la mousse qui, appliqués sur la roche, peuvent la dissoudre en modifiant la composition chimique de la surface de la roche.

RECOMMANDATIONS

- ★ Élaborer un système de MRV adapté et complet pour le carbone séquestré et stocké, ainsi qu'une analyse d'impact environnemental standardisée afin de promouvoir le TEW comme une méthode de CDR permanente. Cela peut inclure des méthodes de modélisation standardisées permettant un MRV précis des stocks de carbone dispersés, à valider par des mesures des taux de dissolution des différents minéraux sur le terrain.
- ★ Envisager des incitations temporaires basées sur les cobénéfices de l'altération forcée et promouvoir un MRV à mesure que la CDR se développera.
- ★ Adapter l'ampleur du déploiement de l'altération forcée à la disponibilité de la poudre minérale plutôt qu'à l'épandage sur les terrains agricoles, potentiellement inépuisables.
- ★ Mener des analyses de durabilité et créer des normes concernant les sources de minéraux, tant en UE qu'à l'extérieur des frontières, et veiller à ce que toutes les émissions de GES potentiels et tous les impacts environnementaux aient été pris en compte. Adapter la législation européenne existante en matière de protection de l'environnement si cela est nécessaire.
- ★ Veiller à ce que les autorisations de projets prévoient des emplacements adéquats pour l'extraction des minéraux et le broyage, avec des énergies renouvelables disponibles en quantité suffisante et à proximité des sites d'épandage afin de limiter les émissions de GES de la chaîne de valeur.



DACCS

Processus absorbant le CO₂ directement de l'atmosphère

Permanence attendue	millénaires
Risque de déstockage	faible
Incertitude quant à la quantité de carbone initialement absorbé	faible
Incertitude quant à la quantité de carbone stocké à long terme	faible
Facilité de MRV	élevée
Cobénéfices clés	aucun

Avantages

STOCKAGE PERMANENT

Le carbone séquestré est stocké de manière permanente, avec un faible risque de déstockage.

Niveau de maturité technologique

Le DACCS est l'une des technologies les plus développées ([TRL 6](#)), déjà en phase pilote.

MRV

Quantification facile des volumes de carbone absorbés et stockés. La définition de la situation de référence est simple, et le DACCS est considéré comme additionnel par défaut.

AVANTAGES ENVIRONNEMENTAUX

Faible impact sur la biosphère terrestre, aucune limite biophysique de manière générale, mais peut offrir une précieuse source d'eau douce dans des régions arides.

Qu'est-ce que le DACCS et comment stocke-t-il le carbone ?

Le captage direct du carbone dans l'air suivi du stockage (DACCS) désigne l'extraction chimique de CO₂ de l'atmosphère par adsorption chimique, suivie par la récupération et la compression du CO₂ dans un liquide concentré stocké dans des réservoirs géologiques. C'est un exemple de méthode d'élimination du carbone pour laquelle le système de MRV est facile à établir, puisque les processus de captage et de stockage sont relativement faciles à quantifier et à mesurer. Le CO₂ est séparé des autres éléments de l'air ambiant par absorption ou adsorption. Une fois extrait, le carbone est ensuite stocké dans des réservoirs tels que des aquifères salins ou dans d'autres formations minérales de la croûte terrestre.

Les sorbants solides et solvants liquides constituent les deux méthodes les plus fréquemment utilisées dans le DACCS pour capturer le CO₂ directement dans l'air. Dans le processus de DACCS avec solvant liquide, une chaleur élevée (900 °C) est fournie par du gaz naturel ou de l'hydrogène, avec de l'électricité tirée du réseau. Il est estimé que les émissions de CO₂ issues de la combustion du gaz naturel seront capturées dans la zone de l'installation. Dans le processus de DACCS avec sorbant solide, la chaleur et l'électricité proviennent toutes deux du réseau électrique via une pompe à chaleur industrielle qui transforme l'électricité en chaleur de faible niveau (100 °C). Les technologies de captage les plus récentes emploient des réactions chimiques plus économiques et réversibles à base de carbonate (carbonatation et calcination).

En février 2024, on compte plus de 20 initiatives de DAC/DACCS en Europe. La capacité actuelle de l'un des plus grands sites en fonctionnement, [Mammoth](#), se situe aux alentours de 36 000 tonnes de CO₂ par an.

Cadres réglementaires pertinents : pour l'heure, le stockage géologique est régi par la [directive CSC de l'UE](#). D'après l'Agence internationale de l'énergie (AIE), l'éventuel transport international de CO₂ pourrait être régi par le Protocole de Londres, après ratification.

Défis

CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Dépend de l'abondance en énergies renouvelables et sources de chaleur. Environ 200 km² de terres non-arables sont nécessaires pour générer les énergies renouvelables requises pour éliminer 1 Gt de CO₂.

LOCALISATION DES SITES

Restrictions quant à la localisation des sites en raison de la proximité nécessaire avec l'approvisionnement en énergies renouvelables. Capacité de stockage limitée en raison de la capacité actuellement faible en réservoirs de stockage stables et permanents.

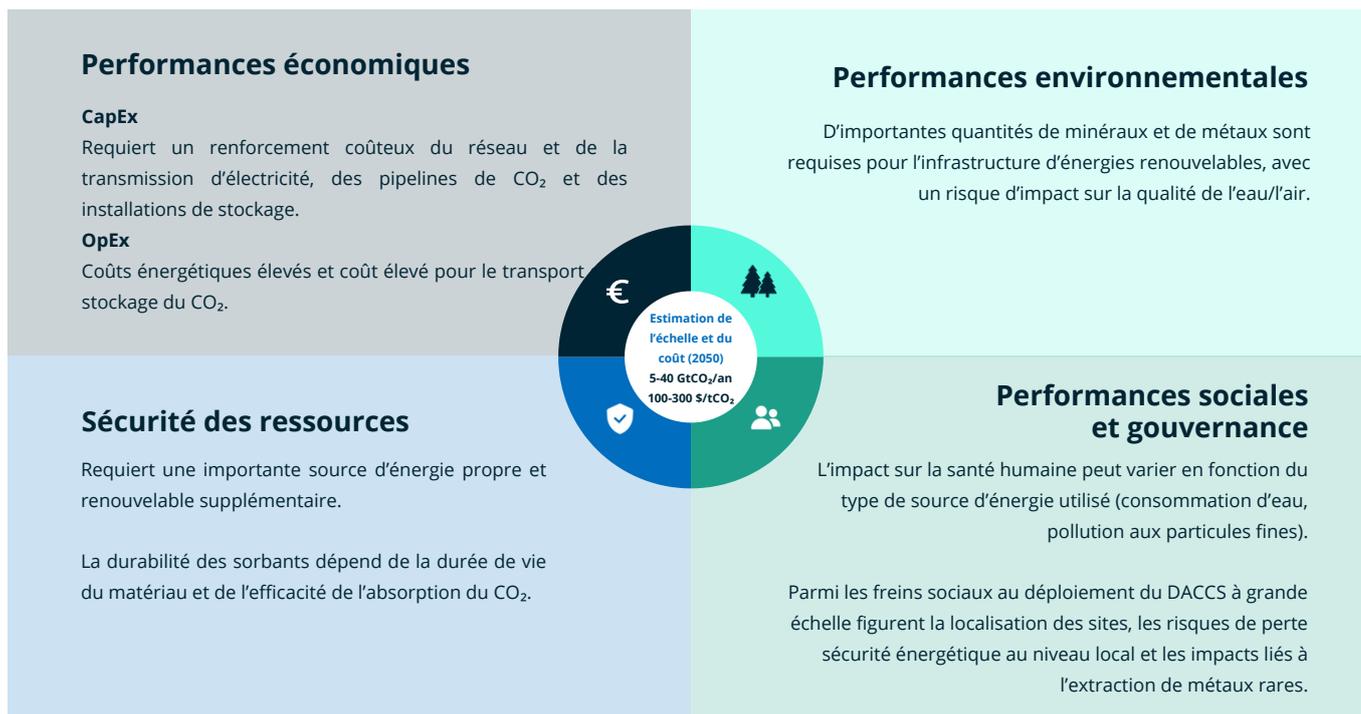
COBÉNÉFICES PEU NOMBREUX

Le DACCS comporte moins de cobénéfices que la séquestration terrestre ou la Bio-CSC.

COÛT

Les coûts sont élevés et la construction de l'infrastructure est onéreuse.

Quel est le potentiel durable du DACCS en matière de séquestration du carbone ?



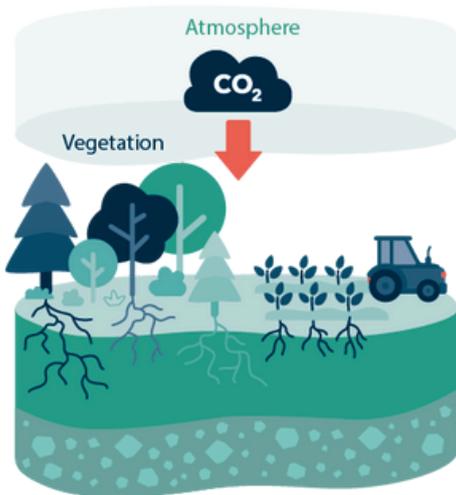
Inconnues actuelles et pistes de recherche futures

Le DACCS est actuellement cher et son coût futur est difficile à prédire. Les experts estiment que les économies d'échelle et l'optimisation des processus, y compris le développement de sorbants plus efficaces et moins coûteux, finiront par faire baisser les coûts de fabrication des sorbants. L'augmentation des volumes d'énergies renouvelables disponibles devrait abaisser leur coût, entraînant une diminution significative du coût énergétique de la technologie. Parmi les possibilités figurent de nouvelles configurations ou technologies utilisant les cycles de carbonatation plutôt que des matériaux sorbants.

La réglementation est actuellement limitée au stockage de CO₂ dans les sites de stockage géologique dans le cadre de la directive CSC (2009/31/CE), qui établit également des mécanismes clairs d'attribution des responsabilités et de suivi. Néanmoins, il n'existe pour l'heure aucun cadre réglementaire international ou européen sur le transport international du carbone.

RECOMMANDATIONS

- ★ Promouvoir le développement des énergies renouvelables pour que les besoins en énergies du DACCS puissent être couverts plutôt que d'accentuer une pression déjà forte sur des systèmes énergétiques qui ne sont que partiellement renouvelables. Cela permettrait d'éviter tout effet néfaste sur la santé associé à la production d'électricité non renouvelable.
- ★ Tenir compte des inégalités de répartition des capacités d'énergies renouvelables et de stockage permanent du carbone pour le DACCS entre les pays. Privilégier le DACCS dans les régions où l'énergie renouvelable est disponible en abondance et veiller à ce que l'énergie requise pour le DACCS ne nuise pas à la décarbonation du réseau. Dans l'idéal, placer les sites de DACCS à proximité des sites de stockage géologique.
- ★ Coordonner le transport international de CO₂ et le stockage pour parvenir à un déploiement du DACCS à grande échelle. Créer des outils juridiques permettant d'intégrer des compensations socio-politiques ou éthiques ou de promouvoir des mécanismes pour les États membres se prêtant le mieux à l'implantation de sites de DACCS. Respecter les droits souverains à l'équité et au développement dans les initiatives internationales avec des États tiers.
- ★ Veiller à ce que les politiques associent les secteurs clés impliqués dans la capture, le stockage et le transport du CO₂ et offrir de la visibilité aux acteurs, promouvoir les investissements financiers et établir des business models sûrs.



Enrichissement des sols en carbone

Pratique renforçant un processus naturel pour stocker du carbone et pouvant réduire les émissions

Permanence attendue	décennies
Risque de déstockage	élevé
Incertitude quant à la quantité de carbone initialement absorbé	moyenne
Incertitude quant à la quantité de carbone stocké à long terme	élevée
Facilité de MRV	faible
Cobénéfices clés	accroît la résilience des sols, la rétention d'eau et contribue à l'intégrité de l'écosystème

Qu'est-ce que l'enrichissement des sols en carbone et comment stocke-t-il du carbone ?

La séquestration du carbone organique dans les sols découle de la capture du CO₂ atmosphérique par les plantes par photosynthèse, ensuite transformé en carbone organique. Une partie de ce carbone organique se diffuse dans les sols, augmentant la teneur en carbone organique des sols. Les pratiques de gestion durable telles que le labour de conservation, les cultures de couverture, la diversification des variétés/cultures, les amendements organiques (compost ou fumier) et une réduction drastique de la consommation d'engrais de synthèse contribuent à maintenir le carbone organique dans les sols et à préserver ou rétablir la santé et la stabilité des sols.

Les mesures d'enrichissement des sols en carbone sont courantes dans la gestion foncière durable en raison de ses cobénéfices qui garantissent aux agriculteurs un moyen de subsistance. Cependant, dans la mesure où il s'agit d'une pratique basée sur l'activité, la quantité de carbone stocké n'est pas calculée de manière globale et peut fortement varier en fonction de l'écosystème concerné et de la situation géographique. Si de nombreux habitats contiennent des quantités substantielles de carbone organique, comme les sols agricoles, les forêts, les zones humides et les prairies, la teneur des sols en carbone est inégalement répartie en Europe : les pays du Nord sont généralement riches en carbone, tandis qu'autour de la Méditerranée, les réserves de carbone sont épuisées. Malgré leur intérêt évident pour la société, environ deux tiers des écosystèmes terrestres de l'UE sont en mauvaise santé, agissant comme une source d'émissions et non plus comme un puits. Une gestion continue des terrains et des mesures politiques cohérentes sont nécessaires pour promouvoir la rétention du carbone dans les sols.

Cadres réglementaires pertinents : [directive sur le suivi des sols](#) (en cours de négociation), [Politique agricole commune](#), [loi sur la restauration de la nature](#).

Avantages

AMÉLIORE LA SANTÉ DES SOLS

L'enrichissement des sols en carbone améliore la qualité et la résilience des sols et stimule le cycle des nutriments dans les écosystèmes terrestres.

CONCERNE UN SECTEUR À FORTES ÉMISSIONS

La mise en œuvre adéquate de pratiques de gestion foncière durable en agriculture pourrait réduire les émissions dans un secteur parmi les plus polluants.

DE NOMBREUX COBÉNÉFICES

Des sols sains répondent à des besoins sociétaux tels que la sécurité alimentaire, la santé des écosystèmes et le stockage d'eau.

Défis

RISQUE DE DÉSTOCKAGE

Le stockage du carbone organique dans les sols est vulnérable aux perturbations, avec un risque de réémission du carbone stocké.

QUANTIFICATION PRÉCISE DU CARBONE

Les pratiques de gestion foncière, les types de sols et les conditions climatiques peuvent avoir divers impacts sur le cycle du carbone dans les sols. Cela rend l'établissement d'un système de MRV et la conception de méthodologies plus complexes.

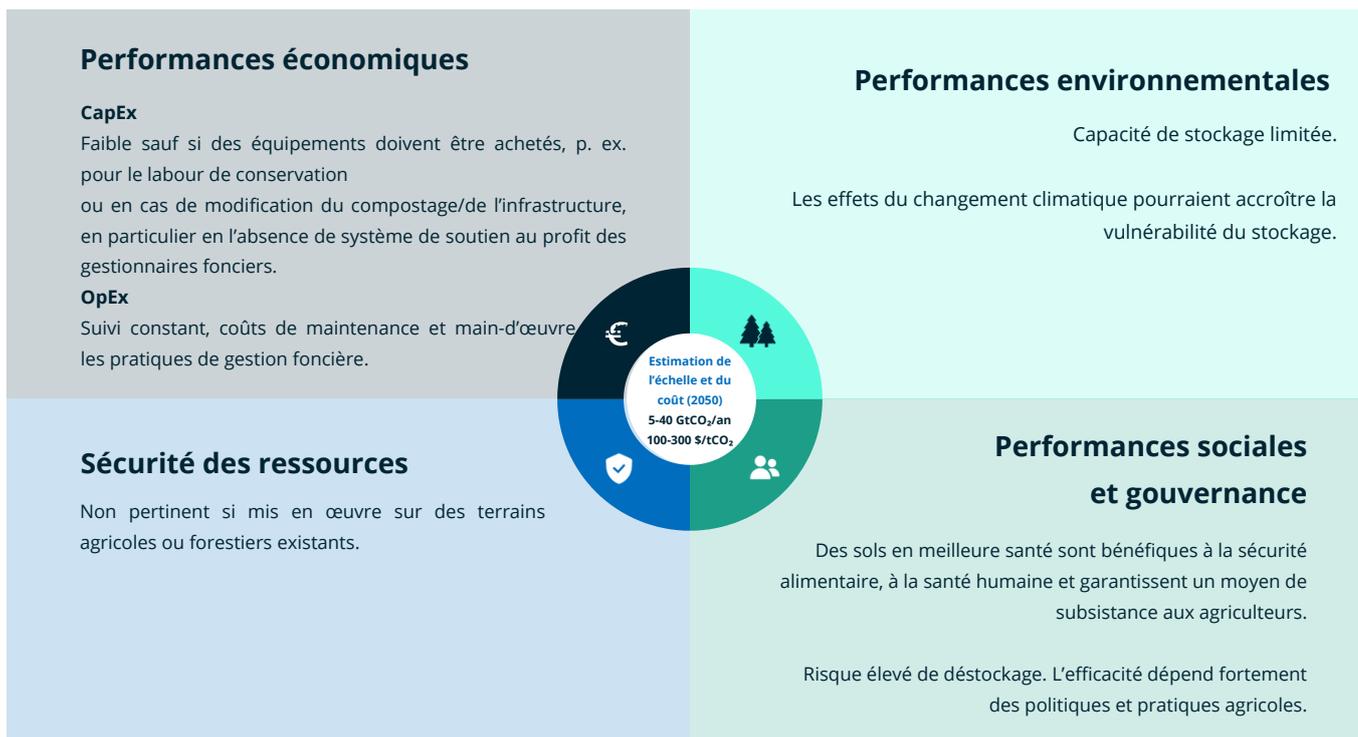
CAPACITÉ DE STOCKAGE LIMITÉE

Les contraintes biophysiques telles que l'impact des précipitations sur le taux de croissance de la végétation peuvent réduire la capacité de séquestration du carbone dans les sols.

GESTION CONTINUE

Une gestion foncière inadéquate ou un transfert de propriété peuvent faire passer les sols du statut de puits de carbone à celui de source d'émissions.

Quel est le potentiel durable de l'enrichissement des sols en carbone ?



Inconnues actuelles et pistes de recherche futures

L'enrichissement des sols en carbone modifie le fonctionnement des sols et, au-delà d'un certain seuil, cesse d'apporter des bénéfices aux écosystèmes. De plus amples recherches sont requises pour établir ces seuils.

L'influence du type de sol, du climat (p. ex. l'évolution des régimes de précipitations, l'élévation du niveau de la mer, l'érosion) et des pratiques de gestion sur la teneur en carbone organique dans les sols. La capacité réaliste de séquestration de carbone organique dans les sols à long terme reste floue à l'heure actuelle.

RECOMMANDATIONS

- ★ Établir des objectifs juridiquement contraignants et des pratiques de gestion durable dans tous les habitats en se concentrant sur la protection, la restauration et la santé des sols, y compris sur le rôle de cette dernière dans la régulation de l'eau, de la qualité de l'air, dans la stimulation de la production alimentaire et dans la promotion de la biodiversité. Axer les politiques sur le renforcement de l'intégrité des écosystèmes, tout en désignant la séquestration de carbone associée comme un cobénéfice.
- ★ Réformer la Politique agricole commune afin d'établir des objectifs plus ambitieux, en associant des objectifs basés sur l'activité et les résultats, des pratiques régénératives et la prévention de la dégradation des sols et stocks de carbone ; appliquer des règles de conditionnalité plus strictes en favorisant les petites exploitations et en offrant aux agriculteurs des possibilités de formation, un soutien technique et des conseils.
- ★ Faire évoluer les préférences alimentaires vers un régime végétarien et adopter des politiques visant à réduire le gaspillage alimentaire.
- ★ Élaborer un système standardisé de comptabilité, MRV et responsabilité adapté aux différentes conditions climatiques et aux divers types de sols si la pratique est soutenue par des unités d'élimination du carbone.
- ★ Créer des bases de données détaillées incluant des données sur l'utilisation des terres afin de mesurer et de suivre les systèmes des sols et leur santé en les comparant à une situation de référence. Développer la télédétection et d'autres techniques de machine learning.

Glossaire

Altération forcée

D'après le GIEC, l'altération forcée consiste en une « intensification du phénomène d'élimination du dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique qu'engendre la dissolution des roches silicatées et carbonatées, en broyant finement ces minéraux et en les appliquant sur les sols, le long des côtes et dans les océans ». Voir également la fiche « [Altération forcée](#) ».

Afforestation et reforestation

L'afforestation et la reforestation décrivent toutes deux la mise en place de forêts sur des terrains qui en étaient dépourvus auparavant. La distinction entre ces deux activités de foresterie dépend de la manière dont le terrain était utilisé avant la création de la forêt. D'après le GIEC, l'afforestation désigne « la plantation de nouvelles forêts sur des terres qui, historiquement, n'en portaient pas ». Certaines définitions fournissent des données temporelles plus précises, comme 50 ans, tandis que d'autres évoquent « un temps historique ». La reforestation, quant à elle, désigne « la plantation de forêts sur des terres anciennement forestières, mais converties à d'autres usages ». Tandis que l'afforestation présente généralement un risque plus important pour l'écologie locale en raison de l'intervention humaine requise, la reforestation est généralement destinée à restaurer l'écosystème naturel initial d'un terrain. Voir également la fiche « [Reforestation et afforestation](#) ».

Albédo

« Fraction du rayonnement solaire réfléchi par une surface ou par un objet, souvent exprimée en pourcentage. Les surfaces enneigées ont un [albédo](#) élevé, les sols un albédo élevé à faible, et les zones couvertes de végétation et les océans un albédo faible. L'albédo de la Terre varie principalement en fonction de la nébulosité et des fluctuations dans l'enneigement, l'englacement, la surface foliaire et le couvert terrestre. » Certaines méthodes de CDR telles que l'afforestation et la reforestation peuvent involontairement modifier l'albédo de la Terre. Les interventions intentionnelles sur l'albédo de la Terre sont généralement considérées comme de la « [Gestion du rayonnement solaire](#) ».

Analyse du cycle de vie

Le GIEC définit l'analyse du cycle de vie comme une « compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service au cours de son cycle de vie ». Les émissions significatives en amont (p. ex. origine de la biomasse et consommation d'énergie) comme en aval (p. ex. émissions liées au transport et sort du co-produit) du processus d'élimination doivent être prises en compte. Cela inclut les émissions des scopes 1, 2 et 3. Une telle analyse ACV impliquant un système « du berceau au tombeau » est nécessaire pour attester que la technologie d'élimination a bien conduit à une diminution globale de la concentration de GES dans l'atmosphère, et donc à des émissions négatives. Voir également « [Comptabilité](#) ».

Biochar

Le biochar est un matériau riche en carbone et une forme de charbon de bois. Il est le fruit de la pyrolyse de biomasse, qui consiste à décomposer de la biomasse à haute température et dans un environnement faible en oxygène. Sa composition chimique complexe dépend de la biomasse utilisée et de la température et durée de pyrolyse, souvent adaptées en fonction de l'utilisation prévue. Le biochar peut être ajouté aux sols afin d'améliorer leur fonction, de réduire les émissions de GES issues de la décomposition de la biomasse et des sols et de contribuer au piégeage du carbone dans le biochar. L'une des principales problématiques de tout processus basé sur la biomasse réside dans l'approvisionnement durable de cette biomasse au vu des répercussions environnementales (par exemple, atteinte à la biodiversité par la déforestation ou les monocultures) ou sociales (augmentation du prix des denrées alimentaires et/ou des terrains en raison de la demande générée par la culture de biomasse) qui peuvent en résulter. En outre, toute utilisation de biomasse implique une demande en terrains qui ne peuvent être utilisés à d'autres fins, la biomasse comme la terre étant toutes deux des ressources finies. Voir également la fiche « [Biochar](#) ».

Biomasse avec captage et stockage du carbone et bioénergie avec captage et stockage du carbone (Bio-CSC et BECCS)

La BECCS est une « technologie d'émissions négatives » où de la biomasse est brûlée pour produire de l'électricité, et où le CO₂ est capté et transporté vers des sites de stockage permanent. La Bio-CSC est un terme plus large qui désigne l'utilisation et la conversion de biomasse suivies par un captage et un stockage de carbone et inclut la BECCS ainsi que d'autres modes d'utilisation et de conversion de biomasse (p. ex. la fermentation ou utilisation de biomasse dans des processus industriels). L'une des principales problématiques de ces processus réside dans l'approvisionnement durable de la biomasse au vu de leurs répercussions environnementales (par exemple, l'atteinte à la biodiversité par la déforestation ou les monocultures) ou sociales (l'augmentation du prix des denrées alimentaires et/ou des terrains en raison de la demande générée par la culture de biomasse) potentielles. En outre, toute utilisation de biomasse implique une demande en terrains qui ne peuvent être utilisés à d'autres fins, la biomasse comme la terre étant toutes deux des ressources finies.

La Bio-CSC peut produire des émissions négatives lorsque le dioxyde de carbone séquestré par une biomasse cultivée de manière durable est converti puis stocké dans un stockage géologique permanent. Cependant, l'absorption réelle depuis l'atmosphère n'a lieu que lorsque la biomasse précédemment convertie repousse (voir également « [Dette carbone](#) »). En outre, le bilan carbone total du processus doit être évalué et les impacts climatiques liés à la production, au transport et à la transformation de la biomasse évalués. Voir la définition de « [l'Analyse du cycle de vie \(ACV\)](#) » ainsi que la fiche sur « [l'utilisation de biomasse avec captage et stockage du carbone \(Bio-CSC\)](#) ».

Captage direct du carbone dans l'air suivi du stockage

Le GIEC définit la capture directe de l'air avec séquestration du carbone comme un « procédé chimique consistant à piéger le CO₂ directement dans l'air ambiant en vue de son stockage. » Voir également la fiche « [Captage direct du carbone dans l'air suivi du stockage \(DACCS\)](#) ».

Carbon farming

Le carbon farming désigne les pratiques de gestion foncière, en particulier en agriculture et foresterie, qui augmentent le volume de CO₂ capturé et séquestré dans les sols, la végétation et la matière organique comme le carbone organique, ou réduisent les émissions de GES du secteur foncier. Il implique un éventail d'activités, comme le recours au labour de conservation, les cultures dérobées et de couverture, l'utilisation durable d'engrais et pesticides, la réhumidification et la conservation des zones humides et l'agroforesterie. Le carbon farming doit être mené selon une approche globale, en rendant service aux écosystèmes afin d'accroître la résilience de l'exploitation plutôt que de chercher à optimiser la séquestration du carbone aux dépens de la santé des écosystèmes.

Cobénéfices

D'après le GIEC, les cobénéfices sont les « effets positifs qu'une politique ou une mesure visant un objectif donné pourrait avoir sur d'autres objectifs, augmentant ainsi les avantages globaux pour la société ou l'environnement. Les cobénéfices sont souvent incertains et dépendent, entre autres choses, des circonstances locales et des pratiques de mise en œuvre. » À titre d'exemple, la Bio-CSC peut générer à la fois des émissions négatives et un produit utile tel que du chauffage urbain ou de l'électricité. En outre, correctement mises en œuvre, certaines méthodes de CDR basées sur le foncier peuvent offrir des cobénéfices en matière de biodiversité, d'adaptation climatique et de sécurité alimentaire. On pourra notamment citer l'amélioration de la santé des sols, la réduction de l'érosion des sols et l'augmentation de la rétention d'eau. Bon nombre de ces éléments pouvant s'avérer plus importants et précieux que le stockage de carbone en lui-même (notamment au vu de la vulnérabilité de certains milieux de stockage), il a été reproché au terme « cobénéfices » de nuire aux autres objectifs environnementaux et de promouvoir une approche exclusivement centrée sur le carbone.

Crédit carbone

Un crédit carbone (voir également « [Mécanismes des marchés du carbone](#) ») correspond généralement à 1 tonne d'équivalent CO₂ réduite ou extraite de l'atmosphère. Dans ce cas, « équivalent » signifie que les GES sont convertis à l'effet de réchauffement du CO₂ en multipliant les tonnes de GES émises par le potentiel de réchauffement planétaire correspondant. Les crédits carbone sont généralement utilisés pour composer les émissions maintenues selon le principe du « tonne pour tonne », une pratique souvent associée au greenwashing et discutable d'un point de vue scientifique (voir « [Mécanismes des marchés du carbone](#) »). Les crédits carbone doivent être accompagnés d'un système de mesure, notification et vérification et de solides procédures de comptabilité afin d'éviter toute double comptabilisation. Les investissements pouvant donner lieu à des crédits doivent démontrer qu'ils apportent des résultats supplémentaires par rapport à ce qui se serait produit naturellement (voir « [Additionnalité](#) » sous « [Comptabilité](#) »). Ils doivent également présenter un faible risque de déstockage et éviter tout effet négatif sur les populations et l'environnement.

Dettes carbone

En foresterie, la dette carbone désigne l'écart temporel entre les émissions de CO₂ générées lors de la récolte de biomasse forestière (et de son utilisation à des fins énergétiques, par exemple) et la séquestration ultérieure du carbone dans la nouvelle biomasse forestière. Il s'agit donc du délai entre l'abattage des forêts et le remplacement de l'équivalent carbone émis dans ce cadre par la repousse des arbres, créant une « dette carbone ».

Difficile à atténuer

Voir « [Émissions résiduelles](#) ».

Dissuasion de l'atténuation

Il y a dissuasion de l'atténuation lorsque les méthodes d'élimination du carbone (ou l'idée qu'elles seront disponibles à l'avenir) sapent ou retardent les efforts de réduction des émissions actuels et futurs. La dissuasion de l'atténuation a déjà eu un impact sur la politique climatique, par exemple via l'utilisation de l'élimination pour permettre la poursuite de l'exploitation et de la consommation de combustibles fossiles et l'établissement d'objectifs climatiques à long terme qui tablent déjà sur d'importants volumes de CDR, potentiellement irréalistes.

Durabilité

Le GIEC définit la durabilité comme un « processus dynamique qui garantit la persistance des systèmes naturels et humains en toute équité ». Pour la CDR, une définition complète d'une utilisation durable des ressources naturelles, physiques et financières sera requise pour assurer le déploiement à long terme de ces technologies et pratiques dans un cadre sécurisé et gouvernable. Cela implique que l'attention ne porte pas exclusivement sur les questions de « carbone » ou de « climat », mais que les questions environnementales au sens large, sociales et économiques telles que la biodiversité, l'adaptation climatique et les droits de l'homme soient également prises en compte.

Effets négatifs

On parle d'effet négatif lorsque l'amélioration d'un aspect de l'environnement se fait aux dépens d'un autre aspect. Le GIEC définit les effets négatifs comme la « concurrence entre différents objectifs dans une situation de décision où la poursuite d'un objectif nuira à l'atteinte d'autres objectifs ». Cela peut se produire lorsque, en raison d'effets de bord, une politique visant à réduire les émissions de GES amoindrit les résultats en matière de préservation de la biodiversité, réduisant potentiellement le bénéfice net envers la société ou l'environnement. Cela peut également être le cas lorsqu'une usine de DACCS, très efficace pour éliminer le carbone, accentue la pression sur la demande en énergies renouvelables et en eau. Les effets négatifs doivent être distingués des synergies, scénarios où le renforcement d'un effet positif mène au renforcement d'un autre.

Élimination du dioxyde de carbone

Également appelée « émissions négatives » ou « élimination du carbone », l'élimination du dioxyde de carbone (CDR) désigne l'extraction physique du dioxyde de carbone déjà présent dans l'atmosphère et son stockage permanent dans les sols, par exemple dans des formations géologiques. Pour qu'une activité soit considérée comme une élimination, les critères suivants doivent être remplis : (1) Le CO₂ est extrait physiquement de l'atmosphère ; (2) Le CO₂ extrait de l'atmosphère est stocké de manière permanente, sans retourner dans l'atmosphère ; (3) Toutes les émissions de GES associées aux processus d'élimination et de stockage sont estimées et incluses dans leur intégralité ; et (4) La quantité de CO₂ issu de l'atmosphère stocké de manière permanente est supérieure au volume de GES émis durant les processus d'élimination et de stockage et tout au long de leurs chaînes de valeur. La CDR est toujours anthropique, et doit donc être distinguée de la séquestration naturelle, qui se produit naturellement dans les forêts, les prairies et les zones humides et qui agissent comme des « puits de carbone ». Voir également « [Permanence](#) ».

Élimination industrielle du carbone

L'élimination industrielle du carbone diffère des méthodes basées sur une séquestration non-permanente dans des réservoirs biologiques telles que l'afforestation, la reforestation ou l'enrichissement des sols en carbone. L'élimination industrielle du carbone emploie une technologie de captage et stockage du carbone (CSC) pour absorber directement le CO₂ de l'atmosphère, comme avec le DACCS, ou pour capturer le CO₂ biogénique issu de centrales électriques ou de processus industriels, comme avec la Bio-CSC. Pour que cela soit considéré comme une réelle élimination, le carbone capturé doit être stocké de manière permanente et les quatre principes de l'élimination du dioxyde de carbone doivent être respectés. Ces méthodes impliquent généralement des coûts et des besoins en énergie élevés (p. ex. DACCS) ou des besoins importants en ressources naturelles (p. ex. Bio-CSC), suscitant le doute quant à leur durabilité.

Émissions résiduelles

Pour l'heure, le concept d'émissions résiduelles n'est ni défini ni utilisé de manière uniforme dans la littérature. Dans ce manuel, nous définissons les émissions résiduelles ou difficile à atténuer comme les activités émettrices que la société considère indispensables ou qu'elle n'est pas prête à éliminer. Le CO₂ doit donc être stocké de manière permanente pour permettre le maintien de l'activité. Certains acteurs utilisent une définition proche du coût marginal de la réduction : les émissions les plus chères à réduire sont considérées comme « résiduelles ». Néanmoins, cela néglige le rôle que la société et les responsables politiques ont à jouer dans la prise de décision. Une définition axée sur les coûts pourrait être employée pour définir les émissions de GES et le forçage radiatif générés par les jets privés comme des émissions « résiduelles », alors qu'il serait relativement simple de les réduire d'un point de vue politique.

La définition de ce qui est considéré comme résiduel est susceptible d'évoluer à tout moment en fonction de la disponibilité des technologies, des besoins de la société et de la situation économique. En tout état de cause, les émissions résiduelles doivent être clairement définies afin d'éviter que les méthodes d'élimination, pourtant limitées, ne soient utilisées pour compenser des émissions qui auraient pu être réduites.

Enrichissement des sols en carbone

L'enrichissement des sols en carbone désigne les pratiques de gestion foncière qui augmentent la teneur des sols en carbone, et extraient donc le CO₂ de l'atmosphère ou le retenant plus longtemps que cela aurait été le cas sans intervention. Voir également la fiche « [Enrichissement des sols en carbone](#) ».

Déstockage

Il y a déstockage lorsque le carbone absorbé, séquestré ou stocké dans un puits est réémis dans l'atmosphère. Les divers niveaux de risque de déstockage des différents réservoirs de carbone doivent être pris en compte. Par exemple, les forêts peuvent être exposées à un risque de déstockage d'origine anthropique (p. ex. abattage illégal), non anthropique (p. ex. maladies et catastrophes naturelles) ou climatique (p. ex. réchauffement). Le risque de déstockage peut être extrêmement difficile à prévoir ou à quantifier, dans la mesure où il peut se produire rapidement ou sur plusieurs siècles. Ainsi, les systèmes ou normes qui exigent uniquement un suivi et une gestion des déstockages potentiels sur une durée allant de quelques années à quelques dizaines d'années peuvent s'avérer contre-productives pour atteindre et maintenir le zéro émission nette. En outre, les stratégies visant à compenser la permanence non-géophysique d'un puits exigent une gouvernance solide et peuvent impliquer des coûts significatifs, rendant ces méthodes potentiellement plus onéreuses que des puits présentant un risque de déstockage moindre. Voir également « [Permanence](#) ».

Fausse équivalence

La fausse équivalence entre élimination et réduction des émissions consiste à considérer, à tort, qu'une tonne de CO₂ éliminée de l'atmosphère est équivalente à une tonne de CO₂ non émise. Cela peut également se produire lorsque l'on étudie l'impact d'une tonne d'élimination via différentes méthodes de CDR présentant des caractéristiques diverses. Voir également « [Le cycle du carbone](#) » et « [Activités distinctes](#) ».

Fausse fongibilité

Voir « [Fausse équivalence](#) ».

Fuite

Le terme fuite désigne l'évolution des émissions tout au long de la chaîne de valeur qui conduisent à une émission ou une réémission de carbone. On parle donc généralement de « fuite de carbone » ou de « fuite d'émissions ». Les fuites de flux de carbone peuvent être significatives et prévisibles. Le terme de fuite physique désigne la fuite de CO₂ stocké du site de stockage géologique ou pendant le transport. Les émissions de GES issues des activités de la chaîne de valeur comme le transport ou le changement d'affectation des terres sont considérées comme des fuites. Cela peut se produire lorsqu'un pays ou un secteur met en œuvre des mesures d'atténuation qui déplacent directement ou indirectement les émissions vers un autre pays ou secteur.

Gaz à effet de serre

Les gaz à effet de serre (GES) absorbent les longueurs d'ondes des rayonnements émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. Cette absorption piège la chaleur dans l'atmosphère et contribue au réchauffement de la surface de la Terre, également appelé effet de serre. Il existe de nombreux GES naturels tels que la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde d'azote (N₂O), le méthane (CH₄) et l'ozone (O₃), en plus de ceux créés par l'Homme, comme les halocarbones et les substances contenant du chlore et du bromure.

Géo-ingénierie

La Convention sur la diversité biologique définit la géo-ingénierie liée au climat comme une « intervention intentionnelle dans l'environnement planétaire, dont la nature et l'échelle visent à contrecarrer les changements climatiques d'origine anthropique et/ou leurs incidences ». Parmi les technologies les plus courantes figurent (1) l'élimination des GES, également appelée « technologies à émissions négatives » (dont certaines font partie des formes de CDR), et (2) les méthodes réduisant l'insolation solaire, également appelées « gestion du rayonnement solaire » ou « gestion de l'albédo ». La définition exclut la capture du carbone à la source de combustibles fossiles mais reconnaît que les parties de ce processus liées au stockage du carbone peuvent entrer dans le cadre des technologies de géo-ingénierie.

Gestion du carbone

La gestion du carbone désigne la surveillance et le suivi des flux de carbone industriels dans le but de réduire les émissions nettes de CO₂ chez les principaux émetteurs. Cela est rendu possible par diverses technologies et pratiques qui captent chimiquement le CO₂ dans les gaz de combustion, avec transport, utilisation ou stockage ultérieurs du carbone. C'est ce que l'on appelle le captage du carbone avec utilisation (CCU) et le captage avec stockage du carbone (CSC). Ces activités peuvent donner lieu à une CDR si le CO₂ capté est d'origine atmosphérique ou biogénique, et si le CO₂ est stocké de manière permanente. Le terme de « gestion du carbone » est donc souvent utilisé de manière générique pour désigner le CCU, le CSC et la CDR, avec le risque d'occulter les différences clés qui séparent ces activités, notamment en termes d'impact climatique. Voir également « [Capture et stockage du carbone \(CSC\) et utilisation \(CCU\)](#) ».

Gestion du rayonnement solaire

Les interventions intentionnelles sur l'albédo de la Terre sont généralement considérées comme de la « gestion du rayonnement solaire ». Ces interventions n'entrent pas dans le cadre étudié par ce manuel, même si la CDR peut accidentellement modifier l'albédo.

Matières premières

Ce terme désigne les matières premières utilisées dans divers processus. Les matières premières peuvent être biogéniques, comme les résidus agricoles et forestiers, ou non-biogéniques, comme les combustibles fossiles. Dans une usine de Bio-CSC, par exemple, la matière première biogénique est brûlée pour en extraire le CO₂ séquestré, qui sera ensuite piégé et stocké de manière permanente. L'utilisation de matières premières durables est essentielle pour limiter les impacts environnementaux.

Neutralité carbone

La neutralité carbone, ou « émissions nettes de CO₂ égales à zéro », désigne une « situation dans laquelle les émissions anthropiques nettes de dioxyde de carbone (CO₂) sont compensées à l'échelle de la planète par les éliminations anthropiques de CO₂ ». Cela signifie que le volume de CO₂ émis dans l'atmosphère est égal au volume de CO₂ éliminé de l'atmosphère, et que la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est stable. La neutralité carbone sera atteinte avant la neutralité climatique car les émissions de GES hors CO₂ seront bien plus difficiles à atténuer et leur élimination sera techniquement plus complexe en raison de concentrations plus faibles dans l'atmosphère. Voir également « [Zéro émission nette](#) ».

Neutralité climatique

D'après le GIEC, la neutralité climatique désigne l'équilibre total entre les émissions résiduelles de GES et le volume de GES extrait de l'atmosphère. Pour simplifier, la quantité de GES ajoutée dans l'atmosphère est égale à la quantité éliminée, conduisant à un équilibre dynamique. La nature exacte de cet équilibre de GES n'est pas encore clairement définie dans les politiques, conduisant à une ambiguïté quant à la manière dans les émissions hors CO₂ seront contrebalancées. Dans une situation de neutralité climatique, l'impact net du climat, y compris les impacts anthropiques locaux ou régionaux sur l'albédo ou le climat est également équilibré. En Union européenne, l'objectif de neutralité climatique d'ici à 2050 est intégré à la loi européenne sur le climat.

Niveau de maturité technologique

D'après la NASA, le « niveau de maturité technologique (TRL) est un système de mesure employé pour évaluer le niveau de maturité d'une technologie. Chaque projet technologique est analysé par rapport aux paramètres de chaque niveau et reçoit ensuite un indice TRL fondé sur le niveau de progression du projet. L'échelle comporte 9 niveaux de maturité, de 1, le plus bas ("Principes de base observés ou décrits") à 9, le plus élevé ("Système réel achevé et qualifié par des missions opérationnelles réussies") ».

Puits

Réservoir (naturel ou artificiel, qu'il s'agisse du sol, de l'océan ou des plantes) dans lequel est stocké un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de GES.

Séquestration terrestre

Dans le cadre de ce manuel, la séquestration terrestre désigne l'absorption biogénique du CO₂ via un processus appelé photosynthèse, puis son stockage dans la plante ou le sol. Parmi les exemples de séquestration terrestre, on peut citer l'enrichissement des sols en carbone, l'afforestation et la reforestation.

Technologies ou pratiques d'émissions négatives

Le terme NETP désigne les technologies et pratiques pouvant être employées afin de créer des émissions négatives ou une élimination du dioxyde de carbone. Cela peut inclure des technologies telles que le DACCS ou des pratiques d'enrichissement des sols en carbone.

Trajectoires

Les trajectoires désignent l'évolution temporelle future des systèmes naturels et/ou humains. Elles peuvent consister en un ensemble de scénarios quantitatifs et qualitatifs, ou de descriptifs, relatifs à des évolutions futures possibles, ou en des processus de prise de décision axés sur la recherche de solutions visant à atteindre des objectifs souhaitables pour la société, comme de limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C. Les trajectoires sont généralement centrées sur l'évolution biophysique, techno-économique ou socio-comportementale, impliquent des dynamiques, des objectifs et des acteurs divers et sont établies à différentes échelles.

Utilisation et changement d'affectation des terres

L'utilisation des terres (UT) désigne l'action humaine (incluant l'ensemble des aménagements, activités et intrants) menée sur un certain type de terrain. Le terme « terres » est également utilisé dans le sens de l'objet socio-économique pour lequel les terres sont gérées (p. ex. culture, pâturage du bétail, abattage de bois, conservation et résidence urbaine). Le changement d'affectation des terres (CAT) implique le passage d'une catégorie d'utilisation des terres à une autre ou le changement d'objet de ces terres par une intervention humaine. Ce changement peut impliquer la conversion de prairies en terres arables ou de terres agricoles en forêts.

L'utilisation des terres et le changement d'affectation des terres peuvent avoir des effets significatifs sur l'environnement, en perturbant la biodiversité, le cycle global du carbone, l'albédo, l'évapotranspiration, et peuvent donc donner lieu à un forçage radiatif et/ou à d'autres impacts sur le climat, à l'échelle locale ou mondiale, comme décrit dans la définition du GIEC. Le CAT peut également être associé à d'importantes répercussions sociales en raison du déplacement de populations indigènes ou locales ou des activités économiques ou culturelles dont elles dépendent. Il comporte donc de nombreuses implications en matière de droits de l'homme.

Le changement d'affectation des terres indirect (CATI) désigne les modifications de l'utilisation des terres par le biais des marchés ou sous l'effet des politiques, qui ne peuvent être directement imputées à des décisions de gestion prises par des particuliers ou des groupes. Par exemple, si des terres agricoles sont converties à la production de carburant, il est possible qu'un déboisement survienne ailleurs afin de remplacer les anciennes cultures. Le CATI peut être difficile à tracer ou à quantifier dans la mesure où il peut se produire dans des régions géographiques très lointaines et en raison des interactions complexes avec les flux d'échange et activités économiques, à l'échelle internationale.

Zéro émission nette

Le zéro émission nette est une situation qui sera atteinte lorsque les émissions anthropiques de GES dans l'atmosphère seront égales aux éliminations anthropiques pendant une durée établie. On parle également de « neutralité carbone » ou de « neutralité climatique ». Cela implique d'associer de fortes réductions des émissions à des technologies éliminant physiquement les GES de l'atmosphère et les stockant de manière permanente.

Accord de Paris à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, 12 déc. 2015, T.I.A.S. No. 16-1104, Article 4,

https://unfccc.int/sites/default/files/french_paris_agreement.pdf

Allanah Paul et al., « Who Should Use NETPS? Managing Expectations for NETP Demand: Considerations for Allocating Carbon Dioxide Removals »,

2023, https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/11/D6.5_Who-should-use-NETPS.pdf

Jens Friis Lund et al., « Net Zero and the Unexplored Politics of Residual Emissions”, Energy Research & Social Science 98 (2023): 103035, [https://](https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103035)

doi.org/10.1016/j.erss.2023.103035

Samantha Eleanor Tanzer et Andrea Ramírez, « When Are Negative Emissions Negative Emissions? », Energy Environ. Sci. 12, no. 4 (2019): 1210–18, [https://](https://doi.org/10.1039/C8EE03338B)

doi.org/10.1039/C8EE03338B

Directive (UE) 2022/2464 du Parlement européen et du Conseil du 14 décembre 2022 modifiant le règlement (UE) no 537/2014 et les directives 2004/109/CE, 2006/43/CE et 2013/34/UE en ce qui concerne la publication d’informations en matière de durabilité par les entreprises, Journal officiel L

322/15, 14 décembre 2022, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32022L2464>

Les facteurs d’émissions sont entendus selon la définition fournie par l’Agence de protection de l’environnement des États-Unis : « Un facteur d’émission est une valeur représentative qui tente de corrélérer une quantité de polluant émise dans l’atmosphère et une activité associée à l’émission de ce polluant », site consulté le 28/03/2024, <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/basic-information-air-emissions-factors-and-quantification>

quantification

Samantha Eleanor Tanzer et al., « Global Governance of NETPS - Global Supply Chains and Coherent Accounting », 30 novembre 2022, [https://](https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/01/D6.3-Global-Governance-of-NETPs.pdf)

www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/01/D6.3-Global-Governance-of-NETPs.pdf

Tuomas Helin et al., « Approaches for Inclusion of Forest Carbon Cycle in Life Cycle Assessment - a Review », *GCB Bioenergy* 5, no. 5 (2013): 475–86, <https://doi.org/10.1111/gcbb.12016>; Miguel Brandão et al., « Quantifying the Climate Change Effects of Bioenergy Systems: Comparison of 15 Impact Assessment Methods », *GCB Bioenergy* 11, no. 5 (2019): 727–43, <https://doi.org/10.1111/gcbb.12593>

Bellona Report « Clearing Conflations on Carbon Capture Terminologies », 2024, consulté le 28 mars 2024, <https://eu.bellona.org/publication/clearing-conflations-on-carbon-capture-terminologies/>

Directive 2009/31/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative au stockage géologique du dioxyde de carbone (2009), Journal officiel L140/114. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0031>

Directive (UE) 2018/2001 du Parlement européen et du Conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables (refonte) (2018). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A02018L2001-20181221&qid=1647270042844>

Bellona Europa, « The Net Zero Industry Act: Unprecedented step in the right direction », 22 février 2024, <https://eu.bellona.org/2024/02/22/the-net-zero-industry-act-unprecedented-step-in-right-direction/>

CE, « Communication de la Commission européenne au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions : Vers une gestion industrielle du carbone ambitieuse pour l'UE », COM(2024) 62 final, 6 février 2024 https://energy.ec.europa.eu/system/files/2024-02/Communication_-_Industrial_Carbon_Management.pdf

Sara Budinis et al., « An Assessment of CCS Costs, Barriers and Potential », *Energy Strategy Reviews* 22 (2018): 61–81, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.003>

Données basées sur AIE (2022) Direct Air Capture et AIE (2023) The Oil and Gas Industry in Net Zero Transition

Bellona Europa/E3G, « Carbon Capture and Storage Ladder: Assessing the Climate Value of CCS Applications in Europe », consulté le 28 mars 2024.

<https://bellona.org/publication/carbon-capture-and-storage-ladder-assessing-the-climate-value-of-ccs-applications-in-europe>

Bellona Europa, « Carbon Capture and Storage: A Crucial Piece of The Puzzle in Industry's Path To Net-Zero », juin 2023, consulté le 28 mars 2024. [https://](https://network.bellona.org/content/uploads/sites/3/2023/06/Bellona-Europa-CCS-Explainer-2023-6.pdf)

network.bellona.org/content/uploads/sites/3/2023/06/Bellona-Europa-CCS-Explainer-2023-6.pdf

Pierre Friedlingstein et al., « Global Carbon Budget 2023 », Earth System Science Data 15, no. 12 (2023): 5301–69, [https://doi.org/10.5194/](https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023)

[essd-15-5301-2023](https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023)

Friedlingstein et al., « Global Carbon Budget 2023 »

Kirsten Zickfeld et al., « Asymmetry in the Climate–Carbon Cycle Response to Positive and Negative CO₂ Emissions », Nature Climate Change 11, no. 7 (2021): 613–17, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01061-2> ; Kirsten Zickfeld,

Andrew H MacDougall et H Damon Matthews, « On the Proportionality between Global Temperature Change and Cumulative CO₂ Emissions during Periods of Net Negative CO₂ Emissions », Environmental Research Letters 11, no. 5 (2016): 055006, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/055006>

Sara Budinis et al., « An Assessment of CCS Costs, Barriers and Potential », Energy Strategy Reviews 22 (2018): 61–81, [https://doi.org/10.1016/](https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.003)

[j.esr.2018.08.003](https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.003)

Le GIEC définit la RTCE comme la « [v]ariation transitoire de la température moyenne à la surface du globe par unité d'émissions cumulées de CO₂ (en général 1 000 GtC). La RTCE donne des informations à la fois sur la fraction des émissions cumulées de CO₂ transportée par l'air (fraction de la quantité totale de CO₂ émis qui demeure dans l'atmosphère, déterminée par les processus en jeu dans le cycle du carbone) et sur la réponse transitoire du climat ». Voir p. 88 :

<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/>

[SR15_Glossary_french.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_Glossary_french.pdf)

Sebastian Sonntag et al., « Quantifying and Comparing Effects of Climate Engineering Methods on the Earth System » *Earth's Future* 6, no. 2 (2018): 149-68, <https://doi.org/10.1002/2017EF000620>

Parlement européen, « Résolution législation du 10 avril 2024 sur la proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre de certification de l'Union relatif aux absorptions de carbone » P9_TA(2024)0195 [https://www.europarl.europa.eu/RegData/seance_pleniere/textes_adoptes/definitif/2024/04-10/0195/P9_TA\(2024\)0195_FR.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/seance_pleniere/textes_adoptes/definitif/2024/04-10/0195/P9_TA(2024)0195_FR.pdf)

Elisa Martellucci et al., « EU ETS 101 A beginner's guide to the EU's Emissions Trading System », février 2022, p.4 https://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2022/03/CMW_EU_ETS_101_guide.pdf

GIEC, « Résumé à l'intention des décideurs : Les bases scientifiques physiques, Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat », 2021, p.30, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_French.pdf

Kirsten Zickfeld et al., « Asymmetry in the climate-carbon cycle response to positive and negative CO₂ emissions » *Nature Climate Change* 11, (2021), 613-617, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01061-2>

Barbara K. Haya et al., « Quality Assessment of REDD+ Carbon Credit Projects », Berkeley Carbon Trading Project, septembre 2023 <https://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2023/09/Quality-Assessment-of-REDD-Carbon-Crediting-1.pdf>

Patrick Greenfield, « Revealed: more than 90% of rainforest carbon offsets by biggest certifier are worthless, analysis shows », *The Guardian*, janvier 2023 <https://www.theguardian.com/environment/2023/jan/18/revealed-forest-carbon-offsets-biggest-provider-worthless-verra-aoe>

Nina Lakhani, « Revealed: top carbon offset projects may not cut planet-heating emissions », *The Guardian*, septembre 2023 <https://www.theguardian.com/environment/2023/sep/19/do-carbon-credit-reduce-emissions-greenhouse-gases>

Brandl et al. (2021), *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 105, 103239, doi.org/10.1016/j.jggc.2020.103239

Fabiola de Simone et Wijnand Stoefs, « Les besoins fondamentaux : principes de base pour concevoir des politiques d'élimination du carbone intelligentes », *Carbon Market Watch*, novembre 2023, p.30, <https://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2023/12/The-bare-necessities-essential-principles-to-design-sensible-carbon-removal-policies-1.pdf>

Gilles Dufrasne et Jonathan Crook, « Carbon Markets 101: The ultimate guide to climate-based market mechanisms », février 2024, p.27 <https://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2024/02/101-report-layout-carbon-markets-230224.pdf>

Solene Chiquier et al., « A Comparative Analysis of the Efficiency, Timing, and Permanence of CO₂ Removal Pathways », *Energy & Environmental Science* 15, no. 10 (2022): 4389–4403, <https://doi.org/10.1039/D2EE01021F>

Solene Chiquier et al., « A Comparative Analysis of the Efficiency, Timing, and Permanence of CO₂ Removal Pathways », *Energy & Environmental Science* 15, no. 10 (2022): 4389–4403, <https://doi.org/10.1039/D2EE01021F>

Stoefs, « Principles for Carbon Negative Accounting », novembre 2021 <https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2021/12/D-6.2-Principles-for-carbon-negative-accounting.pdf>

Nils Meyer-Ohlendorf et al., « EU 2040 Climate Target and Framework: The Role of Carbon Removals », novembre 2023, p.14, <https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2023/60028-EU-2040-Removals-web.pdf>

Danny Cullenward, « A Framework for assessing the climate value of temporary carbon storage », septembre 2023, p.14, <https://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2023/09/FINAL-CMW-version-of-temporary-storage-paper.pdf>

Cullenward, « A Framework for assessing the climate value of temporary carbon storage », p.13

Le GIEC les définit comme des « [p]rocessus ou fonctions écologiques qui présentent un intérêt, pécuniaire ou non, pour des individus ou pour une société dans son ensemble. On distingue souvent : 1) les services de soutien tel le maintien de la productivité ou de la biodiversité ; 2) les services d’approvisionnement, par exemple en aliments ou en fibres ; 3) les services de régulation comme la régulation climatique ou le piégeage du carbone ; et 4) les services culturels tels que le tourisme ou les activités à caractère spirituel et esthétique ». Voir : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_french.pdf

Johan Rockström et al., « A Safe Operating Space for Humanity », *Nature* 461, no. 7263 (2009): 472-75, <https://doi.org/10.1038/461472a>

Johan Rockström et al., « A Safe Operating Space for Humanity »

Katherine Richardson et al., « Earth beyond Six of Nine Planetary Boundaries », *Science Advances* 9, no. 37 (2023), <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>

Katherine Richardson et al., « Earth beyond Six of Nine Planetary Boundaries »

Voir par exemple, « A safe operating space for New Zealand/Aotearoa – Translating the planetary boundaries framework », <https://environment.govt.nz/assets/Publications/Files/a-safe-operating-space-for-nz-aotearoa.pdf> or « Towards a Safe Operating Space for the Netherlands » https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/Towards_a_safe_operating_space_for_the_Netherlands_-_3333.pdf

<https://doughnuteconomics.org/about-doughnut-economics>

X. Lan, P. Tans et K. W. Thoning, « Trends in Globally-Averaged CO2 Determined from NOAA Global Monitoring Laboratory Measurements », version 2024-03, consultée le 26 mars 2024, <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>

Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, *Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal (Montréal : Convention sur la diversité biologique, 2022)* X. Lan, P. Tans, and K. W. Thoning, “Trends in Globally-Averaged CO2 Determined from NOAA Global Monitoring Laboratory Measurements”, Version 2024-03, consultée le 26 mars 2024, <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>

Constanze Werner et al., « Global Assessment of NETP Impacts Utilising Concepts of Biosphere Integrity », 31 mai 2023, https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/08/NEGEM_D3.3_Global-assessment-of-NETP-impacts-utilising-concepts-of-biosphere-integrity.pdf; Johanna Braun et al., « Global NETP Biogeochemical Potential and Impact Analysis Constrained by Interacting Planetary Boundaries », 31 mai 2022, <https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/05/D-3.2-Global-NETP-biogeochemical-potential.pdf>; Johanna Braun et al., « Global Impacts of NETP Potentials on Food Security and Freshwater Availability, Scenario Analysis of Options and Management Choices », 31 mai 2023, https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/08/NEGEM_D3.7_Global-impacts-of-NETP-potentials-on-food-security.pdf; Constanze Werner et al., « Report on Synoptic Assessment of Global Theoretical NETP Potentials », 31 octobre 2023, <https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/12/D3.10-Report-on-synoptic-assessment-of-global-theoretical-NETP-potentials.pdf>

Braun et al., « Global NETP Biogeochemical Potential and Impact Analysis Constrained by Interacting Planetary Boundaries ».

Carbon Market Watch, « Open letter calling for a firewall between carbon emissions, land sequestration and permanent removals in the EU », 8 janvier 2024, https://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2024/01/High-Level-Letter-w-Logos-signatories-rev.-18_01-1.pdf

Duncan McLaren et al., « Beyond “Net-Zero”: A Case for Separate Targets for Emissions Reduction and Negative Emissions », *Frontiers in Climate* 1 (2019) <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00004>

Nils Meyer-Ohlendorf et al., « EU 2040 Climate and Framework: The Role of Carbon Removals », 29 novembre 2023, Ecologic Institute, Berlin, p.2 <https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2023/60028-EU-2040-Removals-web.pdf>

Nils Meyer-Ohlendorf et al., « EU 2040 Climate and Framework: The Role of Carbon Removals »

À définir de manière réaliste et dynamique ; ce qui est considéré comme « difficile à atténuer » aujourd’hui pourrait ne plus l’être dans quelques années ou décennies, lorsque de nouvelles techniques ou pratiques et des changements de comportement se seront établis. Voir Fabiola de Simone et al. « How do NETPs fit in existing climate frameworks? », 31 août 2023, p.27, <https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/09/NEGEM-D6.1-NETPs-in-existing-climate-frameworks.pdf>

Nils Meyer-Ohlendorf et al., « EU 2040 climate architecture », novembre 2023, Ecologic Institute, Berlin, p.12 <https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2023/60028-2040-Climate-Architecture-report.pdf>

Fabiola de Simone et al. « How do NETPs fit in existing climate frameworks? », p.6

Khaled Diab, « EU’s underwhelming 2040 climate target shifts responsibility to future generations », Carbon Market Watch, février 2024, <https://carbonmarketwatch.org/2024/02/06/eus-underwhelming-2040-climate-target-shifts-responsibility-to-future-generations/>

CE, « Communication de la Commission européenne au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions : Garantir notre avenir, Objectif climatique de l’Europe pour 2040 et voie vers la neutralité climatique à l’horizon 2050 pour une société durable, juste et prospère », COM(2024) 63 final, 6 février 2024, p.6 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52024DC0063>

« Règlement (UE) 2021/1119 du Parlement européen et du Conseil du 30 juin 2021 établissant le cadre requis pour parvenir à la neutralité climatique et modifiant les règlements (CE) no 401/2009 et (UE) 2018/1999 », Journal officiel L243/1, 30 juin 2021, Article 4(1) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119>

Règlement (UE) 2021/1119, Article 4(1)

« Règlement (UE) 2023/839 du Parlement européen et du Conseil du 19 avril 2023 modifiant le règlement (UE) 2018/841 en ce qui concerne le champ d'application, la simplification des règles de déclaration et de conformité, et la fixation des objectifs des États membres pour 2030, et le règlement (UE) 2018/1999 en ce qui concerne l'amélioration de la surveillance, de la communication d'informations, du suivi des progrès et de la révision », Journal officiel L107/1, 19 avril 2023, Article 4(2) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0839>

CAN Europe, « Mind the GAP! Assessing Climate Action under the 'Fit For 55' Package », mai 2023 <https://caneurope.org/content/uploads/2023/05/Assessment-climate-files-FF55.docx-2.pdf>

« Règlement (UE) 2018/841 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 relatif à la prise en compte des émissions et des absorptions de gaz à effet de serre résultant de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie dans le cadre d'action en matière de climat et d'énergie à l'horizon 2030, et modifiant le règlement (UE) no 525/2013 et la décision (UE) no 529/2013/UE », Journal officiel, Règlement L156/1, Article 3(1) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0841>
Cristina Urrutia et al., « 2030 climate target plan: review of Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF) Regulation », juin 2021, p.19, [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/662929/IPOL_STU\(2021\)662929_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/662929/IPOL_STU(2021)662929_EN.pdf)

Communiqué de presse du PE, « Le Parlement adopte un règlement pour restaurer 20% des terres et des mers », février 2024, <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20240223IPR18078/nature-restoration-parliament-adopts-law-to-restore-20-of-eu-s-land-and-sea>

Coin presse de la CE, « Mémo sur le train de mesures de soutien de la Commission en faveur des agriculteurs de l'UE », 15 mars 2024 https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/qanda_24_1494

Coin presse de la CE, « Mémo sur le train de mesures de soutien de la Commission en faveur des agriculteurs de l'UE », 15 mars 2024 https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/qanda_24_1494

Coin presse de la CE, « Mémo sur le train de mesures de soutien de la Commission en faveur des agriculteurs de l'UE »

EEB, « Agriculture » <https://eeb.org/work-areas/agriculture/>

Cour des comptes européenne, « Rapport spécial – Politique agricole commune et climat : La moitié des dépenses de l'UE liées au climat relèvent de la PAC, mais les émissions d'origine agricole ne diminuent pas », 2021, p.3, <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/cap-and-climate-16-2021/fr/>

Julia Dahm, « EU green farming schemes fall flat in Germany after meagre farmer uptake », Euractiv, juin 2023, <https://www.euractiv.com/section/agriculture-food/news/eu-eco-schemes-not-a-hit-among-farmers-german-ministry-data-shows/>

EEB et BirdLife International, « Policy Briefing: CAP Strategic Plans - are they likely to deliver on given promises? », février 2022, <https://www.birdlife.org/wp-content/uploads/2022/02/CAP-national-Strategic-Plans-Assessment.pdf>;

AgriCaptureCO2, « Promoting carbon farming through the CAP », septembre 2023 https://eeb.org/wp-content/uploads/2023/09/Policy-Brief_Role-of-the-CAP-in-promoting-carbon-farming.pdf; ÖIR GmbH et al., « Research for AGRI Committee: Comparative analysis of the CAP Strategic Plans and their effective contribution to the achievement of the EU objectives », 15 juin 2023, [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU\(2023\)747255](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU(2023)747255)

Alan Matthews, « What is actually happening with agricultural incomes? » CAP Reform, février 2024, <http://capreform.eu/what-is-actually-happening-with-agricultural-incomes/>; Morgan Ody et Vincent Delobel, « Farmers' protests in Europe and the deadend of neoliberalism », Al Jazeera, février 2024, <https://www.aljazeera.com/opinions/2024/2/25/farmers-protests-in-europe-and-the-deadend-of-neoliberalism>

Constanze Werner et al., « Global Assessment of NETP Impacts Utilising Concepts of Biosphere Integrity », https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/08/NEGEM_D3.3_Global-assessment-of-NETP-impacts-utilising-concepts-of-biosphere-integrity.pdf; Johanna Braun et al., « Global NETP Biogeochemical Potential and Impact Analysis Constrained by Interacting Planetary Boundaries », <https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/05/D-3.2-Global-NETP-biogeochemical-potential.pdf>; Antti Lehtilä et al., « Quantitative Assessments of NEGEM Scenarios with TIMES- VTT », 31 octobre 2023, https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/11/NEGEM_D8.2_NEGEM-scenarios.pdf; Piera Patrizio et al., «Extended MONET-EU», 28 October 2021, <https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2022/04/D7.2-extended-MONET-EU.pdf>

Nixon Sunny, Solene Chiquier, and Niall MacDowell, « Member State Specific Pathway for NETP Deployment », 31 mai 2023, https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/10/NEGEM_D4.5_Member-State-specific-pathway-for-NETP-deployment.pdf

Steve Smith et al., « The State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition », dernière modification le 8 août 2023, <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/W3B4Z>



LE PROJET NEGEM

Le projet [NEGEM](#) – Quantifying and Deploying Responsible Negative Emissions in Climate Resilient Pathways – (Quantifier et déployer des émissions négatives responsables selon des trajectoires de résilience climatique) est une initiative de recherche et d'innovation financée par le programme européen Horizon 2020 (convention de subvention n° 869192) qui vise à évaluer le potentiel réaliste des NETP et leur contribution à la neutralité climatique en complément de la réduction des émissions.

Son analyse va au-delà du point de vue de la physique et de l'économies du climat, qui constituent actuellement le socle de la modélisation des scénarios climatiques. Il adopte une approche multidisciplinaire basée sur la transversalité et des analyses intégrées des aspects techniques, environnementaux, sociaux et économiques, afin de fournir une analyse fondée de l'impact, de l'acceptabilité et de la faisabilité du déploiement des NETP dans le respect des frontières planétaires. Enfin, le projet NEGEM cherche à mettre en avant des parcours de déploiement concrets et à établir une vision à long terme afin de soutenir les efforts fournis par l'UE dans le cadre de l'Accord de Paris.

Auteurs

Allanah Paul, Conseillère principale en recherche et technologies de CDR - Bellona

Marlène Ramón Hernández, Experte en élimination du carbone - Carbon Market Watch

Mark Preston Aragonès, Responsable des politiques de comptabilité carbone - Bellona

Wijnand Stoefs, Expert référent en élimination du carbone - Carbon Market Watch

Rédacteur en chef

Gavin Mair, Chargé de communication - Carbon Market Watch

Conception de la couverture et mise en page

Miriam Vicente Marcos, Chargée de communication senior - Carbon Market Watch

Crédits photos

Valeriia Miller

CONTACT

allanah@bellona.org

marlene.ramon@carbonmarketwatch.org

